

COMMUNAUTE DE COMMUNES DES APPREMONTS

VALLEE DU GUIERS VIF

MASSIF DE LA CHARTREUSE

LA SOURCE MINERALE GERMAINE

Eau sulfureuse superficielle et sédimentaire

A.Schrambach (géologue, hydraulicien, archéologue industriel)

Avec la participation de Pascale Rey (environnementaliste), d'Emmanuelle Vin (historienne), de Michel Delamette (géologue), de Sylvain Paquet (météorologue), Gérard Rémillier (ONF) et de Gérard Leclerc (chimiste)

2008 - 31/01/2012

87 pages 29 images

*Laissez le temps- parfois long - aux images de s'afficher
En cliquant sur les pages blanches (ne pas les enlever !) vous pouvez voir s'il y a une image (un cadre apparaît)*

REMARQUE PRELIMINAIRE

La dénomination « *source Germaine* » ou « *source sainte Germaine* » est assez fréquente dans les stations hydrothermales (Ariège, Adour par exemple).

De la même manière que saint Roch était invoqué par les lépreux, sainte Germaine ne l'était-elle pas pour d'autres maladies telles que celles de la peau ?

SOMMAIRE

-Résumé

-Annexe 5 : Compléments (2011)

-Origine des sulfures

-Emplacement de la source Germaine

Historique

-Captage : aménagements, constructions

Mode d'exploitation

-Géothermie et température de l'eau de la source Germaine

Chimie de l'eau de la source Germaine

Géologie régionale

Hydrogéologie

Essai de détermination approchée des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère. Le débit du griffon

-Usages thérapeutiques de la source d'eau sulfureuse Germaine

Annexe 1 : généralités sur les eaux minérales et thermales
Annexe 2 : calculs hydrauliques
Annexe 3 : calculs géothermiques
Annexe 4 : analyses chimiques

RESUME

La source sulfureuse Germaine, connue depuis (au moins) 1776, est située contre le lit du Guiers vif à deux mètres de l'eau du torrent. Le plan d'eau alimenté par le griffon domine approximativement d'un mètre cinquante le plan d'eau du torrent (en moyennes eaux) : la source est donc indépendante hydrauliquement du cours d'eau.

Dans les années 1890, des études et travaux ont été entrepris afin de créer un centre thermal (projet qui fut abandonné – maladies de peau, voies aériennes, rhumatologie). On connaît ainsi le débit naturel de la source (très faible : 0.5 litre par minute), sa température (12.5°C) et son profil chimique (carbonaté sodique mais également sulfureux avec dégagement d'H²S, odeur d'oeufs pourris). Des travaux furent entrepris afin d'accroître artificiellement le débit. On creusa un puisard sur le griffon (le fond du puisard est plus bas que le lit du Guiers) et à côté une chambre (*descenderie*) permettant d'accéder en bas pour remplir des bouteilles en vue de leur commercialisation (1777, 1812, années 1890)

Le calcul de l'environnement géothermique, a permis d'expliquer le cheminement souterrain de l'eau permettant de donner une telle température, qui quoique peu marquée est celle d'une eau hypothermale.

L'étude de la chimie de l'eau montre que ce sont les lits marneux des formations du Berriasien qui la marquent le plus. Cette eau évolue avec le trajet et la profondeur comme le montre les divers ratios et le résidu sec qui passe de 400 à 1400 milligrammes par litre. Les sulfures, qui résultent de la réduction des sulfates par des bactéries, sont à relier à des sulfates naturels contenus dans la roche et plus particulièrement les lits marneux.

L'environnement géologique montre que de Montagnole au nord, au col du Cucheron au sud, les formations du Berriasien (petits bancs calcaires alternant avec des lits marneux peu épais) affleurent et forment une bande continue orientée nord sud. La tectonique, particulière au massif de la Chartreuse (succession de synclinaux, d'anticlinaux souvent déversés et faillés) complique la géométrie des couches.

L'hydrogéologie de la nappe d'eau sulfurée, contenue dans les formations du Berriasien, est celle d'une nappe libre s'écoulant gravitairement avec drainage par les lits du Guiers au sud et du Cozon au nord. Ces torrents sont au fond de vallons bien marqués et la source est au plus bas ce qui explique les circulations de l'eau. Dans la région, des eaux sulfureuses existent, outre la source, au

hameau de Saint-Même (forage de reconnaissance), à Montagnole au nord et très probablement tout le long des affleurements du Berriasien, sinon sous les dépôts superficiels du Würm et les éboulis fixés (placages sur le Berriasien).

L'aquifère, tel qu'on le voit à l'affleurement doit se comporter comme un milieu anisotrope (alternance de lits perméables et de lits peu perméables).

Des calculs ont été effectués afin de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de cette nappe (perméabilité, transmissivité, porosité efficace)

Il serait utile de vérifier que le Berriasien est fréquemment (sinon systématiquement) associé à des eaux sulfureuses non potables. Les futures recherches pour alimenter en eau les hameaux s'éviteraient des études et travaux coûteux et inutiles.

ANNEXE 5

COMPLEMENTS (2011)

Durant l'hiver 2011, des travaux ont été exécutés sur le site, par une entreprise spécialisée, à l'instigation de la Communauté de Communes des Entremont.

En vue d'un aménagement touristique, les travaux consistaient :

- Dans la descenderie (pleine d'eau à ras bord avant travaux) à pomper l'eau et à curer cette cavité.
- Dans le puisard du griffon de la source : même travaux et là également l'eau était à ras bord donc au même niveau que dans la descenderie.
- A vérifier l'état de la cloison maçonnée entre les deux cavités.

A noter que ces travaux ont été réalisés en hiver donc (à cause de la rétention nivale) au moment des basses eaux tant pour le Guiers vif que pour la nappe d'eau souterraine.

La descenderie

Travaux de pompage réalisés sans difficultés. Au fur et à mesure de la baisse du plan d'eau, on curait le trou (avec remontée par une grue).



Fig : le fond de la descenderie une fois l'eau pompée. Les murs sont recouverts d'une couche de mortier lissé.

Dans cette descenderie, il y avait des blocs de rochers éboulés, beaucoup de vase noirâtre et des planches correspondant à l'escalier en bois pour atteindre le fond.



Fig : les restes de l'escalier et des plates formes dans la descenderie

L'odeur forte d'H₂S, au début s'atténua et les ouvriers au fond travaillaient sans masque, ni ligne d'air.

Un fois le niveau d'eau au plus bas, il y est resté. Les parois de la descenderie sont maçonnées et (plus ou moins) en bon état.

Le puisard de la source.

Même constat avec quelques petits madriers tombés au fond, volume de vase réduit : en effet le trou de communication avec l'air libre étant de faible section, peu de matériaux sont tombés dans le puisard.

Par contre, à l'issue de pompage, l'eau issue de la nappe n'est pas remontée dans le puisard qui est resté sec. Le fond du puisard est largement sous le niveau du Guiers vif.

En haut, la petite surverse a été entre aperçue : la dimension du trappon rend difficile ce genre d'observation.

La cloison entre les deux cavités

Recouverte, côté descenderie, d'un enduit de ciment elle ne présente pas de fissures (tout du moins sur les $\frac{3}{4}$ de sa hauteur à partir du haut.

Les petits tuyaux liés aux robinets ainsi qu'un robinet ont été vus côté descenderie.



Source germaine

Le robinet situé sur la cloison maçonnée (côté descenderie) séparant le puisard du griffon de la descenderie (2010).

Fig : le robinet fixé sur la cloison séparant les deux cavités (vue côté descenderie)

Analyse des résultats.

Comportement de la nappe d'eau souterraine.

Origine des sulfures et des eaux sulfureuses

Les connaissances au sujet du mode de formation des sulfures ont évolué depuis quelques décennies.

Ces sulfures résultent de la réduction des sulfates par un effet bactérien important réalisé à basse température. Pour que les bactéries puissent accomplir cette réduction, elles doivent disposer de matières organiques situées dans les roches de l'aquifère.

Sans bactérie anaérobie, « *cette réduction ne peut se faire qu'à haute température (900 °C)* ». (Schoeller 1962). « *Cette réaction bactérienne est un processus très répandu dans la décomposition de la matière organique (depuis quelques années on a constaté la présence de bactéries dans les roches jusqu'à une profondeur de 4500 mètres). Certaines bactéries anaérobies (par exemple des protéobactéries sulfatoréductrices) auxquelles sont associées d'autres micro-organismes, puisent leur énergie en réduisant les sulfates :*



Cette réaction ne se produit que dans un milieu totalement dépourvu d'oxygène. Une conséquence importante de la réduction des sulfates est la formation de pyrite (FeS₂) par réaction des ions sulfites avec le fer des minéraux détritiques présents dans le sédiment ou avec les hydroxydes de fer à l'état d'ions » (Cojan, 2006). L'hydrogène sulfureux H₂S avec son odeur d'œufs pourris est un marqueur de la présence de sulfures.

Les formations du Berriasien décrites comme organo-détritiques comprennent de petites couches calcaires (fissurées) alternant avec des lits minces de marnes. Les données hydrochimiques montrent que ce sont les sels des marnes qui jouent un rôle quand aux sulfures. Il existe des éléments organo-détritiques et des micro cristaux de gypse (sulfate de calcium) issus de dépôts d'évaporites. Toutes les conditions sont réunies pour donner des sulfures (matières organiques, sulfates, bactéries) et donc des eaux sulfureuses. La teneur en sels de l'eau de la nappe évolue au fur et à mesure que l'eau s'écoule lentement souterrainement.



Réduction des sulfates

Il existe deux modes totalement différents – quand aux conditions géologiques – de réduction des sulfates :

-la thermoréduction des sulfates : opérée à haute température (de 300 à 900° C ce qui correspond à des profondeurs supérieures à 900/2700 mètres), elle combine des fluides chargés en sulfates, des matières organiques qui ont de très fortes propriétés réductrices. Le contact de ces deux éléments conduit à produire d'importantes quantités d'hydrogène sulfuré et de gaz carbonique (issu des matières organiques). Ces gaz interagissent avec le fer et le calcium pour donner de la pyrite (sulfure de fer) et de la calcite. (La Recherche n°303 novembre 1997 page 52).

-la sulfatoréduction à basse température (découverte plus tardivement que la précédente) qui est liée à la présence de sulfates, de fer et de bactéries sulfatoréductrices et anaérobies. Les gaz produit sont le mêmes que précédemment.

Emplacement

Le site, situé sous la route de Saint-Pierre-d'Entremont vers Saint-Même, est à 1 kilomètre au sud-est de Saint-Pierre-d'Entremont (massif de la Chartreuse, Savoie).

Dans la partie nord du massif de la Chartreuse, en rive droite du Guiers vif (le pied du muret en maçonnerie est au contact de l'eau du torrent) au pied d'une colline de calcaires et de marnes du Berriasien.



Fig : Le point rouge, au sud des Combettes, indique l'emplacement de la source Germaine (Savoie) (carte IGN – 1/25000°)

Historique

Avant 1776

Il paraît étonnant que la source, qui répandait une odeur d'oeufs pourris, n'ait pas été connue avant 1776, surtout si elle permettait aux riverains de se soigner (maladies de la peau).

XVIIIe siècle

1776 : découverte fortuite d'une source sulfureuse (d'après Pin-Blancaz, 2000). La morphologie d'origine du griffon, en bordure du Guiers et probablement submersible lors des fortes crues, est inconnue. Le fait que cette source n'était – semble-t-il – pas connue avant la fin du XVIIIe laisse supposer que le griffon était rempli de sables et graviers et l'écoulement discret (ce qui correspond au très faible débit mesuré dans les années 1890).

1777 : mise en bouteilles de ces eaux contenant du sulfure, du bicarbonate, de l'iodure, du bromure et du sodium (Coll, St-Pierre-d'Entremont, Ses eaux minérales, ses sites, ses cures d'air, ses excursions, ses voies de communication.

Imp Breynat et Cie, Grenoble, 1894. Cote BM Grenoble U7367 ; et Pin-Brancaz, 2000)

XIXe siècle

1812 : mise en bouteilles et commercialisation de l'eau de la source (communication de Pascale Rey) – Au moins à partir de 1812, cette information de P. Rey vient d'un habitant de Saint-Pierre d'Entremont (Isère) qui possédait chez lui une bouteille étiquetée et datée de 1812. Mais il est possible que cette activité ait commencé un peu plus tôt (1777, comme signalé dans les références ci-dessus sinon avant).

1844 : le lit du Guiers vif entre saint-Même (saint-Esme sur la carte) et saint-Pierre-d'Entremont était fréquenté : il y avait de l'amont vers l'aval les moulins à grain Baudet, Chenevey et Rigaud (en rive gauche) ce dernier proche de la source germaine qui toutefois est en rive droite (carte d'état major de 1843 au 1/8000^e)

1893 : création de la « *Société des Eaux Minérales de St-Pierre-d'Entremont* » (siège installé à Grenoble) afin de créer un établissement thermal (bains, hôtel, chalets indépendants, écurie, remise et buanderie) proposant divers soins (inhalation, douches laryngiennes, pharyngienne et nasales, pulvérisation et douche écossaise). Des cures et une mise en bouteilles avec commercialisation sont envisagées.

Le site en bordure du Guiers vif sur la rive droite a une superficie de 12 hectares. La production d'hydroélectricité est prévue pour le complexe (l'excédent servira à une usine de pâte de bois - en remplacement des vieux chiffons devenus à cette époque rares et chers - pour les papeteries). Il est vraisemblable que le site hydraulique retenu devait être celui occupé par le moulin Rigaud.

Ce projet ne sera pas réalisé, les capitaux étant en définitive transférés à l'établissement thermal de Challes-les-Eaux, plus accessible (Pin-Brancaz, 2000).

1893 : A l'inverse de celle de Challes, l'eau de la source Germaine « ... *n'a pas d'odeur nauséabonde* ... ». L'eau de la source Germaine était déjà utilisée à l'hôpital de Saint Laurent-du-Pont « ... *telles sont les maladies qui ont cédé à son action depuis qu'il en a été fait usage à l'Hôpital des révérends pères Chartreux, à Saint Laurent-du-Pont* ... ».(d'après les statuts de la Société des Eaux Minérales de Saint-Pierre-d'Entremont).

Années 1890 : lettre de la Maison B. Dumais (ferblanterie et lampisterie, installation d'eau et gaz etc à Chambéry) relative à une pompe probablement en relation avec la source Germaine (communication de Pascale Rey)

1896 : lettre de X (illisible) à Mr Boffert avec une description du griffon et des constructions l'entourant (communication de Pascale Rey)

1896 : lettre de Pochez de Bridoire à Mr. Baffert avec la description (et une coupe verticale cotée mais sommaire) des travaux à entreprendre sur le griffon

(puisard sur le griffon et descenderie avec un escalier) (communication de Pascale Rey)

1897 : facture libellée par la Maison Policant (vins en gros, ciments Vicat et Cie de la Grande Chartreuse, chaux, plâtre, charbons de St-Laurent-du-Pont) à Mr Baffert à Entremont. Facture pour des livraisons de ciment prompt (à prise rapide fabriqué dans la cimenterie Vicat à Oursière sur le Guiers mort) et Portland (à prise lente) (communication de Pascale Rey). Les travaux d'aménagement du captage (puisard et descenderie avec des marches en bois) doivent dater de cette époque.

1897, 1898 : Un embouteillage fut néanmoins réalisé. D'après l'étiquetage, cette eau de la source Germaine soignait « *Toux, laryngite, anémie, angine granuleuse, bronchite, eczéma, arthritisme et chlorose* ». Cette eau fut primée dans les expositions de 1897 et 1898 à Paris (communication de Pascale Rey) (voir l'image de l'étiquette). Cet embouteillage (prenant la suite de celui des années 1770 et 1810) a du être pratiqué durant la seconde moitié des années 1890.

XXe siècle

1936 : lettre du Service des Mines de Chambéry à Mr Collicard, boucher, à St-Pierre-d'Entremont. « ... *l'autorisation d'exploiter une source minérale est assez longue à obtenir ...* » (avec une analyse chimique de l'eau, de la source Germaine, issue d'archives de 1893) (communication de Pascale Rey)

XXIe siècle

2008 : la source et son griffon contigus au lit du Guiers vif, encerclés par un muret en maçonnerie, sont à l'abandon. Le puisard et la vasque (la *descenderie*) sont remplis d'eau car le muret séparant ces deux entités est fissuré et l'eau passe du puisard à la vasque.

Captage : aménagements, constructions

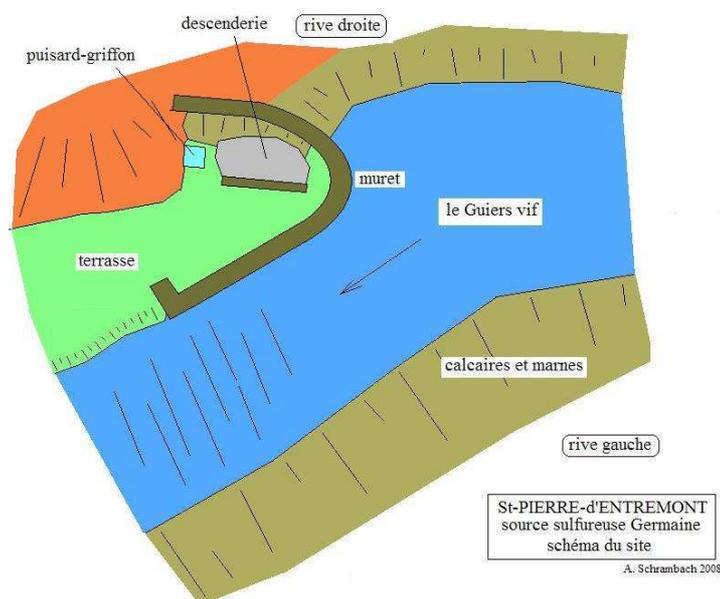


Fig : plan sommaire de la source située à trois mètres du lit du Guiers vif. Le niveau de l'eau du griffon est en charge de 1,0 à 1,5 m au dessus de celui du torrent.

Avant les années 1890, il est vraisemblable que le griffon de la source était à l'état naturel qui n'est pas connu (simple fissure sortant du rocher). Son débit devait être de l'ordre de 0,5 litre par minute.

Durant les années 1890, des études et des travaux ont été entrepris et la source est devenue telle qu'on peut la voir de nos jours.

Une plateforme a été réalisée en entaillant le rocher au dessus du griffon et en nivelant l'ensemble pour former une petite terrasse. Un muret en pierres maçonné a été monté pour mettre hors crue l'ensemble et pour protéger le captage des éboulements venant du versant, susceptibles de combler les cavités suivantes.

Le griffon proprement dit a été aménagé de façon à améliorer l'exploitation et en particulier le remplissage des bouteilles. Une excavation, creusée dans le rocher sur 6 mètres de profondeur, a été réalisée afin de former deux entités distinctes, séparées par un muret en maçonnerie.

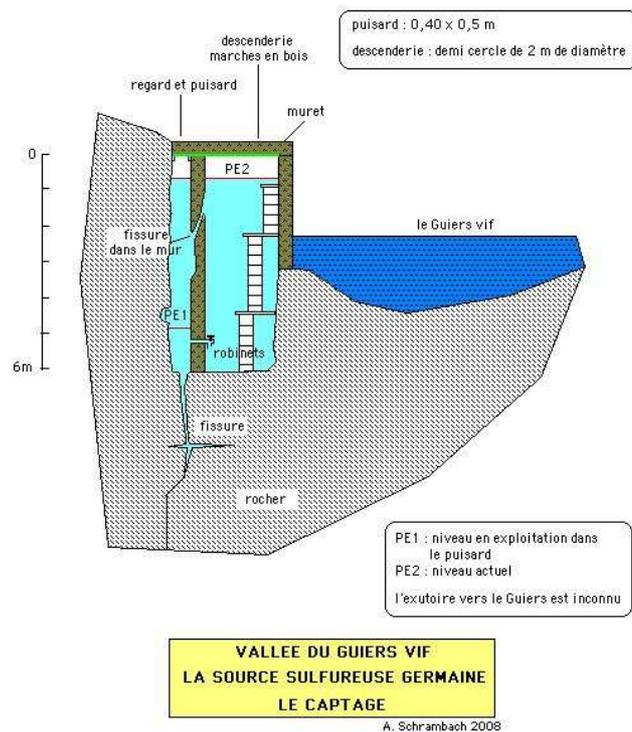


Fig : Dessin schématique du captage : puisard et descenderie (avec un escalier en bois pour accéder aux robinets) en 2008

Donc au dessus du griffon, une petite chambre a été isolée de la grande par ce muret maçonné. Deux robinets ont été mis en place dans ce mur à quelques décimètres du fond.

La petite chambre est le puisard et la grande la *descenderie* car, grâce à un escalier en bois, on accédait au fond pour remplir les bouteilles à raison d'un débit de l'ordre de 3 à 5 litres par minute (effet de drainage avec un rabattement du plan d'eau de la nappe d'eau souterraine).

Il s'agit d'un dispositif classique pour le captage d'une source « *per ascensum* ». Le griffon alimente une « *chambre piézométrique* » qui dans ce cas est le puisard.

Construction d'un abri au dessus du griffon.

Au cas où on désirerait aménager la source, ce petit bâtiment sans murs devrait respecter le style local pour de telles petites constructions : par exemple, une toiture à 4 pans sans mur (comme on les voit fréquemment dans les vieux moulins).

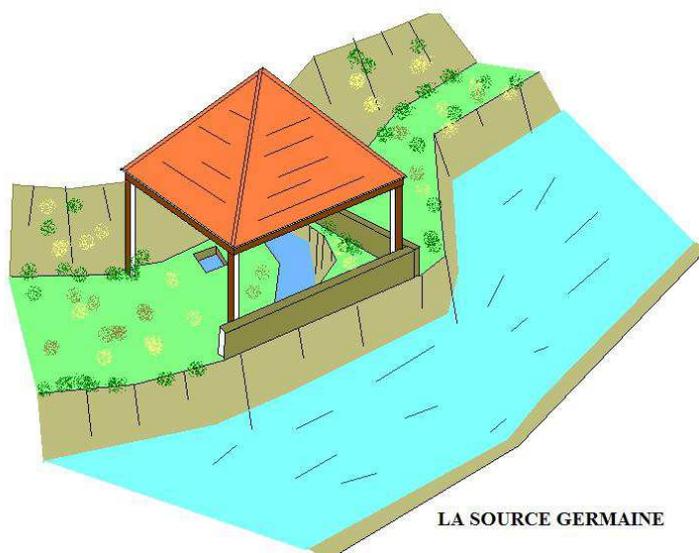


Fig : un exemple d'aménagement de la source

Mode d'exploitation

L'usage de l'eau était à titre thérapeutique (et ceci au moins dès le XVIII^e siècle). L'étiquette des bouteilles, en 1893, comprenait le traitement des affections suivantes : « *Anémie, angine granuleuse, bronchite, eczémas, arthritisme, chlorose, toux et laryngite* ».

Dans le cadre de la station de cure envisagée à la même époque, cette eau aurait été utilisée par inhalation, douches laryngiennes, pharyngiennes et nasales, pulvérisation et douche écossaise. Le plan des installations montre des bains pour hommes et pour les dames, des bains romains, des *bains rasses* et des douches.

Avec un débit de 0,5 litre par minute ce programme semble ambitieux ! L'accroissement du débit à l'aide du puisard permettait simplement d'améliorer les conditions de remplissage des bouteilles.

La mise en bouteilles (pratiquée déjà en 1777 et 1812) et la commercialisation de l'eau sont plus réalistes que la construction d'un véritable centre thermal.

Gestion de l'eau

Avant les années 1890 ainsi que probablement de nos jours, la source présentait un débit naturel de l'ordre de 0.5 l/mn (ses variations devaient être faibles comme explicité au début de l'annexe 2). Pour cela le niveau de déversement

naturel de la source devait être à quelques décimètres sous le sol actuel du puisard (le niveau de la vidange – ou le trop plein - actuel du puisard doit être calé à la même altitude, vidange invisible !).

A partir du milieu des années 1890 et jusqu'à une date inconnue (début du XXe siècle ?) deux entités existaient, le puisard prolongement du griffon et la *descenderie* qui permettait d'accéder aux robinets (embouteillage) calés vers -5 m de profondeur. Ces deux entités étaient séparées sur le plan hydraulique par un muret, ce qui n'est plus le cas de nos jours.

Le rôle du puisard était d'accroître artificiellement le débit de la source. Dans l'annexe 1 les calculs montrent un ordre de grandeur du débit avec un niveau d'eau rabattu par pompage. Avec un niveau d'eau à -5 mètres, le débit pouvait être de l'ordre de 3 à 5 l/mn (soit presque 10 fois le débit naturel).

Ayant installé vers -5 m deux robinets dans le muret séparant le puisard de la descenderie, ouverts ils pouvaient extraire un débit de l'ordre de $2 \times 6 = 12$ l/mn à $2 \times 9 = 18$ l/mn (d'après les débits circulant dans un robinet classique). Dans les deux cas ce débit est supérieur à celui du puisard soumis à un effet de drainage gravitaire par les robinets (12 à 18 pour 3 à 5 l/mn). Il fallait donc fermer partiellement les robinets.

Par contre la nuit, on pouvait fermer complètement les robinets et le puisard se mettait lentement en charge. On utilisait ensuite le principe de l'*éclusage* avec stockage de l'eau la nuit. Les robinets fermés, la source, continuant à couler remplissait partiellement le puisard avec un débit qui diminuait au fur et à mesure que le niveau montait. Le matin, on ouvrait un peu les robinets et on remplissait les bouteilles avec l'eau stockée sortant à un débit « relativement » élevé. En fin de matinée, à niveau bas, on les remplissait avec le débit naturel de la source correspondant au niveau des robinets.

Donc en définitive, on disposait par jour d'un débit moyen un peu plus important que le débit naturel de 0.5 l/mn. Toutefois même avec 5 l/mn, il était à priori difficile d'assurer l'alimentation en eau sulfurée d'un centre thermal. Qu'en était-il réellement ?

A ce sujet, on dispose d'informations relatives à l'exploitation de la source dans le texte publié en 1893 « Les statuts de la Société des Eaux Minérales de Saint-Pierre-d'Entremont ». Il est question d'une vente de 60 000 bouteilles par an soit 200 par jour, d'où une activité durant 300 jours. Si les bouteilles ont une contenance d'un litre cela représente 200 litres par jour.

Avec le débit naturel de la source de 0,5 litre par minute on obtient une durée minimum de travail de 400 minutes par jour soit 6,7 heures journalières. En tenant compte des arrêts, des temps perdus entre chaque remplissage, on obtient de l'ordre de 8 heures.

Toutefois deux robinets furent installés ce qui ne double pas le débit naturel ... mais à quoi servaient-ils et pourquoi les avoir installés au fond du puisard ? Par ailleurs une partie importante de l'eau servait au remplissage des baignoires (il est question dans les statuts de la société de « ...40 baigneurs par jour ... »). Il fallait changer l'eau tous les jours, et au préalable, vider, nettoyer les baignoires et les rincer. A raison de 50 litres par baignoire individuelle, cela représente un volume journalier de l'ordre de 2000 litres par jour. Comme ce remplissage se faisait la nuit, en l'absence des curistes, le débit de remplissage était de 200 litres par heure soit 3,3 litres par minute.

Cette valeur se rapproche de celles calculées et on constate donc que le débit était probablement suffisant pour le centre thermal.



Fig : Le captage de la source Germaine (vue vers l'amont du Guiers) situé en rive droite contre le torrent.

Photo Communauté de Communes d'Entremonts

Caractéristiques de l'aquifère et de la nappe d'eau souterraine alimentant la source Germaine

Deux éléments permettent de définir (plus ou moins grossièrement) l'aquifère. Il s'agit de la température de l'eau au griffon et du profil hydrochimique. Ensuite il faut se tourner vers les données géologiques régionales (carte, coupes structurales) puis hydrogéologiques et les calculs hydrodynamiques associés (dont le débit).

Géothermie : température de l'eau de la source Germaine et conséquences pour la profondeur de la nappe d'eau sulfurée et de son aquifère (annexe 3)

Evolution des températures dans l'écorce terrestre.

La planète Terre, dispose de deux sources de chaleur,

- le soleil (chaleur externe variable)

- et les parties profondes du globe, noyau et manteau, qui possèdent des sources de chaleur naturelles constantes mais variables selon leur profondeur : chaleur résiduelle acquise lors de la formation de la Terre ou chaleur primitive d'accrétion, désintégration des éléments radioactifs. Cette seconde source représente environ la moitié de la chaleur qui s'échappe de la planète soit $2 \cdot 10^{13}$ watts.

Le manteau est plus productif de chaleur que le noyau. En effet à partir des courbes de températures à la limite noyau – manteau (déduite des transitions de phase des minéraux dont la pérovskite) associée aux conductivités thermiques des roches on obtient un flux de chaleur de 10 à 15 térawatts soit entre 25 et 30 pour cent du flux perdu par la Terre à sa surface. Le reste est émis par le manteau (Labrosse Stéphane, 2010).

« Le noyau étant essentiellement constitué de fer, il est deux fois plus dense que le manteau. Par conséquent, il n'y a presque aucun mélange (flux de matières qui aurait pu transporter de la chaleur par convection) et les échanges de chaleur se font principalement par conduction. Tandis que le manteau est riche en uranium, thorium et potassium radio actifs, le noyau est probablement pauvre en isotopes radio actifs, ce qui implique que sa température actuelle (entre 4000 et 5000 kelvins) est essentiellement due à la chaleur résiduelle créée lors de la formation de la planète il y a 4,5 milliers d'années.

Depuis cette formation, le noyau se refroidit par transfert de chaleur vers le manteau qui l'enveloppe.

En faisant des hypothèses plausibles sur la conductivité thermique des matériaux du manteau inférieur, nous avons estimé que le flux de chaleur global du noyau vers le manteau serait de 5 à 10 terawatts (soit la moitié des valeurs proposée par Labrosse Stéphane). Cette valeur est comparable à la production moyenne totale de toutes les centrales électriques du monde. Il s'agit d'un flux d'énergie et d'un taux de refroidissement du noyau plus importants qu'on ne le pensait.

Ce flux de chaleur qui s'ajoute à celui émis par le manteau est la cause des mouvements de convection dans ce dernier : les zones froides descendent et les chaudes remontent ce qui crée des cycles de transfert de matières.». (Kei Hirose. L'ingrédient manquant de la terre (la postpérovskite) Pour la Science n°394 Août 2010 page 66).

a) Chaleur atmosphérique (ou solaire) et zones d'hétérothermies (dans les couches superficielles du sol : infiltration et remontée au griffon)

Quand on descend dans le sol, durant les premières dizaines de mètres, la chaleur d'origine atmosphérique domine et la température des sols et des roches en surface, varie de 2 à 3° dans l'année (et d'un siècle à l'autre selon l'évolution du climat).

Zones d'hétérothermies : elles sont caractéristiques des premiers mètres sous la surface du sol où l'effet de la chaleur d'origine solaire est sensible. Il faut distinguer deux zones d'hétérothermie : celle journalière et celle annuelle.

*** Infiltration (mouvement descendant) :** La zone d'hétérothermie journalière ne joue qu'un rôle négligeable. La vitesse de transmission du front thermique est rapide (de l'ordre de 0.5 à 1.0 mètre par jour) mais son épaisseur n'est que de 1 à 2 mètres (en liaison avec la durée courte, 24 heures). Elle est caractérisée par les différences de température d'un jour à l'autre mais aussi entre le jour et la nuit.

La zone d'hétérothermie annuelle (ou saisonnière) a un rôle important. Son épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres (elle dépend de la nature des roches selon leur diffusivité).

D'une saison à l'autre ses caractéristiques évoluent. Entre octobre et février, l'eau de pluie qui s'infiltré traverse des couches plus chaudes. Entre mars et septembre, elle est en contact avec des eaux plus froides.

***Lors de la remontée vers le griffon**, c'est dans la zone d'hétérothermie annuelle (décrite avant) que les variations de températures de l'eau profonde prennent naissance avec évidemment des variations selon les saisons.

La vitesse de remontée de l'eau au griffon intervient également. Dans une fissure ouverte où l'eau peut circuler à vitesse élevée, les transferts de chaleur eau – terrain sont limités. Dans un milieu poreux où l'eau circule très lentement ce n'est plus la cas.

b) Chaleur d'origine profonde

La température, qui s'accroît en descendant, résulte du calcul du gradient thermique G_t .

Si le calcul de la température des roches se fait simplement avec le gradient géothermique (voir l'annexe 3), celui des températures de la nappe, et donc de l'eau souterraine dans sa branche descendante ainsi que dans sa branche montante vers le griffon de la source, est plus complexe.

En effet la chaleur ne se propage pas dans les mêmes conditions dans une roche (solide) et dans l'eau (liquide). De ce fait, lors de la descente de l'eau puis de la remontée vers le griffon, les températures du terrain et de l'eau (hormis au point d'équilibre) ne sont pas identiques.

Dans la branche descendante, les températures de l'eau sont inférieures à celle des roches, sauf quand on atteint le point d'équilibre où les deux valeurs sont égales.

Dans la branche ascendante, c'est l'inverse : l'eau est plus chaude que la roche. Toutefois pour la source Germaine, comme les profondeurs et les distances (projetées au sol) sont réduites, les différences restent faibles. A la remontée, la présence - très probable - d'un conduit isolé du Guiers, assure une remontée rapide et une déperdition de chaleur minime.

Cette dualité du comportement entre l'eau et les roches est à relier à la chaleur spécifique (C dans les formules) c'est-à-dire la quantité de chaleur qu'il faut apporter au fluide, au solide, pour accroître sa température de $1\text{d}^\circ\text{C}$ (et l'inverse pour le refroidissement).

La conductivité thermique (notée K dans les formules) définit la transmission du flux thermique. Elle est plus faible dans les marnes.

Roches	Chaleur spécifique Unités CGS	Chaleur spécifique Unités Internationales J/KG .K	Conductivité thermique 10 ⁻⁵ CGS	Conductivité thermique Unités Internationales W/m.K
Marnes	0,19	826	220 à 520	1,04 à 1,4
Calcaire	0,20	846	200 à 800	3,5
Air	0,23	966	/	/
Eau	1	4200	/	/

Fig : Chaleur spécifique (synonymes : chaleur massique = capacité thermique = chaleur spécifique massique) et conductivité thermique des roches, de l'air et de l'eau.

Il faut donc apporter 5 fois plus de calories pour l'eau que pour une roche ou l'air.

Les résultats des calculs sont les suivants (voir le détail en annexe 3).

PK (distance au sol) (m) (*)	Profondeurs (m)	températures de l'eau (°C)	températures des roches (°C)
mouvement descendant			
0	0	6,2	6,2
1000	80	8,8	9
2000	175	11,4	12
3000	260	14,0	14,2
3500	300	15,4	15,4
mouvement ascendant (à la verticale de la source)			
/	100	(14,2)**	10,5
/	0	12,5	6,2

(*) PK zéro à Saint-Même

** : comme la source est à 200/250 m plus bas que le haut des collines, cette température est celle de cette profondeur (voir le début du tableau) : la température s'ajuste donc progressivement entre ces deux situations (voir la coupe avec les températures).

La coupe suivante présente l'évolution des températures au dessus de la source.

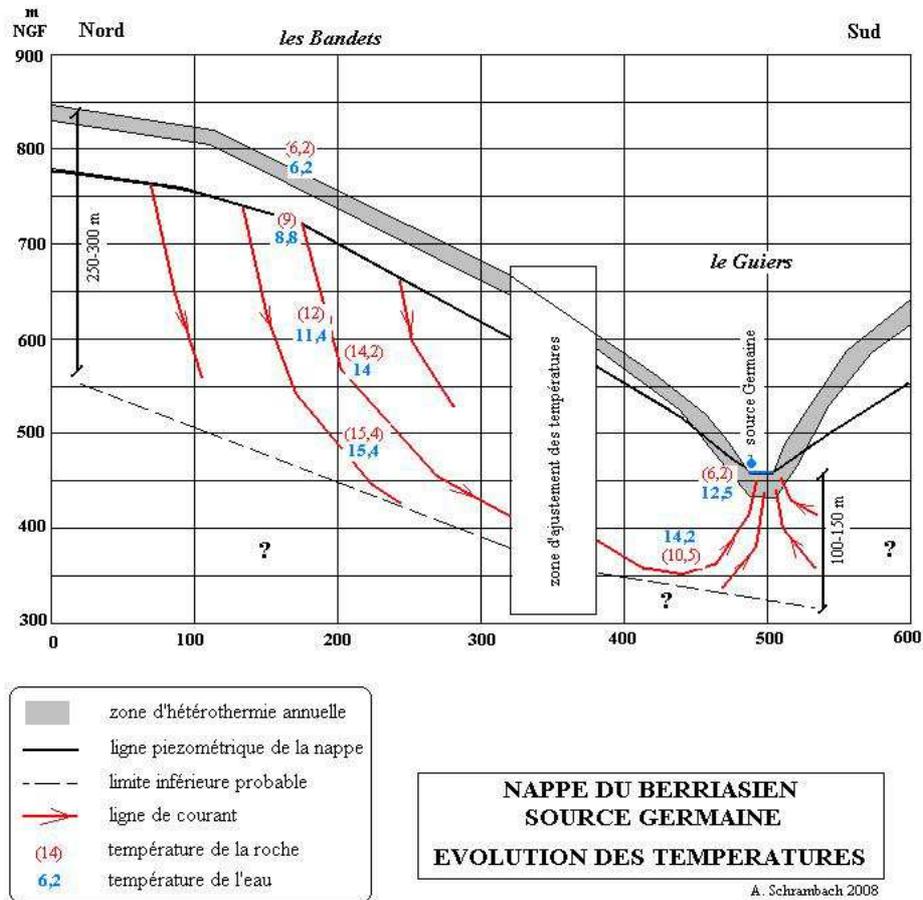


Fig : à gauche les calculs correspondent à une profondeur qui peut atteindre 300 mètres. A droite, à la verticale du griffon, la profondeur n'est plus que de 100 mètres puisque le griffon est au fond du sillon du Guiers (qui par effet de drainage provoque la remontée de l'eau souterraine qui vient d'une manière ou d'une autre se mélanger à celle du torrent). Il y a donc une zone intermédiaire (représentée par le rectangle) qui est une zone de transition, non calculée.

Profondeur d'après les données géologiques

Le contexte géologique et topographique est le suivant.

Les calcaires et les marnes du Berriasien ont une épaisseur de l'ordre de 150 à 200 mètres. Par ailleurs la source est dominée par des collines dont le sommet atteint 900 m juste au dessus de la source et de 1000 m près des Grattiers à l'est. En rive gauche (au sud) elles vont de 800 à plus de 1000 m.

Le Berriasien, sous un couvert de dépôts glaciaires du Würm (à l'ouest) ou d'éboulis fixés (à l'est et au sud ouest) est présent partout mais fortement tectonisé comme le montre les coupes suivantes (le prolongement nord du synclinal du Sappey est sous la source).

Dans ces conditions une profondeur de l'aquifère d'au moins 250 m est compatible avec les épaisseurs annoncées d'après les calculs géothermiques.

*** Si on se réfère à la définition d'une source thermique (voir l'annexe 1), la source Germaine est simplement minérale car sa température est basse (eau hypothermale) , mais elle fait néanmoins l'objet d'applications thérapeutiques. Les calculs conduisent à une profondeur moyenne de l'aquifère et son mode d'écoulement est gravitaire avec effet de drainage par le Guiers (nappe libre)**

Evolution hydrochimique de la nappe d'eau souterraine du Berriasien

Les formations du Berriasien sont présentes autour de Saint-Pierre-d'Entremont et en particulier à l'est de l'agglomération vers le hameau de Saint-Même (et au-delà).

L'eau du forage de Saint-Même et celle de la source Germaine, ont des points communs mais aussi des différences : les eaux sont sulfurées mais les résidus secs n'ont pas les mêmes valeurs. A Saint-Même l'eau provient de la partie supérieure de la nappe (vers - 60 m) alors qu'à la source, l'eau remonte et est issue de profondeurs plus importantes (vers -250/300 m comptée à partir du haut des collines). Ceci est mis en évidence par l'analyse géothermique ainsi que par le résidu sec plus important à la source Germaine.

Les points communs, outre le même aquifère (même si la tectonique complexe entraîne des variations d'épaisseur entre ces deux zones) sont les formations récentes qui sont plaquées en surface en haut des collines : des éboulis fixés à Saint-Même et des formations glaciaires du Würm au dessus de la source. Elles contiennent une nappe d'eau douce superficielle (voir les sources captées de Saint-Même) qui sont alimentées par les pluies et qui à leur tour, alimentent la nappe sous jacente du Berriasien.

Les pluies

Ce sont elles qui rechargent les nappes (alimentation des nappes libres par la surface). Les sels dissous dans l'eau de pluie sont assez nombreux mais en quantités faibles. Le résidu sec est de l'ordre de 5 à 10 mg/litre, dans les régions éloignées de la mer.

L'eau de pluie au contact du sol.

L'eau de pluie infiltrée (après ruissellement plus ou moins bref) met en solution et transporte les sels des sols (par dissolution, hydratation, hydrolyse). Le flux thermique d'origine solaire favorise ces modifications.

Toutefois si pendant les périodes de pluie, cette eau descend vers les couches profondes, durant les périodes chaudes et sèches, elle remonte et s'évapore en déposant les sels. La différence de potentiel capillaire entre les couches desséchées et celles humides, dirige le mouvement de l'eau. En climat tempéré, le mouvement descendant prédomine en hiver (période d'alimentation de la nappe) et l'ascendant en été (non alimentation de la nappe ce qui entraîne une diminution - peu marquée - du débit de la source Germaine et l'existence de basses eaux dans les torrents).

Passage des solutions des sols aux eaux souterraines

Lorsque les pluies, chargées de solutions, sont abondantes et dépassent la capacité de rétention du sol, elles migrent vers le sous sol.

Les eaux pénétrant dans le sous sol sont plus diluées que les solutions du sol et de plus modifient leur composition chimique. Les anions proviennent essentiellement du sol et les cations de l'eau de pluie.

L'eau des nappes dans leurs aquifères

Dans la région située entre Saint-Même et Saint-Pierre-d'Entremont, il y a deux nappes étagées. Celle du haut (éboulis, formations glaciaires avec une matrice argileuse abondante) et celle du fond (succession de petits bancs calcaires fissurés et de lits marneux ; ce sont ces derniers qui comportent les sulfates, les sulfures qui en découlent dont H₂S (sulfure d'hydrogène), marqueur de ce type d'eau).

* Les eaux des argiles et des marnes (Würm, éboulis, Berriasien).

Ces roches ont une surface de contact eau-roche très grande (car contrairement aux idées reçues elles ne sont pas imperméables) et la vitesse de percolation est très faible ce qui favorise les dissolutions. Enfin, par adsorption, elles retiennent une quantité notable de chlorures et de sulfates grâce à la nature colloïdale de leurs constituants (phyllites).

De plus les dépôts du Berriasien comportent des éléments tels que du gypse (sulfate de calcium à relier à des épisodes lagunaires avec dépôts d'évaporites) et des éléments organo-détritiques.

Les eaux dans ces roches sont chargées en sels (en particulier SO₄ et Cl donc Ca, Mg et Na).

* Les eaux des calcaires (Berriasien)

La dissolution du carbonate de calcium (présent dans les calcaires) est limitée. Dans le cas des calcaires à grains fins marneux, l'eau circule essentiellement par les fissures ce qui est le cas des bancs fissurés (mais probablement refermées en profondeur lorsque la décompression ne joue plus). La surface d'attaque par rapport au volume d'eau qui circule est réduite. Les sulfates et chlorures sont emprisonnés dans la matrice cristalline calcaire : ces sels ne peuvent être mis en solution qu'après dissolution préalable de cette matrice (or la dissolution des carbonates est lente).

* Les sulfures

Les eaux sulfureuses, ce qui est le cas des eaux du Berriasien, découlent de la réduction des sulfates (des marnes de cette formation), à basse température, par des bactéries sulfato réductrices. On connaît depuis quelques années, la présence de bactéries dans les roches jusqu'à une profondeur de 4500 mètres. Ces sulfures

s'associent au fer (pour donner de la pyrite micro cristalline ou sulfure de fer), au sodium, à l'hydrogène (pour donner de l'hydrogène sulfureux H₂S, marqueur de ce type d'eau avec une odeur caractéristique d'œuf pourris).

La chimie de l'eau dans les nappes souterraines

Les réactions chimiques sont favorisées par :

- l'accroissement de la température dû au gradient géothermique. Toutefois la dissolution du carbonate de calcium est peu sensible à ce paramètre.
- l'importance des surfaces de contact eau-roche : les argiles sont plus chargées en sels que les roches fissurées. La longueur du trajet des eaux souterraines influe sur ces dissolutions et on constate ainsi une augmentation du résidu sec du haut vers le bas et de l'amont vers l'aval. Les ratios entre sels évoluent également.
- le temps de contact eau-roche.

Evolution de la composition chimique de l'eau dans le même aquifère

L'analyse de l'eau des formations du Berriasien correspond à :

- une faible profondeur, de l'ordre d'une soixantaine de mètres au forage de Saint-Même placé par ailleurs dans la partie amont de la nappe.
- une forte profondeur à la source Germaine : 200 à 300 mètres d'aquifère dominant cette source placée dans le lit du Guiers et de plus dans la partie aval de la nappe.

Les analyses chimiques des eaux de cette nappe et leur comparaison, permettent de montrer les caractéristiques de cette évolution (voir l'annexe 4).

LES ANALYSES HYDROCHIMIQUES DES EAUX SULFUREES DE LA REGION DE SAINT-PIERRE-D'ENTREMONT

Elles ont été réalisées en 1893, 2000 (voir l'annexe 4).

Les analyses de 1893

Une discordance apparaît au sujet du résidu sec. Les analyses de 1893 annoncent 1415 mg/litre mais le cumul des ions donne 1297 mg/l soit une différence de 119 mg/l dont la nature est inconnue.

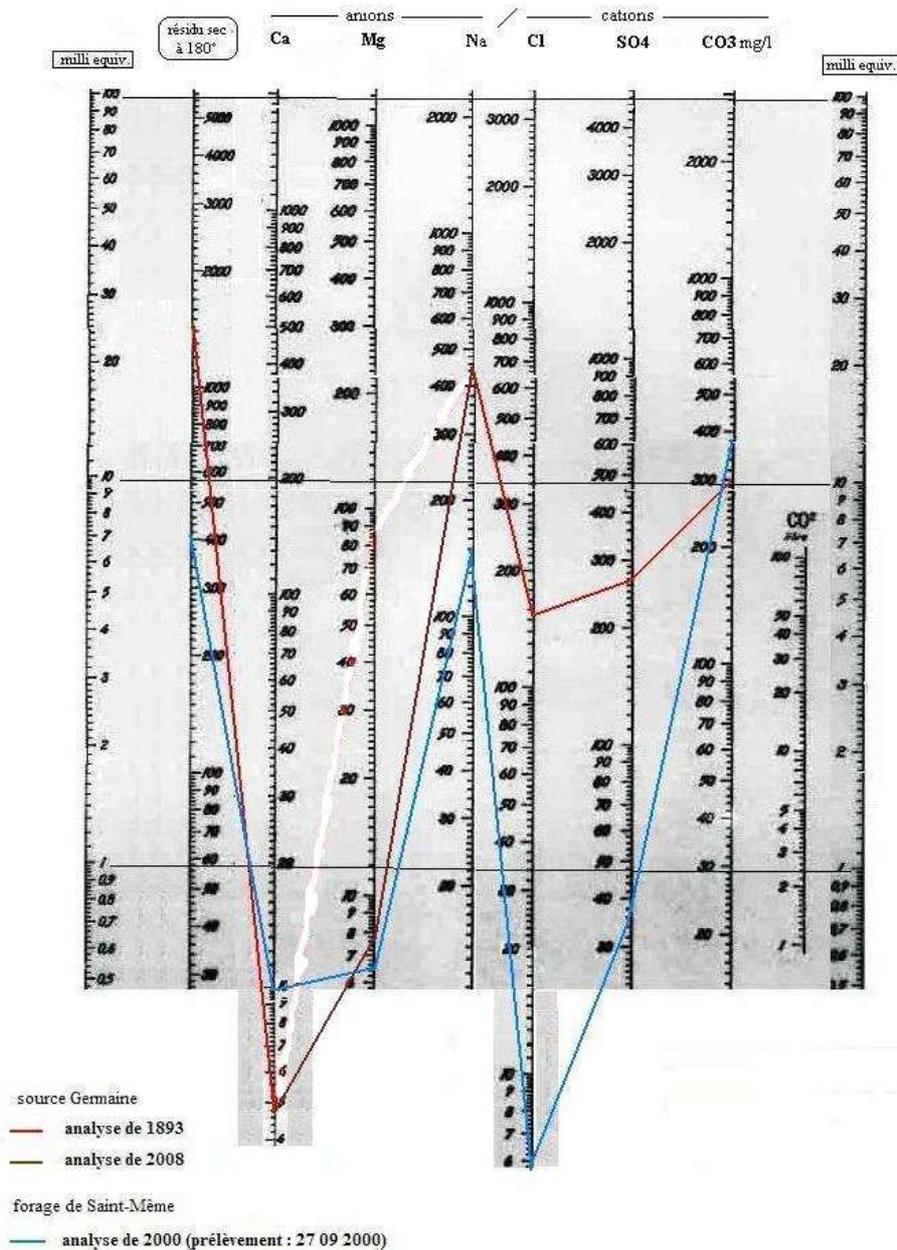
A l'issue du calcul des anions et des cations à partir des sels, il s'avère que les résultats en milliéquivalents sont fortement déséquilibrés.

La valeur des anions en milliéquivalents (16) aurait dû être identique ou très proche de celle des cations (22). Ces 2 valeurs sont très différentes (voir l'analyse de 2000).

La validité des analyses de 1893, est donc remise en question.

Le diagramme suivant « Profils hydrochimiques » utilise la présentation sous forme de barres verticales logarithmiques pour chaque ion en milligrammes par litre.

De façon à comparer chaque analyse, ces barres sont décalées en tenant compte des milliéquivalents de chaque ion.



**PROFILS HYDROCHIMIQUES
SOURCE SULFUREUSE GERMAINE**

Fig : trois profils hydrochimiques de l'eau des nappes du Berriasien (l'analyse de 2008 n'a pas été réalisée)

Malgré, les erreurs mises en évidence dans l'analyse de 1893, les profils ont des similitudes fortes (Chlore, Cl, excepté).

Les analyses de 2000 (eau du forage de Saint-Même)

Elles sont présentées dans l'annexe 4 ainsi que les conclusions générales au sujet de l'eau sulfurée des formations du Berriasien.

Le résidu sec de 1893 moyennement élevé, conduit à considérer l'eau de la source Germaine, comme une eau (faiblement) minérale.

Géologie régionale

Origine des sulfures et identification de l'aquifère

Comme l'ion représentatif, et actif dans un cadre thérapeutique, est le soufre, il faut déterminer l'origine des sulfures.

Comme cela a été explicité précédemment, elle peut être liée à la nature des roches (présence d'évaporites) ou bien à un griffon sale avec des matières organiques. sous forme de boues (comme ces sulfures ont été rencontrés dans l'eau du forage de Saint-Même, l'hypothèse griffon sale peut être écartée).

Ces sulfures résultent de la réduction des sulfates par un effet bactérien important. Sans bactérie anaérobie, cette réduction ne peut de faire qu'à haute température (900 °C. Schoeller 1962). La réduction des sulfates s'accompagne d'une oxydation des matières organiques, de la production de CO² ainsi que l'apparition de soufre et d' H²S.

Pour connaître l'environnement géologique (stratigraphie, pétrologie et structurologie) nous disposons des cartes et des coupes géologiques du massif de la Chartreuse (BRGM et Gidon Maurice).

Les axes structuraux sont grossièrement orientés du Nord au Sud.

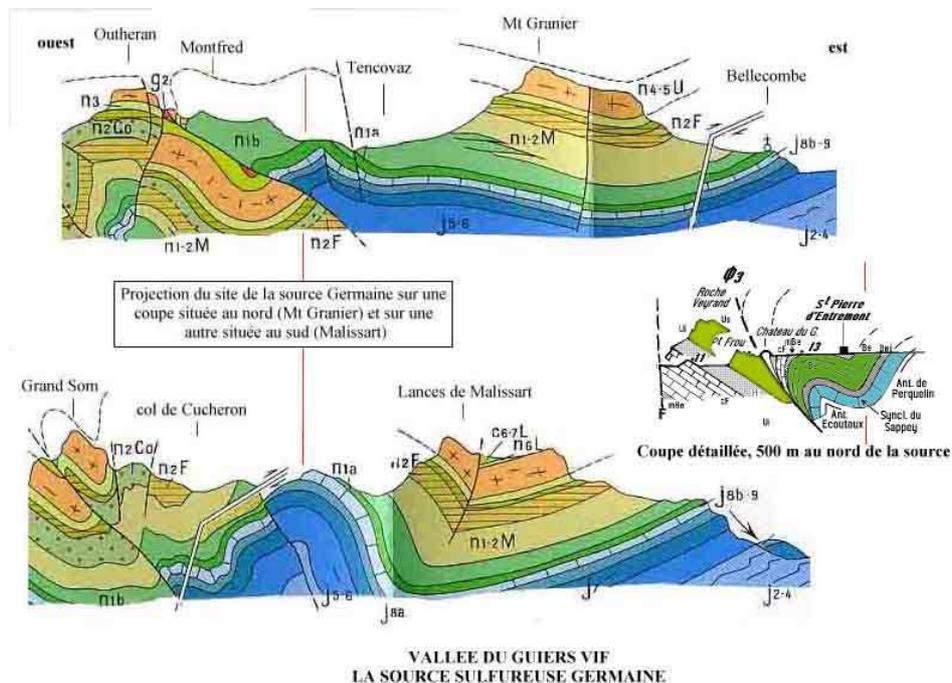


Fig : Trois coupes géologiques. Celles au nord (Mt-Granier) et celle au sud (col du Cucheron) sont extraites de la carte géologique. Celle à droite, plus détaillée, passant par St-Pierre-d'Entremont provient du site internet geol-alp.com

Hydrogéologie

Identification de l'aquifère

Le Berriasien doit être le terrain aquifère.

Cet aquifère constitue le noyau de la colline rive droite encadrée entre le Cozon au nord et le Guiers vif au sud. L'altitude de la source est approximativement de 650 mètres NGF et celle de la colline, est en général autour de 900 mètres NGF soit une dénivellation de 250 mètres. L'analyse géothermique a montré que pour expliquer les températures connues, il faut intégrer la nappe des terrains du

Berriasien de l'est de St-Même à St-Pierre d'Entremont (soit une superficie drainée par le Guiers de l'ordre de plus de 3 km²).

En rive gauche, le Berriasien n'affleure pas mais est présent sous le recouvrement de terrains récents : la nappe se déverse également dans le Guiers (l'eau sulfurée est alors diluée dans l'eau du torrent et passe inaperçue).

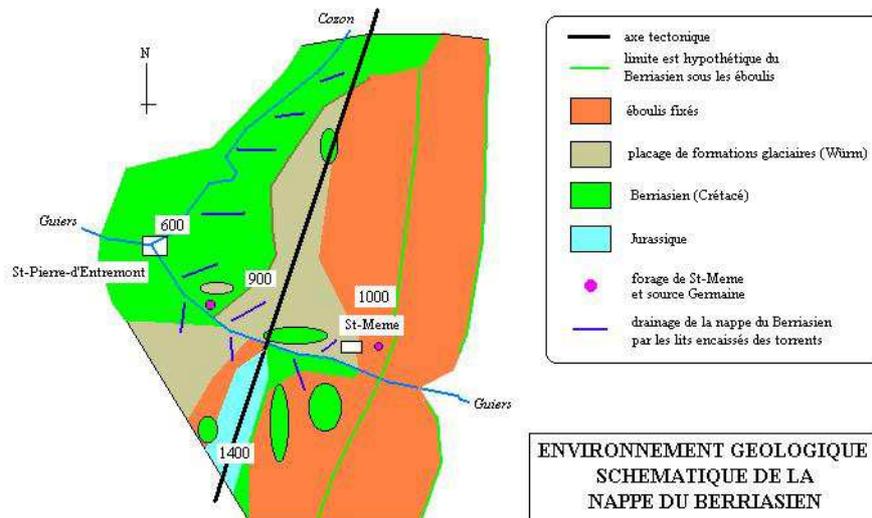


Fig : carte schématique, avec les altitudes, montrant les affleurements du Berriasien entre Saint-Même (à droite) où ils sont surmontés par des formations du Quaternaire et Saint-Pierre-d'Entremont (à gauche)

Le Berriasien (dénommé sur la carte géologique « n1b » : lits organo-détritiques) est constitué au griffon et le long de la route qui la domine, d'une alternance de petits bancs calcaires, d'épaisseur décimétrique (1,0 à 1,5) et de lits de marnes grisâtres d'épaisseur centimétrique (5 à 10). La très faible épaisseur des lits marneux et les fissures ouvertes (à l'affleurement) des bancs calcaires conduisent à créer un aquifère potentiellement perméable (à l'affleurement) mais en profondeur ces fissures se referment et la perméabilité

chute. Il est soit en affleurement, soit recouvert de sédiments Jx (éboulis, cône de déjection ancien) et Gw (formations fluvio glaciaires du Wurmien).



! !
lit marneux banc calcaire

Fig : Sur la route de Saint Môme, dominant la source, le Berriasien affleure. Ce sont des alternances de bancs de calcaire et de lits marneux, à cet endroit en position quasi verticale. L'ensemble en profondeur doit être peu perméable.

Le Berriasien (sur la légende de la carte géologique on cite des couches organo-détritiques), épais de 100 à 200 m, comprend en outre de la pyrite et parfois du gypse (donc des sulfates). La réduction de ces derniers, avec une action bactérienne (bactéries sulfato réductrices), conduit à créer des sulfures solubles dont les espèces dominantes sont, entre autres, le H^2S gazeux. . Avec le fer, ils donnent de la pyrite et avec l'ion sodium d'autres sulfures.

Ce sont ces sels qui caractérisent l'eau sulfureuse de la source Germaine (dont le marqueur gazeux, H^2S).

Par ailleurs, le Berriasien, tout du moins autour de St-Pierre-d'Entremont, présente d'autres manifestations d'eaux sulfureuses. Hors de la commune vers le nord à Montagnol, le Berriasien supporte également une nappe d'eau sulfurée.

A Saint-Même à l'est de Saint-Pierre-d'Entremont

Aux deux hameaux de Saint-Même le long du Guiers au sud de Saint-Pierre-d'Entremont, la recherche de solutions pour une amélioration de l'alimentation en eau potable a permis de mettre en évidence une eau sulfureuse.

Les besoins en eau étaient couverts par des sources, manifestations de la nappe superficielle des éboulis (Ey sur la carte géologique). Cette eau est potable.

Sous jacent, il y a les formations du Berriasien. Elles ont été reconnues vers -27 mètres et pénétrées, par forage, sur plus de 20 mètres.

Cette nappe est alimentée, par le haut, par les infiltrations de la nappe des éboulis. Les apports par les calcaires karstiques formant le cirque de Saint-Même sont très réduits : l'étude que nous avons réalisée en 2007-2008 des apports des karsts montrent qu'ils dépendent des fissures grandes (gros débits de courtes durées) et petites (petits débits à durée prolongée). Les exutoires sont plutôt vers l'air libre que par abouchement souterrain vers les terrains surtout s'ils sont argileux (ils se comportent comme des écrans étanches).

Le forage profond de 65 mètres a montré que le débit extrait pendant une heure était limité (de l'ordre de 0,7 à 1 l/s) et que l'eau est carbonatée sodique et sulfureuse (avec le marqueur H²S très net d'après le foreur ainsi que Fetzaz Roland). L'eau du forage était rejetée dans un petit ruisseau dont l'eau devint blanche (d'après Fetzaz Roland). Les résultats sont donnés en annexe 4.

On peut conclure quand à la présence fréquente, sinon systématique, d'eau sulfurée (et non potable) dans les formations du Berriasien entre St-Pierre-d'Entremont et Saint-Même et environs (qu'il faudrait définir mais c'est également le cas à Montagnol au nord).

Les futures recherches d'eau potable dans la région devront tenir compte de cette caractéristique importante.

Type de nappe d'eau souterraine

L'aquifère est constitué par un (énorme) sandwich de couches perméables (grâce aux micro fissures) : les petits bancs calcaires. Ils sont en alternance avec des couches marneuses nettement moins perméables qui constituent des écrans toutefois peu efficaces car trop minces. L'ensemble se comporte comme un milieu anisotrope et les variations de pression dues à un rabattement de nappe (pompage ou drainage gravitaire) ne doivent se propager que très lentement : un pompage de durée courte ne fait intervenir que les couches les plus proches. De ce fait dans les calculs d'hydraulique souterraine, l'épaisseur de la nappe à retenir n'est pas de 200 m mais plutôt de 20 à 50 mètres.

Enfin cette nappe peut se comporter, au moins localement, comme une nappe captive, ce qui doit expliquer la mise en charge de la source Germaine par rapport au plan d'eau du Guiers.

Mode de gisement

La nappe alimentant la source Germaine, est alimentée directement par les eaux superficielles : la température de l'eau au griffon est relativement basse.

Type d'émergence

Une eau minérale est liée à une ascension rapide des eaux : le rôle des fractures ouvertes est ainsi mis en évidence. Dans le cas de la source Germaine, le fond du puisard n'a pas été vu mais l'absence de relation hydraulique (mais pas thermique) entre l'eau du Guiers et celui de la nappe (le niveau de l'eau dans le puisard creusé sur le griffon est supérieur à celui du torrent), montre l'existence d'un réseau de fissures indépendant avec un système hydraulique en pression par rapport au niveau de l'eau du Guiers. Dans le cas contraire, la température et la chimie de l'eau auraient été profondément modifiées par dilution.

Localisation de l'émergence

Le sillon topographique créé par le Guiers vif a un rôle fondamental : la source jaillit au point d'altitude le plus bas avec comme corollaire un rabattement de la nappe. Les vallées du Cozon au nord et du Guiers vif au sud jouent un rôle topographique de drains : l'eau de la nappe se déverse dans ces lits.

Mécanisme de l'émergence

La température en jeu étant très faible, l'eau reste en phase liquide et le rôle de la vapeur d'eau et des gaz est nul (il existe néanmoins du H²S). Il faut noter que la densité est de 1,0005, ce qui entraîne une absence importante de gaz occlus qui abaissent la valeur de ce paramètre (par exemple $d = 0,5$ à la source Vichy-Célestins).

Les conditions aux limites du système hydraulique (amont et aval) sont les moteurs essentiels du déplacement de l'eau selon la loi de la gravité. Le parcours intermédiaire est surtout influencé par la topographie de l'imperméable relatif qui sert de plancher à la nappe. La circulation de l'eau se contente de suivre les micro chenaux « perméables ». C'est la raison pour laquelle le rôle du sillon du Guiers est fondamental. C'est ce qui est esquissé dans le schéma hydraulique suivant.

Il faut noter qu'une fois le régime permanent de la source acquis, l'eau du griffon doit se déverser dans le Guiers : cette sortie n'a pas été vue.

C'est également la raison pour laquelle il doit exister d'autres émergences à débit faible qui débouchent directement dans le Guiers (et le Cozon) avec une dilution chimique et thermique immédiate : elles sont alors indétectables. Toutefois les petites émergences en rive gauche, à la même altitude en face de la source Germaine, ont peut être la même origine.

En effet un débit à la source (supposé être une valeur moyenne) de 0.5 l/mn représente un volume d'eau annuel de 263 m3. Rapporté à la surface de 1 km2 (supposée) de l'aquifère, l'épaisseur d'eau est de 0,26 mm.

Or la pluviométrie (épaisseur d'eau tombée) est de l'ordre de 1700 / 1900 mm par an. Donc la part infiltrée relative à la source est, par exemple, de $0,26 / 1700 = 0,000154$ par km2. Ce qui est infime. A remarquer que la pluviométrie moyenne au couvent de la Grande Chartreuse est de 2038 mm (altitude de 950 m ; 1930-1953). Au col de Porte en 2007, elle fut de 2089 mm (altitude de 1330 m ; 2007).

On peut calculer cette recharge de la nappe par le haut (les pluies au travers de sa surface) de deux manières. La première est la n°2 suivante et la seconde est la suivante (n°1).

ALIMENTATION PAR LE HAUT D'UNE NAPPE LIBRE

1- Calcul de la recharge par la surface

Z épaisseur nappe en amont pour x (m)	300
h épaisseur nappe "à la sortie" (m)	50
perméabilité horizontale (m2/s)	0,00001
X longueur nappe totale (m)	1000
x longueur nappe intermédiaire à partir de l'amont (m)	850
valeur de T	0,0005
recharge (l/s m2)	0,000001961

2- Calcul de l'infiltration des pluies

longueur impluvium (m)	1000
largeur impluvium (m)	1000
lame annuelle de pluie (mm)	1900
taux d'infiltration (par ex. 3%)	0,03
surface impluvium (m2)	1000000
volume de pluie infiltrée (m3)	57000
débit fictif continu (m3/s)	0,0018
débit fictif continu (l/s)	1,81
débit fictif continu (l/mn)	108,6
recharge (l/s m2)	0,000001810

Le premier calcul résulte de l'application de la formule suivante :

$$C = ((Z-h) * T) / ((xX - x^2)/2)$$

Avec C : recharge en l/s m²

Z : épaisseur de la nappe en amont

h : épaisseur de la nappe à l'exutoire

$$T = K_h * h$$

X : distance horizontale entre Z et h

En ajustant les valeurs, on obtient pour les deux calculs, des résultats proches c'est-à-dire un débit fictif continu de 108 l/mn.km² soit 215 fois le débit de la source Germaine. Le débit délivré par la source n'est donc qu'une part infime du débit de la nappe qui toutefois reste faible.

On constate que l'infiltration profonde (celle qui alimente les nappes) n'est que de 3% du total des pluies annuelles. En effet, outre qu'il s'agit d'une valeur approchée :

- toutes les pluies se répartissent en ruissellement, en infiltration superficielle (reprise par l'évapotranspiration), en infiltration profonde (vers les nappes) et en évaporation du sol. Donc une partie seulement alimente les nappes d'eau souterraines. Le graphique suivant illustre ce comportement pour le Guiers mort où des crues ont lieu durant le tarissement des nappes d'eau souterraines sans modifier ces débits.
- les collines sont tapissées de sols argileux Würm, éboulis fixés) peu propices à l'infiltration.
- les mêmes collines ont des pentes fortes ce qui contribue à accroître le ruissellement et donc diminuer l'infiltration.

RELATION ENTRE LES PLUIES ET LES ECOULEMENTS DU GUIERS MORT LES DIFFERENTS TYPES D'INFILTRATION

A titre d'exemple, le graphique montre en 2007, superposés, les pluies (en rose) au col de Porte et les débits du Guiers mort (en bleu) à Saint-Laurent-du-Pont.

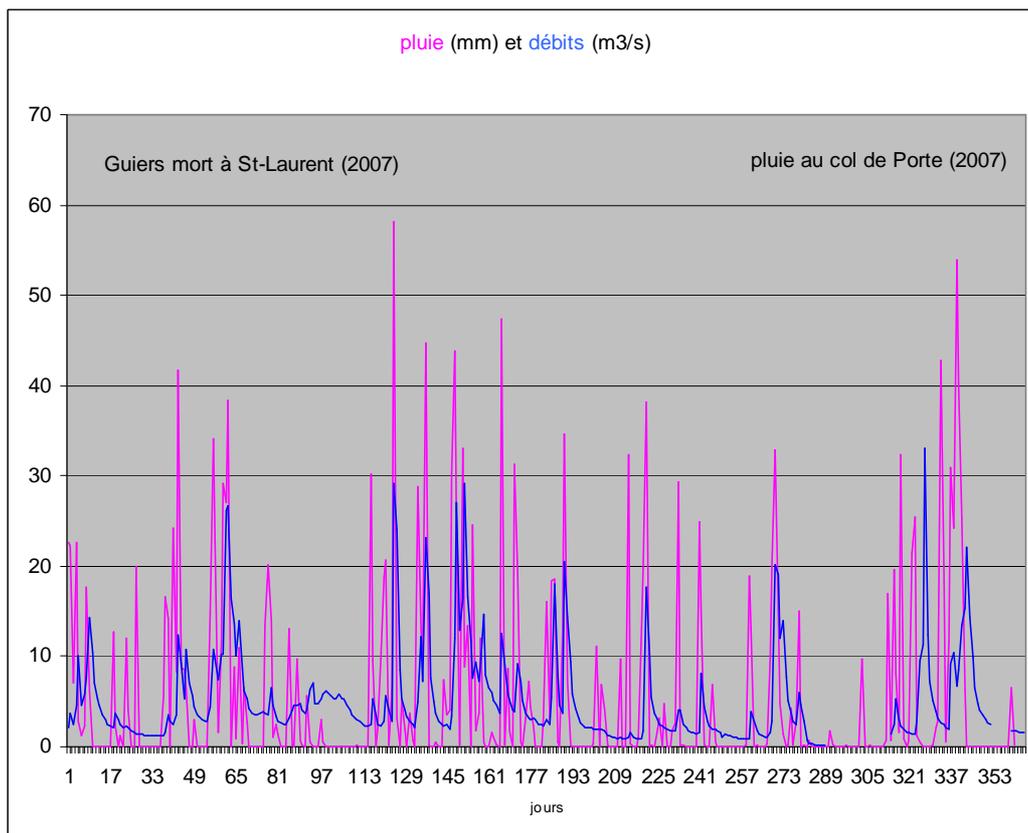


Fig : sur le même graphique, les pluies (en rouge) en 2007 au col de Porte (situé dans le bassin versant du Guiers mort) et les débits (en bleu) du Guiers mort à Saint-Laurent-du-Pont en 2007, ont été représentés de façon à mettre en évidence les relations pluies-écoulements.

Les basses eaux du Guiers mort apparaissent sous forme de courbes presque rectilignes inclinées à moins de 20° (courbe de tarissement) apparaissant après une crue : l'eau du torrent ne provient que de la vidange des nappes d'eau souterraine.

Les fortes pluies coïncident avec les crues du torrent.

Les basses eaux correspondent à des périodes sans pluies mais également à de petites crues. Ces dernières conduisent à une infiltration superficielle dont l'eau est reprise par l'évaporation sans gain pour les nappes d'eau souterraine (la pluie qui leur a donné naissance est inférieure à la valeur limite de la pluie efficace).

C'est, mais à une autre échelle quand aux conséquences, ce qui se passe sur les collines objet de l'étude.

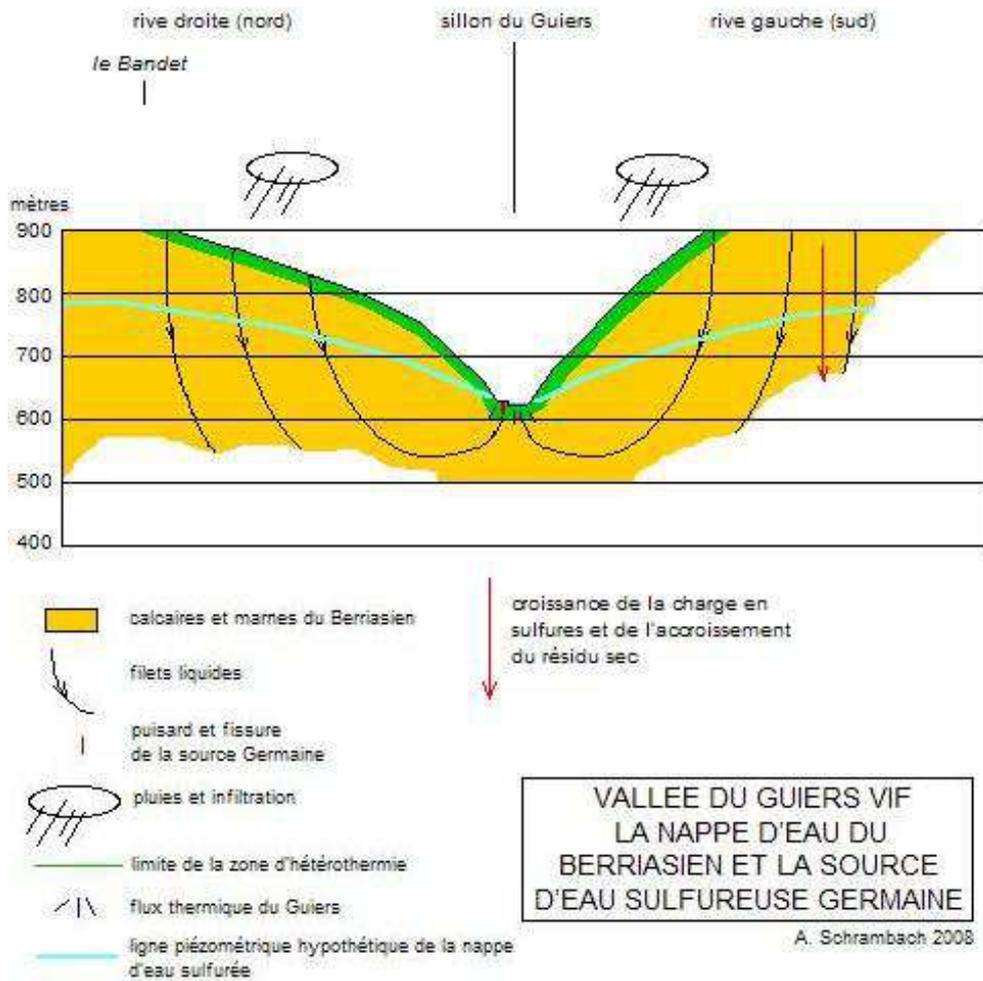


Fig : Modèle hydraulique simplifié de l'environnement de la source Germaine

Essai de détermination approchée des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère. Le débit du griffon (voir l'annexe 2)

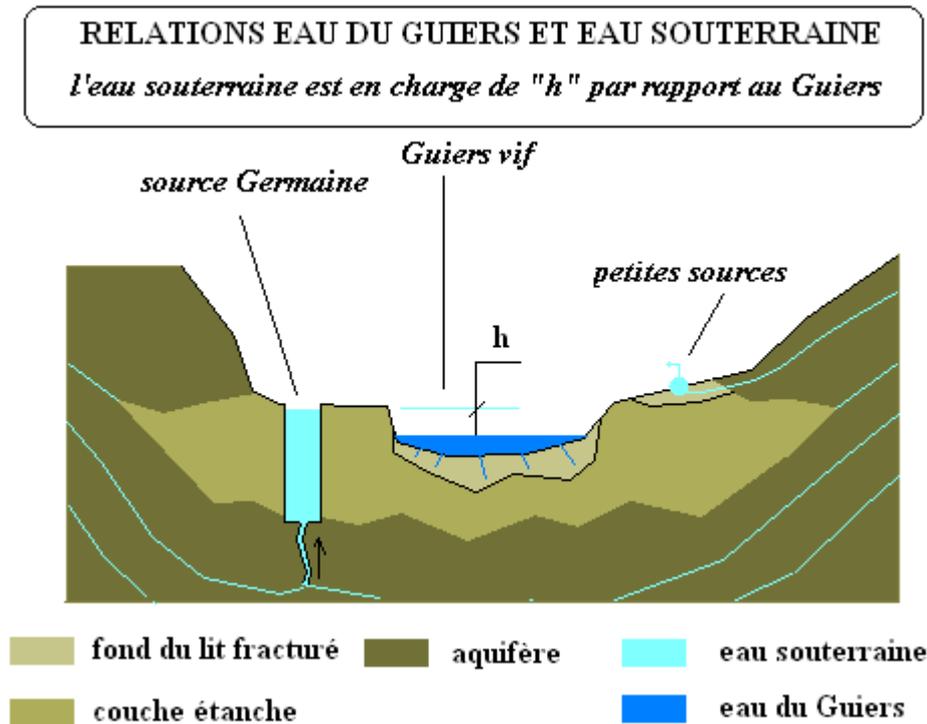


Fig : relations, au niveau du griffon de la source Germaine, entre celle-ci et le Guiers

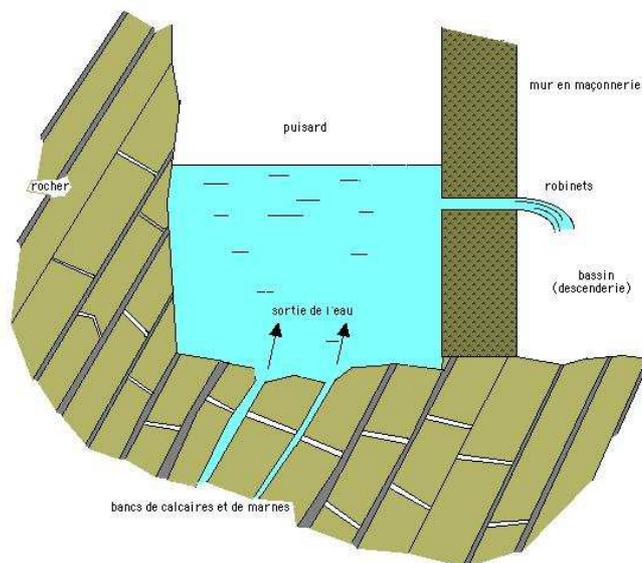
Les calculs précédents nécessitent de connaître les paramètres hydrodynamique de la nappe du Berriasien. Il s'agit de :

- la perméabilité horizontale K_h (m/s)
- la transmissivité T (m²/s)
- la porosité efficace S_e (drainage gravitaire d'une nappe libre) (%)

Les calculs suivants sont des essais de détermination de ces trois paramètres. Ces calculs hydrauliques sont données dans l'annexe 2. Ils sont effectués en assimilant le puisard de la source à un puits pompé et ont été également réalisés avec le pompage du forage de Saint-Même.



Fig : Les bancs de calcaire et les petits lits de marnes du Berriasien au griffon. Le puisard proprement dit est sous les petits rondins. Le plan d'eau correspond à la descenderie. L'altitude de plan d'eau est celle du griffon et donc de la nappe d'eau souterraine soumise à un faible drainage gravitaire (par un déversement vers le Guiers non vu)
Photo Communauté de Communes d'Entremonts



SOURCE GERMAINE
VUE HYPOTHETIQUE DU ROCHER
AU FOND DU PUISARD

A. Schrambach 2008

Fig : dessin hypothétique du griffon de la source Germaine au fond du puisard. Le conduit sub vertical assurant l'absence de liaison hydraulique entre le Guiers et la nappe, ainsi qu'une remontée rapide de l'eau sulfurée assurant le maintien à une température relativement élevée, sont mis en évidence.

Les résultats sont les suivants :

Les différents calculs conduisent à donner aux paramètres hydrodynamiques de la nappe du Berriasien (à Saint Môme et à la source Germaine) les valeurs approchées suivantes (en effet, « *une trop grande précision, surtout dans le calcul des débits qui dépendent avant tout de la perméabilité, est illusoire* »).

Perméabilité horizontale K_h (m/s)

Transmissivité T (m²/s) = $K_h \times H$

Épaisseur de la nappe intervenant pour l'écoulement de la source H (m)

Coefficient d'emmagasinement S_e (%)

Formule	K_h	T	H	S_e
<u>D'après les calculs géothermiques</u>			(100) **	
<u>En régime permanent (*)</u>				
Forage de St-Môme	0.000015	/	(>70) **	/
Palplanches	0.00001	0,0003	30 **	/
Forcheimer	0,00001	/	/	/

En régime transitoire

Descente

Remontée

(*) : la raison d'être de ces calculs est double : montrer qu'une perméabilité de 0,00001 m/s est compatible avec les données et enfin trouver des couples débit-rabattement crédibles pour le puisard de la source.

(**) : valeur hypothétique (100 m à la source et 250 à 300 m sous les collines et probablement moins pour le forage). Mais il n'est pas certain que l'épaisseur totale entre en jeu dans les pompages de courtes durées et ceci à cause de l'anisotropie de l'aquifère.

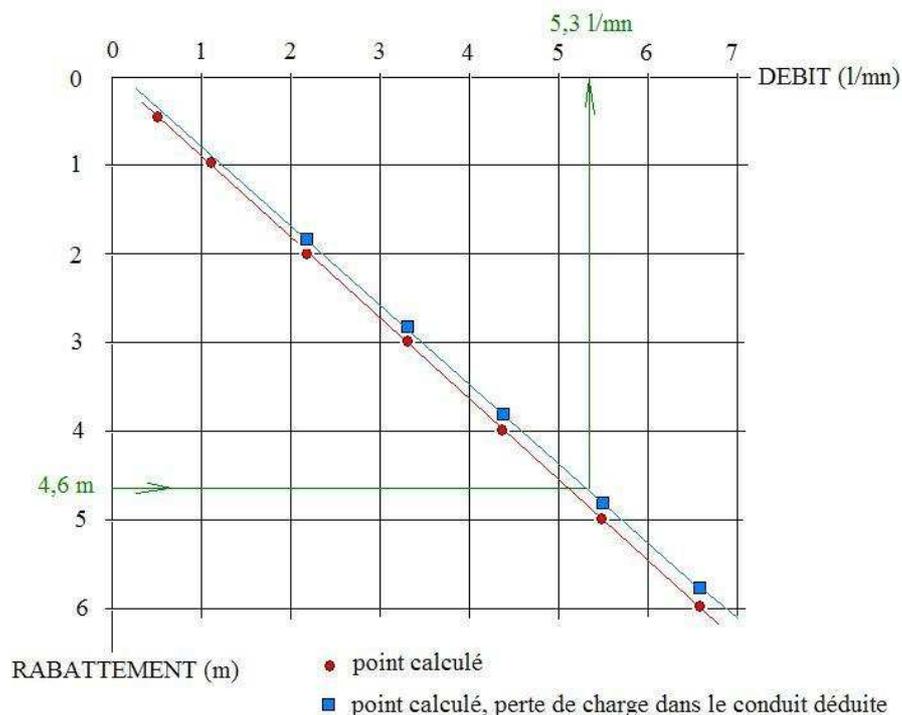
Le débit naturel du griffon (simple déversement de la source au sol) a été mesuré dans les années 1890. Une mesure ponctuelle (à une époque de l'année indéterminée) a donné 0,5 litre par minute.

Si on soumet le puisard (qui joue alors le rôle d'un puits pompé) à un rabattement important, le débit va croître. On a par le calcul cherché les valeurs hypothétiques des débits correspondants à ces rabattements (le calcul est détaillé dans l'annexe 2).

Les couples rabattements-débits calculés (et hypothétiques) sont présentés sur le graphique suivant qui est le courbe caractéristique du puisard assimilé à un puits pompé.

Pour un rabattement de 5 mètres, (les deux robinets devaient être installés à cette profondeur), le débit serait de 5 l/mn soit dix fois plus que le débit naturel.

Il faut noter que d'après les données des statuts de 1893, il fallait – approximativement – un débit continu de 3 l/mn pour remplir les baignoires (calcul présenté dans le paragraphe « gestion de l'eau »). Cette valeur est compatible avec les débits de la courbe suivante.



**COURBE CARACTERISTIQUE CALCULEE ET HYPOTHETIQUE
DU PUISARD**

Usages thérapeutiques de la source d'eau sulfureuse Germaine

En 1893, le rôle thérapeutique de l'eau sulfureuse de la source Germaine était déjà reconnu (en fait depuis la fin du XVIII^e siècle). On traitait « *Toux, laryngite, anémie, angine granuleuse, bronchite, eczémas, arthritisme et chlorose* ».

Les maladies relevaient de la dermatologie (*eczéma*), des affections des voies respiratoires (*toux, laryngite, angine granuleuse, bronchite*), des anémies (*anémie et chloroses*). La faible température de l'eau autorisait aussi les bains froids.

Le texte des statuts de la société des Eaux minérales de Saint-Pierre-d'Entremont cite « ... *telles sont les maladies qui ont cédé à son action depuis qu'il en a été fait usage à l'Hôpital des révérends pères Chartreux, à Saint Laurent-du-Pont ...* ».



Fig : affiche collée sur les bouteilles d'eau de la source Germaine (années 1890)

Dans la région d'autres sources sulfureuses sont exploitées, à Allevard, Aix-les-Bains, Challes-les-Eaux et Uriage (voir l'annexe 4).
Les traitements se font par immersion et par ingestion.

Création d'un centre thermal

Plutôt que de le centrer autour de la source Germaine difficilement accessible et d'un débit très faible, il serait plus judicieux de l'implanter autour d'un forage implanté dans la nappe d'eau sulfureuse.

Toutefois il faudrait déterminer les ressources de la nappe d'eau sulfurée de façon à définir le débit maximum des prélèvements. De même, de façon à assurer une hydrochimie constante, il faudrait dater l'eau de la nappe pour connaître son taux de renouvellement en sulfures.

L'EAU, LES PATHOLOGIES ET LES EFFETS THERAPEUTIQUES

Idées actuelles

Pendant longtemps, l'eau fut considérée comme une source de bienfaits vis-à-vis de certaines pathologies.

De nombreux excès furent commis en partie pour des raisons commerciales. Ainsi au XIXe siècle, l'eau du lac de Paladru fut considérée comme une eau thérapeutique. *« Les qualités thérapeutiques qui, de toute antiquité, furent reconnues par le corps médical aux eaux du lac de Paladru, ne peuvent être toutes citées. Mentionnons seulement que extrêmement limpides et d'une température toujours modérée (due au rôle de la chaleur spécifique de l'eau) jusqu'à la fin du mois de septembre (Au XIXe siècle lors des hivers rigoureux, le lac pouvait geler entièrement), elles sont excellentes pour la peau, qu'elles rendent très douces. Grâce aux calcaires, à l'iode et à la potasse qu'elles renferment, elles ont la faculté de cautériser les blessures et de guérir les affections cutanées ».*

En fait l'eau du lac (ce dernier au XIXe siècle était considéré comme un lac de cratère volcanique alors qu'il ne s'agit que d'un lac morainique d'origine glaciaire) provient des pluies qui tombent sur le lac, de l'eau apportée par le Courbon issu de Montferrat-Paladru et par le Surand venant de Valencogne-le

Pin et pour une part inconnue des eaux souterraines. Il s'agit donc d'une eau banale, mais très calcaire, comme toutes celles qui existent dans le Voironnais. De nos jours ses effets thérapeutiques ne sont plus reconnus.

Actuellement, les avis du corps médical convergent vers le rôle psychosomatique des cures. C'est l'environnement (calme, confort, support médical etc) qui est l'élément moteur et non l'eau. C'est la raison pour laquelle les aménagements de détente et de loisirs prennent une part prépondérante.

D'après Gallay Bertrand, directeur général des Thermes d'Aix-les-Bains, « *la répétition des soins à l'eau sulfurée favorise la recharge en soufre de l'organisme* ». Toutefois comme l'environnement soigneusement étudié est propice à l'apaisement des malades, il est difficile de définir le rôle exact de chaque composant « Des études restent à entreprendre pour démontrer les raisons du mieux-être des curistes » ...

« *Certains centres thermaux jouent la carte ludique avec de vastes piscines, des cascades ... On est loin de la cure thermale classique, mais c'est bon pour la forme et le moral* » (Guy de Boiville, 2005, 2004).

En 2006, le chef du service de rhumatologie de l'hôpital Cochin, le professeur Maxime Dougados déclarait « *...Je suis aussi très attaché à la pluridisciplinarité et favorable aux cures thermales si elles permettent à une équipe médicale d'expliquer pendant plusieurs jours au patient sa maladie, son traitement ... Ce n'est pas l'eau qui a de l'importance dans ces cures, mais cette action concertée* ».



BIBLIOGRAPHIE

- BRGM . Carte géologique de Montmelian 1/50000^e
- Cojan Isabelle Renard Maurice Sédimentologie Dunod 2006
- Collectif Charavines à travers le temps 1999 imprimeur Maury Eurolivres
- IGN Carte topographique 1/25000^e
- Jézéquel D. Sarazin G. Fonty G. Tassin B. Le lac Pavin : le volcan, l'eau et la vie Pour la Science Dossier n°58 Janvier-Mars 2008
- Kei Hirose. L'ingrédient manquant de la terre (la *postpérovskite*) Pour la Science n°394 Août 2010
- Kornprobst Jacques Les roches métamorphiques et leur signification géodynamique Masson 1994
- Labrosse Stéphane Un monde sous le manteau Pour la Science Dossier n°67 Avril-juin 2010
- St-Pierre-d'Entremont, Ses eaux minérales, ses sites, ses cures d'air, ses excursions, ses voies de communication. Imp Breynat et Cie, Grenoble, 1894. Cote BM Grenoble U7367 ; et Pin-Brancaz, 2000
- Pollack Henri Chapman David Dans le sol, la chaleur du passé Pour la Science n°190 août 1993
- Schoeller H Les eaux souterraines ed. Masson 1962
- Schrambach A. Géologie, hydraulique, hydrologie des karsts Non publié 2008
- Schrambach A. La gestion de l'eau par éclusage. Ses contraintes, ses possibilités 17 pages Non édité 2007. (Complément à l'étude : Schrambach A. Une situation conflictuelle : la gestion de l'eau dans la Fure du Moyen Age au XXe siècle. Chroniques Rivoises 1999).
- Schrambach A. Données numériques sur les puits, forages et techniques associées . Note technique interne Sogreah 1982.
- Gidon Maurice Site internet : geol-alp.com

ANNEXE 1

GENERALITES SUR LES SOURCES MINERALES ET HYDROTHERMALES

Les eaux hydrothermales se distinguent des eaux « normales » par leur température (mesurée au griffon ou source) et par l'usage reconnu sur le plan médical.

D'après les diverses définitions, la température doit être au moins supérieure de 4 ou 5 degrés Celsius à la température moyenne de l'air.

L'usage médical varie selon la chimie des eaux. Les eaux sulfureuses, où le soufre est l'élément actif, sont utilisées, entre autres, pour les soins dermatologiques (peau et muqueuses), les soins des voies aériennes et en rhumatologie (arthrose etc).

Trois paramètres sont importants pour l'étude d'une telle eau :

- La température au griffon car elle permet de déterminer la profondeur de l'aquifère qui alimente la source. On distingue les eaux hypothermales (à faible température) et les hyperthermales (à température élevée).
- La chimie de l'eau (anions, cations et résidu sec) afin d'apporter des informations quant à la nature des roches traversées (sels solubles).
- Le débit de la source de façon à connaître l'importance des ressources (ou alimentation) de la nappe d'eau souterraine.

La température

La température est liée directement au gradient géothermique de l'écorce terrestre. La température dépend donc de la profondeur de la nappe d'eau souterraine d'où est issue l'eau qui sort au griffon en surface.

Elle peut être faible. Par exemple à Challes-les-Eaux, elle est de 15°C et à Allevard de 15 à 17 °C. A moins de 20°C, ce sont des eaux hypothermales.

A Uriage, la température est de 27 °C.

Elle peut être plus forte : de 40 à 65°C à Amélie-les-Bains et de 45 à 47 °C à Aix-les-Bains. Ce sont des eaux hyperthermales.

A titre de comparaison, les mesures de températures de l'eau du ruisseau de la Fure (à Rives) et des sources (alimentées par les nappes phréatiques) dans la même vallée, ont donné les résultats suivants.

	février et mars °C	août et septembre °C	moyenne °C
nappes superficielles	8,2	15	11,6
Fure (ruisseau)	4,5	20	12,2

Températures des eaux de la vallée de la Fure

On constate donc que les eaux hypothermales ont des températures proches de celles des eaux normales. Par ailleurs à moins de 80°C, l'enthalpie est basse. Pour les eaux hyperthermales, liées à des aquifères profonds, il n'en n'est pas de même.

Chimie des eaux

La chimie des eaux sulfureuses est définie selon les ions dominants. Toutefois il pouvait y avoir en faible quantité du brome, de l'iode. Des gaz sont émis : CO₂, H₂S, N, gaz rares, méthane.

A Amélie-les-Bains et à Challes-les-Eaux, le profil hydrochimique est sulfuré sodique.

A Allevard le profil est sulfuré calcique (voir le diagramme).

En général le résidu sec (à 180 °C) est supérieur à 1000 milligrammes par litre (2425 à Allevard) mais ce n'est pas une règle. Par exemple à Amélie-les-Bains, il est de 290 à 332 mg/l.

Cas particulier des eaux sulfurées

Ces eaux comprennent des sulfures dont l'origine est liée à la présence de matières organiques.

Les sulfates sont réduits et donnent des sulfures, par les matières organiques et les bactéries associées dont la présence permet cette réduction aux températures de la nappe d'eau souterraine (par exemple des protéobactéries sulfatoréductrices).

La présence d'hydrogène sulfuré libre (gaz H₂S) avec son odeur caractéristique d'œuf pourri, est fréquente.



Les matières organiques peuvent provenir de couches sédimentaires qui en contiennent ou de griffons pollués par des végétaux. Ces eaux peuvent être noirâtres.

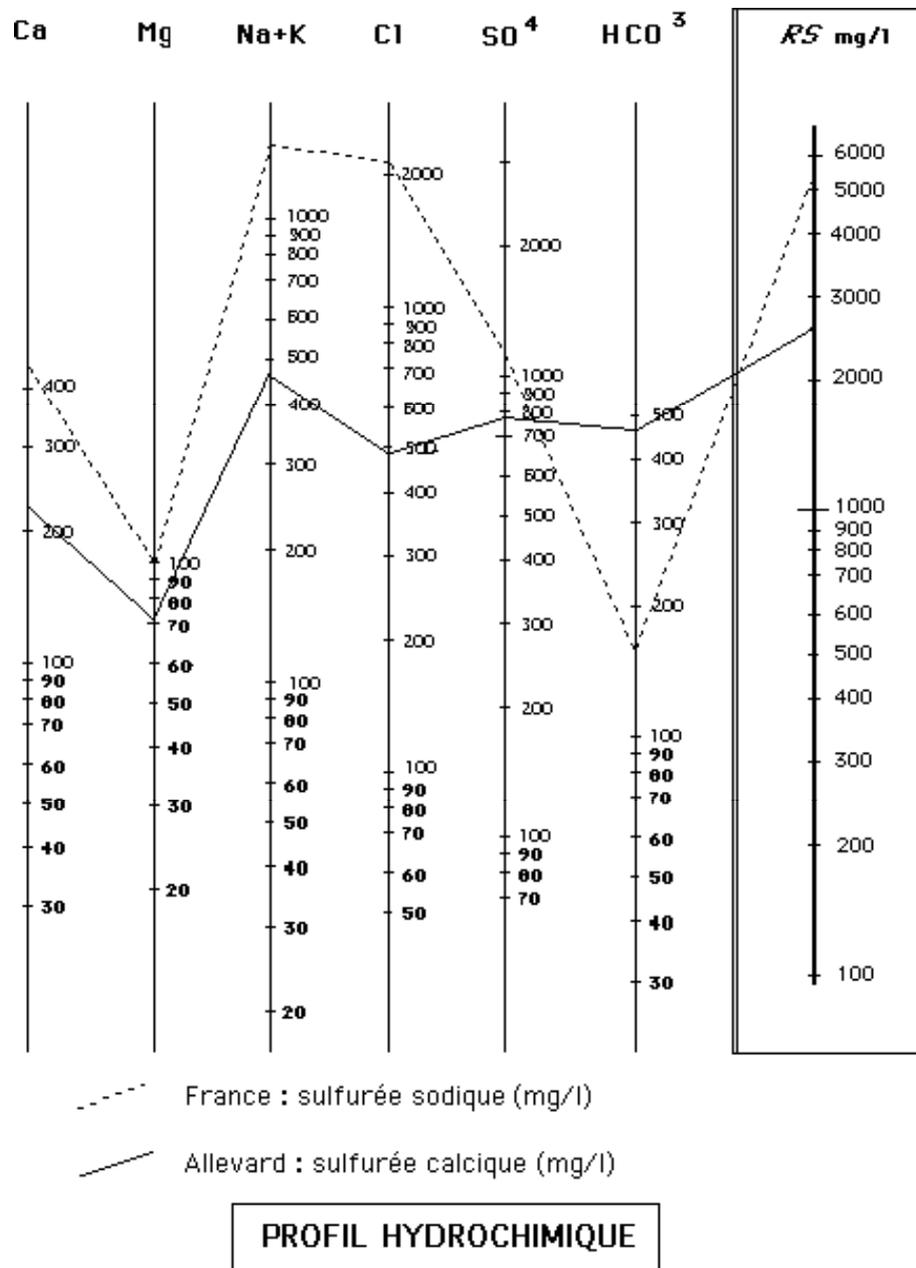


Fig : profils hydrochimiques d'eaux sulfurées

Les débits

Les débits sont variables mais pas nécessairement importants.

A Allevard le débit maximum est de 1,9 l/s (114 l/mn). A Amélie-les-Bains il oscille selon le griffon, entre 0,02 et 5,8 l/s (1,2 et 348 l/mn).

De ce fait les ressources en eau (alimentation) des nappes alimentant ces sources sont très réduites ainsi que le volume de l'aquifère. Il s'agit presque de phénomènes marginaux sur le plan économique (si on ne tient pas compte des retombées dues aux stations thermales).

Hydrogéologie des eaux thermominérales

Plusieurs éléments sont à considérer :

- L'origine de l'eau
- Les caractéristiques de la couche aquifère
- Les conditions d'émergence de l'eau.

L'eau peut avoir deux origines : soit il s'agit de l'infiltration des eaux de pluies et de ruissellement, soit il s'agit d'eau profonde chargée en ions dissous à forte pression et hautes températures.. Les deux schémas suivants montrent cette dualité.

La couche aquifère se distingue selon que l'eau circule dans des roches à porosité d'interstices (comme les sables) ou dans des roches à porosité de fissures ou de chenaux (comme dans les calcaires fracturés).

L'existence de fissures ouvertes permet à l'eau de circuler à forte vitesse et de ce fait à perdre moins vite de la chaleur.

Les conditions d'émergence sont essentiellement la présence de point bas (comme un fond de vallée) et d'une fracturation poussée au griffon.

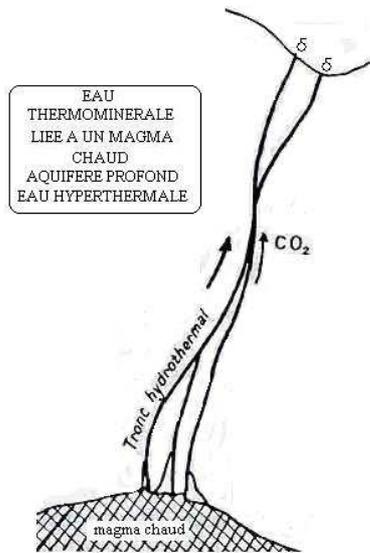
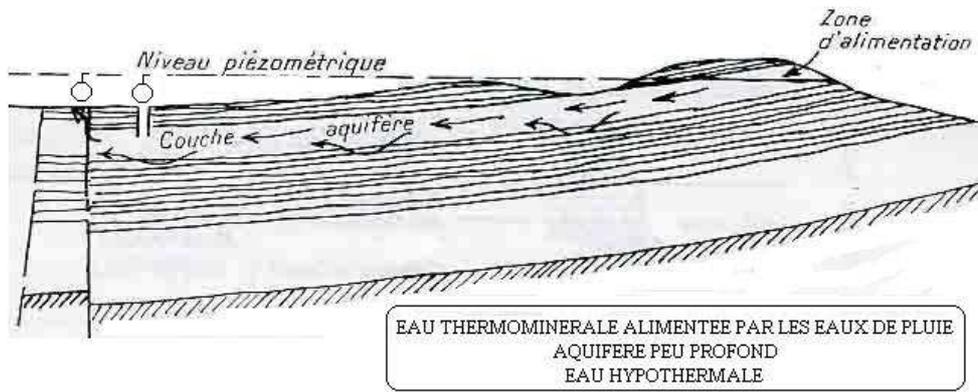


Fig : les eaux thermominérales d'origine superficielle (dessin du haut) et profonde (dessin du bas)

ANNEXE 2

CALCULS HYDRAULIQUES

1- Essai de calcul de la variation du débit de la source Germaine

Une source, un exutoire de nappe d'eau souterraine (comme un ruisseau) voit son débit diminuer selon une loi précise lors des périodes sans recharges d'eau (basses eaux des torrents qui à ce moment se comportent comme un drain linéaire drainant les nappes d'eau souterraine).

Il est intéressant de déterminer les caractéristiques de ces variations durant les basses eaux. Pour cela, on calcule une valeur approchée du coefficient de tarissement « a », avec la formule :

$$a = 5.572 * (K_h * V) / (4 * S_e * X^3)$$

K_h : perméabilité horizontale (m²/s)

V : volume de l'aquifère

S_e : porosité efficace

X : longueur de la nappe

*Données de base :

débit moyen (hypothèse) de 0,75 l/mn (soit 0,0125 l/s)

K_h : $1 \cdot 10^{-5}$ m/s (équivalente de celle de sables très fins)

S_e : 0.001

Le calcul du volume d'eau écoulé en 90 jours conduit aux résultats suivants :

Volume d'eau écoulé en 90 jours : 100 m³

Coefficient de tarissement : 0,0009

Cette faible valeur du coefficient de tarissement (il définit la pente de la droite correspondant à la décroissance des débits de la source ; pente déterminée en coordonnées semi logarithmiques) indique une perméabilité faible, une grande longueur de la nappe d'eau souterraine, un grand volume de la nappe.

Ces résultats correspondent à un débit de source, écoulé dans une situation naturelle (donc avant la construction du puisard) variant peu dans le temps et en dehors d'une période d'alimentation.

2- Détermination des paramètres hydrodynamiques de la nappe d'eau souterraine

Il s'agit des paramètres suivants :

Perméabilité horizontale K_h (m/s)

Transmissivité T (m²/s) = $K_h \times H$

Epaisseur de la nappe intervenant pour l'écoulement de la source H (m)

Coefficient d'emmagasinement S_e (%).

Pour les déterminer il faut analyser le comportement de la nappe lorsqu'elle est soumise à un prélèvement d'eau (par exemple un pompage). On peut faire l'analyse en régime permanent ou en régime transitoire (ce dernier étant lié au fait que le régime permanent n'est atteint qu'au bout d'un temps plus ou moins long).

Paramètres hydrodynamiques de la nappe intéressée par le forage de saint Môme

En régime permanent, sur la base des informations recueillies (entreprise de forage, personnel de la mairie), le débit pourrait être de l'ordre de 0.9 à 1 l/s pour un rabattement de 3,5 mètres (durée du pompage : 1 heure).

Le calcul suivant montre que la valeur de la perméabilité horizontale serait de 0.000015 m/s.

FORAGE PENETRANT PARTIELLEMENT UNE NAPPE

FORAGE de Saint Môme

Données

Kh (m/s)	0,000015
rayon forage (m)	0,1
profondeur forage (m)	65
longueur crépine (m)	15
rabattement (m)	3,5
durée pompage (s)	3600

Résultat

débit pompé (l/s)	0,9
débit pompé (l/mn)	52,0

Paramètres hydrodynamiques de la nappe intéressée par la source Germaine

L'analyse du pompage du puisard est délicate car :

a- du fait que la nappe du Berriasien est en charge par rapport à l'eau du Guiers ceci entraîne que le puisard peut être comparé à un puits avec des parois étanches et alimenté uniquement par le fond.

b- le puisard est un puits imparfait car il ne traverse pas la nappe sur toute sa hauteur.

c- l'isolement hydraulique nappe-Guiers conduit à l'existence très probable d'un conduit naturel (fissure ?) sub vertical remontant vers le puisard. Son comportement hydraulique n'est pas celui d'un écoulement en milieu poreux.

En régime permanent

*** Les conditions a) et b)** conduisent à assimiler le puisard à un rideau de palplanches formant un cercle.

Un puits incomplet est caractérisé par le coefficient de pénétration C_p

$$C_p = A / (2*H)$$

A : longueur de pénétration du puits

H : épaisseur de la nappe intervenant lors du pompage (si l'aquifère est hétérogène, une partie seulement peut intervenir, tout du moins à court terme)

Les calculs suivants donnent à H les valeurs de 30 m

Par ailleurs, les calculs géothermiques font intervenir une profondeur H (à la source) de l'ordre de 100 m.

Dans ces conditions C_p oscille entre 0,1 et 0,03 ce qui est très faible.

La formule avec des palplanches est la suivante :

$$\text{Débit (m}^3\text{/s.m)} = (K*h_0* (p_0-p_3)) / (2*a + L)$$

$$\text{et } a = (K'/b* 1 / (K*h_0))^{0.5}$$

ÉCOULEMENT SOUS UN RIDEAU DE PALPLANCHES (ou sous un mur)

source **Germaine**

Données

po-p3 (rabattement) (m)	0,45	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00
perméabilité (couche du bas) (m/s) K				1E-05	1E-05	1E-05	1E-05
épaisseur couche du bas h0 (m)	30	30	30	30	30	30	30
épaisseur couche du haut b (m)	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
perméabilité (couche du haut) (m/s) K'				1E-05	1E-05	1E-05	1E-05
diamètre du puits L (m)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
circonférence du puits (m)	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6

Résultats

débit (m3/s.m)	5E-06	1E-05	2E-05	3E-05	5E-05	6E-05	7E-05
débit (l/mn.m)	0,3093	0,6873	1,3745	2,0618	2,7491	3,4364	4,1236
débit pour 1,6 m (l/mn)	0,5	1,10	2,20	3,30	4,40	5,50	6,60

Ce calcul montre qu'avec une perméabilité horizontale de 0,00001 m/s, le débit de la source est de 0.5 l/mn pour un rabattement de 0,45 m et de 6.6 l/mn pour 6 m de rabattement.

L'épaisseur de la nappe serait alors de 30 mètres soit une transmissivité de 0,0003 m2/s.

Le calcul suivant correspond à un schéma hydraulique voisin mais la formule est différente (batardeaux)

batardeaux = 2 écrans parallèles et verticaux

rabattement H (m)	0,5	1	2	3	4	5	6
rayon du puits b (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
profond fiche écran sous fond fouille c (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
épaisseur nappe e (m)	30	30	30	30	30	30	30
perméabilité horizontale K (m/s)	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
rabattement H (m)	0,5	1	2	3	4	5	6
longueur batardeau (m)	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88
débit unitaire (m3/s . m)	3,8E-06	7,6E-06	1,5E-05	2,3E-05	3E-05	3,8E-05	4,6E-05
débit unitaire (l/mn . m)	0,23	0,46	0,91	1,37	1,83	2,28	2,74
débit total (l/mn)	0,43	0,86	1,72	2,58	3,44	4,30	5,16

Les résultats sont très proches des précédents.

A titre indicatif, le tableau suivant donne les résultats pour un puits incomplet, à paroi étanche, fond perméable calculés avec la formule de Forcheimer.

$$\text{Débit} = K_h * (4 * r * \text{Rab})$$

K_h : perméabilité horizontale

r : rayon du puisard

Rab : rabattement du plan d'eau

formule de FORCHEIMER

puits à paroi étanche et fond perméable

Données

rayon du puisard	0,5
perméabilité (m/s)	0,00001

Calcul

rabattement (m)	débit (m ³ /s)	débit (l/mn)
0,5	0,00001	0,60
1,5	0,00003	1,80
2	0,00004	2,40
2,5	0,00005	3,00
3	0,00006	3,60
4,7	0,000094	5,64
5	0,0001	6,00
6	0,00012	7,20

Toutefois comme il doit y avoir une fissure quasi verticale qui alimente le griffon (de façon à assurer l'absence de relation hydraulique entre la source et le Guiers), il peut être utile de faire intervenir cette dualité « nappe d'interstices » (écoulement laminaire) en général et « écoulement dans des fissures » (écoulement turbulent). C'est l'objet du calcul suivant.

Écoulement mixte : laminaire et turbulent nappe libre

perméabilité horizont(m/s)	1E-06						
rayon du forage (m)	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125
épaisseur nappe(m)	20	20	20	20	20	20	20
épaisseur nap pompée(m)	19,5	19	18	17	16	15	14
pertes de charge : n	1 et 2						

rabattement (m)	0,5	1	2	3	4	5	6
débit de pompage (m ³ /s)	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
débit de pompage (l/s)	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,09
débit pompage (l/mn)	1,86	2,60	3,58	4,28	4,81	5,23	5,58

Pour retrouver des valeurs de débit voisines des précédentes il faut donner à la perméabilité horizontale une valeur de 10^{-6} m/s (au lieu de 10^{-5} m/s). Ce calcul n'est pas à retenir mais montre que la valeur de la perméabilité est importante. Le rôle de la fissure ou conduit est abordé après d'une manière différente.

Avec les calculs précédents, les ordres de grandeur des débits pour les rabattements échelonnés entre 0.5 et 6 m sont voisins.

Le débit naturel de la source (0.5 l/mn) est associé à un rabattement de l'ordre de 50 centimètres.

Il faut noter que ces débits correspondants à un certain rabattement du plan d'eau dans le puisard ne sont pas des débits naturels puisque les écoulements souterrains sont forcés par le pompage.

Toutefois une fois posés et ouverts les deux robinets assurent un effet de drainage gravitaire qui quoique obtenu artificiellement est identique à un effet naturel.

En régime transitoire

Les données pour faire ce type de calcul n'existent pas.

Hydraulique de la fissure (conduit) qui alimente le griffon

Un puits en pompage est défini par la courbe caractéristique (voir le graphique) ce qui signifie que le débit est une fonction du rabattement (qui augmente, mais de plus en plus lentement, lorsque la durée du pompage s'accroît).

Le rabattement est la visualisation des pertes de charge dans l'aquifère poreux lorsque l'eau se concentre vers le puits (à grande échelle les micro fissures des petits bancs calcaires du Berriasien, se comportent comme un milieu poreux).

Or il est très probable que le puisard soit alimenté par un conduit sub vertical. Les pertes de charges sont alors celles de l'écoulement de l'eau dans une conduite en charge.

Or les rabattements mesurés dans le puisard cumulent les deux effets, pertes de charge dans l'aquifère et celles dans le conduit.

Il paraît utile, pour calculer correctement K_h et T de déterminer si cette seconde composante est négligeable ou non.

Dans un premier calcul, on peut assimiler cet écoulement à un écoulement dans une conduite en charge. On obtient, en recherchant des débits voisins de ceux calculés, une longueur excessive et un diamètre très faible (en rapport avec la faiblesse des débits).

Dans un second calcul plus réaliste, on superpose un écoulement en milieu poreux responsable d'une grande part des pertes de charges, et un écoulement en conduite. Dans ce cas le diamètre de la fissure reste faible (de l'ordre du centimètre).

$$J_{\text{totale}} = J_{\text{ep}} + J_{\text{ec}}$$

J_{ep} = perte de charge de l'écoulement en milieu poreux (laminaire)

J_{ec} = perte de charge de l'écoulement en conduite (turbulent)

Si J_{ec} est trop importante il faut la soustraire pour calculer la perméabilité horizontale.

Les calculs de perte de charge dans une conduite de 20 mm de diamètre et longue de 10 mètres donnent les résultats suivants (formule de Colbrook) :

Conduit de 20 mm de diamètre et de 10 mètres de long

débit		perte de charge		vitesse de l'eau
en l/mn	l/s	(m)	(cm)	(m/s)
0,5	0.0083	négligeable	/	très faible
1.1	0,018	< 0.010 m	<1	< 0,10
2.2	0.036	0,014 m	1,4	0,10
3.3	0,055	0,030	3,0	0,12
4.4	0,073	0,050	5,0	0,14
5.5	0,091	0,08	8,0	0,24
6.6	0,11	0,10	10,0	0,30

Pertes de charge dans le conduit alimentant le griffon et isolant ce mouvement d'eau de l'eau du Guiers

Les pertes de charge, même pour le débit maximum correspondant au rabattement de 6 mètres sont négligeables (le rabattement réel devient donc $6,0 - 0,10 = 5.90$ m).

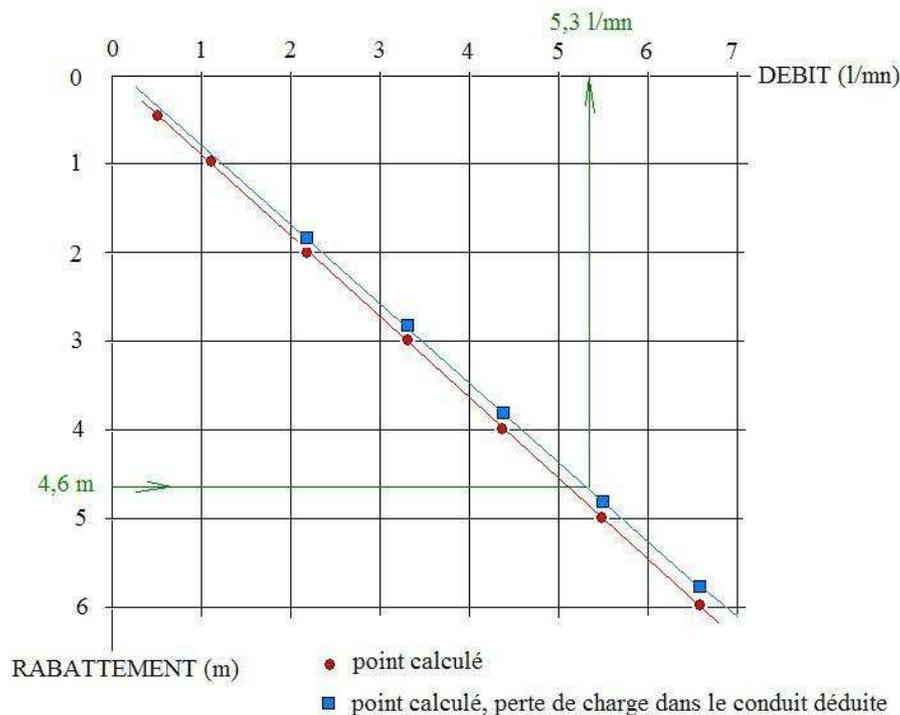
En conclusion, la fissure ne joue un rôle, probablement, que sur une dizaine de mètres mais son existence découle du fait que la nappe au griffon est indépendante de l'eau du torrent.

L'eau issue de la nappe débouche au sol par la source en ignorant la présence du Guiers (sur le plan hydraulique mais pas sur le plan géothermique).

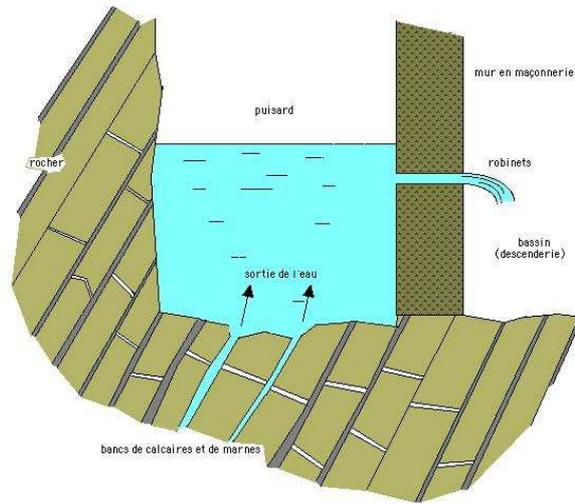
Le débit naturel du griffon (simple déversement de la source au sol) a été mesuré dans les années 1890. Une mesure ponctuelle a donné 0,5 litre par minute.

Si on soumet le puisard (qui joue alors le rôle d'un puits pompé) a un rabattement important, le débit va croître. On a par le calcul cherché les valeurs hypothétiques des débits correspondants à ces rabattements.

Les couples rabattements-débits calculés (et hypothétiques) sont présentés sur le graphique suivant qui est la courbe caractéristique du puisard assimilé à un puits pompé. Pour un rabattement de 5 mètres, (les deux robinets devaient être installés à cette profondeur), le débit serait de 5 l/mn soit dix fois plus que le débit naturel.



COURBE CARACTERISTIQUE CALCULEE ET HYPOTHETIQUE DU PUISARD



SOURCE GERMAINE
VUE HYPOTHETIQUE DU ROCHER
AU FOND DU PUISARD
A. Schrambach 2008

Fig : dessin hypothétique du griffon de la source Germaine au fond du puisard. Le conduit sub vertical assurant l'absence de liaison hydraulique entre le Guiers et la nappe, ainsi qu'une remontée rapide de l'eau sulfurée assurant le maintien à une température relativement élevée, sont mis en évidence.

Le niveau d'eau dans le puisard résulte de l'équilibre entre le débit du griffon soumis à un drainage gravitaire artificiel et celui des robinets dépendant de leur diamètre et de la charge d'eau : les deux débits doivent être égaux.

Conclusions

Les différents calculs conduisent à donner aux paramètres hydrodynamiques de la nappe du Berriasien (à Saint Môme et à la source Germaine) les valeurs approchées suivantes (en effet, « *une trop grande précision, surtout dans le calcul des débits qui dépendent avant tout de la perméabilité, est illusoire* »).

Perméabilité horizontale K_h (m/s)

Transmissivité T (m²/s) = $K_h \times H$

Epaisseur de la nappe intervenant pour l'écoulement de la source H (m)

Coefficient d'emmaganissement S_e (%)

Formule	K_h	T	H	S_e
<u>D'après les calculs géothermiques</u>			(100) **	
<u>En régime permanent (*)</u>				
Forage de St-Môme	0.000015	/	(>70) **	/
Palplanches	0.00001	0,0003	30 **	/
Forcheimer	0,00001	/	/	/

En régime transitoire

Descente

Remontée

(*) : la raison d'être de ces calculs est double : montrer qu'une perméabilité de 0,00001 m/s est compatible avec les données et enfin trouver des couples débit-rabattement crédibles pour le puisard de la source.

(**) : valeur hypothétique (100 m à verticale de la source et 250 à 300 m sous les collines et probablement moins pour le forage). Mais il n'est pas certain que l'épaisseur totale entre en jeu dans les pompages de courtes durées car l'aquifère est fortement anisotrope.

Ces valeurs pourraient utilisées pour d'autres travaux intéressants la même nappe d'eau souterraine.

ANNEXE 3

CALCULS GEOTHERMIQUES

Géothermie : température de l'eau de la source Germaine et conséquences pour la profondeur de la nappe d'eau sulfurée et de son aquifère

Evolution des températures dans l'écorce terrestre.

La planète Terre, dispose de deux sources de chaleur, le soleil (chaleur externe variable) et les parties profondes du globe, noyau et manteau, qui possèdent des sources de chaleur naturelles constantes mais variables selon leur profondeur. (chaleur résiduelle acquise lors de la formation de la Terre, désintégration des éléments radioactifs. Cette seconde source représente environ la moitié de la chaleur qui s'échappe de la planète soit $2 \cdot 10^{13}$ watts).

a) Chaleur atmosphérique et zones d'hétérothermies (dans les couches superficielles du sol : infiltration et remontée au griffon)

Quand on descend dans le sol, durant les premières dizaines de mètres, la chaleur d'origine atmosphérique domine et la température des sols et des roches en surface, varie de 2 à 3° dans l'année (et d'un siècle à l'autre selon l'évolution du climat). Le dessin suivant montre de telles variations.

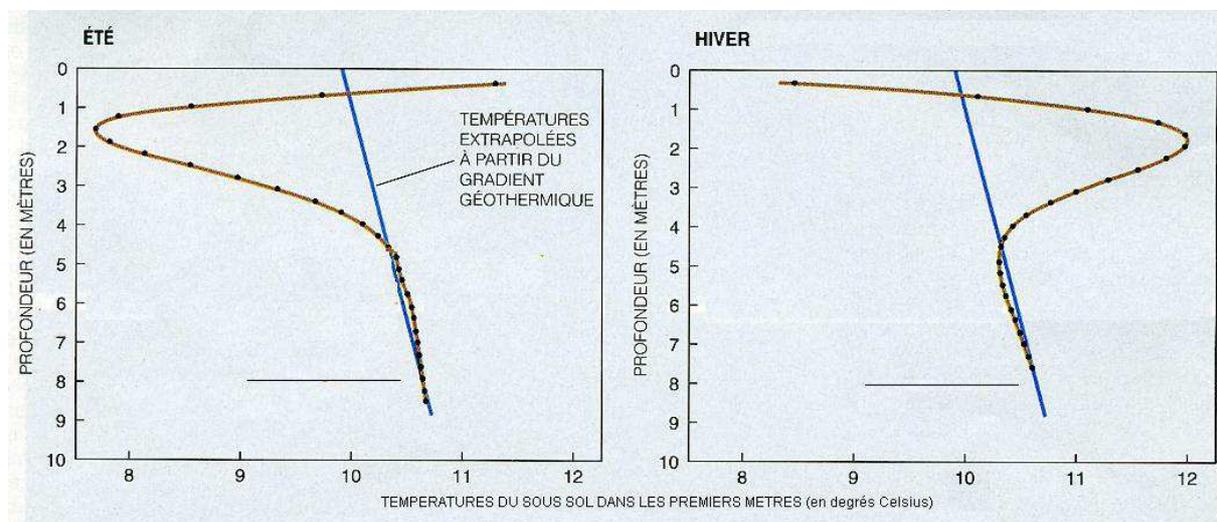


Fig : les zones thermiques dans les premiers mètres dans le sol

*** Infiltration (mouvement descendant) :**

Zone d'hétérothermie : la courbe jaune reliant les points de mesure des températures montre la variation d'une saison à l'autre. La ligne noire est le résultat du calcul du gradient géothermique (voir après) dont les valeurs ne sont représentatives qu'au delà de plusieurs dizaine de mètres de profondeur.

Il faut distinguer deux zones d'hétérothermie : celle journalière et celle annuelle.

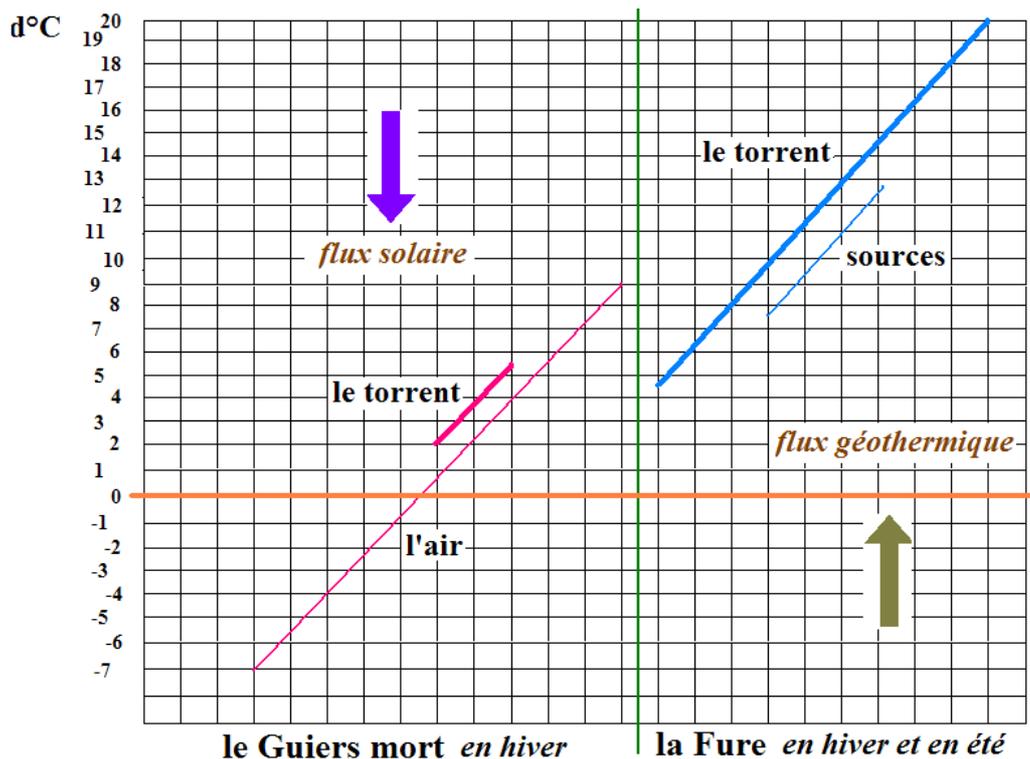
La zone d'hétérothermie journalière ne joue qu'un rôle négligeable. La vitesse de transmission du front thermique est rapide (de l'ordre de 0.5 à 1.0 mètre par jour) mais son épaisseur n'est que de 1 à 2 mètres (en liaison avec la durée courte, 24 heures).

Elle est caractérisée par les différences de température d'un jour à l'autre mais entre le jour et la nuit.

Les flux thermiques

La planète Terre reçoit de l'étoile Soleil un flux thermique. C'est le plus important en intensité mais il est variable (jour et nuit, été et hiver, cycles froids ou chauds).

Le centre de la Terre émet un flux thermique beaucoup plus faible mais il est constant. Toutefois comme il s'accroît avec la profondeur, c'est lui qui joue le rôle primordial vis-à-vis des eaux profondes.



**AIR, EAU DES TORRENTS ET DES SOURCES
VARIATIONS DES TEMPERATURES**

A. Schrambach 2008

Le flux solaire

Du fait que la distance moyenne entre le Soleil et la Terre est de 150 millions de kilomètres, l'angle capable sous lequel est vue la Terre du Soleil est très faible. C'est la raison pour laquelle notre planète ne reçoit qu'un demi-milliardième des émissions du Soleil (dans un cadre de géométrie sphérique).

Dans la journée, l'échauffement dû au Soleil sur la Terre (il s'agit donc du rayonnement qui subsiste après parcours de la distance Soleil – Terre) correspond à un flux énergétique de 1360 watts par mètre carré qui est apporté sur les surfaces qui s'échauffent. Cet apport se répartit en 45% d'infrarouges (qui transmettent un flux thermique), 48% de lumière visible et 7% d'ultraviolets (rayonnement très énergétique qui casse les liaisons atomiques dans les molécules).

Flux thermique d'origine solaire

Selon la latitude	mégawattheure/an/m ²
En Finlande (régions nordiques)	0,80
En France (régions tempérées)	1,36
Au Sahara (régions tropicales)	2,90

La nuit cet apport n'existe plus : toutes les surfaces émettent à température ambiante des infrarouges. Ce flux thermique à raison d'environ 400 watts par mètre carré, entraîne un « refroidissement par rayonnement » des supports et une chute des températures.

La zone d'hétérothermie annuelle (ou saisonnière) a un rôle important et c'est elle qui apparaît en jaune sur le diagramme précédent. La vitesse d'avancement du front thermique est faible (de l'ordre de 1 à 5 cm par jour) mais comme la durée est grande son épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres (elle dépend de la nature des roches selon leur diffusivité).

D'une saison à l'autre ses caractéristiques évoluent. Entre octobre et février, l'eau de pluie qui s'infiltré traverse des couches plus chaudes. Entre mars et septembre, elle est en contact avec des eaux plus froides. A ce sujet le sol se comporte comme un tampon thermique alors que sur un sol rocheux, l'eau de pluie s'infiltré en gardant sa température d'origine.

De plus la température de l'eau d'une source dépend de la latitude, de l'altitude, de l'exposition du griffon selon le soleil (*ubac, adret*) et de la saison.

Par exemple :

*La température moyenne d'un sol en forêt est inférieure d'un degré à celle sous un sol nu.

*La variation avec l'altitude peut être de la forme :

$$10^{\circ} - (0,00375 \times (H - 400))$$

avec H : altitude en mètres. Ainsi pour H = 800 m on obtient 8,5° soit une variation de 1,5° par rapport à 10°.

***Lors de la remontée vers le griffon**, c'est dans la zone d'hétérothermie annuelle (décrite avant) que les variations de températures de l'eau profonde prennent naissance avec évidemment des variations selon les saisons.

La vitesse de remontée de l'eau au griffon intervient également. Dans une fissure ouverte où l'eau peut circuler à vitesse élevée, les transferts de chaleur eau – terrain sont limités. Dans un milieu poreux où l'eau circule très lentement ce n'est plus la cas.

b) Chaleur d'origine profonde

La température, qui s'accroît en descendant, résulte du calcul du gradient thermique Gt (droite inclinée bleue dans le diagramme précédent).

ba) Première approche de la profondeur de la nappe et évolution de la température du terrain (**roches**) à diverses profondeurs

Flux terrestre

La formule suivante permet de calculer l'évolution des températures de l'aquifère à l'aide du gradient géothermique Gt.

$$H = H_s + (T_s - T_a) \times G_t$$

Avec

H : profondeur de la base de l'aquifère contenant la nappe d'eau minérale (m)

H_s : épaisseur de la zone d'hétérothermie annuelle, valeur égale à la valeur suivante selon le type de roche afin de tenir compte des effets de la chaleur atmosphérique.

Sols ordinaires, formations argilosableuses : 15 à 17 mètres

Couches de calcaire : 24 à 27 mètres

Granite et roches apparentées : 34 à 39 mètres

T_s : température de l'eau au griffon (degrés Celsius)

T_a : température moyenne annuelle de l'air près du site (degrés Celsius)

G_t : gradient (profondeur mesurée selon une verticale pour obtenir un accroissement de 1° Celsius de la température du sol) avec $G_t = K / D$

soit K : conductibilité thermique du terrain (valeur moyenne retenue 0,00429)

D = flux de chaleur constant jour et nuit venant du globe (1,3 10⁻⁶ calorie/cm² sec. en moyenne). Pour mémoire le flux d'origine solaire est nettement plus élevé : 0,18 calorie/cm² sec.

Pour les aquifères liés à une eau thermominérale, la valeur fréquente de G_t est de 33 mètres (soit 1°C tous les 33 mètres) mais les extrêmes moins fréquents sont 10 et 50 m. .

$$G_t = 0,00429 / (0,000013) = 3300 \text{ cm soit } 33 \text{ mètres}$$

Elle peut être plus forte par exemple dans les régions volcaniques où un magma chaud peut être plus proche du sol : en Islande le gradient est de 6°C pour 100 mètres.

Dans les couches très profondes, liées à une subsidence, des valeurs faibles de 5 à 10° par kilomètre existent.

Données sur les températures de l'air (Ta)

Dans le cas de la source Germaine, d'après les données numériques de 1893 (à cette époque le Petit Age Glaciaire se termine mais les températures restaient plus fraîches que de nos jours) :

Température à la source Ts

En 1893 : $T_s = 12^{\circ}5$. Il faut remarquer que la date de mesure n'est pas précisée. Or la température varie dans l'année selon les saisons et plus insensiblement selon les siècles.

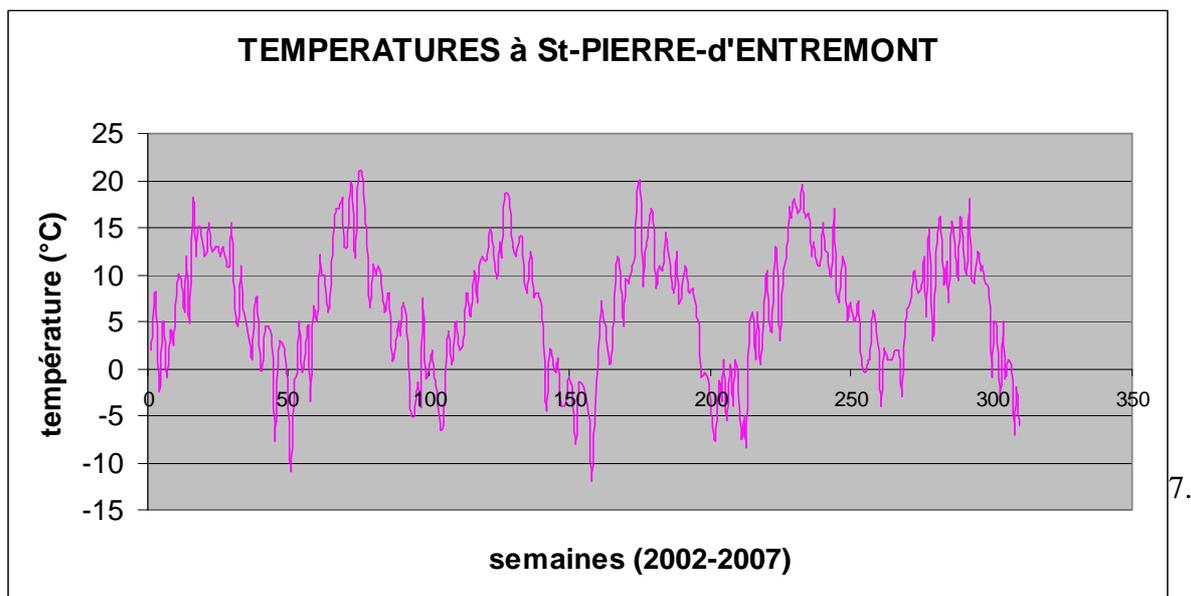
Température moyenne annuelle de l'air Ta

Une station, non officielle, est située près de Saint-Pierre-d'Entremont. Elle est dénommée « Saint-Pierre-d'Entremont – Le château, lieu dit Les Terrays ». Elle est tenue par Paquet Sylvain. Située à une altitude de 870 mètres, il existe des relevés de 2002 à 2007 inclus.

Par ailleurs, la température de la source, relevée en 1893, est influencée par la température de l'air de l'époque, au moment où le Petit Age Glaciaire disparaissait lentement. Enfin, les températures des années 2000, sont à l'inverse dans un contexte (léger) de réchauffement de l'atmosphère.

Pour tenir compte de ces évolutions climatiques, nous avons retenu pour 1893, une valeur égale à celle actuelle mais diminuée de $0,5^{\circ}\text{C}$.

La température moyenne, sur 6 années récentes, est calculée sur les bases suivantes.



La température moyenne annuelle pour cette période est de 6.2°C. A titre de comparaison la température annuelle moyenne relevée à St-Laurent-du-Pont, en bordure mais hors du massif de la Chartreuse, est de 8,2°C (période inconnue – d’après Mollin Joseph, 1966). Des valeurs semblables existent dans le Vercors.

Correction due à l’altitude : on utilise la formule suivante.

$$10^{\circ} - (0,00375 \times (H - 400))$$

Pour H = 870 m (altitude de la station de mesure) on obtient une diminution de 1,76 °C

Pour H = 630 m (altitude de la source) la diminution est de 0,9 °C.

Le 28 mars 2008, les températures suivantes ont été notées :

Eau du Guiers	Eau de la source	Air à la source	Air aux Bandets	différence
6°C	gelée (*)	6.1°C	5.8°C	0.3°C

(*) les mesures ont été effectuées vers 13h30. La source gelée correspond à une température nocturne très basse : c’est un exemple d’hétérothermie journalière.

Le lieu dit Les Bandets est, au lieu de la mesure, vers 870 m d’altitude.

A noter que l’identité des températures eau du Guiers vif – air est conforme à ce qui a été relevé dans le Guiers mort (cf diagramme)

Toutefois comme il s’agit d’une unique mesure, on ne peut la comparer à celle issue du calcul précédent réalisé avec des valeurs moyennes.

La différence avec le calcul est donc de 0,9 °C, valeur qu’il faut ajouter à celle calculée à 870 m d’altitude (augmentation). Enfin, une effet inverse (diminution) est obtenu du fait que la source est au fond d’un vallon encaissé. On peut estimer que ces effets contraires s’annulent.

Donc en résumé :

	années 1890	années 2000
Température my de l'air calculée	$6.2 - 0,5 = 5.7$	6.2
Température my de l'air au griffon (*)	(5.7)	(6.2)
Température de la source au griffon	12°5	non mesurée
Température my de l'eau du Guiers (**)	(5.7)	(6.2)

my = moyenne

(*) : altitude de 640 m

(**) : supposée voisine de celle l'air

Calcul des profondeurs de l'aquifère à partir du gradient thermique

Les données suivantes sont à prendre en compte.

Température instantanée de la source T_s : 12.5°C en 1893.

Epaisseur de la zone d'hétérothermie annuelle : 20 m.

Gradient géothermique : pris égal à 1°C pour 33 mètres.

Température moyenne annuelle du Guiers : 5.7°C donc proche de celle de l'air.

bb) calcul des températures des roches et de l'eau de la nappe pour différentes profondeurs

La formule précédente permet de calculer, à partir de la température de l'eau de la source au griffon T_s , la profondeur H de la base de l'aquifère.

Le calcul des températures de la nappe, et donc de l'eau souterraine dans sa branche descendante ainsi que dans sa branche montante vers le griffon de la source, est plus complexe.

En effet la chaleur ne se propage pas dans les mêmes conditions dans une roche (solide) et dans l'eau (liquide). De ce fait, lors de la descente de l'eau puis de la remontée vers le griffon, les températures du terrain et de l'eau (hormis au point d'équilibre) ne sont pas identiques.

Dans la branche descendante, les températures de l'eau sont inférieures à celle des roches.

Dans la branche ascendante, c'est l'inverse : l'eau est plus chaude que la roche. Toutefois pour la source Germaine, comme les profondeurs et les distances (projetées au sol) sont réduites, les différences restent faibles. A la remontée, la

présence - très probable - d'un conduit isolé du Guiers, assure une remontée rapide et une déperdition de chaleur minime (liée à la conductivité thermique notée K dans les formules suivantes).

Cette dualité du comportement entre l'eau et les roches est à relier aussi à la chaleur spécifique (C dans les formules suivantes) c'est-à-dire la quantité de chaleur qu'il faut apporter au fluide, au solide, pour accroître sa température de 1°Celsius (et l'inverse pour le refroidissement).

Roches	Chaleur spécifique Unités CGS	Chaleur spécifique Unités Internationales J/KG .K	Conductivité thermique 10 ⁻⁵ CGS	Conductivité thermique Unités Internationales W/m.K
Marnes	0,19	826	220 à 520	1,04 à 1,4
Calcaire	0,20	846	200 à 800	1 à 2,1
Air	0,23	966	/	/
Eau	1	4200	/	/

Fig : Chaleur spécifique = chaleur massique = capacité thermique = chaleur spécifique massique et conductivité thermique des roches, de l'air et de l'eau.

La chaleur spécifique de l'eau est très élevée.

D'après le tableau précédent, d'après la chaleur spécifique, il faut donc apporter cinq fois plus de calories pour l'eau que pour les roches présentes dans les formations du Berriasien.

La conductivité thermique permet de comprendre comment un flux de chaleur se propage dans le milieu considéré. Les marnes ont une conductivité plus faible que les calcaires.

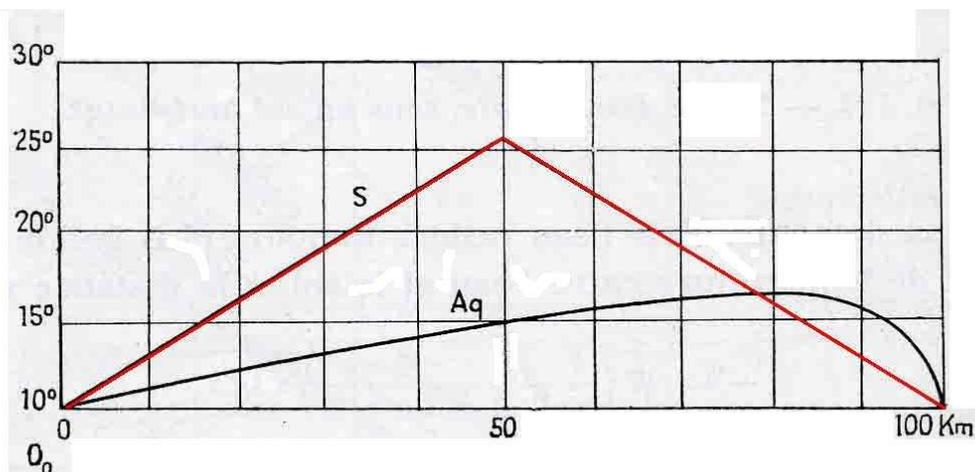


Fig : courbe relative à un aquifère avec une nappe d'eau souterraine, d'abord descendante puis montante. La courbe rouge (Sol) est celle des températures des roches et la noire (Aqua) celle

de la température de l'eau. Le point d'équilibre est atteint lors de la remontée. Lors de la descente (à gauche) la roche est plus chaude que l'eau ; lors de la remontée (à droite) c'est l'inverse.

On constate que la courbe des températures de l'eau n'est pas superposable à celles des températures des roches.

Les formules (en unités CGS) utilisées sont du type : t_e est fonction de h

$$t_e = t_H - G * h + (G/a * \sin p) * (1 - \exp^{-(a * h / \sin p)})$$

avec :

t_e : température de l'eau à la profondeur h

t_H : température de la roche à la profondeur H (base de l'aquifère) A calculer avec le gradient géothermique.

h : profondeur (< à H) pour laquelle on calcule t_e (cm)

G : gradient géothermique (3300 cm)

$$a = 2 * K / (C * q * R1)$$

K : coefficient de conductibilité (0,00429)

C : chaleur spécifique de l'eau (1,00)

$R1$: distance, à partir du flux d'eau, à laquelle les isothermes ne sont plus modifiés par les échanges eau - roche (entre 1000 et 1500 cm)

q : débit du flux d'eau avec $q = V * e$ V étant la vitesse de l'eau (cm/s)

et $e = E * Se$ E étant l'épaisseur du flux (cm) et Se (%) la porosité efficace de la roche

p : pente du flux (radians)

Cette formule utilisée pour le mouvement ascendant est plus simple que celle du mouvement descendant.

AQUIFERE A INTERSTICES, NAPPE DESCENDANTE PEU INCLINEE

température au départ en haut (t moyenne air) d°C	6,2	6,2	6,2	6,2
paramètre D (constante)	1,6E-06	1,6E-06	1,6E-06	1,6E-06
pente de la couche (d°)	5	5	5	5
pente en radian	0,087266	0,087266	0,087266	0,08727
paramètre K	0,0043	0,0043	0,0043	0,0043
vitesse de l'eau (cm/s)	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002
épaisseur réelle de la couche (cm)	3000	3000	3000	3000
porosité efficace (0,xx)	0,2	0,2	0,2	0,2
x = distance horizontale (entre le haut et le point à calculer) (cm)	100000	200000	300000	350000
e = épaisseur cumulée des vides de la couche (cm)	600	600	600	600
<i>résultats</i>				
A la distance x de (m)	1000	2000	3000	3500
et à la profondeur de (m)	87	175	262	306
température de l'eau (d°C)	8,82	11,43	14,05	15,36
température du terrain (d°C)	8,85	11,50	14,15	15,48
différence t terrain - t eau	0,03	0,07	0,10	0,12

Fig : calcul de la descente de l'eau de Saint-Même à Saint-Pierre-d'Entremont (sur une distance de 3500 m et jusqu'à 300 m de profondeur)

REMONTÉE EAU CHAUDE DANS CONDUIT DE FAIBLE DIAMÈTRE

K	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
flux de chaleur D	0,0000016	0,0000016	0,0000016	0,0000016	0,0000016	0,0000016
rayon conduit (cm)	10	10	10	10	10	10
vitesse eau (cm/s)	0,0011574	0,0011574	0,0011574	0,0011574	0,0011574	0,0011574
distance R1 (cm)	15000	15000	15000	15000	15000	15000
angle du conduit (d°)	5	5	5	5	5	5
angle du conduit (radian)	0,0873	0,0873	0,0873	0,0873	0,0873	0,0873
to température eau au fond (d°C)	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5
t température eau au sol (d°C)	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
ts température roche au sol (d°C)	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
calcul x: distance au sol (cm)	1000	10000	15000	50000	100000	114250
profondeur ho au fond (cm)	10000	10000	10000	10000	10000	10000
<i>calculs intermédiaires</i>						
a =	0,0212656	0,021265597	0,0212656	0,0212656	0,0212656	0,021265597
D tg angle/K	0,01555354	0,155535419	0,23330313	0,7776771	1,55535419	1,776992163
to-ts e	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000
D/K ho + tg angle / a * ()	1,77850917	1,778509172	1,77850917	1,77850917	1,77850917	1,778509172
<i>résultats</i>						
calcul : distance x au sol (m)	10	100	150	500	1000	1142,5
xo distance affleurement (m)	1143	1143	1143	1143	1143	1143
profondeur d'origine ho (m)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
profondeur h pour x (m)	0,9	8,7	13,1	43,7	87,5	100,0
température d'origine à ho (d°C)	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5
<i>calcul intermédiaire</i>	16,3	16,1	16,0	15,5	14,7	14,5
<i>calcul intermédiaire</i>	1,8	1,6	1,5	1,0	0,2	0,0
température de l'eau à h (d°C)	12,7	12,9	13,0	13,5	14,3	14,5
température roche à h (d°C)	6,5	6,8	6,9	7,8	9,2	9,5

Fig : calcul des températures de la roche et de l'eau remontant dans un conduit sous et vers le griffon de la source Germaine

(sur ce tableau l'eau « remonte » de droite à gauche)

Les résultats sont les suivants. Pour la descente, les calculs sont exécutés selon un profil de terrains en allant de l'est vers l'ouest sur 3500 m (du hameau de Saint-Même à Saint-Pierre-d'Entremont) et ceux pour la remontée selon une coupe transversale, verticale, au Guiers vif.

PK (distance au sol) (m) (*)	Profondeurs (m)	températures de l'eau (°C)	températures des roches (°C)
mouvement descendant			
0	0	6,2	6,2
1000	80	8,8	9
2000	175	11,4	12
3000	260	14,0	14,2
3500	300	15,4	15,4
mouvement ascendant (à la verticale de la source)			
/	100	(14,2)**	10,5
/	0	12,5	6,2

(*) PK zéro à Saint-Même

** : comme la source est à 200/250 m plus bas que le haut des collines, cette température est celle de cette profondeur (voir le début du tableau) : la température s'ajuste donc progressivement entre ces deux situations (voir la coupe avec les températures).

La coupe suivante présente l'évolution des températures au dessus de la source.

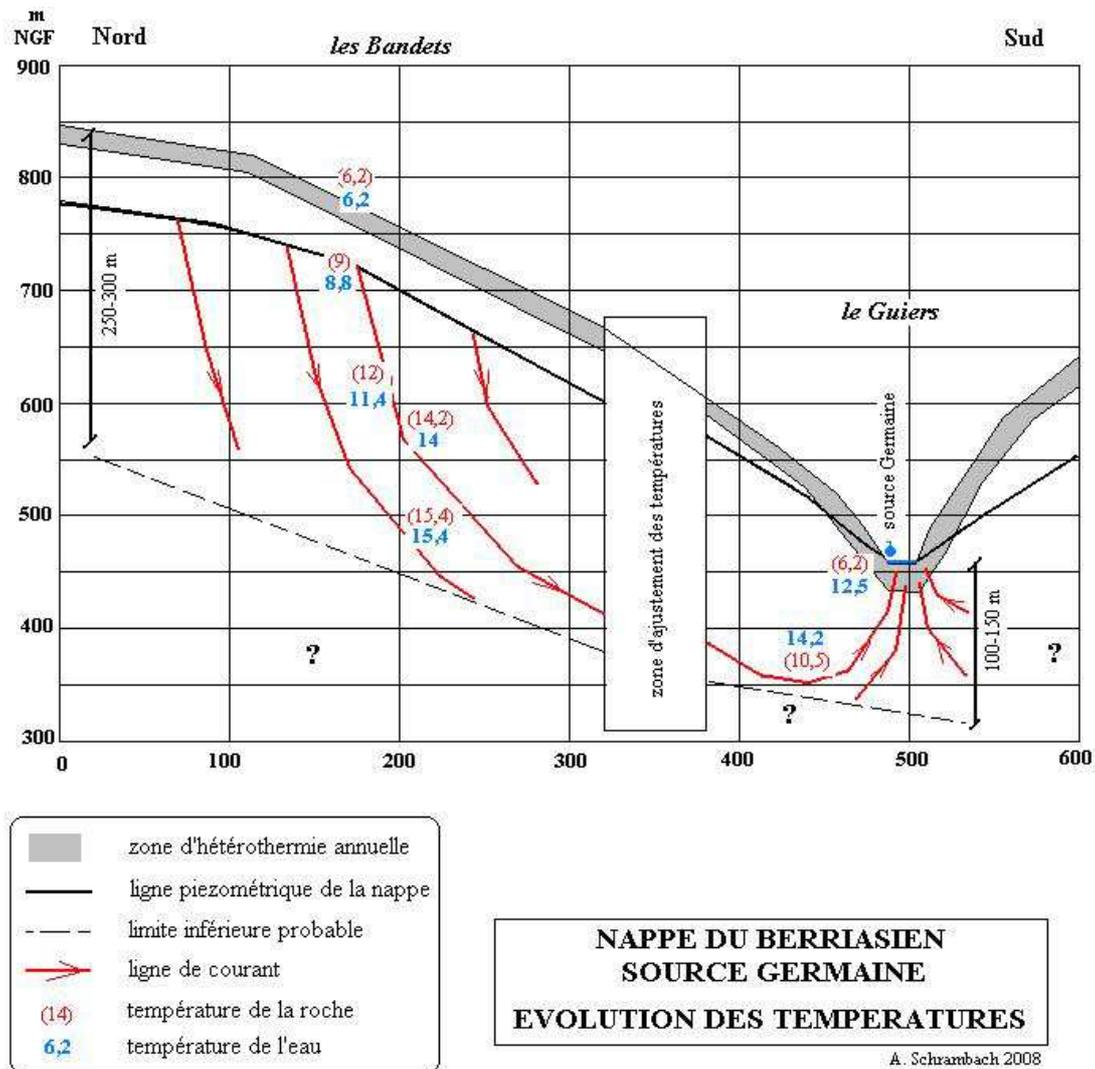


Fig : à gauche les calculs correspondent à une profondeur qui peut atteindre 300 mètres. A droite, à la verticale du griffon, la profondeur n'est plus que de 100 mètres puisque le griffon est au fond du sillon du Guiers.

Il y a donc une zone intermédiaire (représentée par le rectangle) qui est une zone de transition, non calculée.

Flux thermique du Guiers vif.

A la remontée de l'eau vers le griffon, la zone d'hétérothermie annuelle est influencée par la présence du Guiers vif. Le front thermique dû à la présence de l'eau du torrent provient de l'effet régulateur de l'eau pour les températures (effet de tampon thermique qui un reflet pour l'eau et l'air de ce qui se passe pour la roche et l'eau).

En effet le diagramme suivant montre que lorsque la température de l'air oscille entre -7° et $+8^{\circ}$ celsius, la température de l'eau oscille entre $+2^{\circ}$ et $+6^{\circ}$ celsius. : il y a un effet d'amortissement des extrêmes. Toutefois au niveau des moyennes annuelles les valeurs pour l'air et le torrent sont voisines (voir les valeurs pour la Fure dans l'annexe 1).

Ce front thermique va régulariser les effets provoqués par les températures de l'air. En hiver la température de ce front sera plus forte que celle de l'air et en été ce sera l'inverse. De même les variations journalières dans la zone d'hétérothermie seront laminées. Au niveau des moyennes annuelles, l'effet n'apparaît pas.

Le dessin suivant montre qu'un front thermique (isothermes) se propage dans les rochers du lit et vient baigner la (ou les) fissures ou conduits apportant l'eau sulfureuse. A noter que l'influence d'une eau à température donnée disparaît dans le rocher encaissant au-delà d'une distance de 10 à 15 mètres (voir le paramètre R1 de la formule précédente). A noter que les températures de 6°C dans le Guiers et également de 6°C dans l'air à la source ont été mesurées le 28 mars 2008 ce qui montre leur identité près des moyennes.

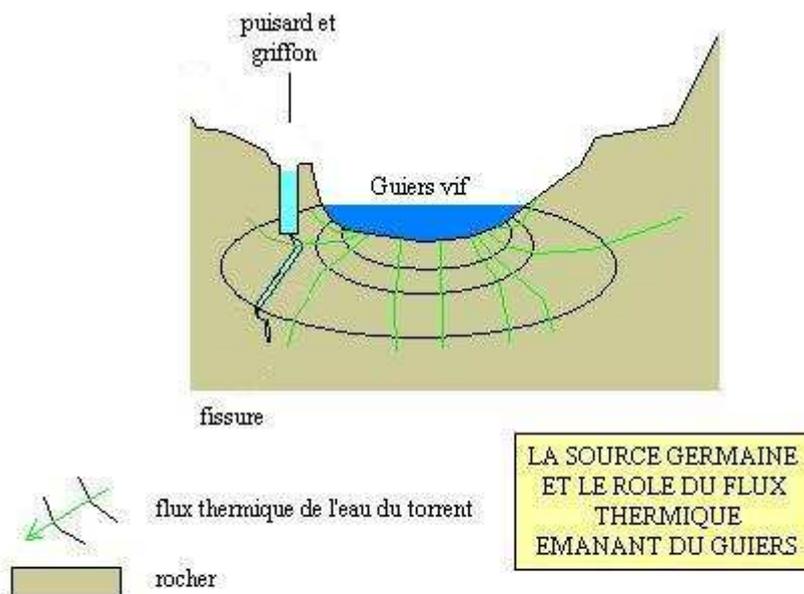
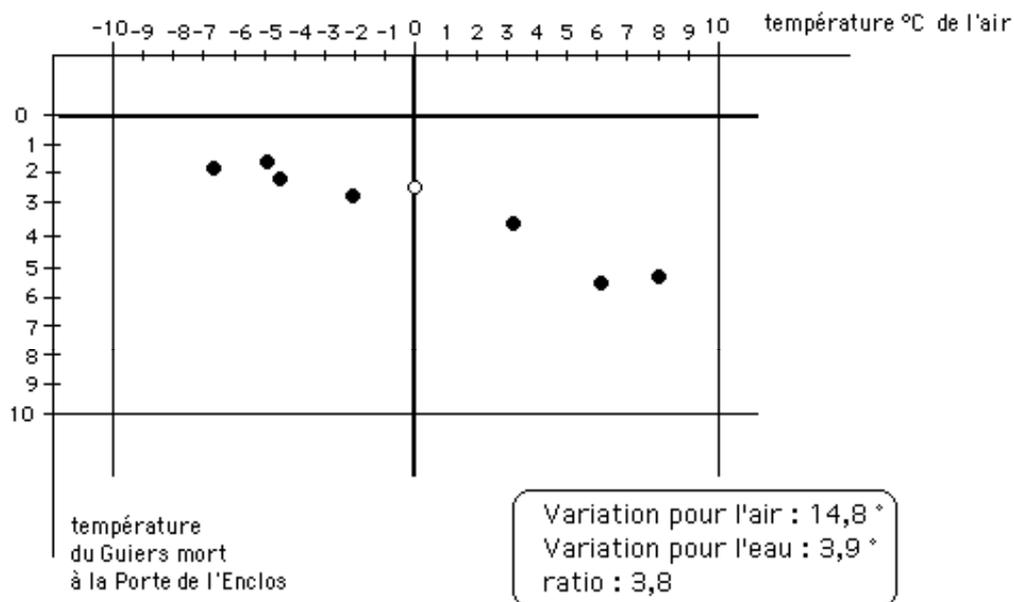


Fig : le flux thermique modérateur des eaux du Guiers vif

Fig : relation entre la température de l'air et celle du Guiers mort avec son effet modérateur (-7° dans l'air correspond à +2° dans le Guiers et +9° dans l'air correspond à +5,5° dans le



MASSIF DE LA CHARTREUSE
TEMPERATURES COMPAREES DE L'AIR
ET DU GUIERS MORT A LA PORTE DE L'ENCLOS
HIVER 2007-2008

G. Remillier 2008
A. Schrambach

Guiers. Une variation de 16° dans l'air correspond à une variation de 11° dans le Guiers).
Ce graphique est l'illustration du rôle des chaleurs spécifiques de l'eau et de l'air.

Profondeur d'après les données géologiques

Le contexte géologique et topographique est le suivant.

Les calcaires et les marnes du Berriasien ont une épaisseur de l'ordre de 150 à 200 mètres. Par ailleurs la source est dominée par des collines dont le sommet atteint 900 m juste au dessus de la source et de 1000 m près des Grattiers à l'est. En rive gauche (au sud) elles vont de 800 à plus de 1000 m.

Le Berriasien, sous un couvert de dépôts glaciaires du Würm (à l'ouest) ou d'éboulis fixés (à l'est et au sud ouest) est présent partout mais fortement tectonisé comme le montre les coupes suivantes (le prolongement nord du synclinal du Sappey est sous la source).

Dans ces conditions une profondeur de l'aquifère d'au moins 250 m est compatible avec les épaisseurs annoncées d'après les calculs géothermiques.

*** Si on se réfère à la définition d'une source thermale (voir l'annexe 1), la source Germaine est simplement minérale car sa température est basse (eau hypothermale) , mais elle fait néanmoins l'objet d'applications thérapeutiques. Les calculs conduisent à une profondeur moyenne de l'aquifère et son mode d'écoulement est gravitaire avec effet de drainage par le Guiers.**

ANNEXE 4

ANALYSES CHIMIQUES

Remarque

En avril 2010 lors de la reconnaissance des lieux de la source Germaine, par les membres du comité de la Communauté de Communes, un brassage énergétique du fond de la descenderie (eau et surtout les boues) a été réalisé.

De nombreuses bulles sont remontées à la surface et une vigoureuse odeur d'œuf pourri est apparue.

A noter que le gaz H₂S est très corrosif (calcaire, cuivre, ciment gris etc) mais est de plus toxique et ceci pouvant entraîner la mort des hommes et des chevaux. Pour les hommes la dose limite en 8 heures est de 5 ppmv (partie par millions en volume). Les ouvriers doivent porter des combinaisons et des masques.

Source Germaine :

* Analyse de 1893

L'analyse chimique réalisée en 1893, est présentée, comme cela se pratiquait autrefois, en recombinaison (d'une manière arbitraire) les ions pour former des sels (d'abord les chlorures, puis les sulfates et enfin les carbonates).

De façon à l'intégrer dans le système de présentation moderne, à l'aide des masses moléculaires et des valences de chaque ion, nous avons calculé les quantités en milligrammes des anions et des cations. Le tableau suivant montre ces calculs.

St-PIERRE-D'ENTREMONT - Source sulfureuse Germaine - analyses de 1893

sel	masse mg/l	anion	masse molécul. mg/l	valence	cations	masse molécul. mg/l	valence	calcul anion mg/l	calcul cation mg/l	masse totale mg/l
SO ₄ Mg	38	SO ₄	96	2	Mg	24	2	30,40	7,60	38,00
SO ₄ Na	354	SO ₄	96	2	Na	23	1	239,32	114,68	354,00
CO ₃ Ca	12	CO ₃	61	2	Ca	40	2	7,25	4,75	12,00
CO ₃ Na	520	CO ₃	61	2	Na	23	1	296,45	223,55	520,00
ClK	147	Cl	35,5	1	K	39	1	70,05	76,95	147,00
ClNa	145	Cl	35,5	1	Na	23	1	87,99	57,01	145,00
SNa	75	S	32,06	2	Na	23	1	30,80	44,20	75,00
BrNa	3,2	Br	80	1	Na	23	1	2,49	1,43	3,91
I ₂ Na	1,9	I	127	1	Na	23	1	1,61	0,29	1,90
									Résidu sec mg/l	1297

ANIONS ET CATIONS				EQUILIBRE DES MILLIEQUIVALENTS			
SO4	269,72	Mg	7,60	SO4	5,62	Mg	0,63
CO3	303,70	Na	441,15	CO3	4,98	Na	19,18
CL	158,04	Ca	4,75	Cl	4,45	Ca	0,24
Br	2,49	K	76,95	Br	0,03	K	1,97
I	2,03			I	0,02		
S	30,80			S	0,96		
total	767		530	total	16		22
mg/l				milliequi			
				v.			

Il faut ajouter du soufre, du brome et de l'iode. L'analyse de 1893 cite « *odeur légèrement sulfureuse et saveur franchement sulfureuse* ».

Il faut ajouter également mais en quantités infimes « *du fer et de l'alumine ainsi que de la silice et de l'acide phosphorique* ».

La présence d'H²S libre (gaz) avec son odeur caractéristique d'œufs pourris n'est pas signalée dans ces analyses mais l'est par les personnes interrogées. En effet ce composé est abondant et est caractéristique des milieux riches en sulfures.

Film rouge bactérien (?)

Lors des crues de la source (correspondant à une recharge de la nappe par les pluies) il y a un débordement sur le sol du puisard avec des dépôts rouges.

Lors d'un pompage récent (fin 2006), une branche plongée dans le puisard est ressortie rouge. Les parois du puisard et le sol autour du regard présentent les mêmes dépôts.

Il pourrait d'un film bactérien avec des sels de fer. Il est connu que le fer forme des composés complexes organométalliques rouges et orangés.

Ce type de dépôt a été constaté également par Fettaz Roland, à 100 m de l'auberge en haut du cirque de Saint-Même où il existe une source qui donne le même genre de dépôt. Sortant des éboulis elle pourrait être alimentée par une nappe du Berriasien. Enfin de tels dépôts rouges existent sur les galets du lit de la Fure au Rivier d'Apprieu.

L'analyse de 1893 montre un profil hydrochimique est celui d'une eau carbonatée sodique avec des sulfates abondants (et sulfurée à cause du H₂S).

Forage de Saint Môme :

* Analyse de 2000

St-PIERRE-D'ENTREMONT - eau du forage de saint Môme - analyses de 2000

ANIONS ET CATIONS (mg/l)				VERIFICATION EQUILIBRE DES MILLIEQUIVALENTS			
SO4	35	Mg	4,6	SO4	0,73	Mg	0,38
HCO3	379,4	Na	148	HCO3	6,22	Na	6,435
CL	5,4	Ca	10,1	CL	0,15	Ca	0,5
CO3	9,6	K	1,9	CO3	0,32	K	0,049
nitrites	0,04	fer dissous	0,39	nitrites	0,001	fer dissous	0,014
nitrates	0,2	aluminium	0,07	nitrates	0	aluminium	0,008
fluorures	2,2			fluorures	0		
total	432		165	total	7,42		7,39
mg/l				milliequiv.			

AUTRES INFORMATIONS

date prélèvement : 27 09 2000
odeur de soufre
conductivité à 20°C 556 microsiemens / cm
pH à 20° C : 8,64
résidu sec à 180°C : 405 mg/l
CO2 libre <1 mg/l
H2S : 0,5 mg/l

r SO4 / r Cl 4,866667
r Mg / r Ca 0,76
(r Cl - r Na) / r
Cl -41,9

L'analyse de 2000, montre un profil carbonaté sodique et peu de sulfates (et sulfuré à cause du H2S).

La comparaison des eaux

La comparaison des eaux se fait en calculant les ratios suivants (avec les valeurs en milliéquivalent ou meq) et en utilisant le graphique semi logarithmique (présenté dans le texte principal). Comme l'eau du forage de Saint Môme est peu profonde et celle de la source, on peut analyser l'évolution de la chimie de l'eau sulfurée de l'amont vers l'aval et du haut vers le bas.

Caractéristiques	forage de Saint-Même (2000)	source 1893	source 2008
Température	(8°C)	12.5°C	?
Profondeur	(60m)	(250/300m) *	idem *
Résidu sec (mg/l)	405	(1400 ?)	? **
<u>Ratios</u> (en milliéquivalents r) :			
rSO4			
----- =	4,86	1.25	?
rCl			
rMg			
----- =	0,76	2.62	?
rCa			

* : la profondeur qui a donné la température de 12,5°C est de l'ordre de 250/300 m, mais celle de la source est plus faible puisqu'elle est au fond du lit du Guiers très encaissé ce qui réduit l'épaisseur.

** : les calculs n'ont pas été effectuée en 2008 puisqu'il n'y a pas eu d'analyse.

Les ratios précédents montrent qu'avec l'accroissement de la profondeur les chlorures augmentent et que la calcium régresse.

Nature des roches et chimisme des eaux

* Les eaux issues des calcaires ont en général :

$rCO_3 > rSO_4$, or ici

en 2000 : $rCO_3 = 0.32$ et $rSO_4 = 0.73$ meq

en 1893 : $rCO_3 = 4.98$ et $rSO_4 = 5.62$ meq donc dans les deux cas les sulfates dominant

et $rCa > rMg$ ou rNa or

en 2000 : $rCa = 0,50$ et $rMg = 0.38$ et $rNa = 6,43$ meq

en 1893 : $rCa = 0.237$ et $rMg = 0.63$ et $rNa = 19.18$ meq donc dans les deux cas le sodium domine.

* Au contact des argiles et marnes, le résidu sec est important (ce qui est le cas en 1893 mais de plus cette eau est à grande profondeur et a parcouru un trajet important), rSO_4 et rNa dominant.

* Donc la chimie de l'eau de la nappe du Berriasien est nettement influencée par les lits marneux dont les sulfates par réduction ont donné les sulfures. Il faut noter que les sulfures sont peu abondants (sinon les sulfates auraient dû fortement régresser) et l'odeur d' H_2S n'est pas toujours nettement marquée (C'est le cas de la source et non celui du forage : cela pourrait venir du type de captage et de son ancienneté – dégazage -).

L'eau circule, lentement car la perméabilité est faible, dans les microfissures des petits bancs calcaire et draine l'eau des marnes. L'eau qui sature ces marnes, reste en contact avec elles longtemps et se charge en sels solubles. Cette eau minéralisée se dilue dans le faible courant d'eau des fissures précédentes.

Il pourrait être intéressant de dater les eaux (par dosage du tritium par exemple) de façon à mieux déterminer le taux de renouvellement.

Conductivité des eaux et relation avec le résidu sec.

Le graphique suivant permet de placer les deux points mesurés dans la nappe d'eau sulfurée du Berriasien.

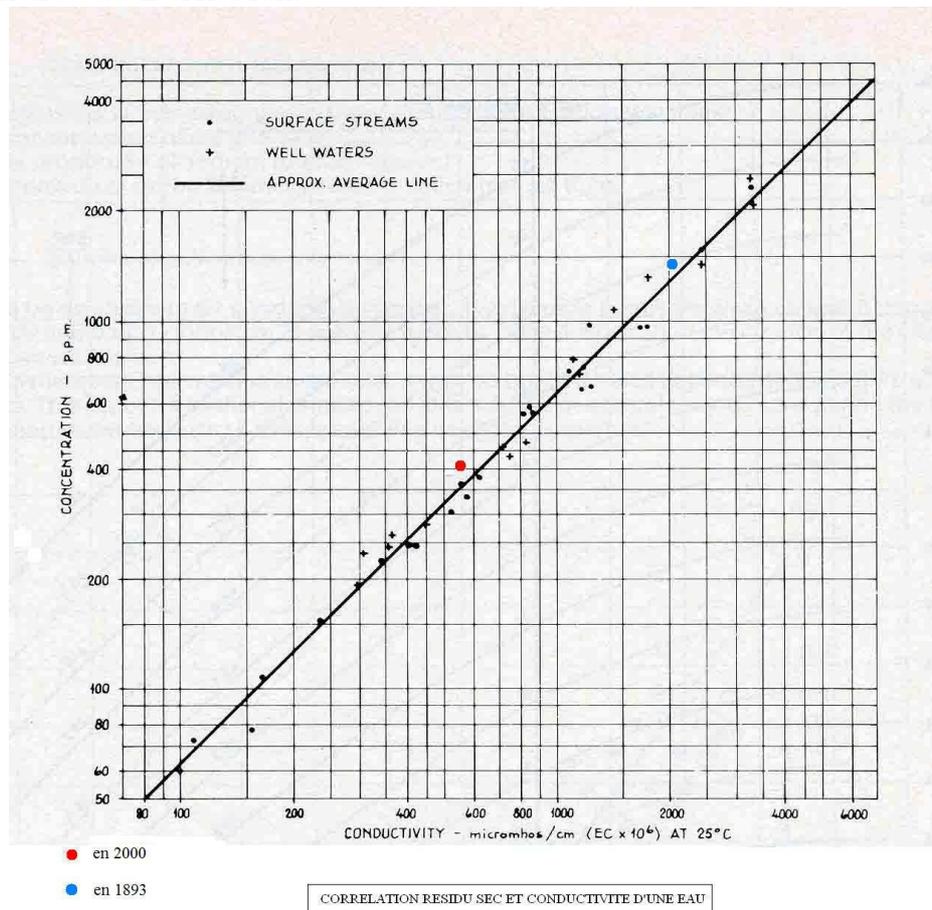


Fig : Le graphique montre les mesures connues (1893 et 2000) de résidus secs et de conductivités de l'eau (points colorés), placées selon une droite de corrélation. En mesurant la conductivité sur d'autres eaux (cette mesure peut se faire sur place) on peut accéder au résidu sec.

LES EAUX SULFUREES

COMPARAISON DES 6 ANALYSES D'EAU

A. Schrambach 30-05-2008
(5 pages)

On dispose de 6 analyses d'eaux issues du massif de la Chartreuse, du Vercors, de Belledonne et des Pyrénées :

- 5 sont publiées en 1893 dans les statuts de la Société des Eaux Minérales de Saint-Pierre-d'Entremont (dont celle de la source Germaine).
- 1 a été réalisée en 2000, à l'issue du fonçage du forage de Saint Môme.

Les statuts ont une orientation très « publicité » et concluent à une forte similitude entre les eaux de la source Germaine et celles de Challes-les-Eaux, de Bagnères-de-Luchon, de Barèges et de Choranche (près de Pont-en-Royans dans le massif du Vercors).

Qu'en est-il réellement ?

Les 5 vieilles analyses sont présentées en sels, recomposés d'une manière arbitraire, comme cela se pratiquait au XIXe siècle. De nos jours on conserve la présentation en ions (cations et anions). Ceux-ci ont donc été recalculés. Celle de l'eau du forage de Saint-Môme a été insérée dans ce tableau.

ions	s. Germaine	Challes	Bagnères	Barèges	Choranche	St-Môme
anions						
SO4	269,7	43,13	41,58	51,85	75,60	35
CO3	303,7	271,81	225,19	0	0	379,4
Cl	158	94,30	46,85	25,37	71,74	5,4
Br	2,5	2,95	0	0	0	?
I	2	104,14	0	0	0,42	?
S	30,8 *	147,44	2,34	0,29	20,54	H ² S **
cations						
Mg	7,6	0	0	0	18,90	4,6
Na	441,2	483,69	223,45	41,69	70,15	148
Ca	4,75	30,57	0	0	0	10
K	76,95	0	0	0	9,95	1,9
résidu sec	1415	1345	516	270	492	405

* : odeur peu marquée d'après les observateurs ** : odeur forte

Fig : les résultats des 6 analyses en ions (mg/litre)

Le graphique suivant montre les profils hydrochimiques de ces eaux.

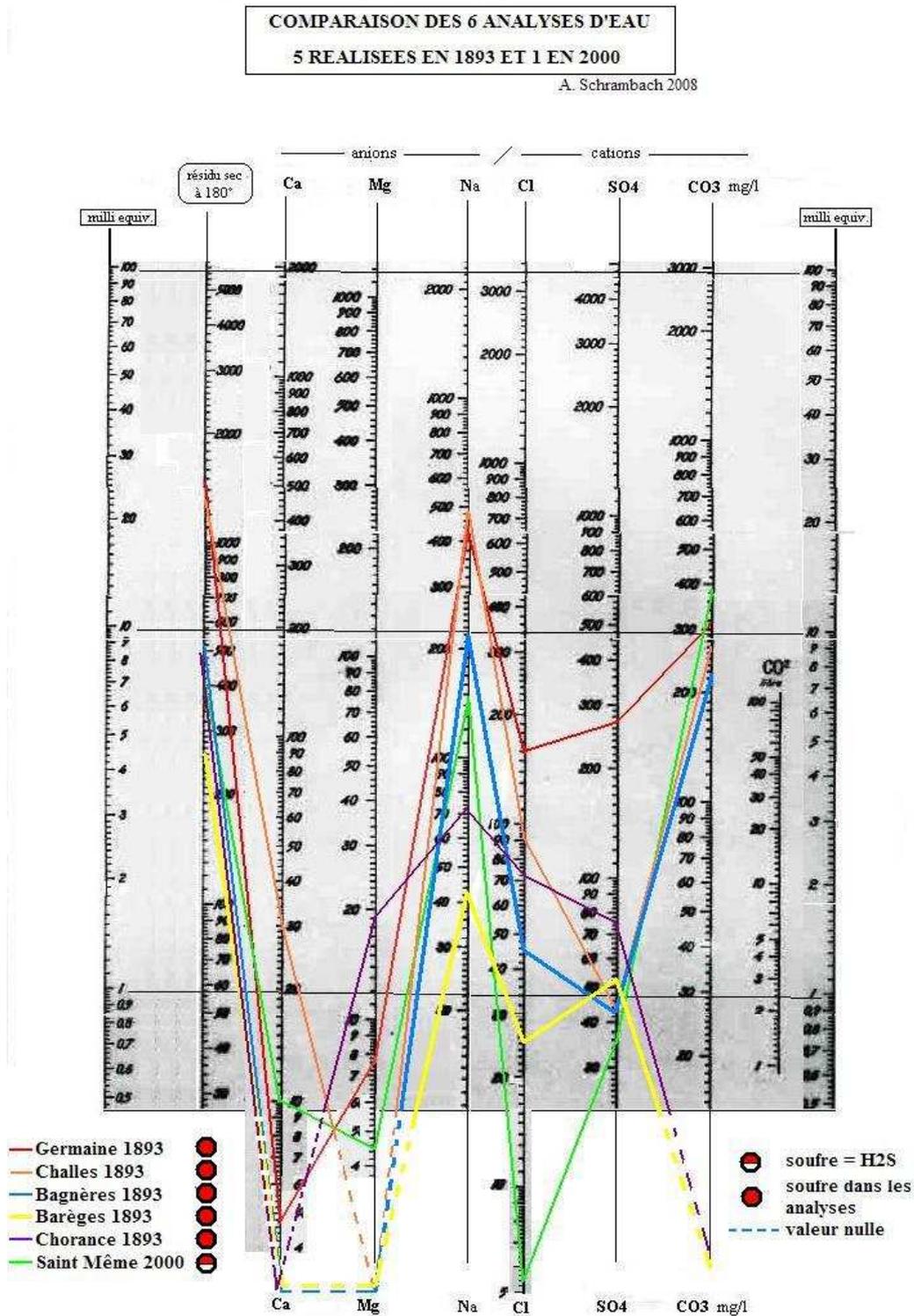


Fig : les profils hydrochimiques des 6 eaux sulfurées

Le tableau suivant montre les analyses en milli équivalents, ce qui permet de calculer des ratios et de comparer toutes ces eaux.

ions	s. Germaine	Challes	Bagnères	Barèges	Choranche	St-Même
anions						
SO4	5,62	0,9	0,87	1,08	1,58	0,73
CO3	4,98	4,46	3,69	0	0	6,22
Cl	4,45	2,66	1,32	0,71	2,02	0,15
Br	0,03	0,04	0	0	0	?
I	0,02	0,82	0	0	0,42	?
S	0,96	4,61	0,07	0,01	0,64	H ² S
cations						
Mg	0,63	0	0	0	1,58	0,38
Na	19,18	21,03	9,72	1,81	3,05	6,43
Ca	0,24	1,53	0	0	0	0,5
K	1,97	0	0	0	0,26	0,05
résidu sec	1415	1345	516	270	492	405

Fig : les résultats des 6 analyses en ions (milliéquivalents)

Examen des données numériques

Les sulfures

La caractéristique principale est la présence de sulfures qui dérivent des sulfates. En principe, plus il y a de sulfures et moins il devrait y avoir de sulfates.

Les ratios $r\text{SO}_4 / r\text{S}$ sont les suivants ($r\text{SO}_4$ signifie SO_4 en milli équivalents)

ratio	s. Germaine	Challes	Bagnères	Barèges	Choranche	St-Même
$r\text{SO}_4/r\text{S}$	5,85	0,19	12,43	108	2,47	/

Fig : ratios $r\text{SO}_4 / r\text{S}$

On constate une forte disparité entre les différentes eaux :

- ratio très faible à Challes (donc peu de sulfates et beaucoup de sulfures) et très fort à Barèges (sulfures très faibles).
- à Bagnères et à Barèges, la teneur en sulfures est très faible.
- à la source Germaine, les sulfates sont les plus abondants des 6 eaux.
- au forage de Saint-Même, bien que les sulfures n'aient pas été mesurés, les sulfates sont réduits et l'odeur d'H₂S forte : ceci devrait se traduire par un ratio faible.
- la moyenne est de 25,79 et sans tenir compte de la valeur exceptionnelle de Barèges, elle devient 4,19, valeur proche de la source Germaine ce qui correspond à une présence de sulfates marquée .

Au forage de Saint-Même, la présence de sulfures est notée par l'odeur spécifique d'œufs pourris donc d'H₂S. Par contre, à la source Germaine cette odeur est peu perçue. D'ailleurs dans le texte des statuts de la société il est écrit « ... ou vendue comme eau de table ... elle est moins désagréable que celle de Challes » ce qui est en relation directe avec la teneur en sulfures de ces deux eaux (Challes et source Germaine). Le fait d'être utilisée comme eau de table, montre qu'elle n'a pas d'odeur.

Le brome et l'iode

Ils n'existent qu'à la source Germaine et à Challes ... ou bien ils n'ont pas été mesurés dans les autres eaux comme au forage de Saint-Même (?).

Les autres ions

Les anions : absence de CO₃ à Barèges et Choranche. Ceci est à relier à l'environnement pétrographique de l'aquifère.

Les cations : absence de Mg à Challes, Bagnères et Barèges.

Absence de Ca à Bagnères, Barèges et Choranche.

Absence de K à Challes, Bagnères et Barèges.

A l'inverse les analyses des eaux de la source Germaine et du forage de Saint-Même montrent une présence de tous ces éléments (rappelons que l'environnement géologique est le même pour ces deux eaux).

Les résidus secs

Ils se répartissent en deux groupes :

- ceux avec un RS supérieur à 1000 mg/litre : source Germaine et Challes
- ceux avec un RS inférieur à 1000 mg/litre : les 4 autres eaux.

En conclusion,

Les eaux de Challes-les-Eaux et de la source Germaine présentent des analogies (teneurs en sulfates et en iode exceptées) et sont toutes les deux des eaux carbonatées, sodiques, sulfurées, bromurée et iodée. A l'inverse de celle de Challes, l'eau de la source Germaine « ... *n'a pas d'odeur nauséabonde* ... »

Les caractéristiques des autres eaux s'en éloignent (en particulier Barèges). On ne peut accepter comme écrit dans les statuts de la société que « *leurs propriétés sont à peu près les mêmes* ».

Cette diversité apparaît bien dans le diagramme des profils hydrochimiques.

ANNEXE 5

COMPLEMENTS (travaux de 2011)

13 pages 11 figures

A. Schrambach 31 01 2012

Durant l'hiver 2011, des travaux ont été exécutés sur le site, par une entreprise spécialisée, à l'instigation de la Communauté de Communes des Entremont.

En vue d'un aménagement touristique, les travaux consistaient :

- Dans la descenderie (pleine d'eau à ras bord avant travaux) à pomper l'eau et à curer cette cavité.
- Dans le puisard du griffon de la source : même travaux et là également l'eau était à ras bord donc au même niveau que dans la descenderie.
- A vérifier l'état de la cloison maçonnée entre les deux cavités.



Fig : le site de la source dégagé lors des travaux de janvier 2011. Le Guiers vif à l'extrême droite, la descenderie avec le plan d'eau bordé par les roches du Berriasien et à gauche le trapon du puisard de la source sulfureuse Germaine (avec les 5 rondins).

Cette plateforme est placée au dessus des grosses crues du torrent.

A noter que ces travaux ont été réalisés en hiver (janvier 2011) donc (à cause de la rétention nivale) au moment des basses eaux tant pour le Guiers vif que pour la nappe d'eau souterraine.

La descenderie

Travaux de pompage réalisés sans difficultés. Au fur et à mesure de la baisse du plan d'eau, on curait le trou (avec remontée par une grue).



Fig : le fond de la descenderie une fois l'eau pompée. Les murs taillés dans le rocher sont recouverts d'une couche de mortier lissé.

Dans cette descenderie, il y avait des blocs de rochers éboulés, beaucoup de vase noirâtre et des planches correspondant à l'escalier en bois pour atteindre le fond.



Fig : les restes de l'escalier et des plateformes (encore couvertes de feuilles, branches, vases etc) dans la descenderie

L'odeur forte d'H₂S, au début s'atténua et les ouvriers au fond travaillaient sans masque, ni ligne d'air.

Un fois le niveau d'eau au plus bas, l'ensemble est resté sec. Les parois de la descenderie sont maçonnées et (plus ou moins) en bon état.

Le puisard de la source.

Même constat avec quelques petits madriers tombés au fond, volume de vase réduit : en effet le trou de communication avec l'air libre étant de faible section, peu de matériaux sont tombés dans le puisard.

Par contre, à l'issue de pompage, l'eau issue de la nappe n'est pas remontée dans le puisard qui est resté sec. Le fond du puisard est largement sous le niveau du Guiers vif.

En haut, la petite surverse (avec retour au Guiers) a été aperçue : la dimension du trappon rend difficile ce genre d'observation.

La cloison entre les deux cavités

Recouverte, côté descenderie, d'un enduit de ciment elle ne présente pas de fissures (tout du moins sur les $\frac{3}{4}$ de sa hauteur à partir du haut.

Les petits tuyaux liés aux robinets ainsi q'un robinet ont été vus côté descenderie.



Source germaine

Le robinet situé sur la cloison maçonnée (côté descenderie) séparant le puisard du griffon de la descenderie (2010).

Fig : le robinet fixé sur la cloison séparant les deux cavités (vue côté descenderie). Robinet à 1,25 mètre sous le sol de la plateforme.

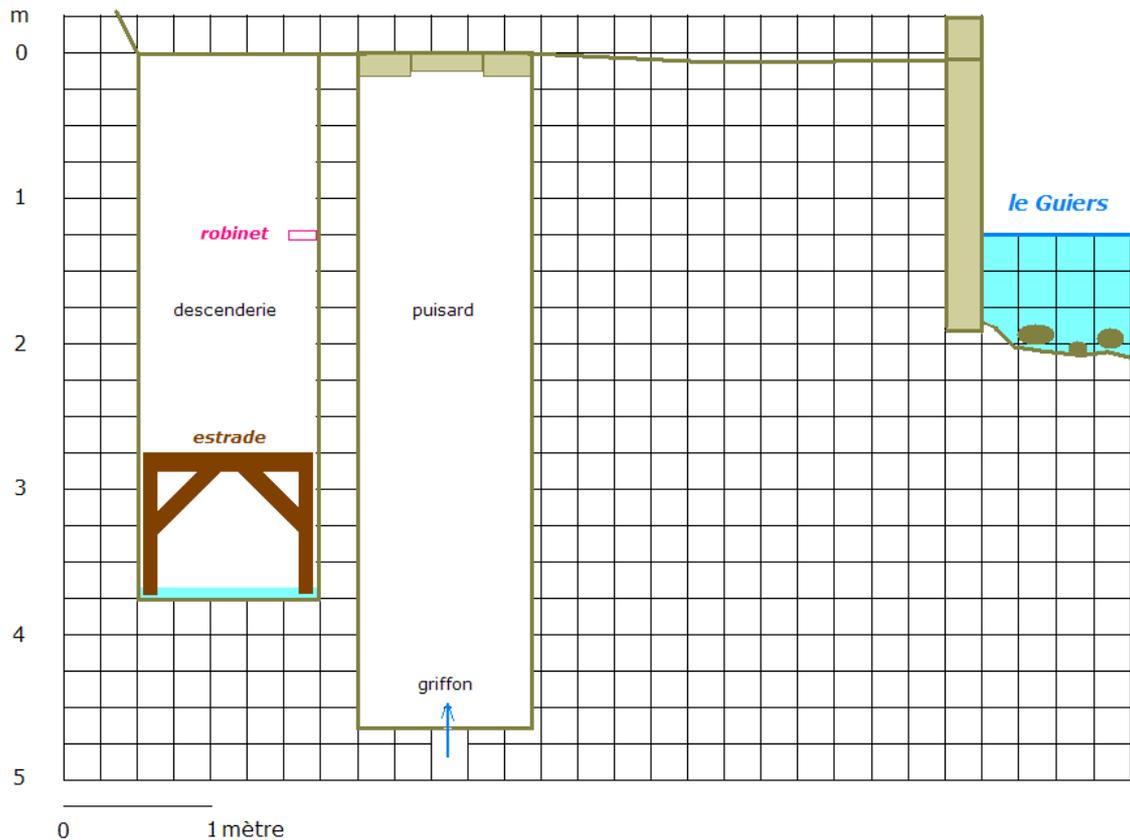
Les dimensions des ouvrages

Les ouvrages vidés de leur eau ont été mesurés.

Descenderie : profondeur de 3,75 mètres

Puisard du griffon de la source : 4,60 mètres.

Par rapport à la même *cote zéro* le fond du lit du Guiers vif est vers 2,20 / 2,30 mètres.



Analyse des résultats et des observations.

Comportement de la nappe d'eau souterraine.

Avant les travaux, le puisard du griffon de la source Germaine, était plein d'eau (jusqu'au sol de la plateforme du site).

A l'issue du pompage, le puisard était sec et l'eau de la nappe n'est pas remontée. Pourquoi ?

Explication proposée

Dans une rivière, un torrent, les débits et l'épaisseur de l'eau dans le lit varient entre les crues et les basses eaux (étiage).

Dans une nappe d'eau souterraine, il en est de même : les débits varient (comme on peut le voir en mesurant les débit des source là où l'eau souterraine est visible) ainsi que les niveaux (comme on peut le voir dans un puits ouvert).

Cette variation de niveaux dans une nappe est dénommée *battement de la nappe* et le volume d'eau ainsi défini correspond au volume d'eau infiltré pour l'année

considérée (volume à définir avec le coefficient d'emmagasinement dit *porosité efficace* lié au volume des fissures qu'il faut calculer).

Un observateur non averti ne peut mettre en évidence de tels mouvements de l'eau sous ses pieds dans la roche.

Or en Isère les basses eaux ont lieu en hiver. Ceci est dû à la *réretention nivale* (stockage de l'eau sous forme de neige qui fond très lentement). Les observations présentées ont été faites en janvier 2011 donc en hiver.

** Donc à l'issue du pompage l'eau n'est pas remontée car le niveau de la nappe était en dessous du fond du puisard, situation de basses eaux.

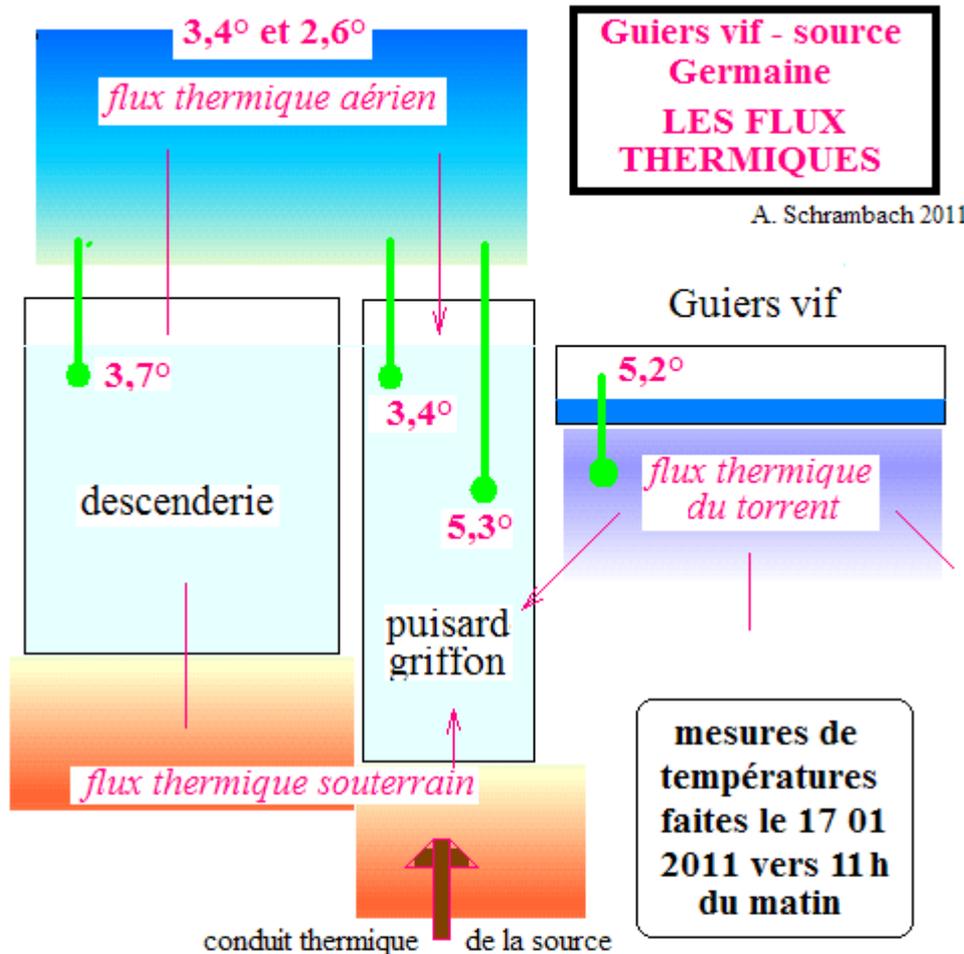
Cette hypothèse est à rapprocher de l'observation suivante. Une personne, un voisin de la source Germaine, présente sur le site, citait sa source en précisant qu'en janvier 2011, son débit était très bas alors que d'habitude il est important. On constate donc qu'il y a une corrélation entre le débit de la source et le niveau bas de la nappe.

Toutefois, comme le puisard ne se vidait pas, ou se vidait très lentement, il faudrait curer le fond et le griffon pour faciliter les mouvements de la nappe dans le puisard.

Les températures

Les températures ont été mesurées avant les travaux de pompage. Dans le puisard du griffon, comme l'eau stagnait dans ce puits, les températures sont fortement influencées par le flux thermique rayonnant autour du lit du torrent (flux thermique qui n'a aucune relation avec un flux hydraulique). Les ondes de chaleur se propagent au travers des roches (voir le coefficient de *conductivité thermique* d'un matériau).

Donc ces températures sont différentes de celles de l'eau issue des profondeurs et chargée d'H₂S.



Nous sommes en régime permanent thermique (mis à part les variations de température de l'air entre jour et nuit).

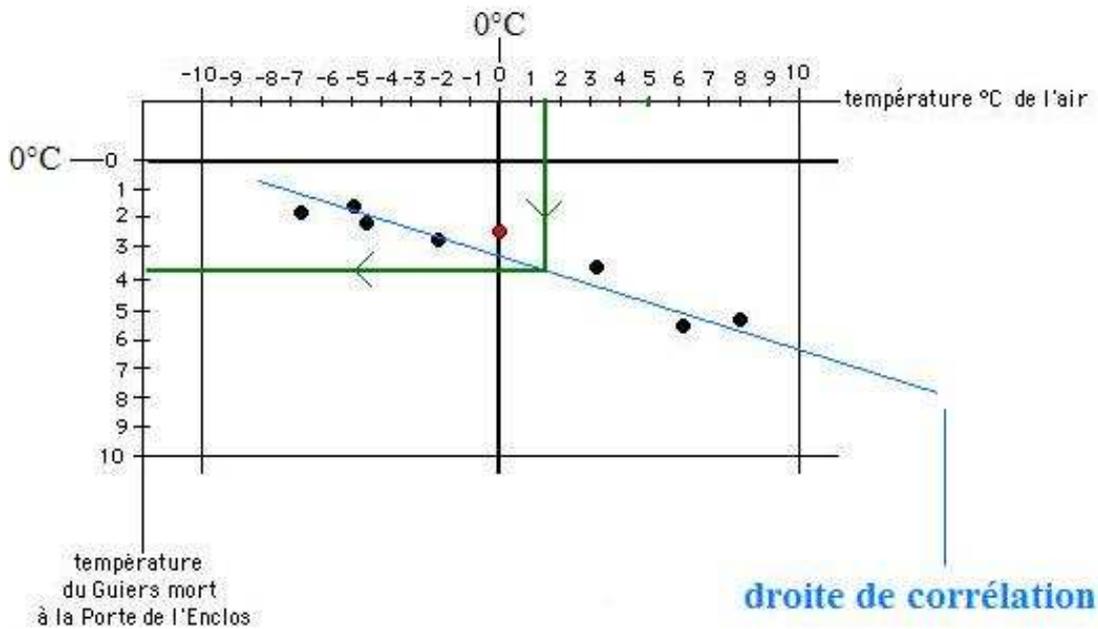
Dans le puisard à 1,5 m de profondeur, la température est influencée par le flux du torrent (d'où cette inversion eau froide (à cause de l'air) en haut et eau "chaude" dessous).

Comme le débit de la source est -aujourd'hui- nul, il n'y a pas d'apport d'eau "très chaude" venant du griffon d'où cette température faible dans le puisard.

Fig : les flux thermiques dans et autour du site de la source Germaine

Rappel : à cause de la *chaleur spécifique* différente pour les roches, l'air et l'eau, Une forte variation des températures dans l'air n'entraîne que des variations plus faibles dans l'eau du torrent. Ce dernier sert de *régulateur thermique*.

Les relations entre les températures de ces éléments apparaissent dans le graphique suivant.



Variation pour l'air : 14,8 °
 Variation pour l'eau : 3,9 °
 ratio : $\frac{14,8^\circ}{3,9^\circ} = 3,8$
effet d'amortissement de 3,8 fois

MASSIF DE LA CHARTREUSE
TEMPERATURES COMPAREES DE L'AIR
ET DU GUIERS MORT A LA PORTE DE L'ENCLOS
HIVER 2007-2008

G. Remillier 2008
 A. Schrambach

Fig : corrélation entre les températures des eaux des torrents (Guiers mort, mesurées par G. Remillier de l'ONF) et celles de l'air. Avec la flèche verte, une température de l'air de + 1,5 °C correspond à une température de l'eau du torrent de + 3,8 °C.

Situation géologique de la source Germaine

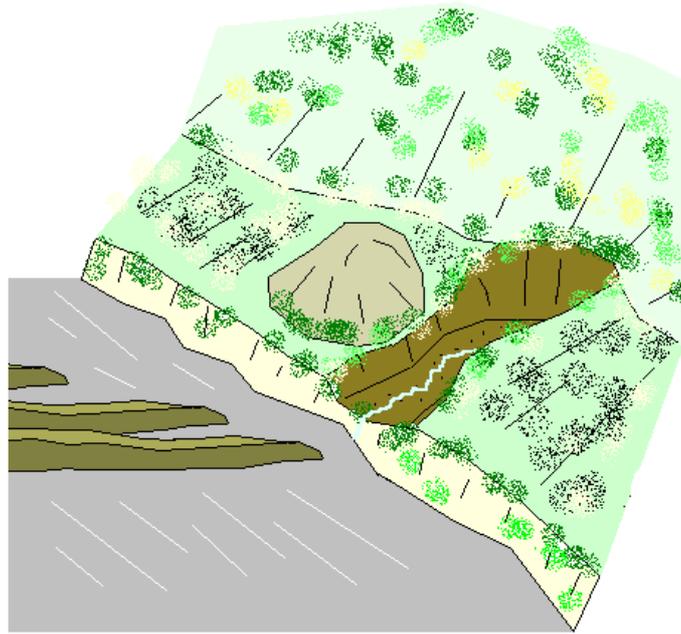
La nappe de la source Germaine est en charge (tout du moins en été lors des niveaux hauts de la nappe d'eau souterraine) par rapport aux niveaux du Guiers vif.

L'examen sur le terrain des strates rocheuses dans le lit du torrent, montre que ces strates forment des crêtes en relief, parallèles en elles, et reliant les deux berges.

En face du griffon de la source Germaine (située en rive droite du Guiers) on distingue sur le rive opposée (la rive gauche) une sortie de source comme montrée sur le dessin suivant. La probabilité est forte pour que ce soit de l'eau sulfureuse.

Les sources seraient donc à relier à l'existence d'un accident tectonique cassant mineur des roches du Berriasien affectant les deux rives. Cet accident est probablement limité.

Toutefois il n'est pas exclu que les eaux de la nappe du Berriasien sourdent à très faible débit dans les eaux du torrent puisque la nappe d'eau sulfureuse est en charge (situation en été) par rapport au niveau d'eau du torrent.



MASSIF DE LA CHARTREUSE

VALLEE DU GUIERS VIF

*La petite source en rive gauche
(à l'origine la source Germaine devait être
identique mais étant placée côté chemin elle était
plus accessible et fut exploitée)*

A. Schrambach 2011

Fig : la source située en rive gauche, rive opposée à celle supportant la source Germaine. Les crêtes des strates rocheuses situées dans le lit du torrent sont représentées à gauche.

RELATIONS EAU DU GUIERS ET EAU SOUTERRAINE

l'eau souterraine est en charge de "h" par rapport au Guiers

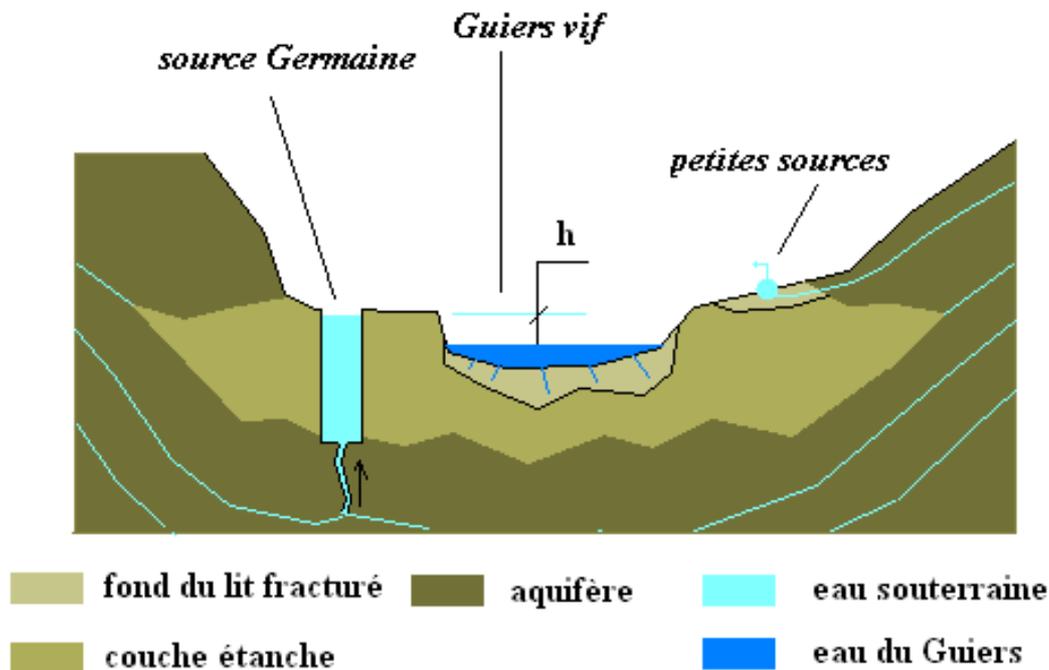
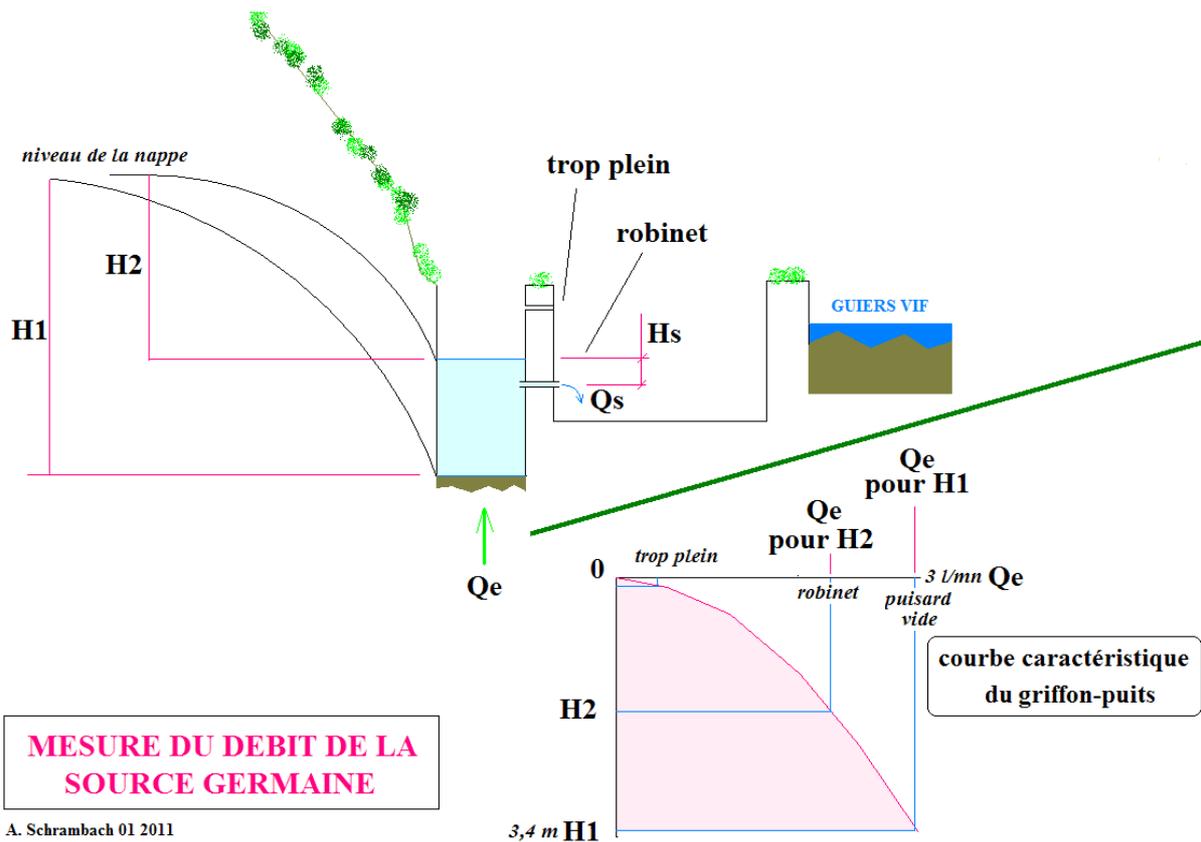


Fig : environnements géologique, hydraulique et hydrologique de la source Germaine (en rive droite à gauche du dessin) et de la source située sur l'autre rive.

Les lignes bleu clair sont les *lignes de courant* des eaux souterraines.

Quelques éléments de réflexion

... au sujet du débit de la source qui avec le puisard peut se calculer comme le débit d'un puits soumis à un pompage (l'eau qui sort du robinet ou Q_s) pour une certaine chute du plan d'eau ou *rabattement* ($H_1 - H_2$). Le débit du robinet se calcule comme le débit passant par un orifice soumis à une charge d'eau de H_s . En bas à droite, comme pour un puits (ou un forage) pompé, on peut tracer la *courbe caractéristique* donnant le débit Q_e (fourni par la nappe et donc la source) pour une chute du plan d'eau dans le puisard ou H .



RAPPEL

H₂S, un gaz mortel

Longtemps, ni les ramasseurs d'algues, ni même les scientifiques du Ceva n'ont eu conscience du danger. Pourtant, les dégagements dans l'air d'hydrogène sulfuré (H₂S) et d'ammoniac (NH₃) provoqués par la décomposition des algues vertes dépassent très largement les teneurs mortelles. En août dernier, l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) a ainsi mesuré sur la plage de Saint-Michel-en-Grève des teneurs

de 1000 ppmv (parties par million en volume) de H₂S, des concentrations provoquant la mort en quelques minutes. Le mécanisme de formation du gaz est simple. Lorsqu'elles sont délaissées sur la plage, les algues de surface sèchent et forment une croûte blanchâtre. Sous cette croûte étanche, la décomposition bactérienne se fait en anaérobie, c'est-à-dire sans oxygène. Les bactéries capables de vivre dans cette atmosphère produisent de l'hydrogène sulfuré,

et ce d'autant plus facilement que les organismes marins – au contraire des terrestres – contiennent des teneurs élevées en soufre (4 à 5 %). Si la croûte est crevée, le gaz se dégage par bouffées mortelles. Cet été, les ramasseurs d'algues devront donc se conformer à la réglementation sur l'exposition des travailleurs au H₂S, c'est-à-dire respecter le seuil de 5 ppmv sur huit heures. Ils travailleront avec des masques dans des cabines étanches à air filtré.