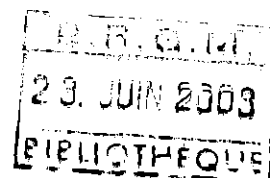


Document public



Etude du système hydrothermal d'Hell-Bourg (Commune de Salazie)

Historique des thermes et nouvelles reconnaissances
géophysiques et géochimiques

BRGM/RP-52214-FR
mars 2003

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 02-ETM-106

N. FRISSANT, J.M. MIEHE, M. MOULIN, B. SANJUAN
Avec la collaboration de
M. BRACH et D. LEBON

Etude du système hydrothermal d'Hell-Bourg, Cirque de Salazie

Mots clés : Eau, Géochimie, Géophysique, Hell-Bourg, Hydrothermalisme, Ile de La Réunion, Salazie.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
FRISSANT N., MIEHE J.M, MOULIN M., SANJUAN B., coll. BRACH M. et LEBON D.
(2003) – Etude du système hydrothermal d'Hell-Bourg, commune de Salazie, Ile de La Réunion.
Rapport BRGM/RP-52214-FR, 8 fig., 2 tab., 33 p.

© BRGM, 2003, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'étude du système hydrothermal d'Hell-Bourg (Commune de Salazie) s'inscrit dans la programmation de Service Public du Service géologique régional du BRGM à La Réunion. Elle a été cofinancée par la dotation de Service public du BRGM et par le Département de La Réunion dans le cadre du Programme Départemental de Recherche en Eau (PDRE) (convention 06-02 en date du 17 avril 2002).

L'objectif de cette étude a été d'apporter des éléments techniques permettant de localiser au mieux les circulations hydrominérales souterraines qui alimentaient les anciens sites thermaux d'Hell-Bourg et leurs conditions de gisement actuelles. Les moyens mis en œuvre sont les suivants :

- une étude bibliographique des documents d'époque, qui a permis de connaître les différentes caractéristiques et évolutions des anciennes sources thermales : la source débitait, en 1860, 1000 litres à l'heure d'une eau à 32 / 33 °C ; sa composition chimique était proche de celle des eaux ferrugineuses de Vichy ; une partie de cette eau était destinée à la consommation et une autre aux bains après avoir transité par une chaudière pour assurer une température de 33 – 35 °C ; l'eau de la rivière du Bras Sec pouvait également être portée à 100°C dans la chaudière avant d'être mélangée à l'eau thermo-minérale pour assurer le confort du bain ; le débit et la température de la source ont périclité plus d'une décennie avant que le griffon ne soit recouvert par un mouvement de terrain à la suite du passage du cyclone de 1948. Il semblerait que l'ancienne source thermale se trouve en rive droite du Bras-Sec, au nord-est du bâtiment des douches et au nord-ouest du bâtiment situé à l'est du site ;
- une campagne de prospection géophysique (résistivité, polarisation spontanée et provoquée) a révélé des structures géo-électriques susceptibles d'être en relation avec la zone d'émergence de la source thermale. Au sein du niveau conducteur assimilé à des formations basaltiques fissurées et/ou altérées, la coupe de résistivité inversée met en évidence un épaississement pouvant correspondre à la zone d'allération recherchée, associé à une faille subverticale dont la présence est suggérée par une figure en marche d'escalier. Les mesures de résistivité apparente ont montré l'existence d'une seconde structure conductrice reposant sur un substratum conducteur, peut-être en relation avec la zone d'émergence de la source thermale. La coupe de polarisation provoquée révèle la présence d'une structure polarisante, dont on ne connaît pas la nature, sur l'emprise de la fontaine des anciens thermes ;
- une campagne de prospection géochimique de mesures de teneurs des gaz dans les sols (CO₂, CH₄, O₂, radon et hélium) qui n'a révélé aucun indice majeur de fuites gazeuses d'origine profonde.

Au stade actuel de nos connaissances et en l'absence de nouvelle exploration par forage, il n'est pas certain que le système hydrothermal d'Hell-Bourg soit encore actif. Des sondages de reconnaissance et des tranchées, dont la localisation est proposée dans le rapport, sont nécessaires pour identifier la nature des structures géo-électriques mises en évidence par la géophysique et situer précisément l'ancien griffon des sources thermales.

Sommaire

1. Objet de l'étude.....	6
2. Synthèse bibliographique.....	8
2.1 Historique des établissements balnéaires d'Hell-bourg	8
2.1.1 Premiers établissements	8
2.1.2 La disparition de la source et la fin du centre thermal	8
2.2 Caractéristiques physico-chimiques des eaux thermo-minérales d'Hell-Bourg	9
2.3 Vertus thérapeutiques	12
2.4 Description des thermes.....	13
2.5 Description récapitulative des anciens thermes d'Hell-Bourg	15
3. Campagne géophysique	17
3.1 Contexte géologique	17
3.2 Méthodes et moyens utilisés	17
3.2.1 Matériel	17
3.2.2 Méthodes - Travaux effectués	17
3.2.3 Interprétation – Restitutions graphiques – Archivage.....	19
3.2.4 Résultats – Recommandations.....	19
4. Campagne géochimique : profils de mesures de teneurs des gaz dans les sols.....	24
4.1 Intérêt de la méthode utilisée	24
4.2 Procédures d'analyses des gaz dans les sols	25
4.2.1 Généralités.....	25
4.2.2 Analyse du dioxyde de carbone, du méthane et de l'oxygène	25
4.2.3 Analyse de l'hélium.....	26
4.2.4 Analyse du radon	26
4.3 Résultats	29
5. Conclusions.....	31
6. Références bibliographiques	33

Liste des figures

Figure 1 : Localisation des anciens thermes d'Hell-Bourg	5
Figure 2 : Schéma hydraulique reconstitué des anciens thermes d'Hell-Bourg	16
Figure 3 : Localisation des dispositifs de l'étude géophysique.....	18
Figure 4 : Pseudo-coupes de résistivité apparente et de polarisation provoquée	20
Figure 5 : Profil de polarisation spontanée et coupes inversées de résistivité et de polarisation provoquée.....	21
Figure 6 : Carte de la polarisation spontanée.....	22
Figure 7 : Schéma du dispositif de prélèvement et de mesure des gaz dans les sols	27
Figure 8 : Localisation des points de mesure des gaz dans les sols sur le site des anciens thermes d'Hell-Bourg	28

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des résultats d'analyses chimiques réalisées au XIXème siècle sur les eaux thermales d'Hell-Bourg.....	9
Tableau 2 : Résultats des analyses chimiques des gaz dans les sols sur le site des anciens thermes d'Hell-Bourg	29

1. Objet de l'étude

L'étude du système hydrothermal d'Hell-Bourg s'inscrit dans la programmation de Service Public du Service géologique régional du BRGM à La Réunion. Elle a été cofinancée par la dotation de Service public du BRGM et par le Département de La Réunion dans le cadre du Programme Départemental de Recherche en Eau (PDRE) (convention 06-02 en date du 17 avril 2002).

Après une activité intense pendant plusieurs décennies, les établissements thermaux d'Hell-Bourg (fig. 1) périclitèrent peu à peu au début du XX^{ème} siècle, avant d'être détruits par un mouvement de terrain à la suite du passage d'un cyclone en 1948. En 1971, un forage de reconnaissance de 40 m de profondeur n'a pas recoupé de circulation hydrothermale.

Dans la perspective d'un éventuel recaptage, cette étude a eu comme objectif de localiser et caractériser, au mieux, les circulations hydrominérales souterraines et leurs conditions de gisement actuelles. Pour cela, les moyens ci-après ont été mis en œuvre :

- une étude bibliographique des documents d'époque, permettant de connaître les différentes caractéristiques (physico-chimie, débit, vertus thérapeutiques, localisation des griffons,...) des anciennes sources ;
- une campagne de prospection géophysique (résistivité, polarisation spontanée et provoquée) pour identifier et localiser des structures géo-électriques susceptibles d'être en relation avec le système hydrothermal ;
- une campagne de prospection géochimique des gaz dans les sols (CO₂, CH₄, O₂, radon et hélium) dans le but de dresser une carte d'anomalies des teneurs en ces gaz, révélatrices d'éventuelles remontées hydrothermales en surface.

L'analyse et la synthèse des données obtenues à partir de ces différentes approches ont permis de préciser les potentialités hydrothermales de la zone et la définition des modalités ultérieures de reconnaissance et de valorisation de la ressource souterraine.

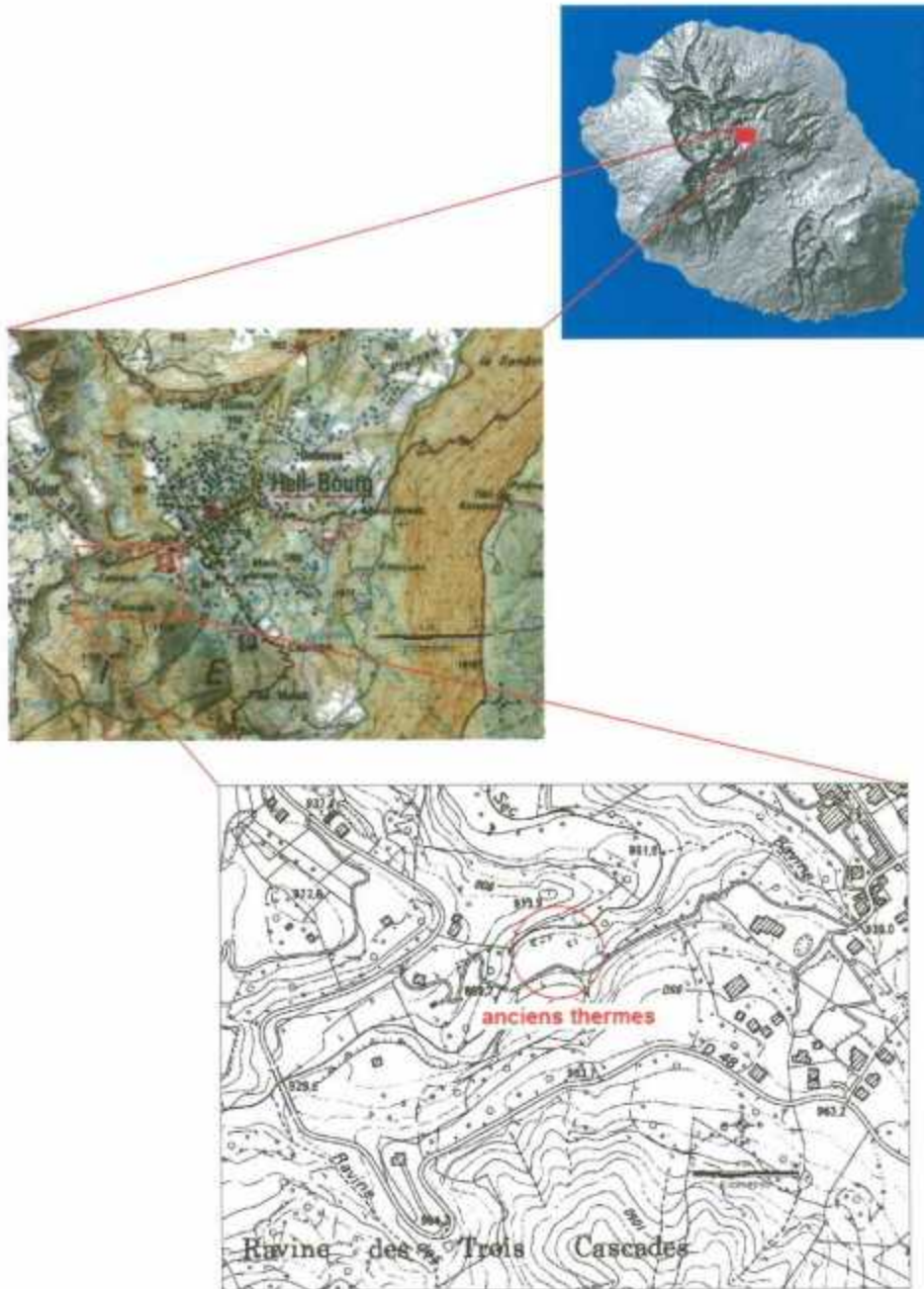


Figure 1 : localisation des anciens thermes d'Hell-Bourg (fonds IGN 1992 au 1/25 000 et 1/5 000)

2. Synthèse bibliographique

2.1 HISTORIQUE DES ETABLISSEMENTS BALNEAIRES D'HELL-BOURG

La source minérale de Salazie fut découverte en 1831 par des chasseurs de cabris. En 1908, le Dr Jacob de Cordemoy sous le titre « Salazie, ses sites, ses eaux minérales » (réf. archive départementale : PB1406), relate l'histoire des établissements balnéaires.

2.1.1 Premiers établissements

"En 1852 se fonda une Société Anonyme de l'Etablissement Thermal de Salazie qui ne prospéra point. Une autre compagnie en commandite qui lui succéda n'eut pas plus de succès. Les dépenses avaient été excessives. Tout allait de mal en pis, lorsqu'en mars 1879, le Bras-Sec à qui l'on avait trop parcimonieusement ménagé l'espace, se chargea d'opérer la liquidation. Il se gonfla subitement et, dans une crue formidable, il détruisit et emporta la plupart des bâtiments de l'exploitation."

Prise de possession par la Colonie de la station thermale :

"Dès lors tout périclita, au point qu'en 1904, le Conseil municipal, considérant que l'état misérable des choses devait fatalement entraîner le délaissement et la ruine de Salazie, proposa à l'Administration de faire l'acquisition de ce qui restait des anciens Etablissements (qui appartenaient à un particulier) de tout remettre à neuf, de pourvoir l'établissement nouveau des engins et du matériel nécessaire, et d'en faire don à la Colonie qui, de son côté, s'engageait à entretenir à Hell-Bourg un médecin civil. Ces offres furent acceptées par l'Administration et par le Conseil Général (...)."

2.1.2 La disparition de la source et la fin du centre thermal

Dans un travail de recherche documentaire réalisé par le collège de Salazie en 1990 sur les thermes d'Hell-Bourg (réf. archive départementale : PB2103) il est précisé :

"Il faut noter avant tout qu'entre les deux guerres, la misère sévissait dans l'île. Les gens n'avaient donc pas l'idée de se rendre aux thermes. La station mourut à petit feu. L'hôpital militaire ferma ses portes au lendemain de la conquête de Madagascar (1897-1905). C'est ainsi qu'est né le nouvel Hôtel des Salazes. Cilaos avait profité entre-temps du déclin d'Hell-Bourg. Et puis les sources étaient de plus en plus froides, de plus en plus faibles.(...)en 1939, M. Rivals, géologue, note un abaissement de la thermalité. (...) La température était passée de 31° à 27° C à partir de 1930. De même, elles subirent les péripéties de deux désastres. Un premier éboulement s'est d'abord produit en 1943 comblant le trou d'où jaillissaient les sources chaudes. Les dernières ont ensuite été ensevelies par un pan de montagne, à la suite du passage du cyclone de 1948. Aujourd'hui, il ne subsiste que des ruines envahies par la végétation."

"En 1971, le professeur Ninard et M. Rodier, ingénieur des Mines se sont rendus sur les lieux et ont conclu que la recherche de cette source était possible. En effet, d'après M. Rodier, la disparition de la source est due à de "lents mouvements de tassements des terrains détritiques et mal assis des cirques, lesquels sont susceptibles de rompre les conduits de concrétion calcaire qui enrobent ces veines et d'ouvrir à l'eau thermale un passage vers d'autres directions. On peut penser que le colmatage n'affecte que la partie supérieure des chenaux de remontée ce qui laisse subsister beaucoup d'espoir de retrouver les sources". Une subvention a été sollicitée par M. André Fontaine, Maire de Salazie, auprès du Conseil Général, pour réaliser des sondages de reconnaissance et un puits de 40 m de profondeur, destinés à retrouver les sources. Les relevés de températures et les analyses chimiques effectués sur les eaux issues de ces travaux ont mis en évidence que les eaux hydrothermales n'avaient pas été recoupées". Nous concluons de ces recherches bibliographiques, que les forages et puits de reconnaissances effectués en 1971 n'ont pas permis de recouper les circulations thermales.

2.2 CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX THERMO-MINERALES D'HELL-BOURG

Le tableau 1, issu de la thèse de doctorat en médecine de Benoît Emile de Fayard (1908) intitulée « Eaux minérales de l'île de la Réunion » (réf. archive départementale : 4MI124J1-2), récapitule les résultats des analyses chimiques qui ont été réalisées sur les eaux thermales d'Hell-Bourg.

<i>Eléments chimiques</i>	<i>Mercadieu (1841)</i>	<i>Borie (1862)</i>	<i>Mac Auliffe (année ?)</i>
<i>Bicarbonate de soude</i>	<i>0,500</i>	<i>0,535</i>	<i>0,535</i>
<i>Bicarbonate de potassium</i>	<i>0</i>	<i>0,056</i>	<i>0,042</i>
<i>Bicarbonate de magnésie</i>	<i>0,430</i>	<i>0,364</i>	<i>0,239</i>
<i>Bicarbonate de chaux</i>	<i>0,180</i>	<i>0,180</i>	<i>0,125</i>
<i>Bicarbonate de fer</i>	<i>0,020</i>	<i>0,025</i>	<i>0,018</i>
<i>Chlorure de sodium</i>	<i>0,007</i>	<i>0,029</i>	<i>0,029</i>
<i>Sulfate de soude</i>	<i>0,030</i>	<i>0,171</i>	<i>0,017</i>
<i>Silice</i>	<i>0,160</i>	<i>0,200</i>	<i>0,200</i>
<i>Matière organique</i>	<i>0</i>	<i>0,074</i>	<i>0,071</i>
<i>Acide carbonique libre</i>	<i>1,250</i>	<i>0,877</i>	<i>1,073</i>

Tableau 1 : Récapitulatif des résultats des analyses chimiques (teneurs en gramme par litre) réalisées au XIX^{ème} siècle sur les eaux thermales d'Hell-Bourg

M. Delavaud, dans une « Note sur l'eau minérale de Salazie » à la Société des Sciences et des Arts de l'île de La Réunion (1859) (réf. archive départementale : 4MI133(J1-9)) signalait "qu'il avait recherché [et trouvé] dans l'eau de Salazie quelques principes rares qui n'ont pas encore été signalés : (...), iode, (...), alumine, (...), manganèse, (...)."

D'autres informations relatives au chimisme des eaux hydrothermales d'Hell-Bourg et des gaz qui leur sont associés, sont données dans la thèse de doctorat en médecine intitulée « Stations climatiques et hydro-minérales de l'île de La Réunion » et soutenue en 1935 par A. Motais de Narbonne (réf. archive départementale : 4MI128) :

"(...) Nos expériences établissent la présence du radon et du radium dans toutes les sources où ces radioéléments ont été recherchés.

(...)

Tous ces gaz, qui accompagnent la venue au jour d'eaux minérales bicarbonatées sodiques, sont très riches en anhydride carbonique. Elles contiennent toutes de minimes proportions d'oxygène et, généralement, des traces de gaz combustibles, (...). Enfin, dans tous ces gaz, on rencontre les cinq gaz rares, parmi lesquels l'argon est toujours et, de beaucoup, le plus abondant. Les proportions d'hélium sont très faibles.

(...)

Eaux radio-actives, chaudes, bicarbonatées sodiques, magnésiennes et ferrugineuses.

(...)"

Elude du système hydrothermal d'Hell-Bourg, Cirque de Salazie

Cette même thèse de doctorat en médecine contient le tableau suivant :

Analyse faite par M. Rélanden (en gramme par litre [à l'exception des analyses dont l'unité est spécifiée dans le tableau])

Densité	1,00205
Sodium	0,2468
Potassium	0,01643
Magnésium	0,07878
Calcium, Baryum, strontium	0,095
Fer	0,01519
Aluminium	0,00688
Silicium	0,06315
Manganèse	traces
Bore	traces
Iode	traces
Acide carbonique	1,558
Acide sulfurique	0,01843
Acide chlorhydrique	0,01101
Acide phosphorique	trace
Acide sulfhydrique	accidentel
Matières organiques	traces
Résidu fixe par litre d'eau	1,342
Radium, en 10-12 gr, par litre d'eau	33,3
Radium, en 10-12 gr, par gramme de résidu fixe	24,8
Radon en millimicrocuries, par litre, à l'émergence	
T°C	31,7
Gaz (sec. 0°-760 mm)	1,04
Eau	0,13
Composition centésimale moyenne, en volumes, des gaz spontanés	
Anhydride carbonique	89,34
Oxygène	0,004
Gaz combustibles (en bloc)	0,26
Argon + azote	10,14
Argon + tr, de K2 et NL(ou NI ?)	0,237
Hélium + néon	0,012
Radon (en milimicrocuries par litre, à l'émergence)	1,04

"Nous désignons [ces eaux] sous le nom d'eaux bicarbonatées sodiques en acceptant la division proposée par F. Durand dans son traité thérapeutique des eaux minérales de France et de l'Étranger."

Le Dr Jacob de Cordemoy note, en 1908 (réf. archive départementale : PB1406) : "Cette eau est limpide, quelquefois légèrement opalescente, de saveur agréable, un peu piquante. Elle se conserve en vase clos, pendant plusieurs semaines. (...) Cette eau tient en suspension des sels de fer qui se déposent sur les parois des vases qui la contiennent, on y voit en outre flotter de petits corps tachés de rouille en lesquels on reconnaît au microscope deux petites conferves dont l'une paraît appartenir au genre *Crenothrix*."

Chanot écrit dans sa thèse de doctorat en médecine « Eaux minérales de Salazie », publiée en 1860 (réf. archive départementale : BIB1150) : "Examinée au sortir du robinet,

cette eau est parfaitement claire, transparente, sensiblement gazeuse, état encore mieux appréciable en la recevant dans un verre. Elle donne au goût une sensation de picotement, une saveur âpre, ferreuse ; l'odeur rappelle très légèrement celle de l'encre ordinaire."

"(...) M. Delavaud, ayant constaté dans la source d'Hell-Bourg l'existence de l'iode, du manganèse, de l'alumine, et tout portant à penser que, vu la quantité remarquable de silice, on doit également y rencontrer de l'acide borique, je puis insister sur la comparaison avec les sources ferrugineuses thermales de Vichy."

● **Variation de la température de l'eau et de sa teneur en gaz :**

Chanot (1860) poursuit : " (...) tout tendait à faire croire que souvent le cours grossi du torrent voisin et l'eau de pluie devaient, par une infiltration possible, troubler les conditions naturelles de l'eau thermale. L'observation ayant justifié cette crainte, on chercha à diminuer un peu les inconvénients indiqués ; mais c'est en 1852 et 1853 que furent exécutés d'importants travaux d'encaissement, qui mirent à couvert toutes les sources (...). Après ces utiles et heureux travaux, l'infiltration de l'eau ordinaire ne fut plus que très exceptionnelle, et n'eut lieu qu'à la suite de très abondantes pluies ; je dois noter immédiatement que cette altération n'est que momentanée et cesse encore plus rapidement qu'elle ne se produit (...).

La température oscille de 32 à 33 ° centigrade ; le degré le plus élevé répond à la sécheresse la plus grande de l'atmosphère et du sol. Quelquefois, un abaissement de plusieurs degrés est produit par un mélange d'eau pluviale filtrant au travers de la couche superficielle du terrain ; mais, au bout de peu d'heures, la température habituelle se rétablit à mesure que la cause de trouble cesse.

(...)

L'influence de certaines variations météorologiques est aussi évidente pour cette source que pour beaucoup d'autres eaux thermales. Pendant les orages, l'eau est plus gazeuse, ce qui a probablement pour cause principale la diminution de la pression atmosphérique ; mais encore faut-il tenir compte de la chaleur et de la sécheresse, car, dans la condition opposée, si l'eau vient à être momentanément refroidie, le dégagement de gaz est au contraire diminué.

(...)

J'aurais bien voulu savoir si la secousse de tremblement de terre, avec détonation souterraine, et qui fut ressentie au village de Salazie, le 30 mars 1857, à midi et demi, avait produit quelque modification passagère dans la température de la source ; mais je n'ai trouvé aucune indication à ce sujet, ce qui me fait penser que le médecin alors chargé du service a constaté la continuation de l'état normal de l'eau. Cette question est suffisamment motivée par la petite distance qui existe entre la source et le village indiqué et par la connaissance du trouble que les tremblements de terre ont parfois causé dans la constitution de certaines eaux minérales ; on sait, en effet, que le tremblement de terre de Lisbonne (1 novembre 1755) rendit complètement froides les eaux d'Aix en Savoie, tandis que les eaux de Bagnères de Luchon devinrent beaucoup plus chaudes."

● **A propos du débit de la source thermo-minérale, Chanot note : "l'écoulement de l'eau est continu et évalué de 900 à 1000 litres par heure."**

Roussin note en 1859 (réf. archive départementale : BIB119/I) : "Deux fois en décembre 1856, deux autres fois en janvier 1857, le torrent du Bras-Sec, gonflé par les pluies des jours précédents, est monté de plus d'un mètre, des filtrations se sont opérées à la superficie du sol, et l'eau de la source s'est troublée en perdant de sa chaleur et de sa saveur. Cet accident momentané m'a forcé de suspendre l'usage des eaux minérales que pendant deux jours. A mesure que le torrent s'écoulait, on a remarqué que les eaux thermales recouvraient peu à peu toutes leurs propriétés."

2.3 VERTUS THERAPEUTIQUES

Roussin note en 1859 (réf. archive départementale : BIB119/I) : *" Les eaux de Salazie conviennent dans un grand nombre de maladies. En général, les maladies internes chroniques se combattent par les eaux administrées à l'intérieur, tandis qu'il vaut mieux avoir recours aux applications extérieures quand il s'agit de détruire un mal externe. On commence par un demi-verre à vin à jeun, et on augmente successivement, chaque jour, jusqu'à en prendre de 4 à 5 litres par 24 heures. Si, en débutant, les eaux se digèrent mal, on peut en mélanger une petite quantité avec de l'eau ordinaire ou du lait, et l'estomac s'y étant habitué, on finit par pouvoir les prendre pures. Quant aux bains, on les prend à la température de 26 ° à 30 ° Réaumur. Pour les avoir à ce degré, on fait chauffer l'eau de la source afin de l'ajouter à celle qui, dans son trajet et son transvasement, a déjà perdu 2 à 5 degrés. Il doivent être d'abord d'un quart d'heure et finissent par être d'une heure à deux. On maintient toujours la même température par des additions successives d'eau chaude. Si les eaux augmentent dans les premiers jours vos douleurs, persévérez dans leur usage et félicitez-vous-en ; c'est le pronostic d'une guérison complète."*

Il poursuit :

"Ces eaux ont du succès dans les maladies chroniques suivantes : de la tête, des yeux et des paupières, de la face, de l'oreille, du nez du cou et de la muqueuse, de l'estomac, de la région du cœur, des organes génitaux, surtout chez les femmes ; des organes urinaires, du bas ventre, de la colonne vertébrale. Elles ont été employées efficacement pour les nausées, les vomissements, le carreau, scrofule, rachitis, lumbago, maladies des seins, surtout chez les nourrices ; pour les paralysies dans les membres supérieurs, pour les faiblesses dans les membres inférieurs, pour les raccourcissements de tendons, pour les ulcères, caries, maladies des membranes muqueuses accompagnées de suppuration ; pour les plaies fistuleuses en général. Ces eaux ont diminué, mais non guéri : l'épilepsie, l'obésité, et la danse de Saint-Guy. Quarante jours suffisent, ordinairement, pour prendre les eaux ; on les cesse souvent dès le vingtième, tandis que d'autres fois on en continue l'usage pendant deux mois et même plus. Impossible d'établir une règle fixe. Les Européens peuvent prendre les bains en tout temps, mais surtout du 15 avril au 15 novembre, tandis que les créoles se trouvent mieux en y allant seulement du 15 septembre au 15 décembre. Le froid de l'hiver, quoique léger, est souvent désagréable pour ceux qui sont nés sous les tropiques."

Toujours en 1859, M. Delavaud dans une « note sur l'eau minérale de Salazie » écrit (réf. archive départementale : 4M1133(J1-9)) : *"On peut néanmoins, être fixé dès à présent sur la valeur de cette eau minérale. Si on la compare aux eaux du bassin de Vichy, qui sont au nombre de seize, on voit qu'elle est beaucoup moins riche en principes minéralisateurs ; car, tandis que le résidu pour celles-ci varie de 4,408 gr, il égale seulement 1,2 gr pour la notre, et par conséquent est en moyenne quatre fois plus faible.*

(...) Il ne faudrait pas croire, d'après le peu de richesse relative de l'eau minérale de Salazie, que son efficacité médicale soit minime ou presque nulle. Si elle contient moins de bicarbonate de soude que les eaux de Vichy, elle renferme une plus grande quantité de fer que la plupart d'entre elles ; et cet élément, si utile pour la réparation des forces chez les sujets dont le sang est appauvri, se présente là sous une forme très avantageuse pour l'absorption, à cause de la quantité surabondante d'acide carbonique qui le maintient en dissolution. Il faut en dire autant du manganèse (dont il existe aussi des traces dans les eaux de Vichy), qui agit dans le même sens que le fer, et dont l'utilité a été bien reconnue dans ces derniers temps (...)."

Chanot (1860) donne la définition médicale suivante : *"L'eau minérale de Salazie active la circulation en tendant à la régulariser, agit consécutivement dans le même sens sur l'innervation, réveille la contractilité des tissus, peut être appliquée dans un grand nombre d'états morbides ne présentant plus de caractère essentiellement inflammatoire, et chez les sujets dont le tempérament, à l'état physiologique, n'offre pas une irritabilité exceptionnelle.*

(...) L'eau de Salazie est minéralisée de manière à être classée comme médicament d'une activité variable, suivant le mode d'administration, et qu'il faut parfois modérer (...)."

Il rapporte également : "*[les] diverses maladies dans lesquelles l'emploi de l'eau minérale de Salazie est indiqué [sont les] : (...) maladies des organes respiratoires, (...), maladies des organes de l'appareil digestif, (...), coliques nerveuses, (...), maladies des organes des appareils génito-urinaire, (...), maladies des organes de la vision, (...), maladies des organes de l'audition, (...), maladies des organes de l'olfaction, (...), maladies chirurgicales (carie, fractures, maladie de peau).*"

En 1908, B.E. de Fayard, dans sa thèse de doctorat en médecine sur les « Eaux minérales de l'île de La Réunion » note (réf. archive départementale : 4MI124 J1 -2) : "*Il est important de signaler l'analogie de composition qui rapproche l'eau minérale de Salazie de quelques-unes des nombreuses sources du bassin de Royal et de Vichy. Sans doute il existe une légère différence au point de vue de la composition chimique ; mais il importe peu pour la valeur médicale des eaux de Salazie qu'elles soient plus faibles que plusieurs autres du même genre de France.*"

En 1935, A. Molais de Narbonne note dans sa thèse de doctorat en médecine sur « Les stations climatiques et hydro-minérales de l'île de La Réunion » (réf. archive départementale : 4MI128) :

"Indications thérapeutiques : les eaux thermales donnent de bons résultats dans toutes les formes et variétés de rhumatismes, dans les sciaticques, les polynévrites, dans le traitement des séquelles consécutives aux traumatismes, dans les raideurs articulaires, les synovites tendineuse, etc.

Les eaux froides, prises en boisson, dans lesquelles la présence de fer est corrigée par les sels de soude qu'elles contiennent, se montrent admirablement toniques et reconstituantes."

Le Dr Jacob de Cordemoy note, en 1908 (réf. archive départementale : PB1406) : "*Plusieurs facteurs concourent à l'obtention du résultat désiré. Et d'abord il y a la cure d'altitude.(...) Tel est le secret de l'heureuse transformation qu'éprouve l'organisme à la montagne, et qu'il nous est donné de constater chaque jour. Voilà l'explication des remarquables résultats obtenus dès le début et restés toujours identiques chez les malades et les convalescents séjournant aux environs de la source thermale.*

(...)

La cure d'altitude comporte parmi ses éléments de succès, les exercices du corps. Parmi ceux-ci, le meilleur, le plus naturel est la marche. C'est une excellente pratique que l'hygiéniste doit conseiller. Celle-ci trouve facilement à Salazie les meilleures attractions. Les promenades charmantes y abondent."

2.4 DESCRIPTION DES THERMES

Chanot, en 1860 (réf. archive départementale : BIB1150) donne les informations suivantes :

"C'est en 1852 et 1853 que furent exécutés d'importants travaux d'encaissement, qui mirent à couvert toutes les sources, alors ramenées en deux conduits, dont l'un, moins considérable, aboutit directement au réservoir des bains, dans lequel vient retomber la partie non utilisée du débit de l'autre conduit, destiné aux buveurs. (...) Il poursuit ensuite : tout ce qui était possible a été fait, en cherchant à prendre pour modèle les établissements français du même genre. (...) Après avoir bien capté la source dans la couche supérieure du sol, on a placé, sous un abri parfaitement aéré, le conduit qui dessert la buvette publique. Cette buvette, présentant deux orifices, fournit un débit de 700 à 750 litres par heure ; le conduit qui aboutit directement au réservoir des bains produit 200 à 250 litres dans le même temps. L'écoulement de l'eau est continu, est évalué 900 à 1000 litres par heure. (...)

Le réservoir des bains étant hermétiquement clos et fait en pierres dures, liées avec un ciment hydraulique, l'eau y fut soustraite, autant que possible, à deux causes puissantes d'altération, « le contact de l'air et de la lumière ». Il n'y a que quelques mètres de distance entre ce bassin d'alimentation et le point où la source est captée ; on a eu soin de diriger la conduite d'eau par une inclinaison qui rend l'écoulement plus facile et en assure la continuité. Même précaution dans la direction du tuyau qui sort du bassin pour parcourir environ 7 mètres, et peut être mis à volonté en communication avec la chaudière ou avec le système de remplissage des baignoires. On a eu soin de donner aux divers tuyaux un diamètre proportionné d'abord au rendement de la source, puis à une rapidité suffisante pour le service des bains ; on a disposé l'écoulement de manière à maintenir les canaux toujours pleins, et, par conséquent, vides d'air. (M. Pierre Cazeau est l'entrepreneur qui a conçu et conduit les travaux) (...). Il fallut recourir à des tubes métalliques en zinc en raison de leur résistance à l'oxydation. (...). La disposition du terrain a imposé la nécessité de porter l'eau à une élévation de 3 à 4 mètres pour arriver aux baignoires et à la chaudière. Pour le pompage, on a établi l'appareil de manière que le jeu du piston ne permet pas d'interruption dans le plein des tuyaux. Les baignoires sont en zinc et remplies par le fond pour continuer à maintenir l'eau dans les meilleures conditions ; deux canaux, l'un d'eau à la température du réservoir d'alimentation, et l'autre provenant de la chaudière.

L'eau de Salazie étant à + 33 ° au sortir du robinet de la buvette, pourrait être immédiatement employée en bain si elle conservait ce degré thermométrique ; mais on conçoit qu'un abaissement sensible se produit vite, et que si, malgré cela, elle peut être encore utilisée de la même manière dans certains cas, on a dû pourtant s'occuper d'un mode de chauffage. Lors de la création de l'établissement thermal d'Hell-Bourg, une chaudière en fonte fut employée pour chauffer l'eau minérale (...). Une grande élévation dans la température troublant sûrement la constitution chimique de l'eau minérale, on a soin de chauffer seulement au degré nécessaire (...) (33 à 35 °C). Mais on finit par avoir dans la chaudière un dépôt considérable (...). J'étais réduit à conseiller uniquement de curer la chaudière aussi souvent que possible.

(...) La meilleure méthode de chauffage de l'eau minérale de Salazie est le coupage avec l'eau du torrent voisin, laquelle, portée à une température de 100°C peut-être ajoutée en diverses proportions, de manière à obtenir 33 à 35 °C pour le bain. Cette méthode est certainement celle qui altère le moins l'eau de la source thermique ; j'y ai toujours eu recours chaque fois que j'ai cru devoir prescrire un bain minéral affaibli.(...)"

En 1908, le Dr Jacob de Cordemoy (réf. archive départementale : PB1406) note :
"L'eau, ne possédant qu'une température insuffisante pour les bains, traverse un réservoir où elle est légèrement chauffée, ce qui du reste n'altère en rien ni sa composition chimique, ni son efficacité thérapeutique, la quantité d'acide carbonique qu'elle contient demeurant toujours très suffisante à maintenir en dissolution les éléments minéralisateurs.

Cette opération se pratique sans préjudice en Europe dans maintes stations thermales."

En 1908, B.E de Fayard écrit dans sa thèse de doctorat en médecine (réf. archive départementale : 4MI124 J1-2) :
"(...) cependant, l'eau n'arrivait pas avec assez d'abondance pour qu'il fût possible de l'envoyer directement dans les baignoires ; ce fut une nécessité d'en faire une provision, de la recueillir à l'avance et par suite de la chauffer. Sa puissance curative n'en est pas altérée, tout au plus provoque-t-on le dégagement d'une partie de l'acide carbonique."

Concernant les caractéristiques du griffon, en 1859, Roussin note (réf. archive départementale : BIB119/I) :
"Les eaux thermales de Salazie jaillissent par des fissures d'une roche volcanique, sur le bord de la ravine du Bras-Sec, à un mètre de distance d'une source froide et indifférente.

Des travaux d'encaissement, exécutés de 1852 à 1853, ont permis d'utiliser toutes les sources en les réunissant en deux canaux."

En 1908, le Dr Jacob de Cordemoy indique (réf. archive départementale : PB1406) :
"La source thermo-minérale d'Hell-Bourg émerge à l'altitude de 872 mètres et à la température de 32°5 d'un énorme bloc de trachyte situé sur la rive droite d'un petit torrent, le Bras-sec, par plusieurs filets réunis en deux groupes."

La brochure « Eaux minérales de Salazie », dont on ne connaît pas l'année de parution (réf. archive départementale : PB 1243) indique : *"La source thermale est située sur le bord de la rivière du Bras-Sec à 872 mètres au dessus du niveau de la mer, et jaillit d'une roche feldspathique (Eurite), à un mètre à peine de distance d'une source froide et indifférente. Des travaux d'encaissement, exécutés en 1852 et 1853, ont permis d'utiliser tous les filets qui s'échappent de dessous la roche basaltique, de manière à les réunir dans un réservoir commun, parfaitement scellé, duquel partent les conduits destinés à la buvette et aux bains. Au-dessus de la source, qui est ainsi abritée, se trouve un vaste bâtiment composé d'une grande salle de réunion, d'une salle de billard, et d'un salon particulier pour les dames ; et à droite, un bâtiment qui contient une dizaine de baignoires desservies par l'eau de la source, modérément chauffée."*

2.5 DESCRIPTION RECAPITULATIVE DES ANCIENS THERMES D'HELL-BOURG

L'eau thermale émergeait en rive droite de la ravine de Bras-Sec au sein de formations volcaniques (trachytes ?). La source débitait 1000 litres à l'heure d'une eau à 32 - 33°C. La température de l'eau augmentait lors des périodes de sécheresse et diminuait en cas d'infiltration d'eau froide (pluie ou montée des eaux de la ravine). L'eau était d'autant moins gazeuse qu'elle était froide, et d'autant plus que le temps était à l'orage.

Sa composition chimique était proche de celle des eaux ferrugineuses de Vichy. L'émergence se trouvait en dessous d'un vaste bâtiment composé d'une grande salle de réunion, d'une salle de billard, et d'un salon particulier pour les dames et un bâtiment qui contenait une dizaine de baignoires se trouvait à sa droite. La source était alimentée par trois venues d'eau distinctes (mais appartenant au même système hydrothermal). Des travaux d'encaissement ont été réalisés en 1852-53 pour protéger l'eau des actions du soleil et de l'air. L'eau était canalisée dans deux tuyaux. Le plus gros, débitant 700 à 750 litres par heure, alimentait deux robinets dont les eaux étaient destinées à la consommation. Le second tuyau, qui débitait entre 200 et 250 litres par heure, était relié à un réservoir hermétiquement fermé situé à quelques mètres seulement de la source. L'eau qui n'était pas bue au robinet était également canalisée vers ce réservoir. De là, l'eau était pompée (3 à 4 mètres d'élévation) et acheminée, soit directement vers les baignoires de bains en zinc (entre dix et quinze), soit transitait par une chaudière pour assurer des bains à 33 – 35 °C. L'eau de la rivière du Bras Sec pouvait également être portée à 100 °C dans la chaudière avant d'être mélangée à l'eau thermo-minérale pour assurer le confort du bain. Enfin, une dépression creusée dans le lit de la rivière faisait office de piscine.

Cette description des thermes d'Hell-Bourg, schématisée sur la figure 2, permet de localiser approximativement l'ancien griffon. La présence d'un mur de pierre en bon état et d'arbres à l'ouest du bâtiment des baignoires semblent confirmer que le griffon ne se trouvait pas de ce côté ci de l'actuelle ruine. L'émergence étant en dessous d'un vaste bâtiment et un autre qui contenait une dizaine de baignoires se trouvant à sa droite ; la source thermale devrait se trouver en rive droite du Bras-Sec, au nord-est du bâtiment des baignoires et au nord-ouest du bâtiment situé à l'est du site (Fig. 2). Le creusement d'une (ou deux) tranchée(s) de quelques mètres de profondeur sur la zone où l'existence de l'ancien griffon est pressentie, permettrait de confirmer ou de démentir cette hypothèse, si il y a toujours arrivée d'eau lhermale en subsurface.

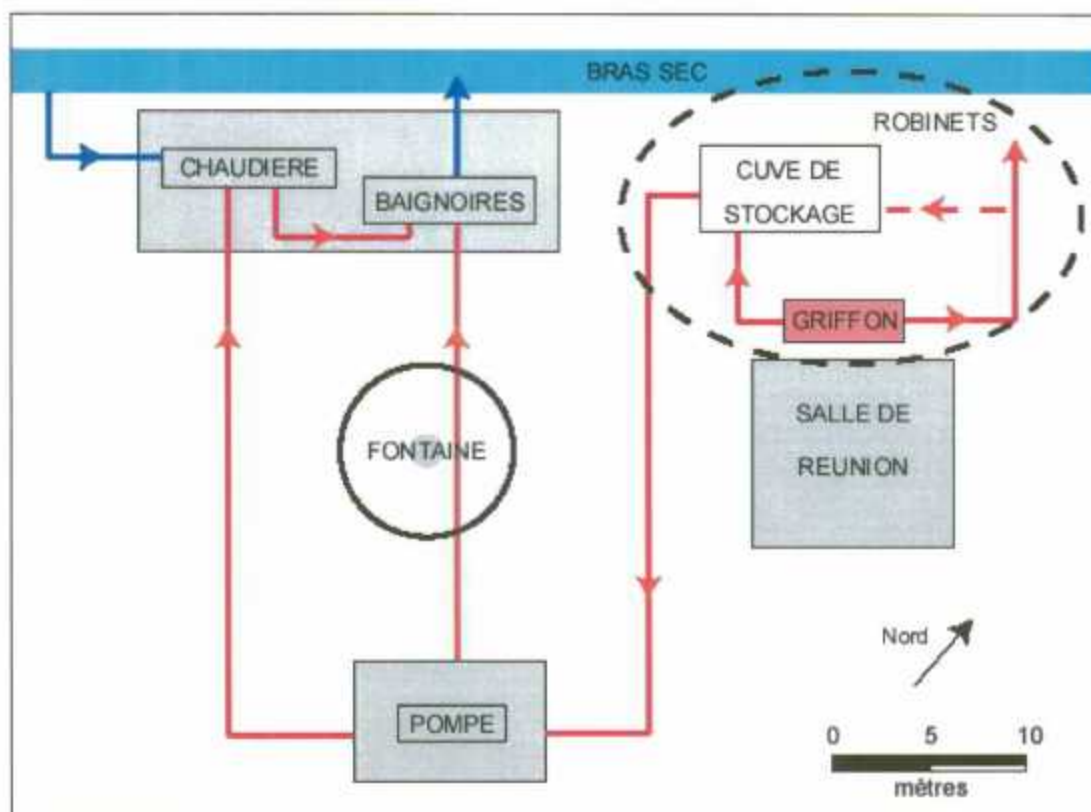


Figure 2 : Schéma hydraulique reconstitué des anciens thermes d'Hell-Bourg

3. Campagne géophysique

L'objectif de la campagne géophysique qui a été réalisée, a été de rechercher la zone d'altération hydrothermale pouvant correspondre à des circulation d'eaux thermales, sous les terrains de couverture (colluvions).

La technique géophysique qui a été retenue est l'imagerie électrique, par la méthode du panneau électrique en dispositif dipôle-dipôle. Les mesures de résistivité apparente et de polarisation provoquée ont été complétées par des mesures de polarisation spontanée.

3.1 CONTEXTE GEOLOGIQUE

L'environnement géologique des anciens thermes correspond à des laves appartenant aux séries basaltiques anciennes du massif du Piton des Neiges.

A l'affleurement, au sud du site, on remarque la présence d'une falaise de basaltes sombres et fissurés, zéolitisés (séries des océanites anciennes, phase I), localement recoupés par des dykes. L'emplacement des anciens thermes est recouvert de colluvions constituées de blocs rocheux basaltiques déplacés par un glissement de terrain (cyclone de 1948).

La limite nord du site est bordée par les alluvions grossières de la ravine du Bras Sec.

3.2 METHODES ET MOYENS UTILISES

3.2.1 Matériel

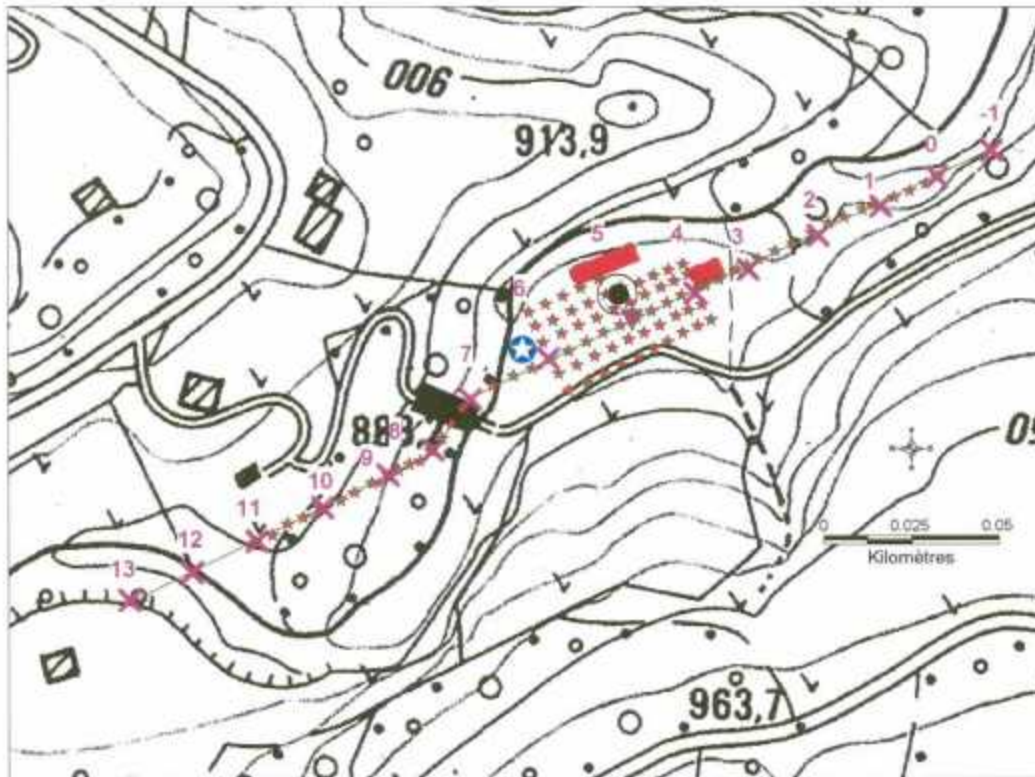
- 1 résistivimètre ELREC6 multi-canaux (Iris Instruments) ;
- 1 émelleur de courant continu VIP4000 (Iris Instruments) ;
- 1 contrôleur universel Metrix MX45 ;
- 1 groupe électrogène 4.5 KVA (Honda) ;
- matériel annexe pour la mise en œuvre des mesures électriques (câbles, électrodes en acier inoxydable, électrodes impolarisables au sulfate de cuivre...) ;
- 1 véhicule ;
- 1 ordinateur portable Toshiba 440 CDX et une imprimante HP Deskjet 340 ;
- logiciels RES2DINV pour l'interprétation des pseudo-coupes, MapInfo, Surfer, Grapher pour les restitutions graphiques

3.2.2 Méthodes - Travaux effectués

La méthode du panneau électrique a été retenue pour tenter de mettre en évidence la zone d'altération hydrothermale dans le sous-sol, par son contraste de résistivité. Compte tenu de l'accessibilité du site et de la profondeur d'investigation souhaitée (de 10 m à quelques dizaines de mètres), l'imagerie électrique s'est appuyée sur un dispositif dipôle-dipôle combinant deux longueurs de dipôles, $D = 10$ m et $D = 20$ m orientés est-ouest (Fig. 3).

Les paramètres résistivité apparente et polarisation provoquée ont été mesurés simultanément (134 mesures), la durée du signal électrique étant de 2 s. La topographie a été sommairement évaluée de visu, à 0.5 m près, précision suffisante pour l'interprétation des résultats.

Les mesures de polarisation provoquée ont pour objectif de détecter une éventuelle concentration de sulfures disséminés associés à l'altération hydrothermale.



- ★ Point de mesure PS
- ✕ station dipôle-dipôle et n°
- ▼ milieu du dispositif dipôle-dipôle
- ★ forage de reconnaissance fait en 1971
- fontaine des anciens thermes
- pont métallique
- bâtiments des anciens thermes (ruines)

Figure 3 : Localisation des dispositifs de l'étude géophysique (fond IGN 1992, échelle 1/5 000)

Les mesures en courant continu ont été complétées par des mesures de polarisation spontanée, le long du panneau électrique au pas de 5 m (48 mesures). 10 profils perpendiculaires (nord-sud) au panneau électrique ont été mesurés à la maille 5 x 5 m (55 mesures) sur l'emprise accessible des anciens bâtiments des thermes pour étudier l'extension latérale des anomalies électriques.

3.2.3 Interprétation – Restitutions graphiques – Archivage

Sur la figure 4 sont présentées les pseudo-coupes de résistivité apparente et de polarisation provoquée.

Celles-ci ont été interprétées par inversion avec le logiciel RES2DINV avec prise en compte des variations du relief.

Ce logiciel, utilisé en configuration éléments finis, comporte des algorithmes de convergence très perfectionnés, prend en compte la topographie des profils et permet de corriger les effets de relief (anomalies parasites dues aux variations importantes de relief). Le logiciel s'affranchit également de tous les artefacts "classiques", liés au dispositif dipôle-dipôle (à-coups de prises dus aux structures superficielles) et au mode de représentation des pseudo-coupes ("chapeaux chinois", branches inclinées à 45°).

Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme de coupe-profondeur de résistivité et de polarisation provoquée.

Cette interprétation par inversion fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : caractéristiques électriques (résistivité et polarisation provoquée vraies), géométrie et profondeur.

Même si la précision et la stabilité des inversions sont optimisées par des algorithmes de convergence très performants, les paramètres géométriques fournis par l'inversion des pseudo-coupes peuvent varier, en théorie, dans une fourchette comprise entre 10 et 20 %.

Les représentations graphiques ont été réalisées avec les logiciels MapInfo, Surfer et Grapher.

3.2.4 Résultats – Recommandations

Les résultats sont présentés sur les figures 5 et 6.

La coupe de résistivité interprétée met en évidence un ensemble résistant R1 (200 à 400 Ohm.m) superficiel, d'une épaisseur de quelques mètres à une dizaine de mètres entre les stations 7 et 2 (110 et 230 m), correspondant de toute évidence aux colluvions affleurant en surface.

L'épaisseur de ces alluvions diminue au niveau de la ravine du Bras Sec où affleure une coulée de lave altérée caractérisée par un horizon plus conducteur (C1, 60 à 100 Ohm.m). A l'est, au niveau de la ravine Bras Sec, apparaît une autre coulée de lave altérée, avec un degré d'altération plus important que la première, qui se traduit sur la coupe par des valeurs de résistivité plus faibles (C2, < 20 Ohm.m).

Vers 10 à 15 m de profondeur apparaît un ensemble conducteur C3 (20 à 40 Ohm.m). Il pourrait s'agir de formations basaltiques fracturées et/ou altérées. A l'est, ce conducteur repose sur un substratum plus résistant (R2, 80 à 100 Ohm.m), correspondant peut-être à des dépôts basaltiques moins altérés pouvant éventuellement présenter un intérêt en terme d'aquifère ?

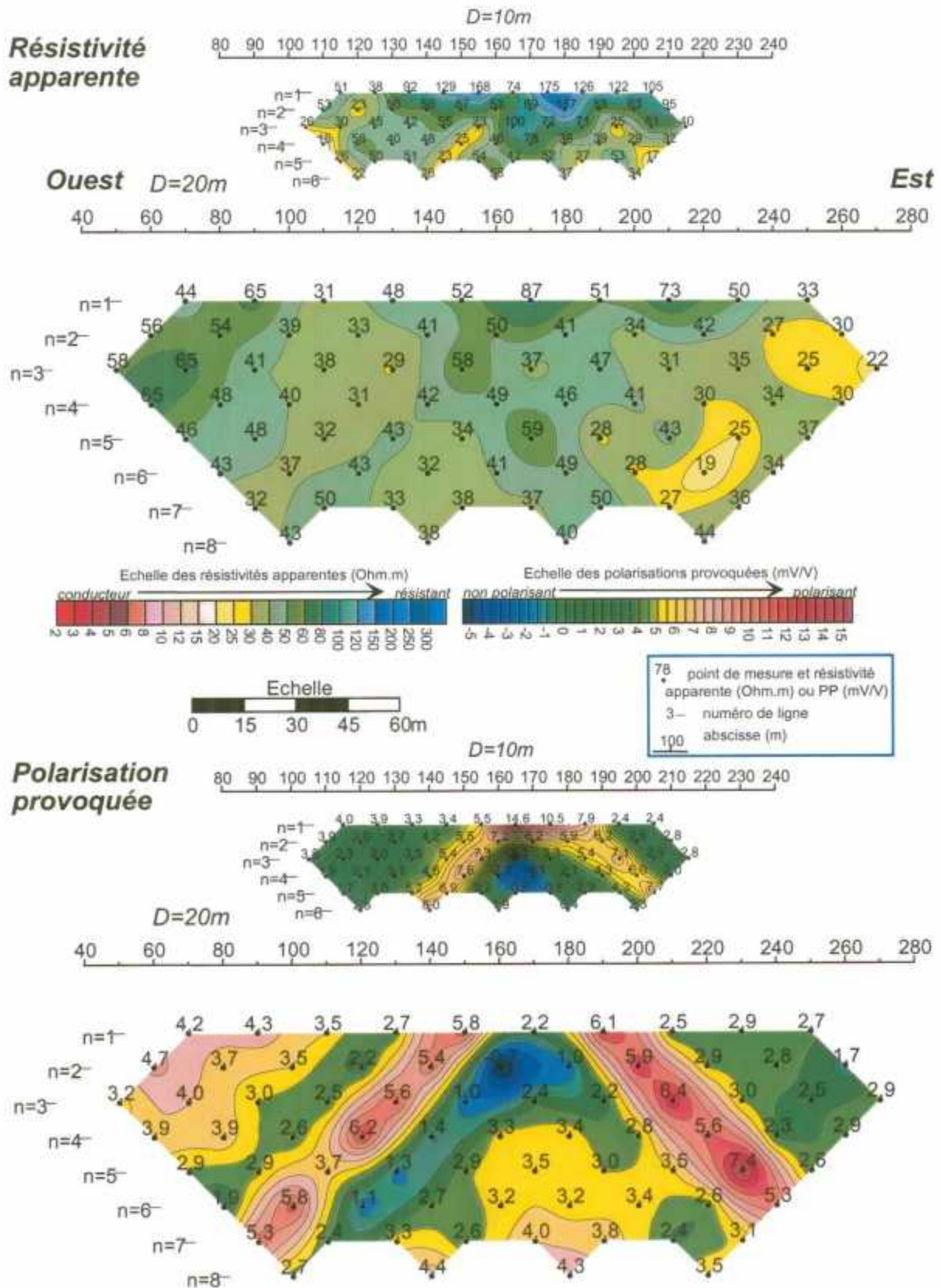


Figure 4 : Pseudo-coupes de résistivité apparente et de polarisation provoquée

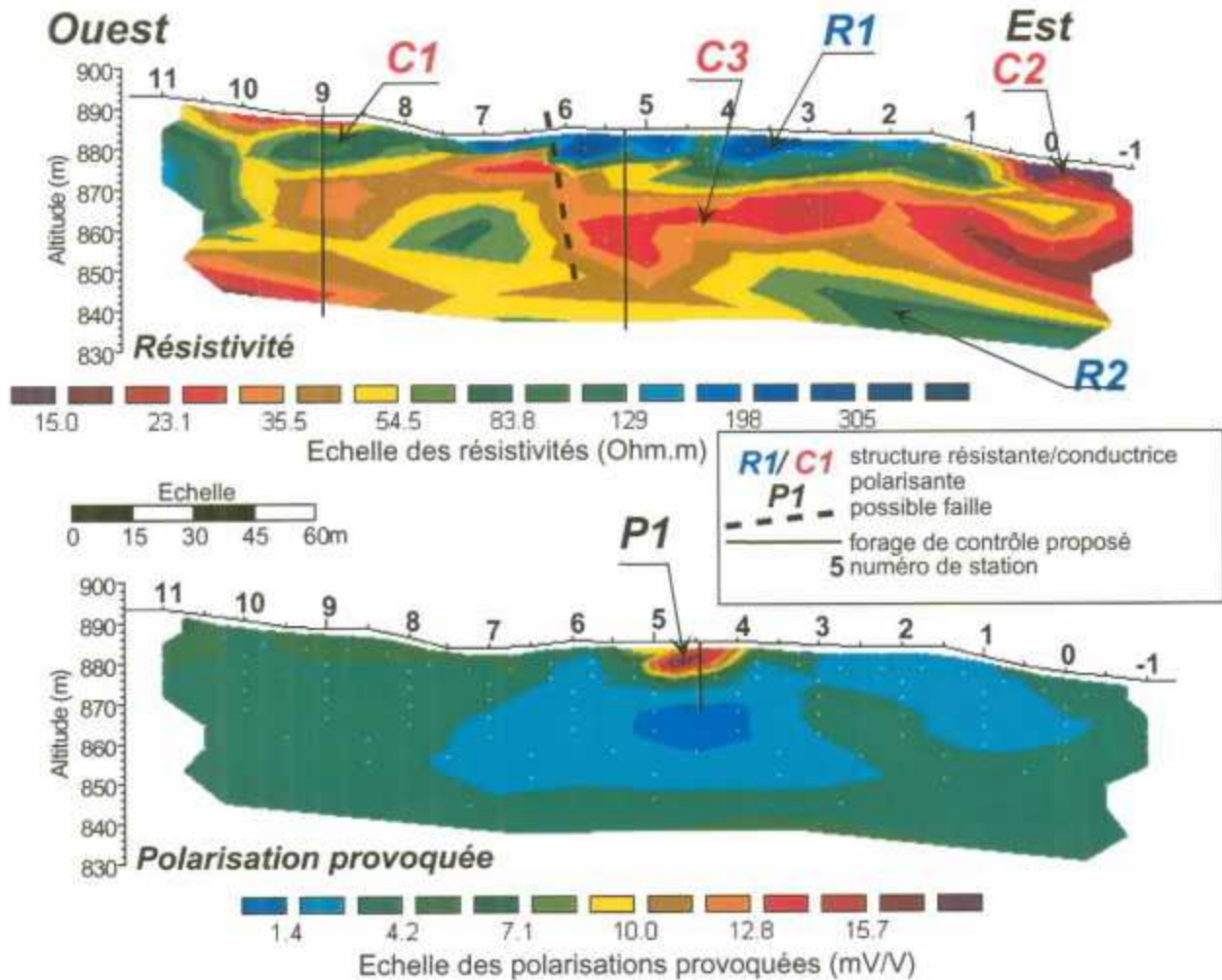


Figure 5 : Profil de polarisation spontanée et coupes inversées de résistivité et de polarisation provoquée

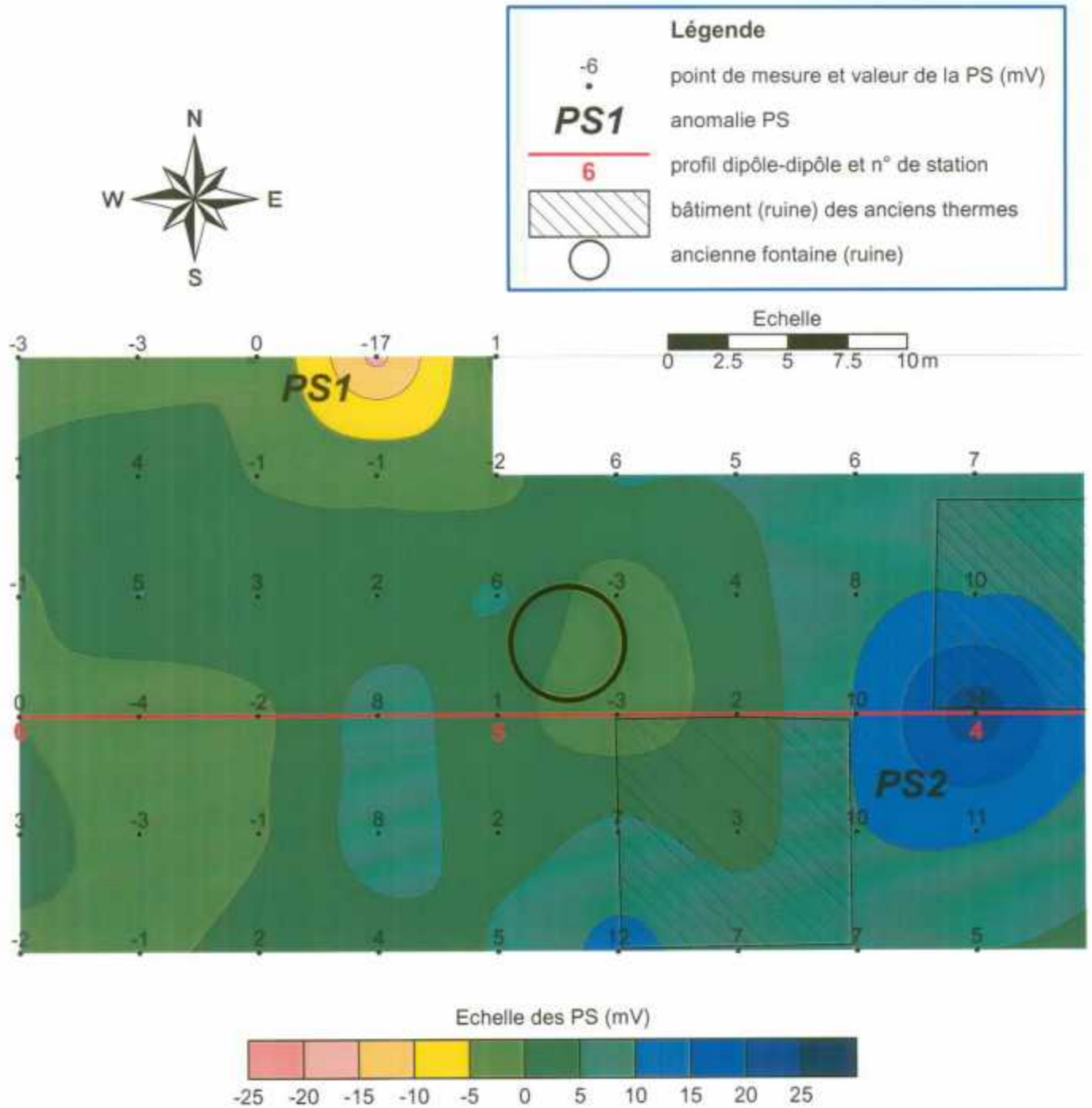


Figure 6 : Carte de la Polarisation Spontanée (PS)

La structure conductrice est marquée par une figure en marche d'escalier au niveau de la station 6 (130 m), indiquant peut être la présence d'une faille avec un compartiment haut, à l'ouest et un compartiment bas, à l'est.

L'épaississement du conducteur C3 entre les stations 6 et 4 (140 et 170 m sur la figure 5) pourrait être la signature de la zone d'altération hydrothermale recherchée, associée à une faille subverticale.

Un forage de reconnaissance vertical d'environ 50 m de profondeur permettrait de vérifier cette hypothèse.

Vers l'ouest, on observe également un épaississement de l'horizon C3 (station 9 (80 m sur la figure 5)) s'appuyant sur un substratum plus conducteur. Ces unités conductrices pourraient également être en relation avec une zone d'altération hydrothermale. Un forage de reconnaissance de 60 à 70 m de profondeur permettrait de préciser la nature de ces structures.

La coupe de polarisation provoquée met en évidence une structure polarisante P1 sub-affleurante entre les stations 5 et 4 (160 et 180 m sur la figure 5) au voisinage de la fontaine des anciens thermes. Cette structure s'inscrit dans un contexte peu polarisant (< 5 mV/V (Fig. 5) et coïncide avec une interruption du résistivité R1 (station 175 m sur la figure 5), également marquée par une anomalie positive (25 mV) de la polarisation spontanée.

Un forage de 10 à 15 m de profondeur permettrait d'identifier cette structure.

Des valeurs négatives inhabituelles de polarisation provoquée ont été enregistrées à l'aplomb des stations 4 et 5 (170 m sur la figure 5), aussi bien en dispositif $D = 10$ m que $D = 20$ m (Fig. 5). Ces mesures, parfaitement stables et répétitives, correspondent sur la coupe inversée, à une structure non polarisante d'origine inconnue.

La polarisation spontanée mesurée le long du panneau électrique varie de -7 à $+23$ mV et n'apporte aucune précision sur la nature des structures géo-électriques mises en évidence.

Mis à part deux anomalies très ponctuelles (PS1 -17 mV et PS2 $+24$ mV) les profils de la polarisation spontanée, perpendiculaires (Fig. 6) au panneau électrique ne montrent aucune variation importante de la polarisation spontanée. La fontaine des anciens thermes est marquée par des valeurs négatives de la polarisation spontanée, mais le contraste est trop faible pour être significatif.

4. Campagne géochimique : profils de mesures de teneurs des gaz dans les sols

4.1 INTERET DE LA METHODE UTILISEE

L'objectif de l'analyse de certains gaz libres dans les sols, tels que l'oxygène, l'azote, le dioxyde de carbone, l'argon, l'hélium et le radon, est de détecter des anomalies associées à des discontinuités structurales dans la croûte terrestre et des flux d'énergie. Cette méthode présente donc un intérêt tout particulier pour la prospection des zones géothermales/hydrothermales. Quelques-unes de ces anomalies se juxtaposent aux discontinuités structurales (enrichissement en He, appauvrissement en O₂ par rapport à la composition atmosphérique), tandis que d'autres, en raison de la présence de nappes phréatiques et de la plus grande solubilité de certains gaz dans l'eau, peuvent être décalées (enrichissement en CO₂, par exemple).

Le radon ne diffusant pas latéralement, contrairement à l'hélium et surtout au dioxyde de carbone, s'exprime en surface par des anomalies sous forme de bandes très étroites (Baubron et Sabroux, 1984). Ce gaz dont l'isotope 222 est le plus stable (période de 3,8 jours) et est celui que l'on mesure, ne doit sa grande mobilité qu'à celle des fluides qui le transportent. Il constitue, par conséquent, un bon indicateur d'un flux correspondant à des circulations d'eaux actives.

Le dioxyde de carbone (CO₂) est un gaz ubiquiste ; ce gaz est, en particulier, signalé dans tous les champs géothermiques connus et, d'une manière générale, dans les fumerolles de toutes les zones volcaniques du monde, quelle que soit, d'ailleurs, la température des émanations gazeuses (Truesdell *et al.*, 1983).

La mesure des différents gaz contenus dans les sols est un outil précieux pour la recherche d'eaux thermales, riches en gaz. Elle permet de tracer parfaitement le flux des gaz libérés par ces eaux qui subissent, au cours de leur remontée vers la surface, une baisse de pression. Quand la pression est inférieure au « point de bulle », il y a séparation des phases (eau et gaz) et les gaz, ainsi libérés, migrent dans le proche sous-sol. Dans le contexte volcanique de La Réunion, ces gaz sont essentiellement constitués de CO₂.

Dans les sols, la production de CO₂ d'origine biogénique se fait essentiellement au niveau des racines et lors de la décomposition de la matière organique. Ce CO₂ se rencontre dans la partie très superficielle du sol (15 à 20 cm de profondeur) ; les concentrations sont variables selon la saison et la nature du sol, mais dépassent rarement 5 % en volume. L'air atmosphérique ne possède que de très faibles teneurs en CO₂ (0,034 % environ).

Ainsi, en utilisant une technique de prélèvement qui puisse faire abstraction du CO₂ superficiel d'origine biogénique, on peut détecter les émanations de CO₂ associées à la présence d'eaux thermales ou de discontinuités structurales profondes.

4.2 PROCEDURES D'ANALYSES DES GAZ DANS LES SOLS

4.2.1 Généralités

Ce chapitre présente les différents protocoles de prélèvements et de mesures des gaz (Fig. 7). La localisation des points de mesure sur le site des anciens thermes d'Hell-Bourg est fournie en figure 8.

L'échantillonnage se fait à la pression atmosphérique, afin d'éviter des calculs de correction sur les mesures de gaz obtenues. Une analyse de gaz simultanée permet de travailler à pression atmosphérique constante et est donc recommandée, quand cela est possible. Le choix d'une profondeur identique de prélèvement pour un même profil (profondeur conseillée 50 cm) contribue à une meilleure comparaison des résultats.

En fonction de l'accessibilité et donc de la disponibilité de courant pour le perforateur, on installe, dans le sol, soit des tubes en carton, soit des cannes de prélèvement en acier dont l'étanchéité en surface est assurée par un joint torique, et qui sont enfoncées à l'aide d'une masselotte. En ce qui concerne les tubes en carton, il ne faut pas oublier d'assurer une bonne étanchéité périphérique en surface en humidifiant le tube. La mesure et/ou le prélèvement ne doivent être effectués que 24 h, au minimum, après la réalisation du trou pour que le sol retrouve des caractéristiques non perturbées.

Dans la mesure où l'on travaille en relatif (recherche d'anomalies de gaz), une très grande précision des mesures n'est pas exigée. Par contre, il est intéressant de pouvoir analyser sur site, plusieurs gaz, à la fois.

4.2.2 Analyse du dioxyde de carbone, du méthane et de l'oxygène

Les mesures de ces trois gaz se font par infra-rouge. L'appareil est un LFG 20 TELEGAN portable, qui donne simultanément les mesures des gaz en % de volume. La précision analytique est de 0,5 % pour CO₂ et CH₄ et de 0,4 % pour O₂.

Le CO₂, le CH₄ et le O₂ sont toujours analysés sur site. La pompe interne du LFG 20 sert également à remplir les fioles à scintillation pour les analyses de radon et à alimenter le spectromètre ou à remplir un sac téflon « Tedlar », en cas d'absence du spectromètre sur site, pour les analyses d'hélium.

Le zéro de l'appareil est fait, soit avec du N₂ pur ou mieux encore, avec un mélange N₂/CO₂ à 80/20 %. Le réglage de la valeur en oxygène (20,9 %) se fait à l'air libre avant la connexion avec la canne de prélèvement pour s'affranchir des variations de la pression atmosphérique. L'étalonnage en CO₂ et CH₄ est réalisé au laboratoire avec un étalon de 20 % et un étalon de 50 ou 100 %, dans des sacs soumis à la pression atmosphérique.

Les mesures sont directement lues sur l'appareil après stabilisation. Pour éviter les incertitudes dues à la dérive de l'appareil, une vérification des taux en O₂, CO₂ et CH₄ de l'air ambiant est faite avant et après la connexion sur la canne de prélèvement.

4.2.3 Analyse de l'hélium

L'hélium est analysé au moyen d'un spectromètre de masse ALCATEL, type ASM 100. La précision analytique est de 0,02 ppm. Le spectromètre de masse est mis en marche au minimum 20 à 30 mn avant d'effectuer les mesures afin d'obtenir un bon vide et donc une bonne stabilité de la mesure. Le branchement He est latéral par rapport au flux de gaz pour minimiser les perturbations liées aux variations de débit de la pompe du LFG20.

Que l'analyse se fasse en direct ou après prélèvement dans un sac téflon, le protocole analytique est le même. On fait d'abord circuler du N₂ (ou un autre gaz dépourvu d'hélium) à travers l'analyseur CO₂ et le spectromètre, afin d'obtenir, sur l'enregistreur papier ou sur le métrix, le zéro de l'appareil. Quand le LFG 20 indique zéro en oxygène, on peut régler le zéro en hélium du spectromètre. Ensuite, la mesure dans l'air ambiant permet de se caler sur la valeur en hélium atmosphérique de 5,24 ppm. L'idéal est alors de régler le potentiomètre de gain du spectromètre sur 52,4 mV. L'utilisation d'un étalon de 20 ppm est recommandée, mais non indispensable.

L'étalonnage de l'appareil étant terminé, on peut passer l'échantillon. Lorsqu'on a atteint une bonne stabilité de la mesure en CO₂ sur le LFG 20, on peut alors noter la valeur en hélium mesurée. Avant et après chaque passage d'échantillon, il est recommandé de se connecter sur l'air afin de pouvoir corriger le résultat obtenu de la dérive de l'appareil.

4.2.4 Analyse du radon

Le radon est analysé au moyen d'un compteur à scintillation de particules alpha. Le gaz est introduit dans des fioles spéciales (sulfure de zinc dopé à l'argent) pour permettre l'exécution du comptage. Compte tenu de la période extrêmement faible de cet élément, le comptage doit se faire impérativement entre trois et six heures après le prélèvement.

Les fioles à scintillation sont laissées à l'air libre au moins une nuit avant un prélèvement. De plus, une fiole ayant été mouillée intérieurement, doit être écartée.

Avant prélèvement, le vide doit être fait à l'intérieur de la fiole au moyen d'un dispositif connecté à une pompe à vide à main. Quand la stabilité du circuit de prélèvement est atteinte (stabilisation de la valeur de CO₂ mesurée sur le LFG 20), on connecte en bout de circuit l'aiguille hypodermique qui va servir à introduire l'échantillon de gaz dans la fiole. Le septum de cette fiole est traversée par l'aiguille. On attend alors la remontée complète en pression de la fiole, à l'aide du manomètre de la pompe à vide, puis on pompe tranquillement une quinzaine de fois. La pompe à vide est déconnectée puis la partie amont de la fiole est désolidarisée du circuit sans retirer l'aiguille du septum afin de faire remonter l'intérieur de la fiole à la pression atmosphérique. L'heure du prélèvement est notée afin de ne pas oublier de faire le comptage entre 3 et 6 heures après le prélèvement.

Le comptage est réalisé sur cent secondes (sur une période plus courte, on perd de la précision et sur une période plus longue, on perd du temps). Il convient de bien choisir l'échelle de comptage en fonction de la concentration en radon.

Le compteur est ensuite remis à zéro puis on commence le comptage. L'expression des résultats se fait selon la formule : 1 cp/s = 120 pCi/l.

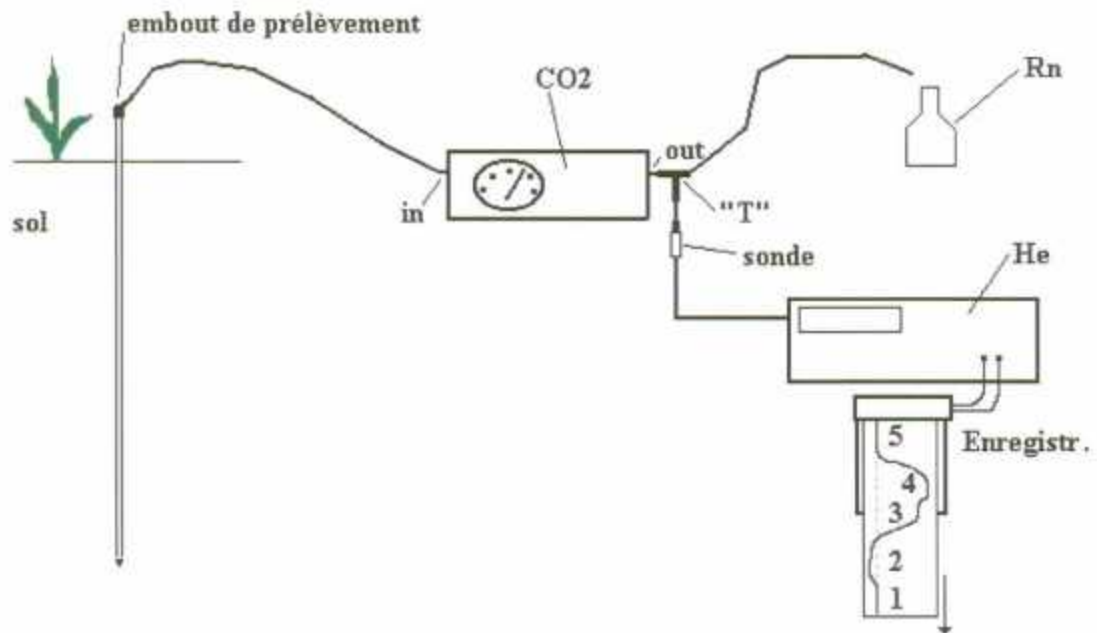


Figure 7 : Schéma du dispositif de prélèvement et de mesure des gaz dans les sols

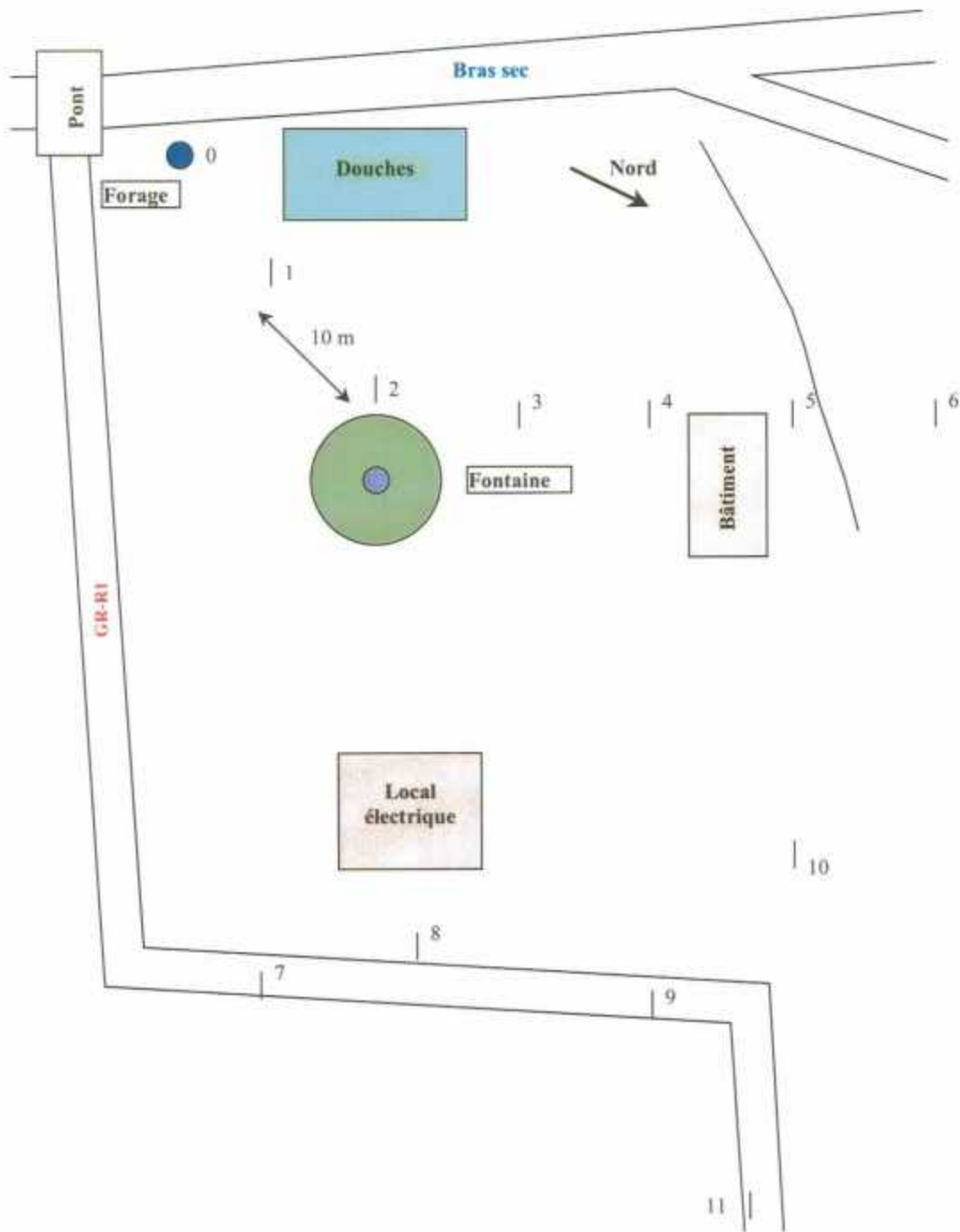


Figure 8 : Localisation des points de mesure des gaz dans les sols sur le site des anciens thermes d'Hell-Bourg

4.3 RESULTATS

N° échantillon	Mode de prélèvement	date de prélèvement	Heure de prélèvement et de mesures	Remarques
0	tube en carton	23/06/2001	15:30	
1	tube en carton	23/06/2001	15:40	
2	tube en carton	23/06/2001	15:55	
3	tube en carton	23/06/2001	16:05	sac prélèv. He vide
4	tube en carton	23/06/2001	16:15	
5	tube en carton	23/06/2001	16:25	tube enlevé
6	tube en carton	23/06/2001	16:35	
7	tube en carton	23/06/2001	17:21	
8	tube en carton	23/06/2001	17:10	tube cassé
9	tube en carton	23/06/2001	17:03	
10	tube en carton	23/06/2001	16:45	
11	tube en carton	23/06/2001	16:55	

N° échantillon	CO ₂ %	CH ₄ %	O ₂ %	Mesure du Rn			He ppm
				Heure	cp/s	pCi/l	
0	0.9	0.0	19.9	18:40	0.24	29	5.23
1	0.3	0.0	20.5	18:42	0.24	29	5.24
2	0.3	0.0	20.5	18:45	0.34	41	5.24
3	0.1	0.0	20.5	21:35	0.04	5	?
4	0.6	0.0	20	21:40	0.19	23	5.24
5	0.2	0.0	20.1	21:42	0.03	4	5.24
6	0.4	0.0	20.1	21:45	0.17	20	5.24
7	0.1	0.0	20.3	22:00	0.06	7	5.27
8	0.3	0.0	20.1	21:56	0.04	5	5.24
9	0.4	0.0	20.1	21:52	0.14	17	5.24
10	0.9	0.0	19.7	21:47	0.15	18	5.24
11	0.3	0.0	19.9	21:50	0.19	23	5.27

Tableau 2 : Résultats des analyses chimiques des gaz dans les sols sur le site des anciens thermes d'Hell-Bourg

L'hélium est jugé comme le meilleur indicateur de fuites gazeuses profondes. En ce qui concerne ce gaz, une anomalie de +0.1 à +0.2 ppm par rapport à la valeur atmosphérique (5.24 ppm) peut être, en général, considérée comme significative de remontées hydrothermales. De telles valeurs anormales n'ont pas été mesurées sur le site des anciens thermes d'Hell-Bourg.

Le CO₂, considéré comme un indice de fuites gazeuses profondes, peut également être d'origine organique (jusqu'à 5-6 % du volume de l'échantillon, voire plus). Quand les teneurs en ce gaz sont élevées, les analyses doivent être validées par des mesures isotopiques de ¹³C, qui discriminent le carbone d'origine organique de celui d'origine magmatique, afin de s'assurer de son origine. Des mesures isotopiques de ¹³C sur les points 0 et 10, où les teneurs de CO₂ sont proches de 1%, auraient pu être réalisées. Néanmoins, dans l'éventualité où ces concentrations seraient liées à des fuites gazeuses d'origines profondes, elles resteraient très faibles.

En ce qui concerne le CH₄, son origine, tout comme le CO₂, peut être organique (jusqu'à 5-6 %, voire plus). Quoi qu'il en soit, les teneurs de ce gaz, mesurées sur les anciens sites des thermes d'Hell-bourg sont nulles.

Les investigations géochimiques traduisent donc l'absence d'anomalies de surface, liées à la remontée de fluides hydrothermaux.

5. Conclusions

Les études géophysiques et géochimiques menées sur le site des anciens thermes d'Hell-Bourg ont permis d'apporter des éléments nouveaux quant à la géométrie et au fonctionnement de ce système hydrothermal. D'autres informations, tout aussi précieuses et en partie tombées dans l'oubli, ont été collectées et synthétisées après des recherches bibliographiques menées aux Archives Départementales de La Réunion.

· Les recherches bibliographiques menées aux Archives Départementales de La Réunion ont permis de spécifier les caractéristiques physico-chimiques des anciennes sources thermales d'Hell-Bourg et la configuration du site avant sa disparition progressive dans les années 1930 - 1940 :

l'eau émergeait en rive droite de la ravine du Bras-Sec. La source débitait 1000 litres à l'heure une eau à 32 - 33 °C. La température de l'eau augmentait pendant les périodes de sécheresse et diminuait en cas d'infiltration d'eau froide (pluie ou montée des eaux de la ravine ; phénomène interprété comme étant dû à une dilution par des eaux atmosphériques). L'eau était d'autant moins gazeuse qu'elle était froide, et d'autant plus que le temps était à l'orage (phénomène à mettre en relation avec la baisse de pression atmosphérique). Sa composition chimique était proche de celle des eaux ferrugineuses de Vichy. L'émergence se trouvait en dessous d'un vaste bâtiment composé d'une grande salle de réunion, d'une salle de billard, et d'un salon particulier pour les dames, et un bâtiment qui contenait une dizaine de baignoires se trouvait à sa droite. La source était alimentée par trois venues d'eau distinctes (mais appartenant au même système hydrothermal). Des travaux d'encaissement ont été réalisés en 1852 et 1853 pour protéger l'eau des actions du soleil et de l'air. L'eau était canalisée dans deux tuyaux. Le plus gros, débitant 700 à 750 litres par heure, alimentait deux robinets dont les eaux étaient destinées à la consommation. Le second tuyau, qui débitait entre 200 et 250 litres par heure, était relié à un réservoir hermétiquement fermé situé à quelques mètres seulement de la source. L'eau qui n'était pas bue au robinet était également canalisée vers ce réservoir. De là, elle était pompée (3 à 4 mètres d'élévation), et acheminée, soit directement vers les baignoires en zinc (entre dix et quinze) soit transitait par une chaudière pour assurer des bains à 33 - 35 °C. L'eau de la rivière du Bras Sec pouvait également être portée à 100°C dans la chaudière avant d'être mélangée à l'eau thermo-minérale pour assurer le confort du bain. Enfin, une dépression creusée dans le lit de la rivière faisait office de piscine.

Cette description des thermes d'Hell-Bourg, schématisés sur la figure 2, permet d'envisager de localiser l'ancien griffon et son équipement de captage. La source thermale devrait se trouver en rive droite du Bras-Sec, au nord-est du bâtiment des baignoires et au nord-ouest du bâtiment situé à l'est du site. Le creusement d'une tranchée de quelques mètres de profondeur sur cette zone permettrait peut-être de vérifier cette hypothèse.

Il est à noter que le débit des sources avaient sensiblement diminué et que leurs eaux étaient de plus en plus froides, la température était passée de 31° à 27° C à partir de 1930. Le coup fatal fut porté à la station délaissée, par un éboulement qui ensevelit la source, à la suite du passage du cyclone de 1948.

· L'imagerie électrique a permis de mettre en évidence des structures géo-électriques susceptibles d'être en relation avec la zone d'émergence de la source thermale.

La cible prioritaire est située au droit de la station 5. Au sein du niveau conducteur assimilé à des formations basaltiques fissurées et/ou altérées, la coupe de résistivité inversée met en évidence un épaissement pouvant correspondre à la zone d'altération hydrothermale recherchée, associé à une faille subverticale dont la présence est suggérée par une figure en marche d'escalier. Un forage vertical de 50 m de profondeur permettrait de vérifier cette hypothèse.

A l'aplomb de la station 9, les mesures de résistivité apparente ont mis en évidence une seconde structure conductrice reposant sur un substratum conducteur peut être en relation avec la zone d'émergence de la source thermique. Un forage de contrôle de 60 à 70 m de profondeur permettrait d'identifier ces ensembles conducteurs.

La coupe de polarisation provoquée révèle la présence d'une structure polarisante entre les stations 5 et 4 (160 et 180 m), sur l'emprise de la fontaine des anciens thermes. Sub-affleurante et peu enracinée, cette structure pourrait être contrôlée par un forage de 10 à 15 m de profondeur.

· Les résultats de la campagne géochimique de mesures des teneurs en gaz dans les sols des anciens thermes d'Hell-Bourg, ne mettent en évidence aucun indice majeur de fuites gazeuses d'origine profonde sur ce site.

A la suite des investigations géophysique, géochimique et bibliographique, conduites dans le cadre de cette étude, l'activité du système hydrothermal ayant alimenté les anciens thermes, ne peut être démontrée à l'heure actuelle. Un nouveau forage – ou tout au moins, des sondages de reconnaissance – et des tranchées, à réaliser dans les zones "anormales" pressenties devraient permettre :

- de vérifier la nature *in situ* des structures géo-électriques mises en évidence par la géophysique ;
- de mettre à jour l'ancien griffon.

En outre, la réalisation d'un forage de plusieurs dizaines de mètres de profondeur permettrait, en cas de succès, c'est à dire de captage d'eau d'une façon pérenne :

- de savoir si les caractéristiques physico-chimiques de l'eau restent proches de celles citées dans la littérature ;
- d'approcher, en cas de conditions favorables, les caractéristiques hydrodynamiques minimales de la ressource hydrothermale.

6. Références bibliographiques

Références citées dans le texte :

Anonyme (date ?) - Eaux minérales de Salazie. 8 p. Réf. archive départementale : PB 1243 .

Baubron J.C. et Sabroux J.C. (1984) - Analyses des gaz dans les sols sur les zones de Bouillante et de Moscou (Guadeloupe). Rapport BRGM n° 84 SGN 400 GTH, 94 p.

Chanot François – Auguste (1860) - Eau minérale de Salazie (Ile de La Réunion). Thèse pour doctorat en médecine. 164 p. Réf. archive départementale : BIB1150.

Collège de Salazie (1990) - Les thermes de Salazie. 38 p. Réf. archive départementale : PB2103.

Dalavaud (1856) - Note sur l'eau minérale de Salazie. pp 77-82. Réf. archive départementale : 4MI133(J1-9).

Dr de Cordemoy Jacob (1908) - Salazie, ses sites, ses eaux minérales. 52 p. Réf. archive départementale : PB1406.

de Fayard Benoît-Emile (1908) - Eaux Minérales de l'île de la Réunion. Thèse pour le doctorat en médecine. 64 p. Réf. archive départementale : 4MI124 J1 –2.

Motais de Narbonne A. (1935) - Stations climatiques et hydro-minérales de l'île de la réunion. Thèse de doctorats en médecine. Paris. 35 p. réf. archive départementale : 4MI128.

Roussin A. (1975) - L'album de La Réunion Edition Jeanne Laffite. pp 86-89, première édition 1860. Réf. archive départementale : BIB119/l.

Truesdell A.H., Mazor E., Nehring N.L. (1983) - The origin of thermal fluids at Lassen volcanic national park : evidence from noble and reactive gas abundances. Geothermal Resources Council, Transactions, vol. 7, October 1983.

Références consultées mais non citées dans le texte :

Dr Auber J. (1900 ?) - Bourbon Sanalerium. 92 p. Réf. archive départementale : PB 1807.

Anonyme (1865) - Compte-rendu des résultats obtenus à l'établissement hydrothérapique du Dr Herland pendant les années 1862 , 1863, 1864. Imprimerie du journal du commerce. Réf. archive départementale : PB20.

Petit L.A et Gaudin C. (1857) - Guide hygiénique et médical aux eaux thermales de Salazie. Imprimerie de Vital Delval. 122 p. Réf. archive départementale : BIB1064.