



BRGM

RÉGIE MUNICIPALE DES EAUX THERMALES
DE BAGNÈRES-DE-BIGORRE (65)
thermes de Salut

étude hydrogéologique
en vue d'un recaptage des eaux

B. R. G. M.
12. DEC. 1985
BIBLIOTHEQUE



RÉGIE MUNICIPALE DES EAUX THERMALES
DE BAGNÈRES-DE-BIGORRE (65)
thermes de Salut

étude hydrogéologique en vue d'un recaptage des eaux

J.-C. Soulé

avec la collaboration de

J.-M. Collin

F. Iundt

M. Nartet

J.-L. Sahuqué

Y. Ternet

Novembre 1985
85 SGN 541 MPY

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
Service Géologique Régional Midi-Pyrénées
avenue Pierre-Georges-Latécoere - 31400 TOULOUSE - Tél.: 61.52.12.14

RESUME

La présente étude, effectuée à la demande de la Régie Municipale des Eaux Thermales de Bagnères-de-Bigorre, a été conduite en vue de satisfaire les objectifs suivants :

- augmenter les débits
- augmenter la température
- stabiliser la qualité de l'eau
- réduire les risques de pollution

Pour ce faire, on a examiné toutes les informations apportées par les investigations faites avant l'intervention du B R G M, puis un examen détaillé du contexte hydrothermal a été entrepris en utilisant les outils suivants :

- géologie structurale
- hydrochimie et analyses isotopiques
- prospections géophysiques (V.L.F et électrique)
- prospection des anomalies de gaz radon dans le sol
- hydrogéologie

Ces différentes investigations nous conduisent à proposer d'une part un programme de recaptage passant par l'exécution de 3 à 5 sondages verticaux de 80 à 150 m situés au Sud et à l'Est des Thermes, de façon à recouper les deux familles de fractures identifiées (N 35° et N 150°), et d'autre part à proposer un périmètre de protection de la ressource.

TABLE DES MATIERES

- 1 - INTRODUCTION
- 2 - CONTEXTE GEOLOGIQUE
 - 2.1 - Situation géologique générale
 - 2.2 - Affleurements calcaires de Salut
 - 2.3 - Conclusions
- 3 - PROSPECTIONS GEOPHYSIQUES
 - 3.1 - Prospection par la méthode électromagnétique dite V..L.F
 - 3.2 - Prospection par la méthode du sondage électrique par trainé
- 4 - PROSPECTION DES ANOMALIES DE GAZ DANS LE SOL (radon)
- 5 - HYDROCHIMIE
 - 5.1 - Conditionnements spécifiques
 - 5.2 - Mesures in situ
 - 5.3 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques
 - 5.4 - Caractéristiques physico-chimiques des eaux étudiées
 - 5.5 - Relations entre les différentes eaux étudiées
 - 5.6 - Caractéristiques du mélange identifiant l'eau de la source du Lavoir
 - 5.7 - Relations entre le système thermal de Salut et celui de Bagnères-de-Bigorre
 - 5.8 - Température maximum atteinte par les eaux thermales en profondeur
- 6 - HYDROGEOLOGIE
 - 6.1 - Historique de la station
 - 6.2 - Données existantes utilisées
 - 6.2.1 - Débits et températures de Salut
 - 6.2.2 - Données acquises sur les forages
 - 6.2.3 - Exploration du karst du Lavoir
 - 6.3 - Données nouvelles
 - 6.3.1 - Interprétation des résultats pour le système karstique du Lavoir
 - 6.3.2 - Evolution comparée des écoulements

7 - CONCLUSIONS

- 7.1 - Schéma explicatif de la circulation des eaux de Salut
- 7.2 - Projet de recaptage

8 - PROPOSITIONS POUR DES PERIMETRES DE PROTECTION

- 8.1 - Périmètre sanitaire d'urgence
- 8.2 - Périmètre de protection du gisement thermal

TABLE DES PLANCHES

- Fig. 1 - Carte géologique simplifiée
- Fig. 2 - Canevas de Schmidt. Fracturation aux environs des Thermes
- Fig. 3 - Canevas de Schmidt. Fracturation dans les calcaires des carrières
- Fig. 4 - Coupe interprétative d'après la géologie de surface et les données de l'hydrochimie
- Fig. 5 - Interprétation géophysique
- Fig. 6 - Relation température-résistivité et température-sulfate
- Fig. 7 - Relation sulfate-autres espèces chimiques
- Fig. 8 - Relation tritium-teneur en sulfate
- Fig. 9 - Evolution de la température et de la piézométrie
- Fig.10 - Schéma explicatif de la circulation des eaux de Salut
- Fig.11 - Projet de périmètre de protection du gisement

TABLE DES PLANCHES HORS TEXTE

- Pl. 1 - Relevés de fracturation, prospection radon
- Pl. 2 - Caractéristiques des différents sondages réalisés

ANNEXES

- Annexe 1 - Profils de mesures de V.L.F. et de trainés électriques
 - Annexe 2 - Prospection des teneurs anormales des gaz des sols
 - Annexe 3 - Résultats d'analyses chimiques
-

1 - INTRODUCTION

Le Directeur de la Régie Municipale des Eaux Thermales de Bagnères-de-Bigorre, a confié au Service Géologique Régional Midi-Pyrénées du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) une étude hydrogéologique des Thermes de Salut en vue d'un recaptage des eaux.

Les Thermes de Salut sont alimentés par le mélange de deux sources : l'Intérieur et la Montagne. Ces deux sources ont été autorisées par l'arrêté Ministériel du 11.03.1884.

Ni le débit, ni la température (31°C) de ces eaux ne satisfont les besoins des Thermes.

Actuellement, les Thermes de Salut équipés de 20 baignoires ont besoin de 120 m³/jour d'eau à 36°C.

De 1979 à 1983, plusieurs séries d'études et de travaux de recaptage ont été conduits par M. G. Feneyrou, (Ingénieur divisionnaire T P E Mines). Ces travaux ont consisté en une tranchée et 13 sondages totalisant 780 m forés ; mais la complexité du contexte géologique est telle que, malgré toutes ces investigations, ces travaux n'ont pas atteint les objectifs fixés.

En 1985, une nouvelle approche hydrogéologique a été proposée par le BRGM ; elle repose sur les données fournies par les études et travaux antérieurs et sur des investigations nouvelles utilisant des méthodes de prospection faisant appel à des techniques aussi différentes que la géologie structurale, l'hydrochimie, la géophysique, l'hydrodynamique.

Cette nouvelle étude est conduite en vue de satisfaire les objectifs suivants :

- augmenter les débits
- augmenter la température
- stabiliser la qualité et la température de l'eau en évitant le mélange avec des eaux froides non minérales
- réduire les risques de pollution.

La satisfaction de ces quatre objectifs passe par une condition nécessaire, MAITRISER LE CAPTAGE DE L'EAU, et par une condition subséquente, imposer des CONTRAINTES REGLEMENTAIRES DE PROTECTION.

2 - CONTEXTE GEOLOGIQUE

2.1. SITUATION GEOLOGIQUE GENERALE :

Les sources thermales de Salut jaillissent des calcaires d'âge aptien des Allées Dramatiques, tout près de leur limite (voir Fig? 1) avec une formation de marnes schisteuses d'âge albien qui occupe la majeure partie du vallon de Salut et qui les sépare nettement du massif calcaire du Bédât.

Cette limite n'est pas un contact stratigraphique normal mais un accident structural majeur de la région (faille) connu tant vers l'Ouest que vers l'Est sur plusieurs dizaines de kilomètres et qui met en contact anormal, suivant un plan subvertical, la montagne calcaire du Monné et la zone schisteuse déprimée de la Croix de Manse.

Dans ce massif du Monné se succèdent, du Sud-Ouest vers le Nord-Est, les calcaires et marnes du Lias, les dolomies, les calcaires et les brèches du Jurassique, les marnes et les calcaires de l'Aptien.

Les bandes de marnes aptiennes indiquent bien l'orientation des couches qui passe de N 140°Eaux Allées Dramatiques à N 170°E à la hauteur de Médous. Les pendages sont subverticaux ou très fortement inclinés vers le Sud-Ouest. On remarque de nombreux petits décrochements dus à autant de petites failles subverticales de direction N 40°E en moyenne.

2.2. LES AFFLEUREMENTS CALCAIRES DE SALUT :

Deux secteurs permettent l'étude des calcaires aptiens aux environs de l'établissement thermal :

- l'environnement immédiat
- les carrières abandonnées situées au Sud-Est.

Secteur de l'établissement thermal

Les calcaires affleurent de part et d'autre du vallon orienté W.NW - E.SE qui débouche sur l'angle ouest du bâtiment. Il s'agit de calcaires variés contrai-

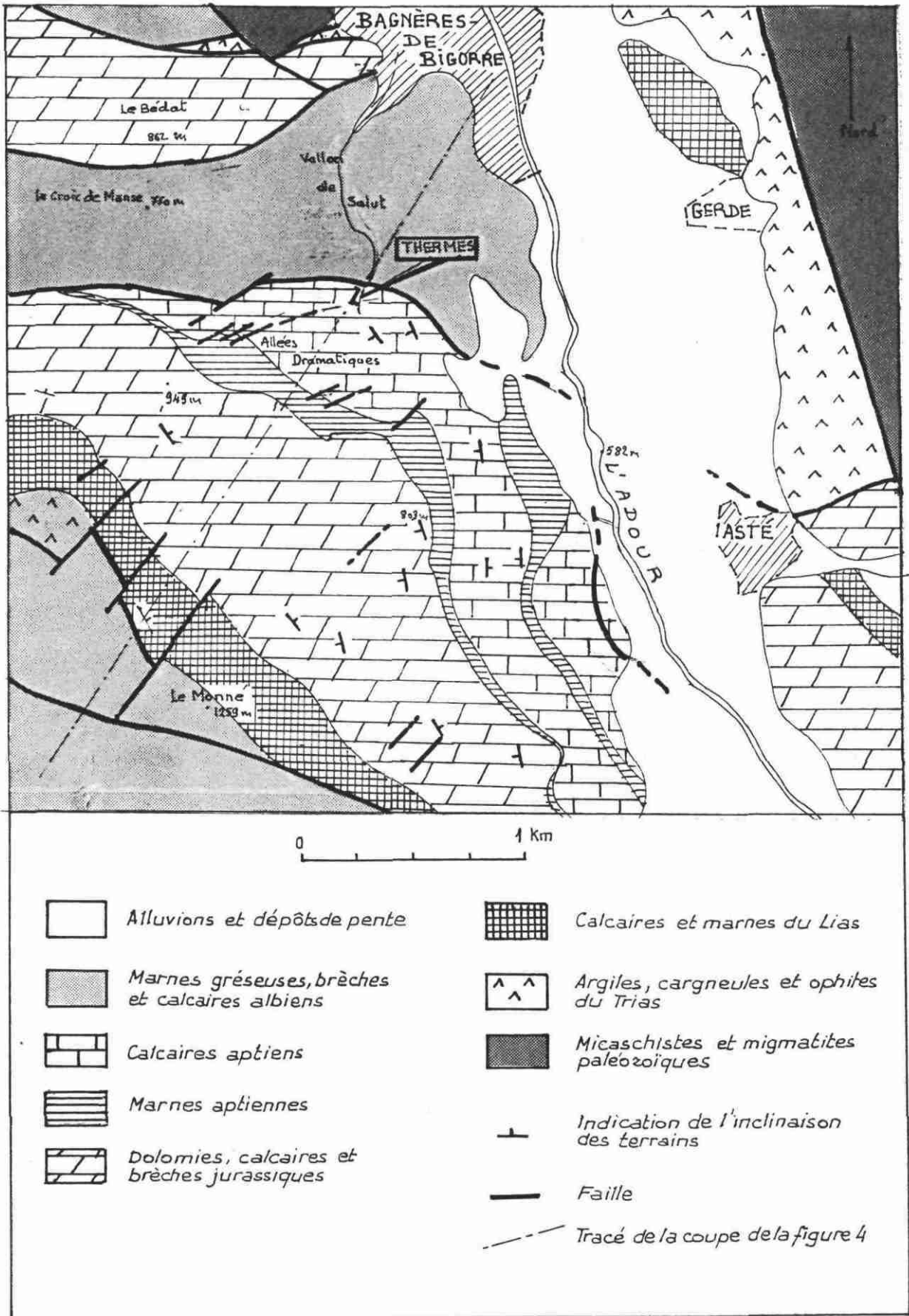


Fig. 1 - Carte géologique simplifiée des environs des thermes de Salut
(d'après E. Rey, 1970 ; F. Médiavilla, 1978 ; Y. Ternet, 1983)

rement à ce que peut laisser supposer une patine blanchâtre uniforme : calcaires beige-rosé très recristallisés, calcaires argileux sombres, calcaires à débris de Lamellibranches et d'Echinodermes en couches alternées (autrefois exploités, surtout vers Médous, ils forment les encadrements des portes et des fenêtres des maisons anciennes de Bagnères). Leurs couches subverticales orientées N 150°E en moyenne, passent d'un bord à l'autre du petit vallon mentionné ci-dessus et dans lequel aucune autre formation lithologique n'a pu être décelée.

Ces roches sont parcourues par un réseau serré de joints qui les découpe en une multitude d'éléments. Et comme l'on sait que les sources jaillissent précisément de certaines cassures, cette fracturation a été plus particulièrement étudiée.

Les caractères de nombreux joints (orientation, pendage, stries) ont été relevés et reportés pour en faciliter l'étude statistique sur un canevras isoaire de Schmidt par le procédé de la projection stéréographique en utilisant la demi-sphère inférieure. Les plans mesurés sont alors représentés par leur projection polaire (un simple point).

Mais cette façon de faire ne permettant pas d'apprécier leur position sur le terrain, on a reporté sur un plan (Fig. 2) leurs orientations moyennes mais aussi ceux dont l'emplacement pouvait être parfaitement repéré.

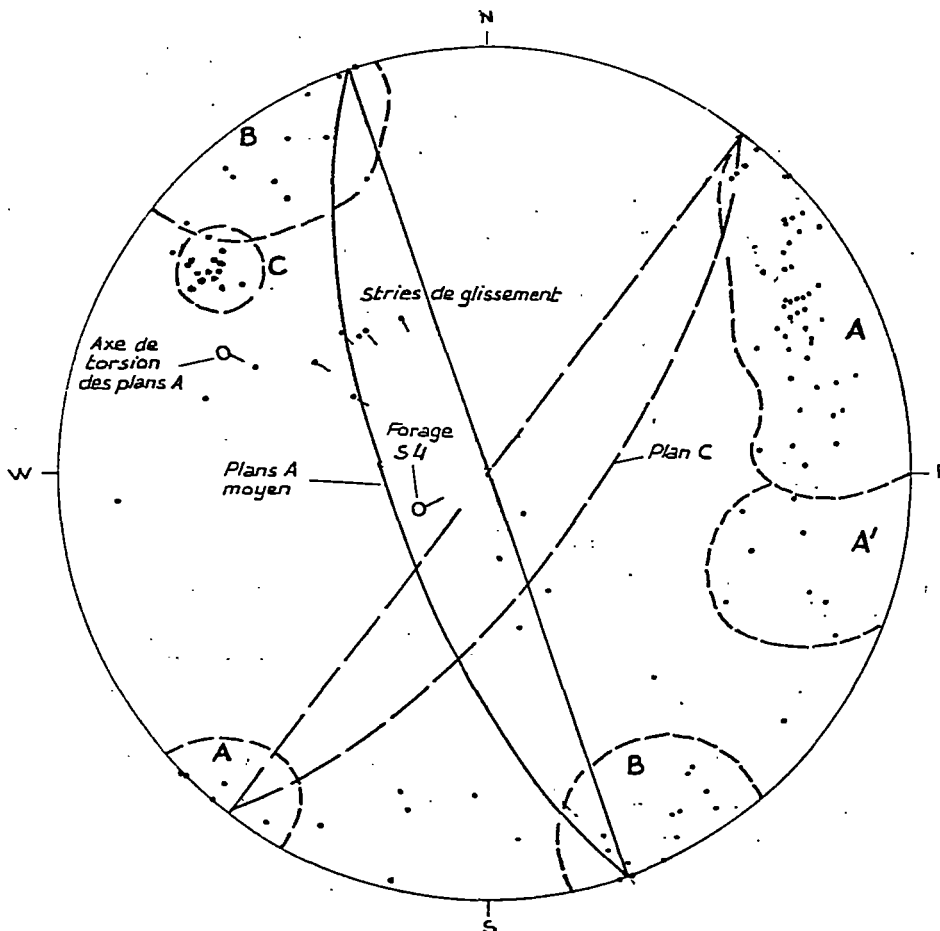


Fig. 2. *Éléments structuraux des calcaires des environs des thermes de Salut.*

Canevras de Schmidt. Projection de la demi-sphère inférieure. 120 mesures

Le diagramme obtenu montre plusieurs concentrations des projections polaires des plans qui traduisent l'existence de plusieurs familles de fractures.

On distingue :

- des plans (A) de direction moyenne N 150°E, inclinés de 70° à 80° vers le Sud-Ouest. Quelques uns sont inclinés très fortement vers le Nord-Est
- des plans (B) de direction moyenne N 60°E, très fortement inclinés les uns vers le Sud-Est, les autres vers le Nord-Ouest
- un groupe très serré de plans (C) de direction N 35°E, inclinés de 70° vers le Sud-Est.

Les plans A sont les plus nombreux. Souvent soulignés par un remplissage argileux rougeâtre, ils portent fréquemment des stries de glissement (quelques uns sont reportées sur le diagramme) qui sont très régulièrement inclinées de 50° à 60° vers le Nord-Ouest et dont la configuration indique un jeu inverse ; c'est-à-dire un mouvement ascendant du bloc nord-est par rapport au bloc sud-ouest de part et d'autre du plan A. De tels plans sont des plans de faille.

Ces plans A sont très régulièrement répartis sur les affleurements avec une fréquence de 5 à 50 cm. Ce sont les plus spectaculaires : paroi ouest du porche de la grotte du Lavoir par exemple. Ce sont aussi ceux d'où émergent les eaux thermales à la source "la Montagne" et à la source "du Lavoir".

La régularité de leur orientation est cependant interrompue aux environs de la source de "la Montagne" où ils prennent sur quelques mètres la direction N 20°E ; ces plans (A') donnent sur le diagramme un nuage un peu diffus décalé vers le Sud par rapport à celui des plans A. La répartition de l'ensemble des points sur un grand cercle de la projection semble indiquer en effet l'existence d'une torsion des plans A autour d'un axe plongeant de 30° vers l'Ouest-Nord-Ouest.

Les plans B sont des diaclases conjuguées, vraisemblablement dues au jeu des plans A qui les recoupernt.

Les plans C sont caractérisés d'une part par la régularité de leur orientation (N 35°E) et de leur pendage (65° à 75° vers le Sud-Est), d'autre part par leur distribution spatiale extrêmement restreinte puisqu'on ne les observe qu'au Nord-Ouest de l'établissement thermal. Ils semblent postérieurs au jeu de failles A.

Le sondage S₄

Ce sondage carotté a exploré les calcaires à l'Ouest de l'établissement sur une épaisseur de 117,80 m dans l'azimut 240.

On a pu y observer, sur les 80 premiers mètres des calcaires sombres parfois à débris coquilliers alternant avec des calcaires gris-clair, puis de calcaires gris-beige à flammes rosées. Tous portent les marques d'efforts tectoniques : structures fluidales allant jusqu'à la brèche, étirement de débris coquilliers, très nombreux plans striés à enduit argileux rouge. Ces plans striés ne peuvent guère correspondre qu'aux plans fracture A repérés en surface ; mais on constate qu'ils recoupent l'axe des carottes (donc du forage) sous un angle de 40° environ qui n'est pas compatible avec l'inclinaison théorique du forage donnée pour 75° sur l'horizontale. En effet la construction stéréographique montre que cet angle devrait être seulement de 5 ou 10°. Il y a donc une certaine incertitude sur l'inclinaison réelle de ce sondage.

Conclusions

Autour de l'établissement thermal de Salut affleurent des calcaires aptiens dont les couches subverticales et très déformées dans le détail ont une orientation générale N 150°E.

De nombreux joints de stratification ont évolué en plans de failles inverses dont certains passent par les émergences d'eau thermale.

Des fractures uniquement localisées à la bordure nord-ouest du bâtiment, sont orientées N 35°E, avec une inclinaison de 70° vers le Sud-Est. Dans le prolongement de ces fractures on rencontre la source "de l'Intérieur", puis une zone de torsion des couches située à proximité de la source de "la Montagne" et, si l'on se reporte à la carte géologique, les décrochements affectant le contact calcaires-marnes aptiens aux Allées Dramatiques.

Les affleurements des carrières

Il s'agit des carrières abandonnées situées immédiatement au Sud de l'embranchement du chemin des Allées Dramatiques.

Les calcaires sont les mêmes qu'à l'établissement thermal :

gris foncé, sombres ou gris-beige et portant le même fin rubanement N 150E vertical. Ils sont également très fracturés : le diagramme des pôles des plans de fracture obtenu sur le canevas de Schmidt, toujours en employant la demi-sphère inférieure, montre :

- l'intensité de la fracturation par les plans de faille A
- la dispersion des plans B.

Le secteur des carrières montre donc une grande similitude avec le secteur de l'établissement thermal, du point de vue lithologique comme du point de vue structural. Cependant, on y remarque l'absence des fractures de type C qui paraissent, dès lors, coïncider avec l'emplacement des sources thermales (Fig. 3).

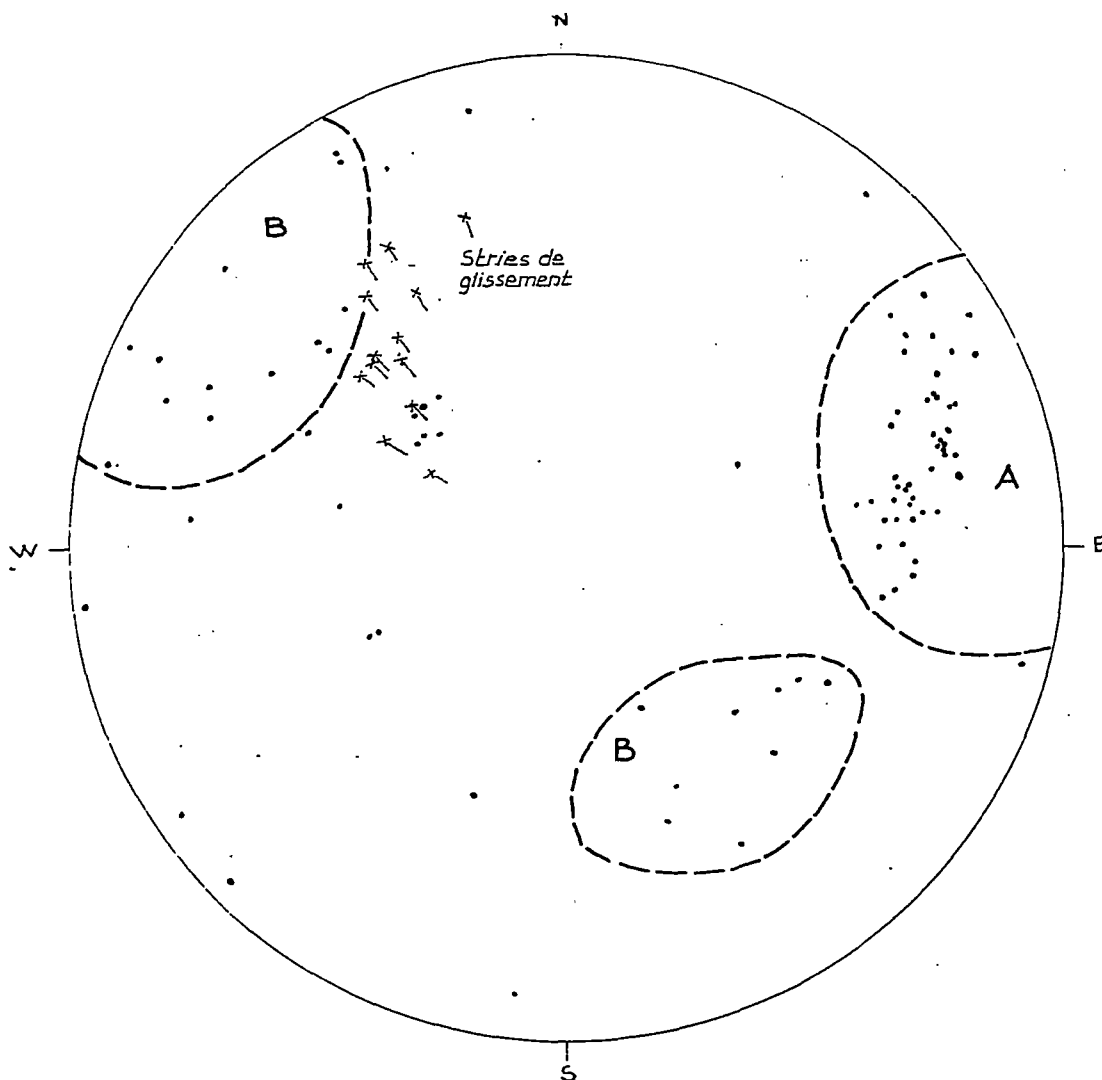


Fig. 3 *Eléments structuraux des calcaires des carrières de Salut.*

102 mesures.

2.3. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

L'eau thermique jaillit de calcaires aptiens au point altitudinal le plus bas atteint par cette formation dans la région.

Ces calcaires sont bordés au Nord, à quelques mètres des sources, par une formation imperméable de marnes schisteuses abiennes ; le contact entre les deux formations est une faille d'importance régionale.

Les émergences chaudes se produisent aux intersections de plans de failles d'orientation moyenne N 150°E et à fort plongement vers le Sud-Ouest, très fréquents dans le massif, et de fractures d'orientation N35°E inclinées de 70° vers le Sud-Est, situées dans une bande de terrain de 10 à 15 m de large, le long du mur nord-ouest de l'établissement thermal.

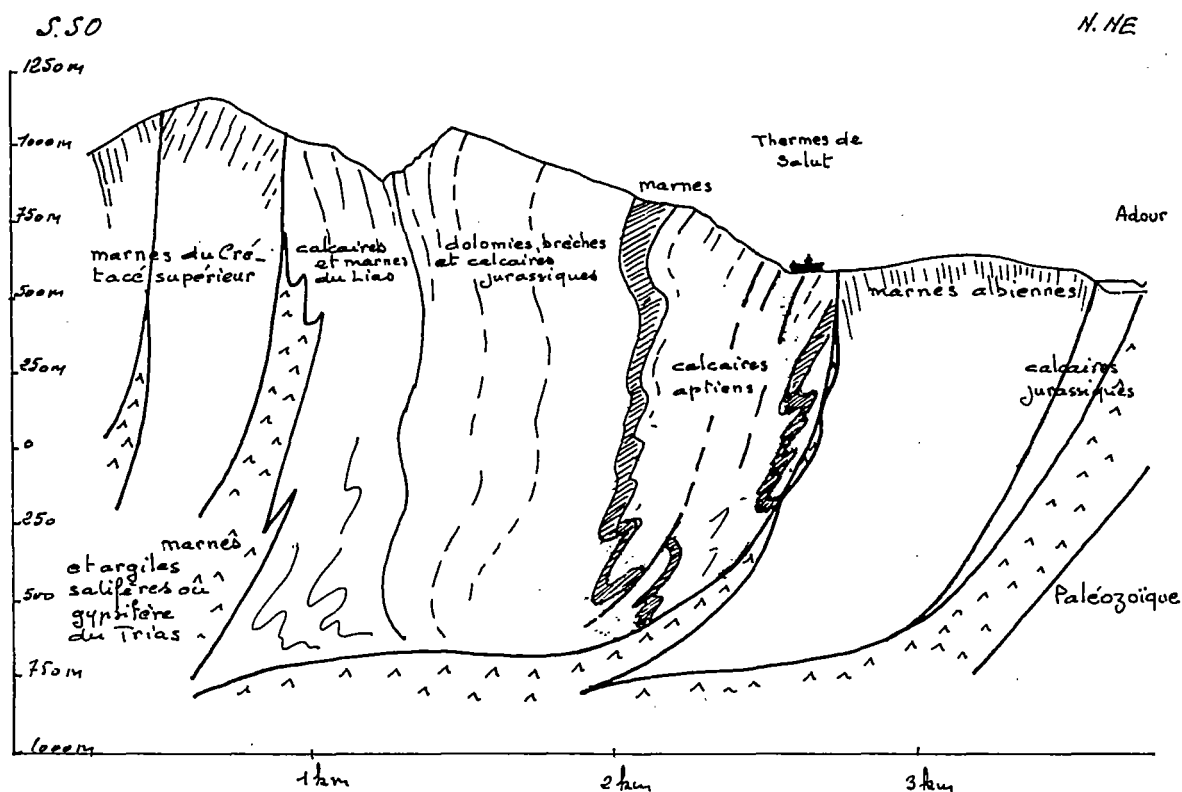


Fig. 4 Coupe interprétative d'après la géologie de surface et les données de la géochimie des eaux thermales.

3 - PROSPECTION GEOPHYSIQUE

3.1. PROSPECTION PAR LA METHODE ELECTROMAGNETIQUE DITE VLF :

Il s'agit d'une reconnaissance au sol, permettant de mettre en évidence des fractures ou drains favorables à une circulation d'eau souterraine.

La zone prospectée est recouverte par une faible épaisseur d'éboulis, sauf pour la partie N W où les calcaires sont sub-affleurants.

Le but de cette prospection est de pouvoir situer, avec un maximum de renseignements, une zone favorable à une venue d'eau chaude.

Le VLF (very low frequency) utilise les ondes électromagnétiques de basse fréquence (15 à 25 kHz), ce qui explique que la profondeur d'investigation ne dépasse généralement pas 40 m.

Dans ce type de prospection, seuls les axes négatifs, dits conducteurs, représentant un drain, une fracture, sont recherchés.

3.1.2 - ELEMENTS STATISTIQUES :

8 profils de direction N 335gr et de 5 m d'intervalle ont été réalisés, avec un pas de 5 m (cf. annexe 1 et fig. 5, et pl. hors texte 1).

Soit une longueur totale de profil de 380 m, ce qui représente environ 90 mesures. Le terrain situé en façade (côté Est du bâtiment) n'a pas pu être prospecté à cause de la présence de conduites dans le sol.

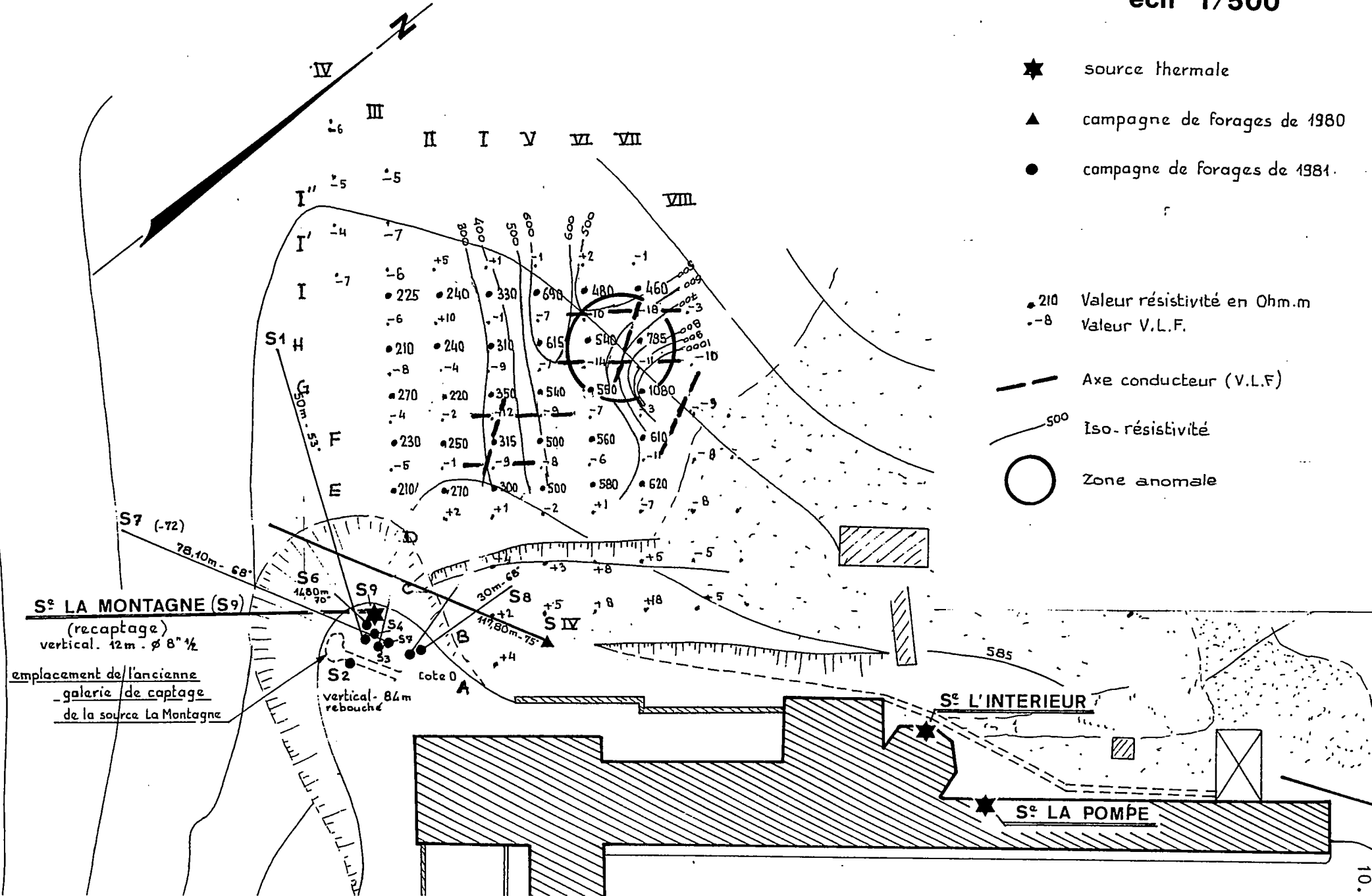
- . Surface totale couverte : environ 2000 m²
- . Exécution sur le terrain : 13 au 15 mai 1985

. Détails des observations :

La zone prospectée, très facile d'accès, est une zone non perturbée, ce qui nous donne des mesures fiables et cohérentes.

Fig. 5 - INTERPRETATION GEOPHYSIQUE-V.L.F et RESISTIVITE

ech 1/500



L'interprétation des valeurs obtenues fait apparaître deux directions de fractures parallèles à celles qui ont été reconnues en surface (N 30° et N 160°).

Un secteur précis se détache de ce levé, avec des valeurs négatives homogènes de - 18 à - 10.

Ce secteur représente la zone d'intersection des deux directions de fracturation (c'est une zone favorable possible).

3.2. PROSPECTION PAR LA METHODE DU SONDAGE ELECTRIQUE PAR TRAINÉ :

. Profils et carte des résistivités

De manière à mesurer les variations de la résistivité dans les secteurs mis en évidence par la méthode VLF inclinaison faisant apparaître des directions parallèles pouvant provenir de fractures, il a été réalisé 5 profils de trainé électrique par balayage suivant un quadrillage déterminé à l'avance et selon un dispositif d'électrodes constant avec pour ligne d'émission AB=10 m MN=0,50 m (cf. fig. 5).

L'exécution de plusieurs trainés, a permis de construire à partir des points mesurés des courbes d'isorésistivité et d'établir une carte des résistivités (cf. annexe 1 et fig. 5 et pl. hors texte 1).

L'interprétation des profils de résistivité et de la carte des isorésistivité permet de déterminer assez distinctement les zones de transition entre les terrains du fait de la variation de la résistivité apparente. En effet, on observe notamment au droit ou à proximité des axes mis en évidence par la méthode VLF, une stabilisation voire une diminution sensible de la résistivité apparente sur les profils :

Profil E points I et II stabilisation de la résistivité 270-300 ohm.m

Profil F " " " 250-315 ohm.m

Profil G point II diminution de la résistivité de 270 à 220 ohm.m
point VI stabilisation de la résistivité de 540-550 ohm.m

Profil H point VI diminution de la résistivité de 615 à 540 ohm.m

Profil I points VI-VII diminution et stabilisation de la résistivité à 480-460 ohm.m

Cette diminution ainsi que la stabilisation relative de la résistivité apparente pourrait en effet correspondre à des fracturations.

4 - PROSPECTION DES ANOMALIES DE GAZ DANS LE SOL (RADON)

Les eaux sulfatées de Salut remontent en empruntant les fissures des bancs calcaires redressés par les failles régionales (faille Nord-Pyrénéenne, faille de Bigorre). Ces eaux qui véhiculent du radon en solution peuvent être détectées dans leur remontée vers le sol même sous recouvrement d'alluvions ou d'altérations. Car si l'eau sortant des fractures se perd dans les terrains meubles et n'est pas visible en surface, le radon qui est un gaz, diffuse dans le sol et remonte à la verticale de la fracture.

La méthode consiste à capter ce radon dans le sol et à le quantifier en mesurant sa radioactivité (cf. annexe 2).

Les résultats (cf. planche hors texte 1) de cette campagne de prospection mettent en évidence plusieurs zones à anomalies significatives (valeurs supérieures à 1000 et 2000 p Ci/l.)

1) *au Nord-Ouest du bâtiment thermal :*

une zone parallèle au bâtiment, qui pourrait correspondre aux fractures donnant les émergences captées (la Montagne, l'Intérieur)

2) *à 40 m. au Nord-Ouest du bâtiment thermal : une anomalie, comportant de nombreuses valeurs > 1000 et une > 2000, correspond à la zone anormale signalée par le V.L.F., et également par la prospection électrique.*

3) au Sud du bâtiment : points 48 et 49

4) au Sud-Est du bâtiment : points 52 à 55 le long de la route et un point mesuré dans la carrière (n° 60) qui présente une valeur forte.

Remarque : Cette méthode de prospection a été effectuée à titre d'essai ; elle n'était pas prévue au contrat. Cette première application pour des eaux sulfatées s'est révélée très encourageante, et cette méthode peut être retenue pour localiser plus finement les fractures sous recouvrement alluvial.

5 - HYDROCHIMIE

Les eaux thermales des thermes de Salut de Bagnères de Bigorre ont été étudiées afin de mieux caractériser le système hydrothermal (identification des aquifères, détermination d'éventuelles interactions entre aquifères : mélanges, origines des eaux et temps de circulation, température maximum atteinte par les eaux en profondeur, etc.).

Les mesures des paramètres physico-chimiques ont été réalisées in situ et les échantillons d'eau ont été conditionnés de manière spécifique puis ont été analysés dans les laboratoires du BRGM.

Les deux sources thermales actuellement exploitées aux thermes de Salut (Montagne et Intérieur) ont été étudiées ainsi que l'eau (anormalement chaude : $21,2^{\circ}$) alimentant le bassin-lavoir situé à proximité de l'établissement thermal. Pour pouvoir replacer les eaux thermales dans le contexte régional, nous avons aussi échantillonné une source d'eau froide ($11,7^{\circ}$) émergeant en aval de l'établissement thermal et une source thermale (Salies) des thermes de Bagnères-de-Bigorre.

5.1. CONDITIONNEMENTS SPECIFIQUES :

Les prélèvements d'eau ont été conditionnés de manière spécifique dans des flacons en polyéthylène pour assurer une bonne conservation des échantillons en vue des analyses à réaliser. Il est important de signaler qu'un échantillon mal prélevé ou mal conditionné peut perdre, de ce fait, toute sa représentativité.

- . 1 flacon 250 cc (filtré à $0,45 \mu$ de porosité) pour l'analyse des anions ;
- . 1 flacon 250 cc (filtré à $0,45 \mu$ de porosité) acidifié pour l'analyse des cations et éléments en traces
- . 1 flacon 500 cc rempli à reflux et fermé hermétiquement pour l'analyse des isotopes (deutérium, oxygène 18 et tritium).

5.2. MESURES IN SITU :

Les eaux thermales sont particulièrement instables et tout contact avec l'atmosphère induit des modifications parfois irréversibles (oxydation, dégazage, refroidissement, etc.). Nous avons mesuré différents paramètres physico-chimiques sur le lieu même des émergences (température, pH, et/ou potentiel d'oxydoréduction, conductivité, oxygène dissous). Le tableau suivant présente les résultats des différentes mesures réalisées sur chaque point d'eau étudié.

NOM	TEMPERATURE °C	CONDUCTIVITE à 25°C en mS/cm	pH	eh mv	OXYGENE DISSOUS mg/l	MINERALI- SATION CALCULEE g/l
MONTAGNE	31,7	1,85	7,12	+ 153	0,7	1,50
INTERIEUR	30,9	1,88	7,13	+ 226	1,0	1,45
LAVOIR	21,2	1,18	7,43	227	5,1	0,84
FROIDE	11,7	0,36	7,36	225	5,9	0,29
SALIES	50,0	2,68	7,08	+ 35	1,2	2,55

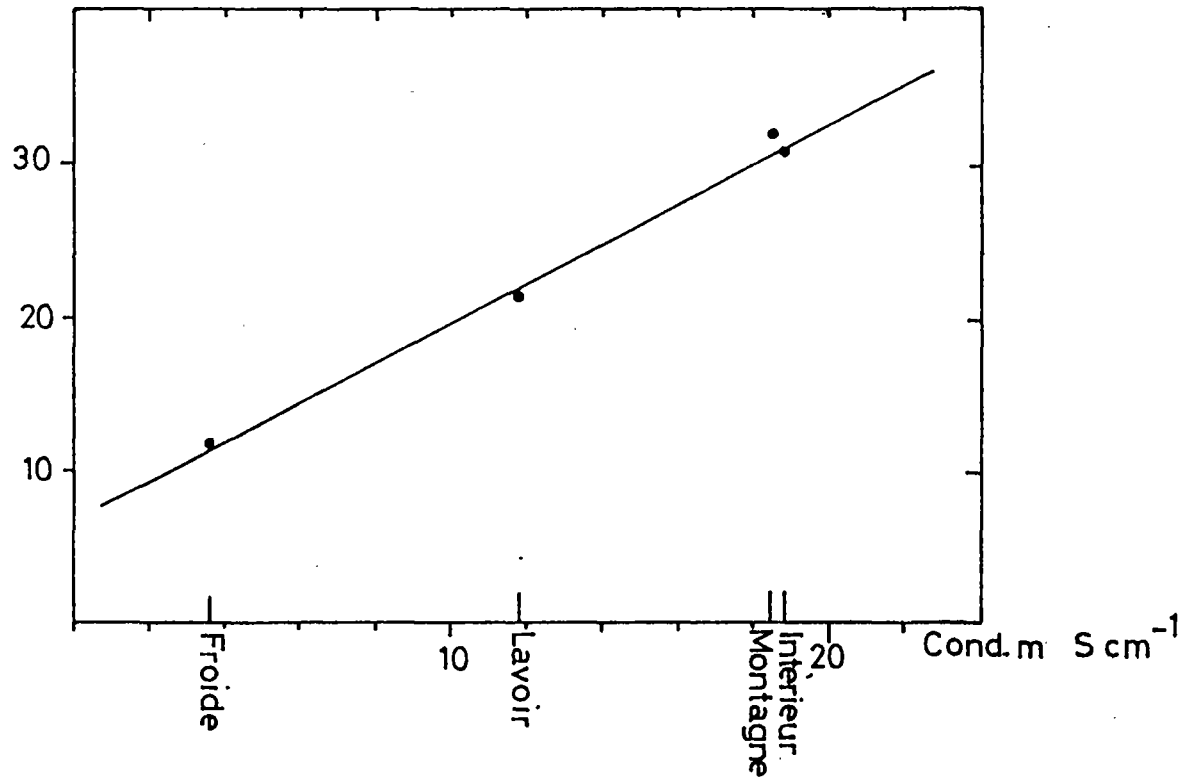
5.3. RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES (annexe 3)

Les résultats des différentes analyses chimiques sont présentés dans le tableau 1 avec les limites de détection pour chaque espèce chimique analysée dans le tableau 2. Les résultats exprimés en milliequivalents (tableau 3) montrent que les eaux thermales ainsi que l'eau du Lavoir sont caractérisées par un faciès chimique sulfaté calcique alors que les eaux froides sont de type bicarbonaté calcique.

Les balances ioniques calculées pour chaque échantillon sont bien équilibrées (de 0,9 à 3,9 %), ce qui permet de s'assurer de la qualité acceptable des analyses chimiques.

Rappelons qu'une analyse chimique doit avoir une balance ionique équilibrée (la somme des espèces chimiques chargées positivement doit être égale à la somme des espèces chargées négativement) ; un écart de 5 % est le maximum tolérable.

température en °C



température °C

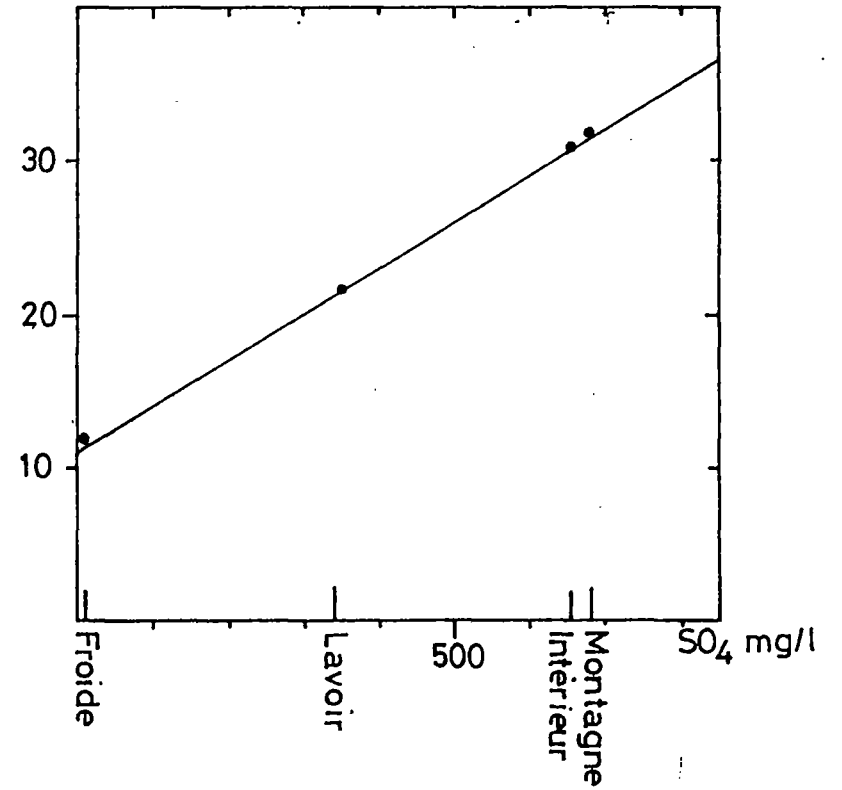


Figure 6

5.4. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX ETUDIEES

Les eaux thermales des thermes de Salut sont sulfatées calciques ; parmi les deux sources thermales étudiées, Montagne est plus représentative du pôle thermal que la source Intérieur : la température d'émergence est plus forte (31,7° et 30,9°C respectivement) ainsi que la minéralisation totale (1,50 g/l et 1,45 g/l respectivement). L'eau du réseau karstique alimentant le bassin-lavoir est nettement plus chaude et plus minéralisée que les eaux froides superficielles classiques (21,2° contre 11,7° et 0,84 g/l contre 0,29 g/l).

Les différentes caractéristiques physico-chimiques des eaux étudiées peuvent s'interpréter par des relations plus ou moins directes entre le pôle thermal et les eaux superficielles.

5.5. RELATIONS ENTRE LES DIFFERENTES EAUX ETUDIEES :

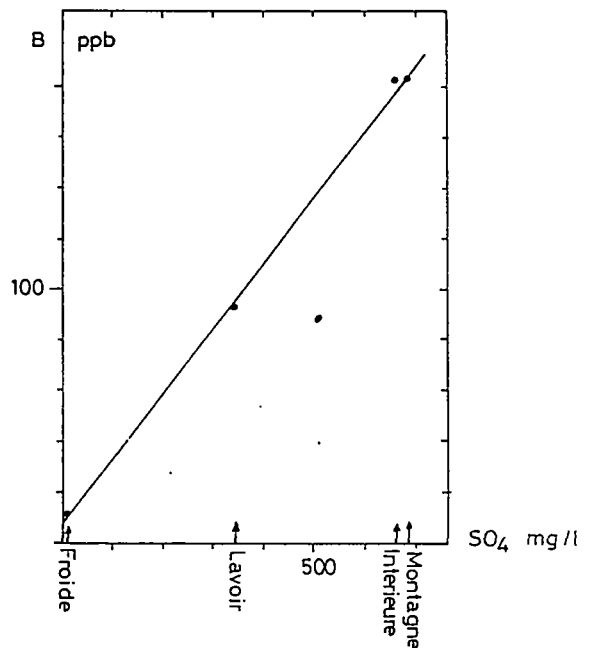
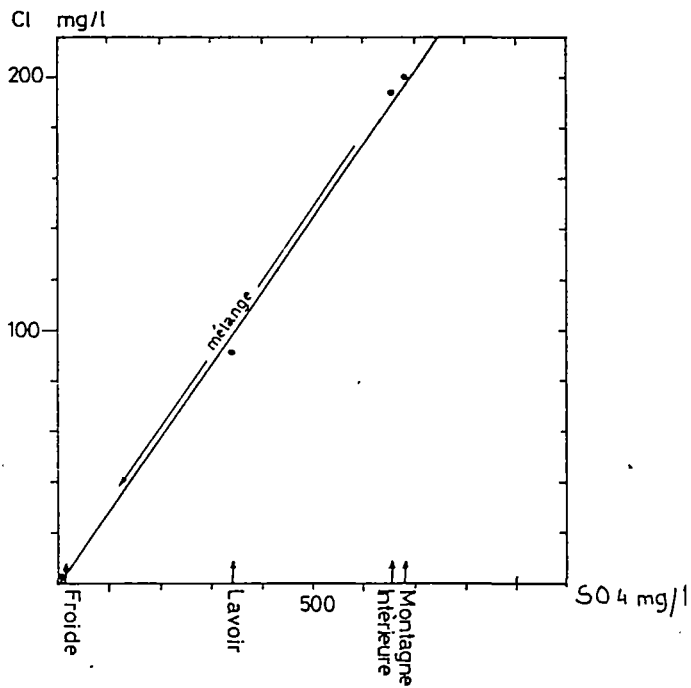
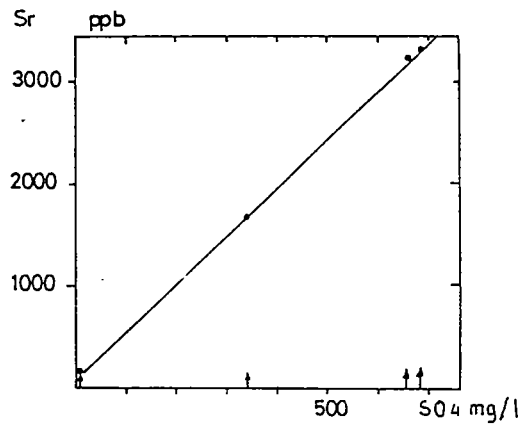
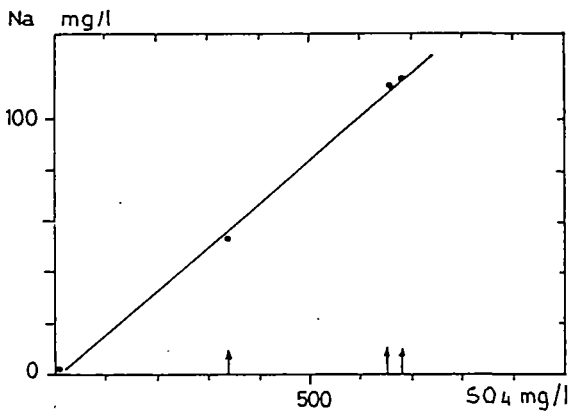
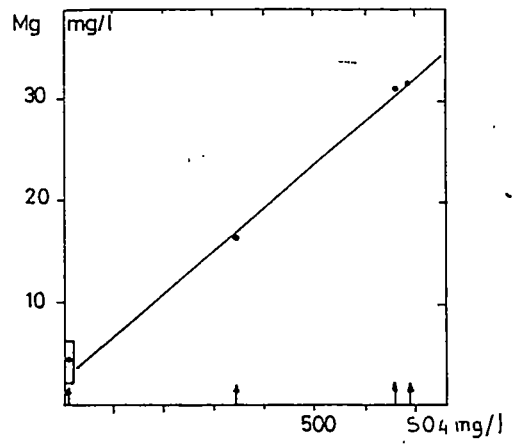
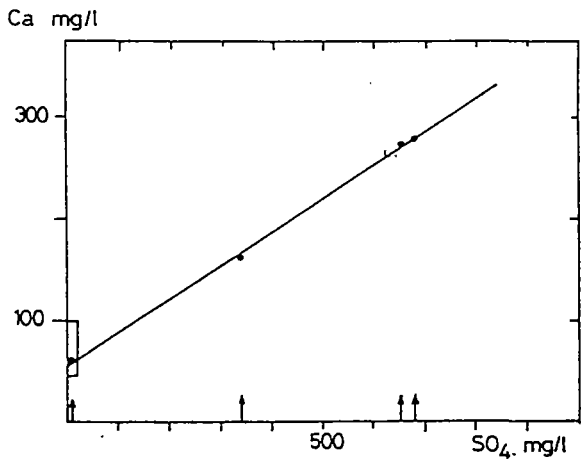
Les mesures effectuées *in situ* nous avaient déjà indiqué sur le terrain une température et une conductivité anormalement fortes pour l'eau de karst alimentant le lavoir (la conductivité d'une eau représente assez bien sa minéralisation totale).

Comme on peut le constater sur la figure 6, il existe une relation extrêmement nette entre les eaux thermales (Montagne et Intérieur) l'eau du lavoir, et les eaux froides superficielles ; que ce soit d'après les données de terrain (relation température/conductivité) ou d'une façon plus précise avec les différentes compositions chimiques (relation température/sulfate).

On peut considérer que les teneurs en sulfates représentent une espèce chimique majoritaire caractérisant bien l'eau du pôle thermal. Dans la figure 7, nous avons établi, pour chaque échantillon, les corrélations entre les teneurs en sulfate et les différentes espèces chimiques : éléments majeurs (Ca, Na, Cl, Mg) et éléments traces (Sr, B, ..). Les différents diagrammes de la figure 7 confirment la relation déjà définie précédemment entre les eaux thermales, l'eau du lavoir et les eaux superficielles.

Ces très bonnes droites de corrélations montrent que :

- la source Montagne est la plus représentative du pôle thermal (teneur en sulfate et minéralisation élevée ; température d'émergence la plus chaude du groupe de Salut ;



- la source Intérieur semble très légèrement diluée (avec des eaux froides superficielles abaissant ainsi la température d'émergence et la minéralisation);
- l'eau du réseau karstique alimentant le lavoir est un mélange entre de l'eau du pôle thermal et une eau froide superficielle. Nous verrons dans la suite de l'étude la fraction d'eau thermale apportée dans ce mélange.

Afin de mieux préciser nos connaissances sur le système thermal de Salut, nous avons réalisé des analyses isotopiques de tritium sur l'ensemble des eaux étudiées.

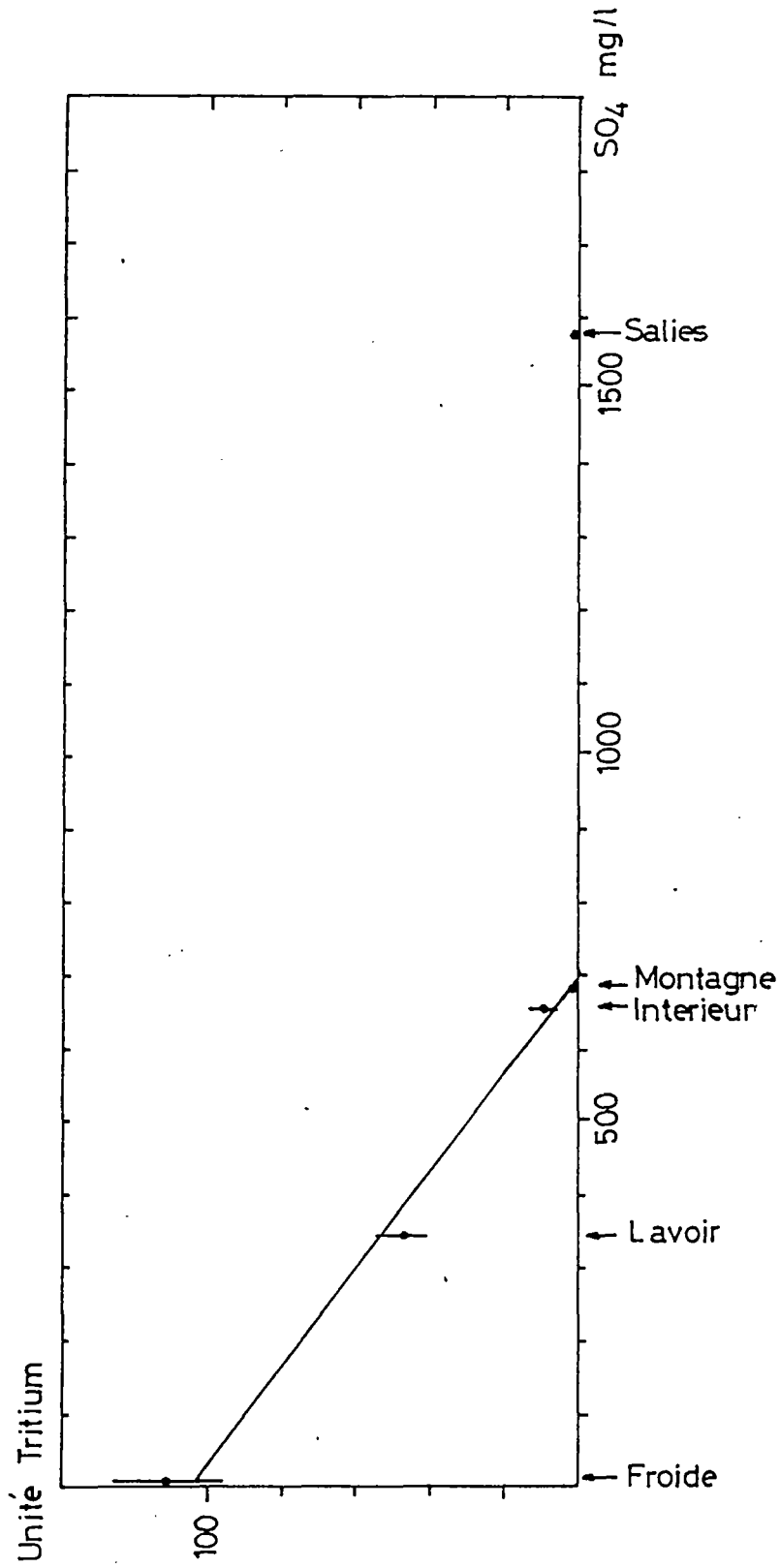
Les quantités de tritium des eaux de la source Montagne et de Salies sont inférieures à la détection limite (bruit de fond 0,3 UT) ce qui signifie que le pôle thermal est bien caractérisé par des eaux anciennes, infiltrées avant 1953 (date de la première explosion thermo-nucléaire, explosion qui a contribué à la très forte augmentation des teneurs en tritium dans l'atmosphère).

La figure 8 montre les résultats de tritium des échantillons en fonction des teneurs respectives en sulfate. On peut constater que :

- la source de la Montagne est caractéristique du pôle thermal ;
- la relation est encore nettement définie entre les sources thermales de Salut, de l'eau de la source du lavoir et des eaux de surface. L'eau thermale de la source de Salies se distingue de cette relation, ce qui permet de penser qu'elle appartient à un système thermal différent ;
- l'eau de la source du Lavoir est définie comme un mélange entre le pôle thermal (0 UT) et les eaux de surface ($111 + 15$ UT).

L'eau thermale de la source Intérieur ($9 + 5$ UT) est légèrement tritiée, ce qui confirme la légère participation d'eau superficielle dans cette source.

Figure 8.



5.6. CARACTERISTIQUES DU MELANGE IDENTIFIANT L'EAU DE LA SOURCE DU LAVOIR

On peut calculer les fractions d'eau thermale et d'eau froide définissant l'eau de la source du lavoir. Un calcul simple permet de déterminer le facteur d'eau thermale présent dans cette source en utilisant l'équation suivante :

$$C_m = C_{sup.} \cdot (1 - x) + C_{th.} \cdot (x)$$

ou C_m = teneur dans l'eau du mélange (c'est-à-dire l'eau de la source du lavoir)

C_{sup} = teneur dans les eaux de surface

$C_{th.}$ = teneur dans l'eau thermale du pôle profond

x = la fraction d'eau thermale dans le mélange

Avec les températures et les différentes espèces chimiques on obtient ainsi par calcul la quantité d'eau thermale (en %) dans le mélange caractérisant l'eau de la source du lavoir. Le tableau ci-dessous présente les différents résultats obtenus :

éléments	Température	SO ₄	Ca	Na	Cl	Mg	Sr	B
% d'eau thermale	47,5	49,3	45,4	45,0	44,3	44,0	48,9	47,

La moyenne pour ces différentes fractions calculées est de 46,5 %, ce qui représente le pourcentage d'eau thermale dans l'eau de la source du lavoir. Cette quantité d'eau thermale est extrêmement forte étant donné le débit important de cette source karstique, (cf. rapport hydrogéologique).

5.7. RELATIONS ENTRE LE SYSTEME THERMAL DE SALUT ET CELUI DE BAGNERES-DE-BIGORRE :

Comme nous venons de le souligner à partir des analyses isotopiques de tritium, la source Salies ne semble pas liée au système des Thermes de Salut (caractérisé par la source Montagne). On peut remarquer que la source Salies est plus minéralisée (2,55 g/l contre 1,5 g/l), sa température d'émergence est plus élevée (50° contre 31,7°) et sa teneur en silice est plus forte (36 mg/l contre 26 mg/l). Mais inversement les teneurs en chlorures sont plus faibles (100 mg/l contre 200 mg/l) ainsi que celle de sodium (78,5 mg/l contre 116 mg/l).

Pour les deux sources thermales on obtient des rapports B/Cl différents. Ces éléments sont peu sujet aux phénomènes secondaires : rééquilibration, précipitation, dilution. De la même façon les rapports Ca/Sr ne sont pas identiques ce qui souligne que les contextes géologiques à l'origine de la minéralisation des eaux thermales ont été différents.

Il n'existe donc pas de relation évidente entre les systèmes thermaux et si elle existe, elle sera difficile à appréhender ; seules des analyses chimiques et isotopiques détaillées pourraient apporter quelques renseignements complémentaires.

5.8. TEMPERATURE MAXIMUM ATTEINTE PAR LES EAUX THERMALES EN PROFONDEUR

Les différents géothermomètres chimiques classiques (Na-K ; Na-K-Ca, Na-K-Ca-Mg ; Na-Li) sont basés sur des équilibres avec des minéraux du type feldspaths sodiques, potassiques et calciques.

L'utilisation de ces géothermomètres dans ce contexte géologique est délicate et souvent dénuée de toute signification car ils sont fréquemment perturbés par des dissolutions post-équilibre.

Le géothermomètre utilisant les teneurs en silice est lui parfaitement adapté car nous avons pu définir le pôle thermal sans mélange ou dilution (absence de tritium).

A ces faibles températures, c'est l'équilibre avec la chalcédoine (forme allotropique de silice) qui est atteint. A partir des teneurs en silice mesurées à l'émergence, on peut calculer la température à laquelle s'est fait l'équilibre.

On obtient :

Therms de Salut source Montagne	: température profonde	: 40°C
Therms de Bagnères source Salies	: température profonde	: 55°C

La température à l'émergence à Salut étant de 32°C le gain maximal que pourrait apporter un recaptage par forage serait donc de l'ordre de 8°C.

Dans ces conditions il n'est pas souhaitable d'effectuer des forages profonds (300 ou 400m) dans le seul but d'élever la température compte tenu du coût élevé de l'opération.

6 - HYDROGEOLOGIE

6.1. HISTORIQUE DE LA STATION

- . 1718 - Les sources sont recommandées
- . 1884 (11 mars) - Arrêté Ministériel d'Autorisation portant sur les 3 sources :
 - la Montagne
 - l'Intérieur
 - la Pompe
- . 1954 - Une pollution est signalée à Salut. Pour éliminer le risque de pollution par les eaux superficielles sur l'Intérieur et la Montagne, la source la Pompe est mise en charge.
- . 1958 - Proposition de retrait d'autorisation de la Pompe
- . 1966 - Elaboration d'un projet de développement de la station entraînant la nécessité d'accroître le débit
- . 1967 - Premier programme de recherche d'eaux thermales
- . 1971 - Pollution des sources de Salut
- . 1979 - Exécution de 4 sondages : S1, S2, S3, S4
 Ces sondages exécutés en partie au marteau fond de trou et en partie en carottage continu, n'ont pas entraîné de progrès dans la connaissance du système hydrothermal.
- . 1981 - Creusement d'une galerie pour observer les venues d'eau, exécution de 8 sondages nouveaux et d'un forage vertical de 12 m pour recapter la source la Montagne. Malgré ces travaux le problème du recaptage des eaux de Salut n'a pas encore trouvé de solution.
- . 1982-1983 - Etudes géologiques et hydrogéologiques complémentaires
- . 1984 - Le B.R.G.M. est contacté pour élaborer un programme de recaptage à partir des données acquises et de données complémentaires.

6.2. DONNEES EXISTANTES UTILISEES

Toutes les investigations effectuées sur les Thermes de Salut, ont été prises en compte. Du dépouillement de cette abondante documentation nous avons retenu les éléments suivants :

- données géologiques : elles ont été prises en compte pour l'étude géologique, mais les interprétations étant nombreuses et contradictoires, l'apport est faible.
- données hydrogéologiques : elles sont de plusieurs types :
 - mesures de débit et de température sur les sources et les forages
 - exploration en plongée par caméra-vidéo du Karst de la source du Lavoir
 - diagraphies sur les forages.

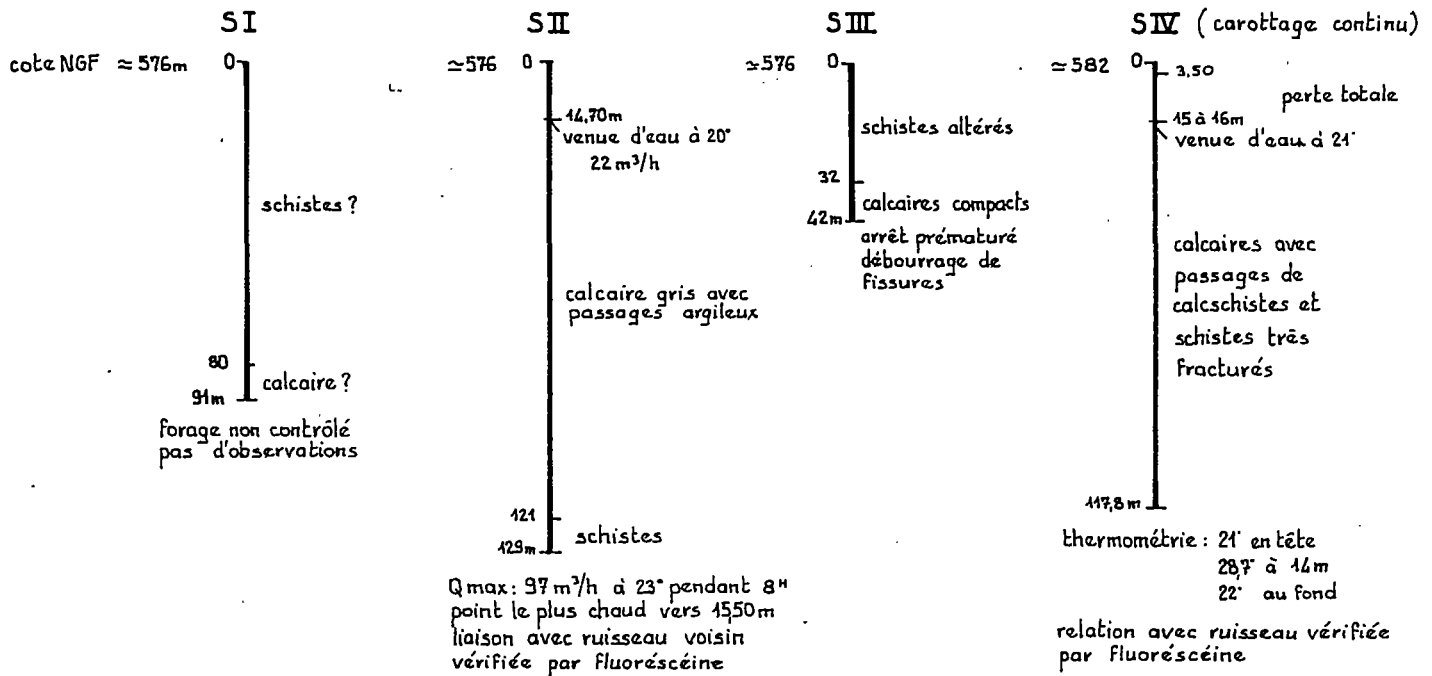
Ces données sont résumées dans les tableaux ci-contre.

6.2.1. Débits et températures de Salut

Source	DATE	1718	1821	1821	1855	1883	1888	1891	1932	1948	1953	1954	1955	1958	1982	1985
	Q m ³ /h e/c		Avril	Octobre	Février		16/11/		18/03	25/06		La pompe non en charge	La pompe en charge	(moyen)		6/09
La Montagne	2,1 à 7,2 32,5 à 34,2	7 26	2 27,5	6 34,4	4,9 33,5	6,0 34,2	6,0 34	6,8 34,4	6,0 34,2	34,5	3,0 à 7,2 33 à 33,8	5,2 à 12 32 à 34,2	7,2 33,5	9	5,9 32,3	
l'Intérieur	5,4 à 20,7 31,5 à 32,2	20 25,3	5 26,8	7,5 33,9	5,2 33,2	7,5 33	7,5 33,9	7,1 33,9	7,1 33,0	33,9	5,2 à 9,0 31 à 32,5	7,2 à 18,0 31,5 à 32,6	12 32,0	7,2	6,1 31,1	
La Pompe	2,1 31,5				3,0 31	3,3 32,2	3,3 33,2	3,0 32,2	3,0 32,0	32,0	(1,5 m ³ /h/m) 2,6 à 3,6 30,5 à 31					
Le Lavoir											27 ou 206 20,5			120 le 3/02/83 20,0	25 21	

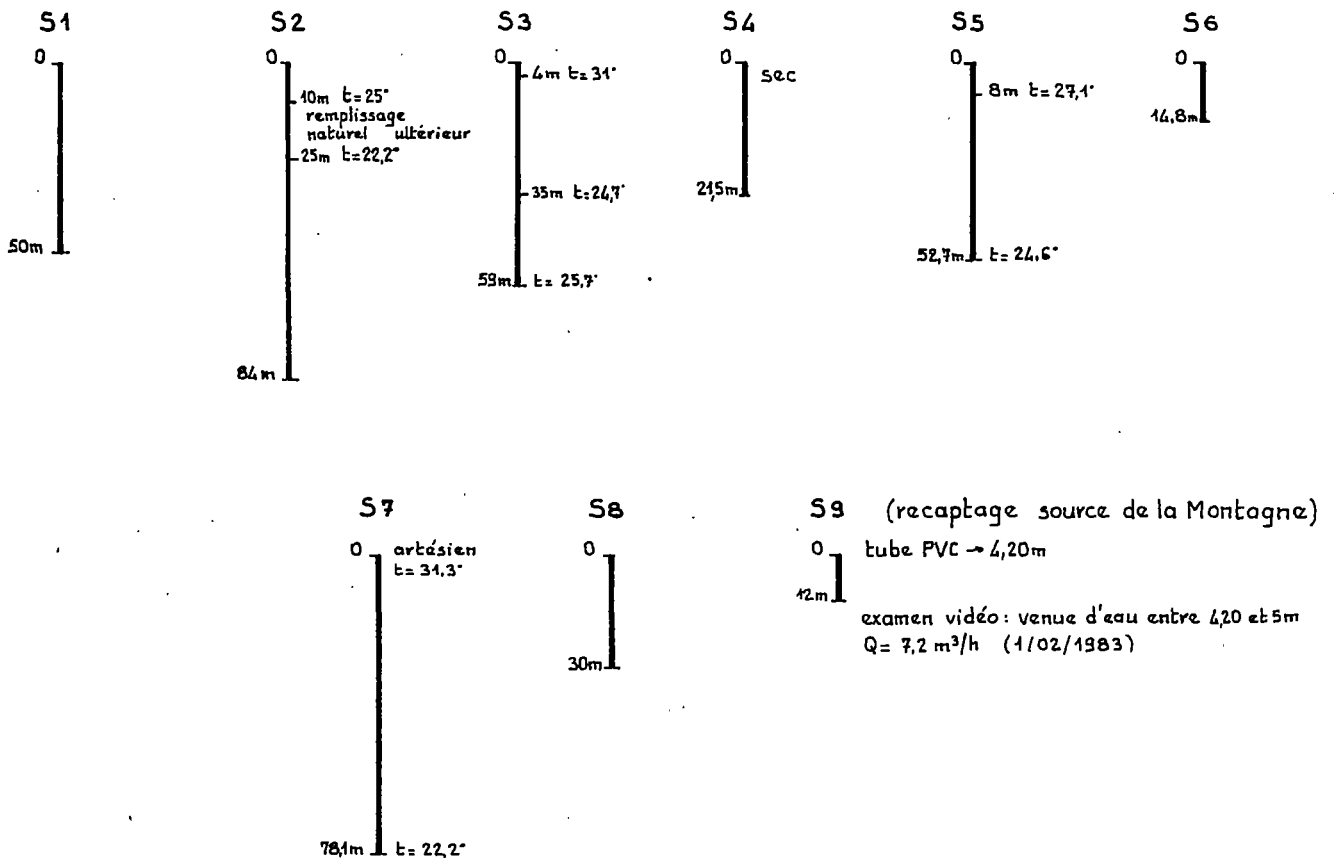
Nota : Les variations brutales du débit de la Montagne sans variation de température pourraient correspondre à la transmission des variations de charge du karst du Lavoir.

campagne de 1980



nota: les points les plus chauds se situent entre 15 et 20m de profondeur

campagne de 1981-1982



nota: les circulations d'eau chaude se seraient manifestées vers 10m de profondeur

REMARQUES :

Il est important de noter que jusqu'en 1955 les températures de la Montagne et de l'Intérieur sont voisines de 34° alors que depuis 1955 elles oscillent entre 31°C et 33°C. Lors des tests de mise en charge de la Pompe en 1958, on a pu montrer que la température et le débit de la Montagne augmente en fonction de la charge imposée sur la Pompe. On observe un effet du même type, bien que moins net, sur l'Intérieur.

Nous avons cherché quelle cause extérieure perturbante a pu entraîner une diminution de pression sur les sources à partir de 1955, et nous avons retenu comme cause possible, un abaissement du niveau d'eau de la source du Lavoir. En effet, il semblerait que ce lavoir ait été utilisé de façon régulière jusqu'à une date voisine de 1955, ce qui maintenait dans le bief un niveau d'eau plus élevé que le niveau actuel. Puis l'abandon de ce lieu comme lavoir aurait entraîné une modification du site avec abaissement du niveau d'eau, ce qui par contrecoup aurait créé une diminution des charges hydrauliques favorisant les sorties d'eaux thermales à l'intérieur du karst et diminuant le débit des sources captées. Cette explication n'est qu'une hypothèse, qui sera reprise plus loin pour vérification.

6.2.2 Données acquises sur les forages : d'après les rapports de forage et les investigations thermométriques et vidéo (cf. tableaux ci-après et pl. hors texte n° 2) caractéristiques des différents sondages réalisés).

REMARQUES :

Toutes les circulations d'eaux chaudes se manifestent entre 5 et 20 m de profondeur.

6.2.3 Exploration du karst du Lavoir

Les investigations par caméra vidéo et thermographie faites dans le système karstique du Lavoir par la société Hydro-Invest en 1983 confirment :

- que le développement du réseau karstique s'est effectué à partir de la fracturation principale et du pendage identifié par examen structural

- que les venues d'eaux thermales s'effectuent en des points éloignés de l'entrée du système : deux points ont été repérés :

. venue d'eau à 34 m de l'entrée à 20,3°C
: venue d'eau à 53 m de l'entrée à 21,6°C (l'eau à l'entrée était à 20,0°C).

6.3. DONNEES NOUVELLES

Les observations hydrogéologiques nombreuses effectuées au cours des périodes de travaux antérieurs, nous apportent des informations sur l'évolution des paramètres sur de longues périodes avec de grands pas de temps.

Pour compléter ce type d'informations, nous avons effectué des mesures à pas de temps serré ou à enregistrement continu :

- mesures hebdomadaires pour la résistivité (Lavoir, Montagne, Intérieur)
- mesures journalières pour la température (Lavoir, Montagne, Intérieur)
- mesures continues des variations de niveau (Lavoir, Montagne).

6.3.1 Interprétation des résultats pour le système karstique du Lavoir

Pour le système karstique du Lavoir, aucune autre source n'est connue dans les calcaires crétacés (excepté quelques sources temporaires faibles dans le fossé de la route qui conduit aux carrières.

Cependant la karstification se traduit dans le vallon à l'Ouest des Thermes par quelques dolines en cours de formation.

Quant aux sources de trop plein (sources temporaires qui fonctionnent en période de crue), situées au Sud des Thermes à 30 m de l'extrémité de la route des carrières, elles n'appartiennent pas au même système karstique que les sources du Lavoir, elles sont un exutoire de l'aquifère jurassique séparé du Crétacé par les marnes imperméables (cf. § géologie).

6.3.2 Evolution comparée des écoulements

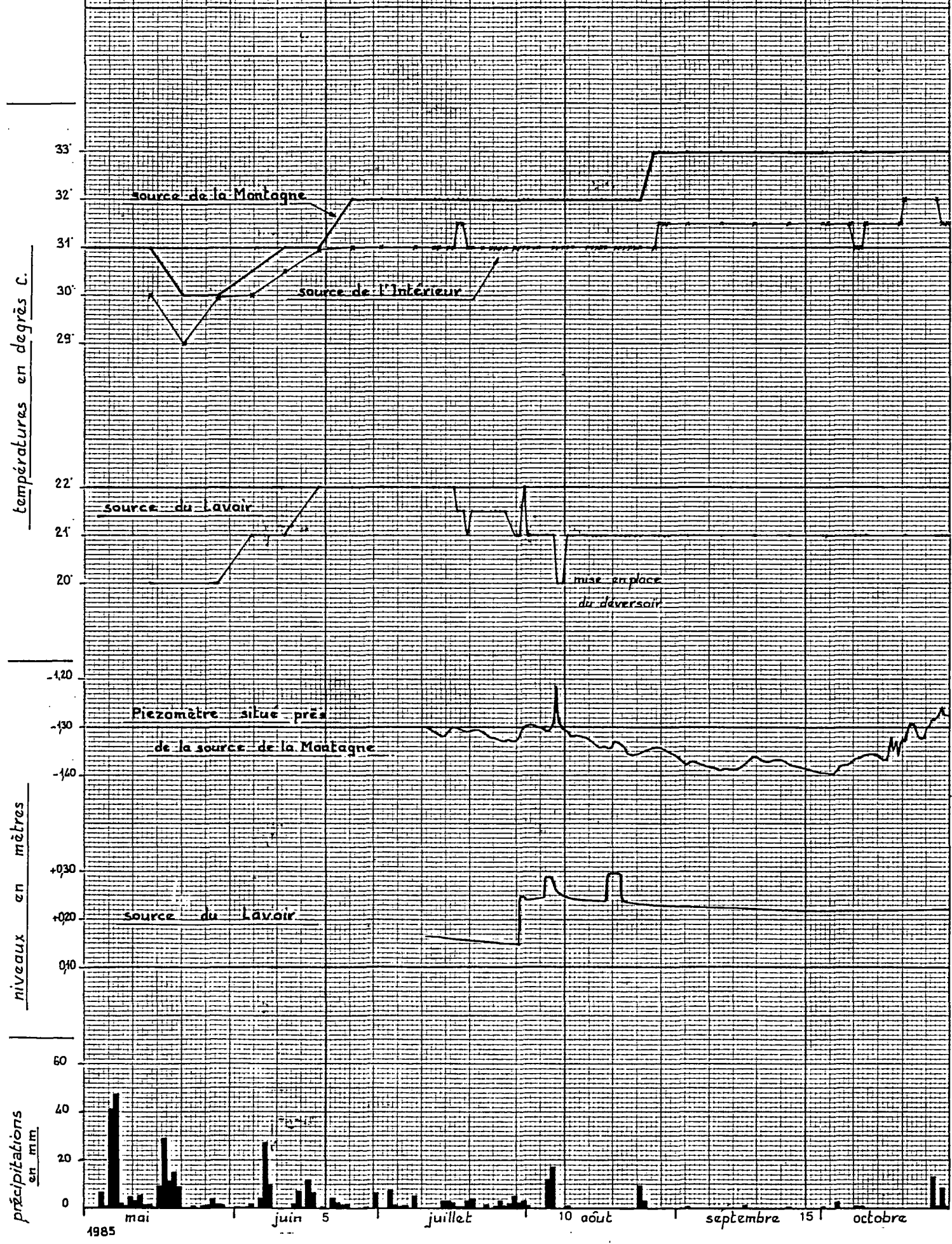
Les mesures faites de juin à octobre ont été reportées sur un même graphique (cf. fig. 9).

D'après ces mesures la température des sources s'élève de Mai à Septembre (de 30°C à 33°C pour la Montagne et de 30°C à 32°C pour l'Intérieur), tandis que la température de la source du Lavoir est passée de 20 à 21°. Mais il faut noter pour le Lavoir un passage de 20 à 22° de mai à juin puis une baisse de 22° à 21° de juin à juillet. Ce phénomène pourrait être dû à la mise en place du déversoir du Lavoir qui a modifié les pressions relatives des eaux karstiques et des eaux thermales par relèvement du niveau d'eau de sortie du système.

La résistivité a peu varié durant cette période.

Enfin, l'observation des niveaux d'eau (hauteur d'eau au déversoir du Lavoir, et pression sur le piézomètre situé à côté de la source la Montagne) met en évidence l'effet des variations de niveau dans le karst sur la pression des eaux thermales. Le relèvement artificiel de 10 cm du plan d'eau du Lavoir le 30 Juillet s'est transmis sur le piézomètre de la Montagne qui a accusé une remontée de 3 cm.

Fig. 9 évolution de la température et de la piézométrie



7. - CONCLUSIONS

L'ensemble des données recueillies et des observations faites nous conduit :

- d'une part à proposer un schéma explicatif de la circulation de l'eau thermo-minérale,
- d'autre part à proposer un programme de recaptage des eaux pour satisfaire les besoins des Thermes de Salut.

7.1. SCHEMA EXPLICATIF DE LA CIRCULATION DES EAUX DE SALUT (cf. Fig. 10)

Le circuit thermal proposé découle de l'ensemble des mesures géologiques, hydrochimiques, isotopiques, et hydrogéologiques :

- l'eau de pluie s'infiltré à travers les calcaires jurassiques du versant nord du Monné (hypothèse la plus probable)
- l'eau descend lentement dans ces calcaires par son réseau de fissures jusqu'au contact avec les évaporites du Trias (gypse, anhydrite, sel). Ce circuit a été confirmé par les analyses chimiques de l'eau qui contient des sulfates de calcium et du chlorure de sodium.
- l'eau atteint en profondeur une température de l'ordre de 40°C (valeur obtenue par calcul hydrochimique). Si l'on suppose un gradient géothermique de 3°C/100m et une température de surface de 10°C, la profondeur pour avoir une température de 40°C serait de l'ordre de 1000 m.
- le circuit des eaux de Salut est différent de celui des eaux des Thermes de Bagnères. Ceci a été vérifié par la différence de minéralisation et par la différence de température profonde calculée. La température atteinte par les eaux de Bagnères serait de l'ordre de 55°C ce qui correspondrait à une profondeur de l'ordre de 1500 m.
- les eaux ont un circuit souterrain d'une durée supérieur à 32 ans (mesure de tritium).
- les eaux de la Montagne sont des eaux thermales pures d'origine profonde (démonstré par le tritium et la chimie).
- les eaux de l'Intérieur sont légèrement mélangées et les eaux du Lavoir sont mélangées (46% d'eau thermale). Ceci est démontré par le tritium et par les paramètres physico-chimiques.

- le débit total d'eau thermale mesuré le 6/9/1985 se répartit de la façon suivante :

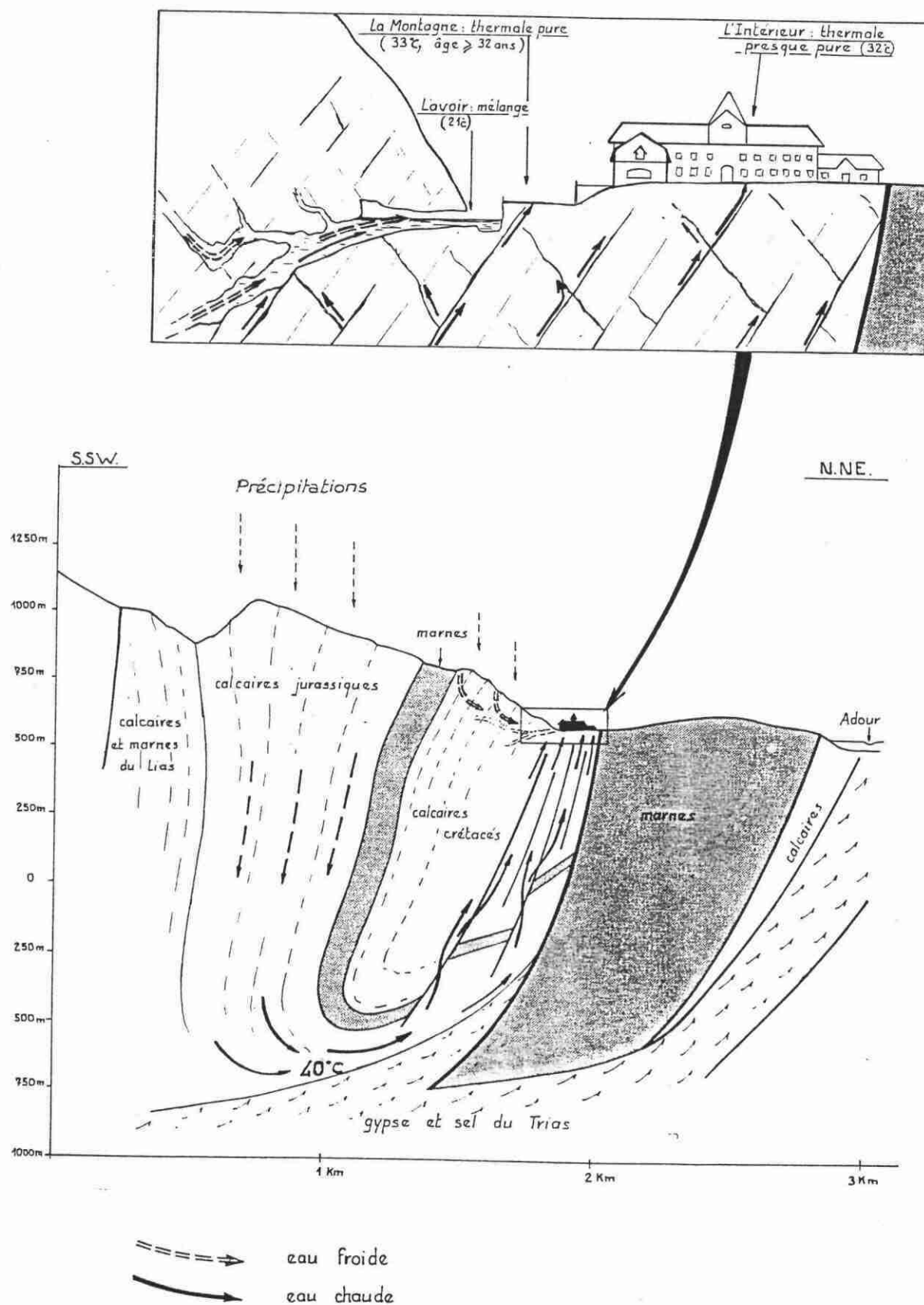
Lavoir (46% d'eau thermale):	12 m ³ /h	soit	288 m ³ /j
La Montagne	: 6 m ³ /h	"	144 m ³ /j
L'Intérieur	: 6 m ³ /h	"	144 m ³ /j
	-----		-----
Total eau thermale	24 m ³ /h	"	576 m ³ /j
	=====		=====

dont 288 m³/jour sont captés par les Thermes : soit 50% du flux sortant

(Bien entendu ces chiffres ne sont que des ordres de grandeur qui représentent plutôt des valeurs minimales, car des eaux thermales peuvent s'écouler et se perdre dans le sol en dehors des captages.)

- la remontée de l'eau s'effectue rapidement le long de la faille qui crée une limite imperméable vers le Nord en amenant les marnes de l'Albien en contact avec les calcaires fissurés aquifères de l'Aptien.
- les sources de Salut jaillissent au point topographique le plus bas du calcaire et de la faille.
- leur dispersion au sol dans le vallon de Salut ne s'effectue pas au hasard mais en fonction des contraintes géologiques (stratification et fracturation). La source la plus pure, la Montagne, jaillit à 75 m seulement de la faille séparant les calcaires des marnes.
Toutes les sources connues sont situées dans un rayon de 80 m par rapport à la source de la Montagne, la dispersion est donc faible.
- la température de l'eau à l'émergence, 32°C actuellement, 34°C avant 1955, est peu différente de la température atteinte en profondeur. Ceci est en accord avec une remontée rapide, mais a pour conséquence de limiter les possibilités d'accroître la température par forage,
Cependant on peut espérer retrouver les 34° antérieurs et gagner encore quelques degrés en permettant à l'eau de parcourir plus rapidement son trajet final.

Fig.10 - schéma explicatif de la circulation des eaux de Salut



7.2. PROJET DE RECAPTAGE

Le schéma explicatif permet de dégager les grandes lignes pour un projet de recaptage; notamment il permet d'envisager la satisfaction des objectifs fixés :

- objectif 1 : - augmenter les débits : le flux arrivant au sol est nettement supérieur au flux capté. On peut donc accroître celui-ci.
- objectif 2 : - augmenter la température : la température maximale en profondeur étant de 40°C on peut prévoir d'accroître la température mais seulement de quelques degrés. On peut passer de 32°C à 34-36°C par un forage de 100 m de profondeur.
Inutile de rechercher des températures plus élevées par un forage plus profond car le gain serait très faible.
- objectif 3 - stabiliser la qualité de l'eau : les eaux ayant plus de 30 ans, sont chimiquement stables. Il suffit d'effectuer un captage en s'isolant des contaminations par les eaux froides de ruissellement ou du karst.
- objectif 4 - réduire les risques de pollution : mêmes remarques que ci-dessus

Nota : La source karstique du Lavoir peut également être utilisée pour équilibrer les pressions dans le sol et stabiliser ainsi les débits et la qualité de l'eau.

C'est l'ensemble des études structurales, des prospections géophysiques, des recherches d'anomalies en radon, et des mesures hydrauliques qui permettent de proposer le programme de recaptage.

Ce programme, est basé sur la recherche du meilleur rapport "chances de résultats positifs"/prix. En particulier, le captage par un forage profond (300 à 400 m) doit être abandonné puisque le gain en température serait faible, et que le prix d'un tel forage est équivalent à 6 à 8 forages de 100 m, qui offrent de meilleures chances de réussite.

C'est donc un programme de forages de l'ordre de 100 m de profondeur (150 m au maximum) que nous proposons :

- nombre de sondages : 3 à 5
- profondeur : 50 à 150 m
- emplacement de chaque sondage de reconnaissance : à déterminer en fonction des résultats de la présente étude et des informations complémentaires recueillies au fur et à mesure au cours de la campagne de sondages.

C'est-à-dire qu'il est préférable de prévoir un programme de sondages de reconnaissances modifiable à tout moment :

On peut cependant prévoir que les sondages seront verticaux ce qui leur permettra de recouper indifféremment l'un ou l'autre des deux principaux plans de fractures de direction (N35° et N150° à forts pendages).

Par rapport aux sorties thermales actuelles les sondages devraient s'effectuer plutôt vers l'Est pour recouper les plans de fracture de direction N35 - c'est-à-dire vers la façade du bâtiment, et plutôt vers le Sud-Ouest pour recouper le plan de fracture N150° mais ceci aurait tendance à nous ramener vers le réseau karstique.

Aussi on retiendra comme zones favorables la zone de torsion située au niveau de la source La Montagne, et comme deuxième zone la façade du bâtiment thermal afin de ne pas travailler dans le système karstique; ce qui rendrait le captage très difficile.

Les sondages de reconnaissance devront être exécutés de manière à être transformables immédiatement, en fonction des résultats, en forage d'exploitation. C'est-à-dire qu'ils pourront recevoir un tubage pour éviter les mélanges avec les eaux froides karstiques ou de ruissellement.

En même temps que les forages seront réalisés, on effectuera toutes les opérations nécessaires :

- observations géologiques, hydrogéologiques
- mesures de débit
- mesures de température, résistivité, identification de toute eau rencontrée.

Toutes ces mesures seront utilisées pour décider de l'opportunité d'équiper ou non le forage et pour décider des nouveaux emplacements. Ces derniers pourront être par ailleurs précisés par une prospection radon complémentaire, qui devrait permettre de réduire le nombre de sondages à exécuter.

8 - PROPOSITIONS POUR DES PERIMETRES DE PROTECTION

Deux types de périmètres de protection sont à proposer :

- 8.1. PERIMETRE SANITAIRE D'EMERGENCE autour de chaque source qui devra faire l'objet de contraintes sévères (cf. circulaire du 18 Juin 1957 du Ministère de la Santé Publique). Ce périmètre a pour but de protéger chaque source contre toute pollution.

Ce périmètre qui peut entraîner des clôtures de terrain et/ou des interdictions d'accès, ne doit être défini qu'après exécution des travaux de recaptage.

8.2. PERIMETRE DE PROTECTION DU GISEMENT THERMAL

Les eaux minérales peuvent être protégées quantitativement par la délimitation d'un périmètre de protection à condition que la source ait été déclarée d'intérêt public (cf. art. L 735 à L 746 du Code de la Santé Publique).

Pratiquement un tel périmètre de protection devrait avoir pour effet d'empêcher tous travaux souterrains susceptibles d'altérer ou de diminuer l'eau de la source.

Ce périmètre qui peut avoir une grande extension est défini à partir des connaissances hydrogéologiques.

Le schéma hydrogéologique conduirait à la délimitation de 2 zones à protéger :

- 1 - les calcaires jurassiques, zone d'infiltration
- 2 - les calcaires crétacés, zone de remontée.

Les activités humaines seront en fait plus perturbantes dans la zone 2 que dans la zone 1 car l'aire d'alimentation est grande et peut supporter quelques modifications. C'est par conséquent la zone 2 (calcaires crétacés) qu'il faut protéger contre toute activité perturbante (travaux souterrains, stockage d'eau en surface, action sur les eaux froides du secteur).

Le périmètre de protection proposé est figuré sur la planche 11.

Dans ce périmètre ainsi délimité tous les travaux souterrains ou hydrauliques devraient être réglementés et ils ne devraient être autorisés que dans le mesure où l'on peut apporter la preuve qu'il n'y aura aucun préjudice pour les sources thermo-minérales.

Toulouse, le 12 Novembre 1985

<i>Synthèse et hydrogéologie</i>	: J.C Soulé, Ingénieur hydrogéologue
<i>Géologie</i>	: Y. Ternet, Ingénieur géologue
<i>Hydrochimie et prospection radon</i>	: F. Iundt, Ingénieur hydrochimiste M. Nartet, Technicien supérieur
<i>Géophysique : sondages électriques</i> V.L.F	: J.M. Collin, Géophysicien J.L. Sahuqué, Géophysicien

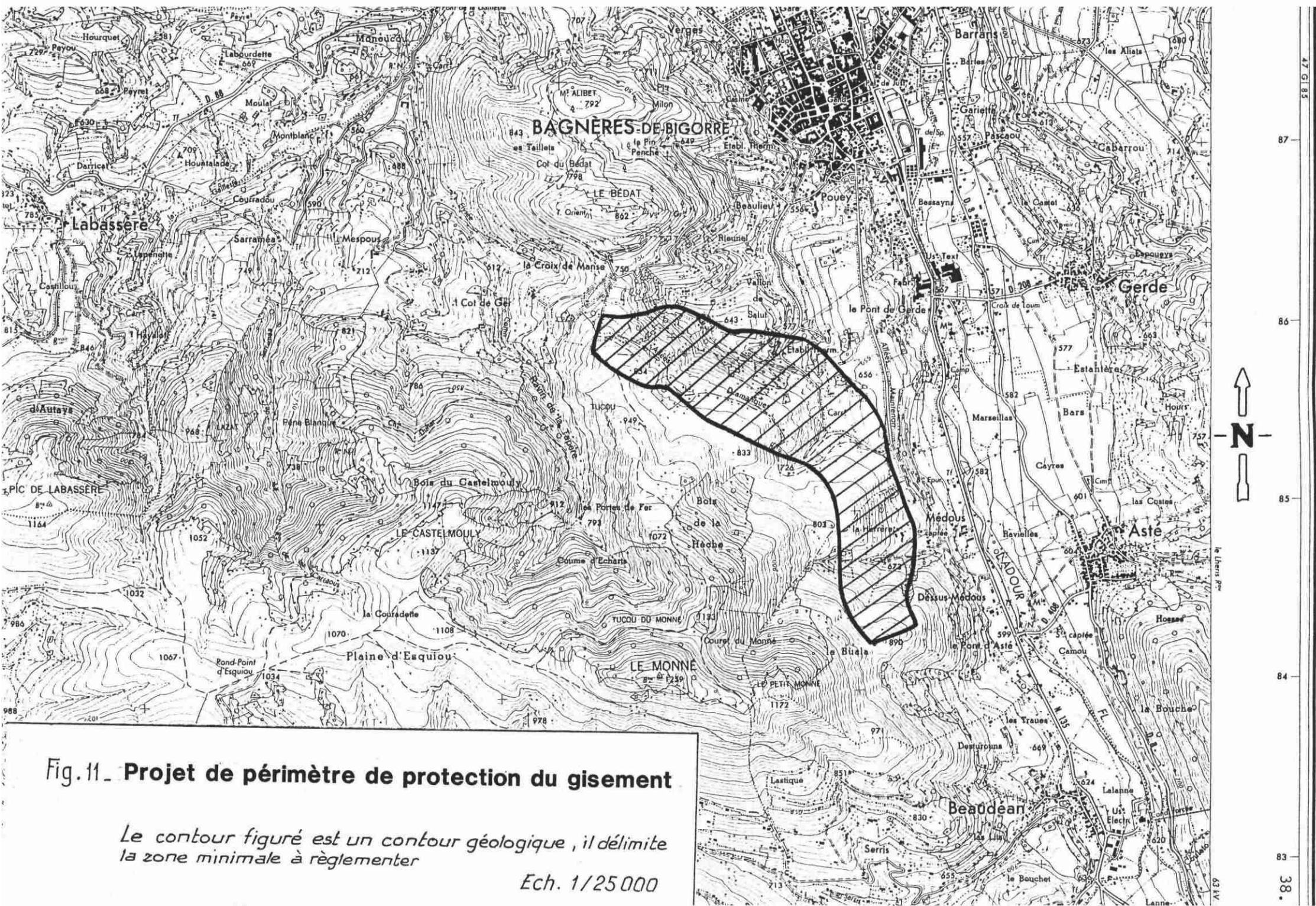


Fig. 11 - Projet de périmètre de protection du gisement

Le contour figuré est un contour géologique, il délimite la zone minimale à réglementer

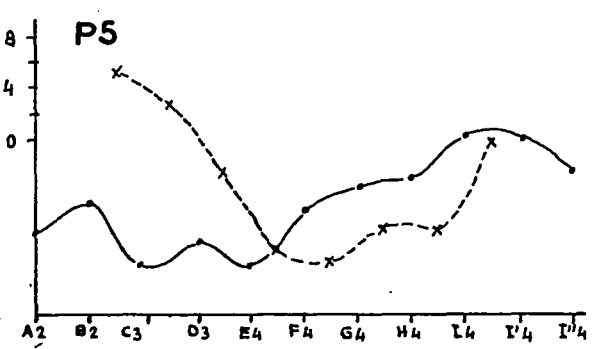
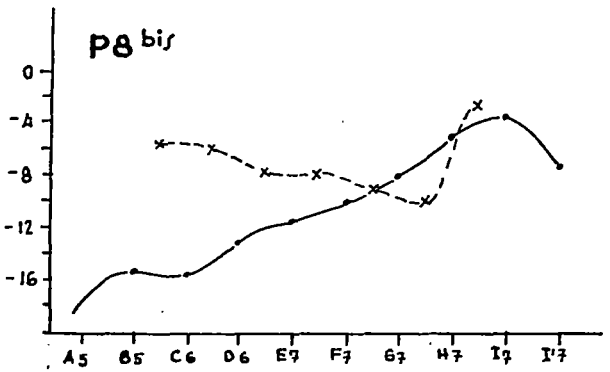
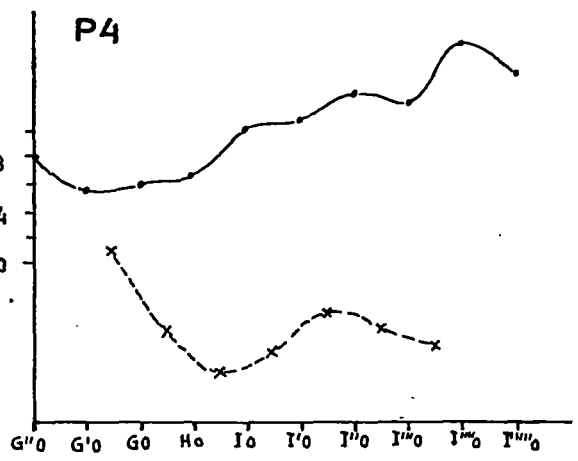
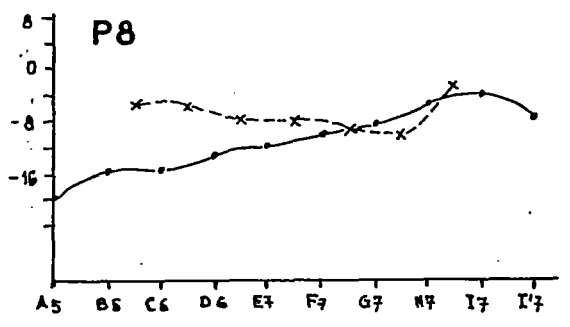
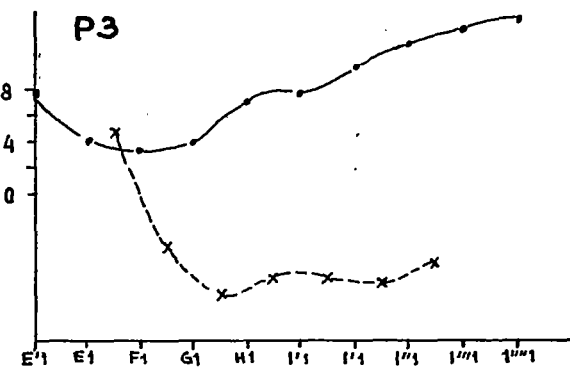
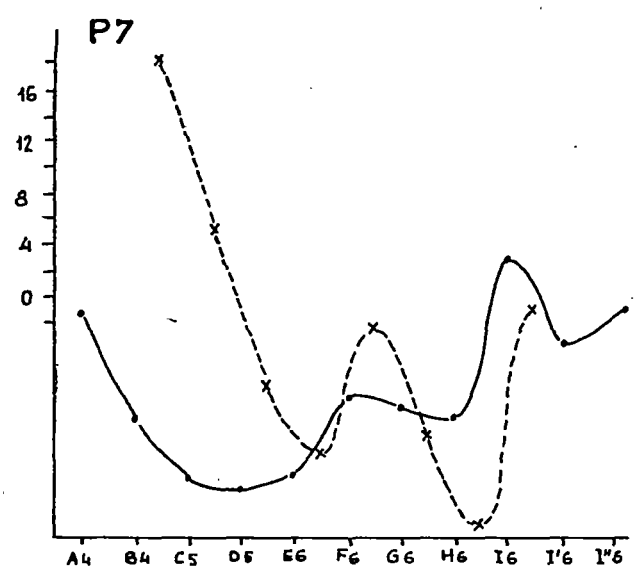
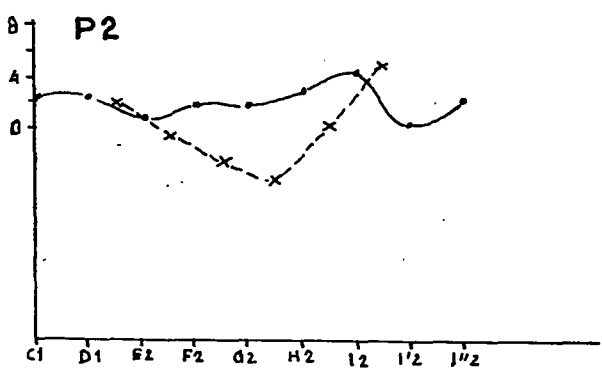
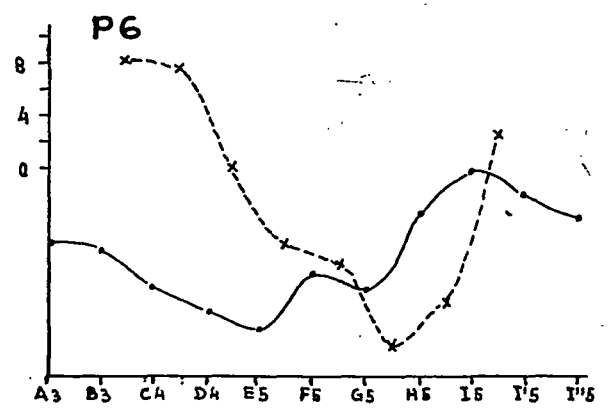
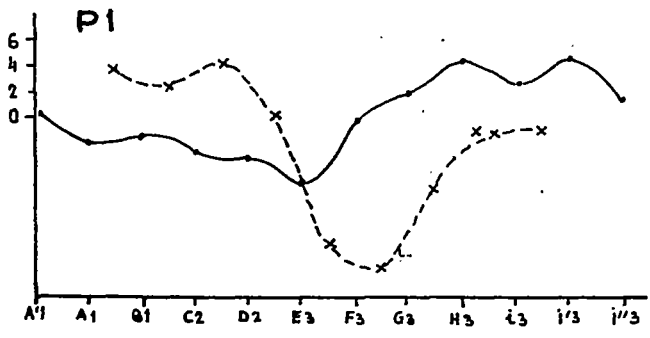
Ech. 1/25 000

47 G 85
87
86
85
84
83
38
43 AV

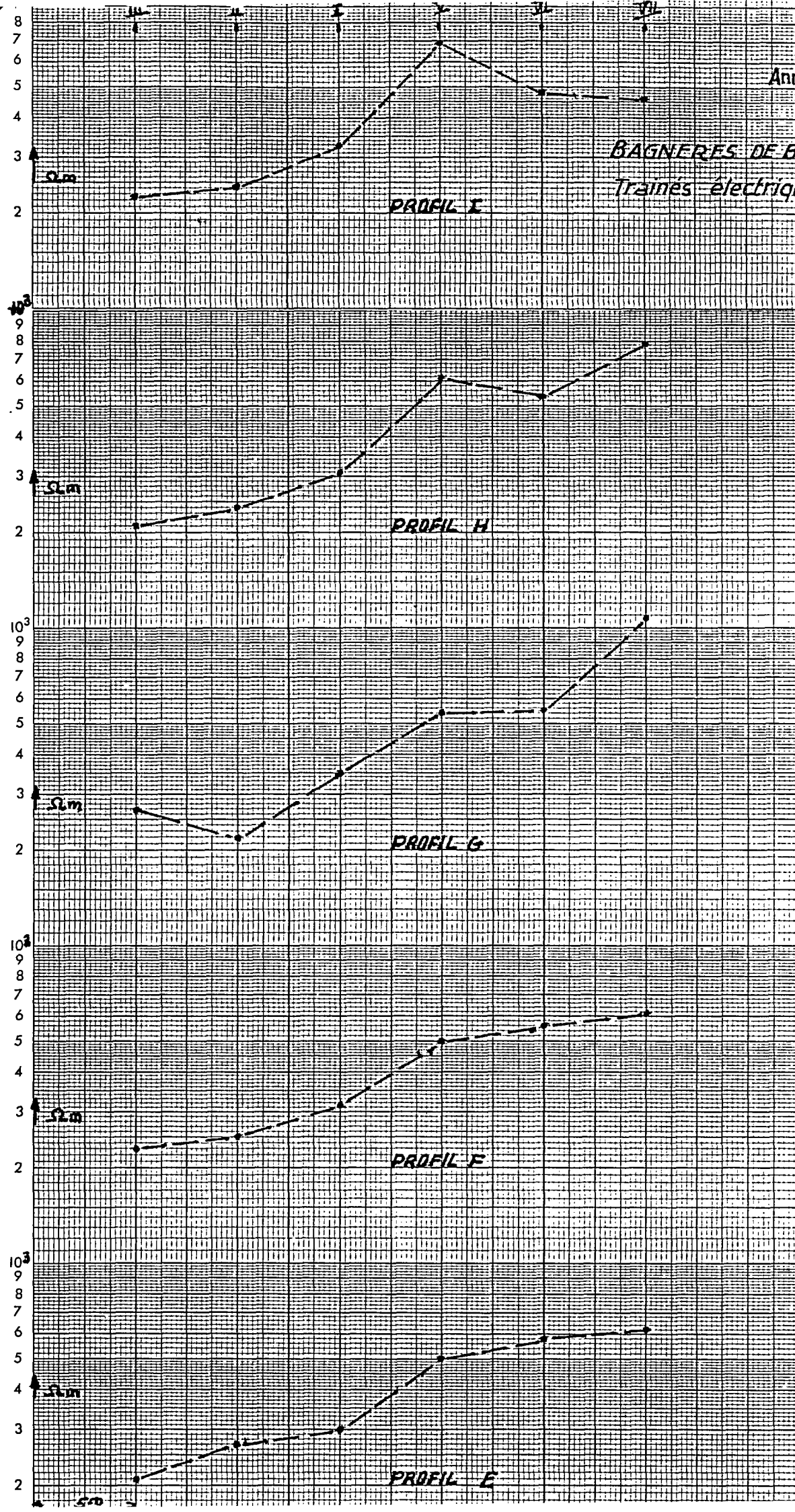
ANNEXE 1

Annexe 1 A - Profils de mesures de V.L.F.

Annxe 2 A - Profils de mesures de trainés électriques



BAGNERES DE BIGORRE
Trains électriques



Annexe 2

Prospection des teneurs anormales des gaz des sols

PROSPECTION DES TENEURS ANOMALES DES GAZ DES SOLS

INTRODUCTION

La mesure des différents gaz (CO₂, CO, O₂, H₂S, radon, etc.) contenus dans les sols s'est révélée être un outil précieux :

- en prospection minière : mise en évidence de gites cachés (minerais sulfurés, uranium) ;
- pour la ressource en eau minérale, thermale et géothermale : localisation d'implantation de forages sur des failles actives et productives ;
- pour les risques naturels : prévision des tremblements de terre et risques volcaniques ;
- en environnement :
 - . pollution des nappes (hydrocarbures, etc.) ;
 - . surveillance de décharges contrôlées (CH₄, CO₂, etc.).

Depuis déjà plus de vingt ans, les anomalies des teneurs en CO₂ et O₂ des gaz des sols ont été mises en évidence au dessus des gites cachés d'amas sulfurés (Kulikova, 1960 ; Khairtdinov, 1965 ; Kratsov, 1965, etc.). La géochimie des gaz des sols est reconnue à l'heure actuelle comme une technologie très importante en prospection minière de par les résultats qu'elle apporte (Lovell et al. 1979, 1980 ; Ball et al. 1980 ; Desgranges et al. 1983).

La géochimie des gaz des sols permet de bien localiser les systèmes de failles actives, même sous d'importantes couvertures sédimentaires et trace parfaitement le flux des gaz libérés par les eaux minérales ou thermales (Israel et Bjornsson, 1967 ; Koga, 1983 ; Sidle, 1984). Les gaz associés aux failles actives ont fait l'objet d'études détaillées et ont été utilisés pour les prévisions des tremblements de terre et des risques volcaniques (Sugisaki et al, 1980).

I - GÉOCHIMIE DU RADON DANS LES SOLS

La géochimie du radon dans les sols, mise au point pour la recherche de l'uranium, est nouvellement utilisée en prospection géothermique et en recherche d'eaux thermales et minérales (Whitehead, 1981-1984).

1.1 - LE RADON

Le radon est un gaz rare de numéro atomique 86, qui comprend plusieurs isotopes. Parmi eux, seuls les isotopes ^{220}Rn , et surtout ^{222}Rn ont une signification géologique (la période de désintégration du ^{219}Rn , par exemple, n'est que de 3,92 secondes). Les tableaux 1 et 2 détaillent les deux familles radioactives naturelles (celles de l'uranium-238 et du thorium-232) qui ont, parmi leurs éléments de filiation, respectivement le ^{222}Rn (radon) et le ^{220}Rn (thoron),

Radon et thoron étant tous deux des émetteurs α très énergétiques (5,49 et 6,28 MeV, respectivement), leur détection est basée sur cette radioactivité, ce qui conduit à des méthodes d'analyse spectaculairement sensibles. Gaz rare, mais de période relativement courte (3,824 jours), le radon ne doit sa grande mobilité, dans la nature, qu'à la mobilité des fluides qui le transportent. D'une façon générale, il convient de retenir d'emblée que la migration du radon seul constitue un phénomène géochimique mineur si on le compare à la migration de ses précurseurs les plus mobiles, ^{238}U , ^{234}U et ^{226}Ra . On peut considérer que par simple diffusion les atomes de Radon ne peuvent pas parcourir des distances significatives (par exemple sur une distance de 10 cm, les concentrations en Radon décroissent de 1 % environ).

Fleischer et Mogro Campero (1980) ont étudié le comportement du radon dans un sol parfaitement homogène, tant par ses propriétés physiques (densité, porosité) que géochimiques (teneur en radium et pouvoir émanateur). Un calcul simple montre aisément que la migration du radon, si elle se limite à la seule diffusion, ne permet pas de détecter en surface des anomalies enfouies sous plus d'une dizaine de mètres de recouvrement. Le transport du radon est donc lié essentiellement aux mouvements des fluides dans le sous-sol (Andraws, 1983).

La présence de failles actives, en augmentant la perméabilité du sous-sol, facilite la migration du radon. Par ailleurs ces failles, qui livrent souvent passage à des fluides minéralisés, constituent en elles-mêmes des anomalies géochimiques d'uranium, élément mobile en milieu oxydant, ou de radium, élément mobile en milieu réducteur (Gingrich, 1984). Ce dernier co-précipite généralement avec les sulfates (gypse, barytine, celestite, anglesite, aluns, etc.). Le radon dans le sol a d'ailleurs depuis longtemps été reconnu comme un indicateur efficace des

structures géologiques, même si ces dernières n'ont pas d'expression visible en surface (Israël et Björnsson, 1967 ; Chovelon et Marty, 1985).

En prospection géothermique ou en recherche d'eaux thermominérales, la prospection radon se justifie pleinement puisque les sites d'étude montrent souvent des modifications de paramètres physiques (fracturation, gradient thermique ...) ou chimiques (distribution de l'uranium et/ou du radium).

1.2 - LA METHODE DE MESURE : LES CHAMBRES A SCINTILLATION

Qu'elle soit à échantillonnage continu ou discontinu, cette méthode est basée sur les propriétés scintillantes du sulfure de zinc dopé à l'argent. Une particule rencontrant le scintillateur y induit des photons (4500Å , en moyenne) détectés à leur tour par un photomultiplicateur. Le signal amplifié est traité de façon analogique ou, plus fréquemment, numérique. Le scintillateur ne réagit ni au β ni au γ , ce qui explique la sensibilité et la spécificité de la méthode.

Lors de notre prospection, nous avons utilisé des fioles cylindro-coniques de 125 cm^3 décrites par Pradel et Billard (1975) et commercialisées par le C.E.A. tapissées intérieurement - au moyen de graisse silicone - de sulfure de zinc activé et revêtues extérieurement de peinture blanche qui, tout en augmentant le rendement de comptage, protège le scintillateur de l'action délétère de la lumière du jour, ces fioles en verre ont un fond transparent qui permet leur couplage optique avec la photocathode du PM.

Les fioles sont hermétiquement bouchées à l'aide d'un bouchon en caoutchouc évidé qui est utilisé comme septum. Prélèvements et vidanges de la fiole sont réalisés à l'aide d'aiguilles hypodermiques ($\emptyset = 1\text{ mm}$). On fait circuler les gaz à prélever dans la fiole pour purger l'air qui y était contenu, au moyen d'une pompe à vide manuelle munie d'un manomètre. Le contrôle de la pression permet de détecter les sols peu perméables au gaz (terrains argileux). Lors du prélèvement, il convient d'éviter que le radon de l'échantillon soit accompagné de descendants émetteurs α , en équilibre ou non avec lui. L'aiguille hypodermique de prélèvement ("pique-fiole") est donc solidaire d'un filtre possédant une excellente efficacité de filtration des aérosols ultra-fins.

Le bruit de fond "propre" d'une fiole scintillante neuve est inférieure au coup/minute ; il est essentiellement dû aux rayons cosmiques.

1.3 - CALCUL D'UNE CONCENTRATION EN RADON

Rappelons que l'activité A d'un corps radioactif est égale au produit du nombre d'atomes par la constante radioactive $\lambda = (\log 2)/T$ (où T est la période ou demie-vie du corps radioactif). Nous utilisons le pCi/l = 10^{-12} Ci. \cdot l^{-1} comme unité de concentration (le curie est l'activité de 1 g de radium, soit $3,7 \times 10^{10}$ désintégrations par seconde).

Soit une activité a de ^{222}Rn introduite dans la fiole au temps $t = 0$. Après quelques heures, ce radon est en équilibre radioactif avec ses descendants, soit environ 3 α totaux pour 1 de radon. Il vient :

$$A \text{ (pCi/l)} = c(t) \times \frac{8 \cdot 10^{12}}{60 \times 3,7 \cdot 10^{10} \times 3 \times f(t) \times \rho \times R}$$

c (t) étant le taux de comptage net (c'est-à-dire bruit de fond déduit) au temps t en coups/minute et f (t) le facteur de décroissance du ^{222}Rn au temps t :

$$f(t) = e^{-\lambda t} \text{ avec } \lambda = 1,2588 \cdot 10^{-4} \text{ mn}^{-1}$$

R est le rendement des fioles ($R = 0,6$) et ρ le rendement de l'échelle de comptage ($\rho = 0,955$ avec le scintillomètre α type MARGNAC (licence CEA), utilisé lors de notre prospection).

En toute rigueur, c'est le facteur global de décroissance de l'activité α totale, et non pas f (t) qu'il convient d'utiliser ici, mais cette approximation est légitime car dès $t = 2 \text{ h } 56 \text{ mn}$ l'erreur relative ainsi introduite est inférieure à 1 % (d'où la fameuse règle empirique du "comptage après 3 h"). Notons au passage que l'activité α dans la fiole est maximum à $t = 3 \text{ h } 35 \text{ mn}$ et que l'erreur minimum est commise à $t = 3 \text{ h } 54 \text{ mn}$.

Comme ordre de grandeur, et pour un comptage réalisé "en temps utile", il convient de retenir que :

$$A \text{ (pCi/l)} \approx 2,1 \times c \text{ (c/mn)}$$

Le bruit de fond propre d'une fiole étant de l'ordre du coup/minute, il apparait que la limite de détection de la méthode se situe vers le pCi/l mais nécessite alors, pour être atteinte, des durées de comptage prohibitives. La méthode des fioles scintillantes est donc de sensibilité insuffisante pour mesurer - sans préconcentration - la teneur en radon de l'air ambiant*, (en moyenne de 0,1 à 0,3 mCi/l sur les continents), mais convient parfaitement pour des analyses de gaz du

* En d'autres termes, le bruit de fond d'une fiole vide est sensiblement égal à celui d'une fiole remplie d'air atmosphérique "normal".

sol, même en terrain non uranifère (Sabroux, 1984). Notons enfin qu'à une activité volumique de 1 pCi/l correspond une concentration de $6,5 \cdot 10^{-13}$ ppm de radon (17 460 atomes/litre).

Remarque

Il ne convient pas de réaliser des comptages trop longtemps après le prélèvement. Le résultat est en effet moins précis car l'activité α dans la fiole décroît selon une "pseudo-période" légèrement inférieure à 3,824 jours. Ce phénomène est vraisemblablement dû à la diffusion du radon à travers le bouchon en caoutchouc de la fiole. De plus, un séjour prolongé du ^{222}Rn dans une fiole augmente son bruit de fond "définitif" dû aux α du ^{210}Po (T = 138 jours) directement produit par la désintégration β du ^{210}Pb (T = 22 ans) : par exemple, cent comptages - après 4 heures - d'échantillons successifs autour de 2 000 c/mn élèvent le bruit de fond "définitif" de la fiole de 1 c/mn, ou de 4 c/mn si chaque échantillon avait séjourné 16 h dans la fiole au lieu de quatre. Ce n'est, en fait, pas l'augmentation séculaire du bruit de fond qui amène à rejeter une fiole mais plutôt diverses fausses manoeuvres dont l'introduction inopinée de particules minérales ou d'eau lors de prélèvements en terrain marécageux.

1.4 - METHODE DE PRELEVEMENT DES GAZ DES SOLS

Les gaz des sols sont prélevés au moyen de cannes de prélèvement qui se composent d'un tube de 65 cm de longueur et de 1,5 cm de diamètre avec, à l'intérieur, une tige pleine de 80 cm de longueur. Le principe de la méthode de prélèvement des gaz des sols est présenté dans la figure page suivante.

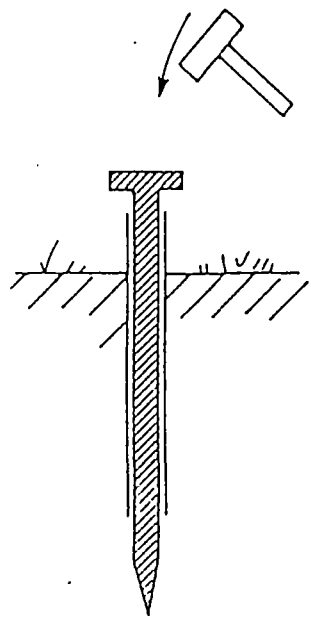
- Mise en place de la canne de prélèvement : la canne est enfoncée au moyen d'une masse jusqu'à 75 cm de profondeur ;

- Extraction de la partie centrale : la tige pleine centrale est retirée laissant ainsi un trou de 75 cm de profondeur tubé sur 60 cm et en découvert sur les 15 derniers centimètres ;

- Raccordement du système : canne de prélèvement, fiole et pompe à vide manuelle

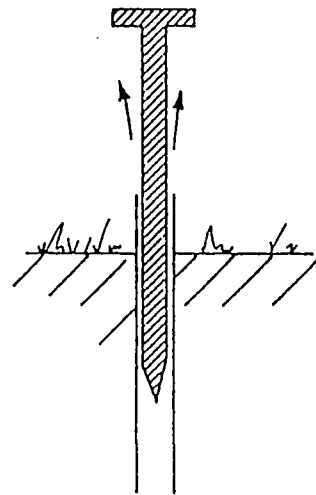
- Aspiration du gaz des sols : (10 fois environ le volume de la fiole). On réalise une circulation des gaz à échantillonner au travers de la fiole de prélèvement chassant l'air qui y était contenu.

METHODE DE PRELEVEMENT DES GAZ DES SOLS
(Mesures de Radon)

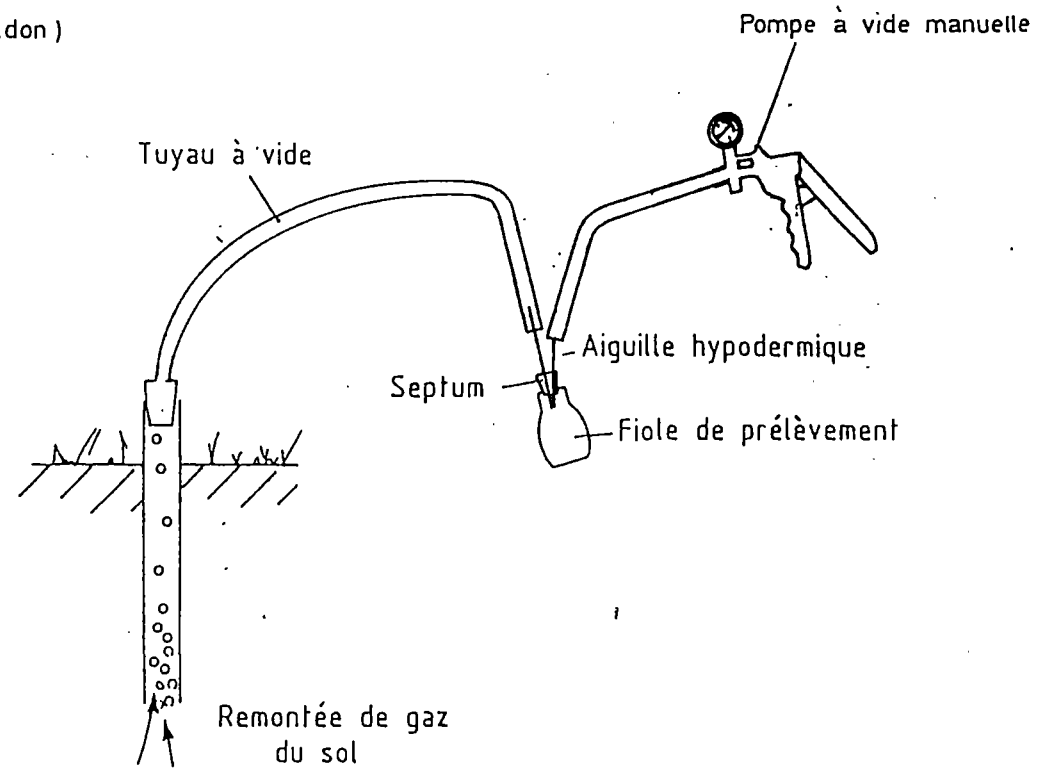


sol

Mise en place
de la canne de prélèvement



Extraction
de la tige centrale



Prélèvement

sol, même en terrain non uranifère (Sabroux, 1984). Notons enfin qu'à une activité volumique de 1 pCi/l correspond une concentration de $6,5 \cdot 10^{-13} \text{ ppm}$ de radon ($17\,460$ atomes/litre).

Remarque

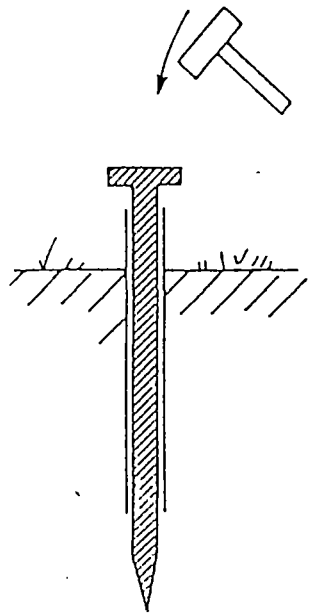
Il ne convient pas de réaliser des comptages trop longtemps après le prélèvement. Le résultat est en effet moins précis car l'activité α dans la fiole décroît selon une "pseudo-période" légèrement inférieure à 3,824 jours. Ce phénomène est vraisemblablement dû à la diffusion du radon à travers le bouchon en caoutchouc de la fiole. De plus, un séjour prolongé du ^{222}Rn dans une fiole augmente son bruit de fond "définitif" dû aux α du ^{210}Po ($T = 138$ jours) directement produit par la désintégration β du ^{210}Pb ($T = 22$ ans) : par exemple, cent comptages - après 4 heures - d'échantillons successifs autour de 2 000 c/mn élèvent le bruit de fond "définitif" de la fiole de 1 c/mn, ou de 4 c/mn si chaque échantillon avait séjourné 16 h dans la fiole au lieu de quatre. Ce n'est, en fait, pas l'augmentation séculaire du bruit de fond qui amène à rejeter une fiole mais plutôt diverses fausses manoeuvres dont l'introduction inopinée de particules minérales ou d'eau lors de prélèvements en terrain marécageux.

1.4 - METHODE DE PRELEVEMENT DES GAZ DES SOLS

Les gaz des sols sont prélevés au moyen de cannes de prélèvement qui se composent d'un tube de 65 cm de longueur et de 1,5 cm de diamètre avec, à l'intérieur, une tige pleine de 80 cm de longueur. Le principe de la méthode de prélèvement des gaz des sols est présenté dans la figure page suivante.

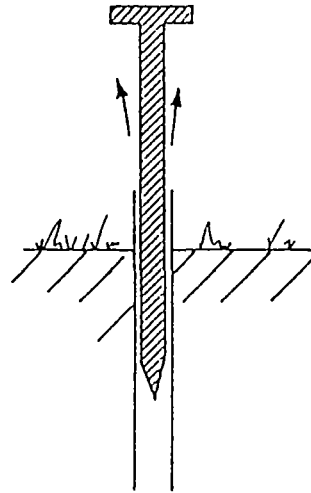
- Mise en place de la canne de prélèvement : la canne est enfoncée au moyen d'une masse jusqu'à 75 cm de profondeur ;
- Extraction de la partie centrale : la tige pleine centrale est retirée laissant ainsi un trou de 75 cm de profondeur tubé sur 60 cm et en découvert sur les 15 derniers centimètres ;
- Raccordement du système : canne de prélèvement, fiole et pompe à vide manuelle
- Aspiration du gaz des sols : (10 fois environ le volume de la fiole). On réalise une circulation des gaz à échantillonner au travers de la fiole de prélèvement chassant l'air qui y était contenu.

METHODE DE PRELEVEMENT DES GAZ DES SOLS
(Mesures de Radon)

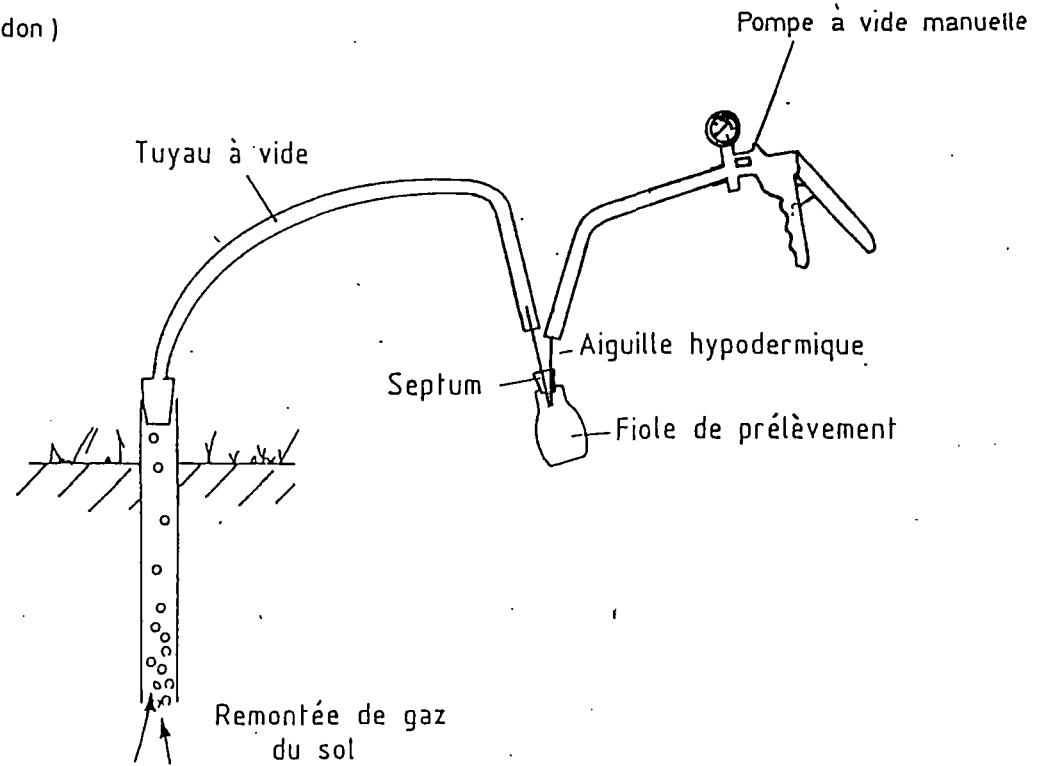


sol

Mise en place
de la canne de prélèvement



Extraction
de la tige centrale



Prélèvement

Uranium	Uranium I	$^{238}_{92}\text{U}$	4,5.10 ⁹ a	α : 4,18 γ : 0,45 (23)
↓	Thorium	Uranium X ₁	$^{234}_{90}\text{Th}$	24,1 j
↓	Protactinium	Uranium X ₂ 99,85 Uranium Z 0,15	$^{234}_{91}\text{Pa}$	1,18 mn 6,66 h
↓	Uranium	Uranium II	$^{234}_{92}\text{U}$	2,48.10 ⁵ a
↓	Thorium	Thorium	$^{230}_{90}\text{Th}$	8.10 ⁴ a
↓	Radium	Radium	$^{226}_{88}\text{Ra}$	1617 a
↓	Radon	Radon émanation	$^{222}_{86}\text{Rn}$	3,825 j
↓	Polonium	Radium A	$^{218}_{84}\text{Po}$	3,05 mn
↓	Plomb 99,98	Radium B	$^{214}_{82}\text{Pb}$	26,8 mn
↓	Astate	Astate	$^{218}_{85}\text{At}$	1,3 s
↓	Bismuth 99,96 %	Radium C	$^{214}_{83}\text{Bi}$	19,9 mn
↓	Polonium 0,04 %	Radium C'	$^{214}_{84}\text{Po}$	1,58.10 ⁻⁴ s
↓	Thallium	Radium C''	$^{210}_{81}\text{Tl}$	1,5 mn
↓	Plomb	Radium D	$^{210}_{82}\text{Pb}$	19,4 a
↓	Bismuth 99	Radium E	$^{210}_{83}\text{Bi}$	5,013 j
↓	Polonium 1 %	Radium F	$^{210}_{84}\text{Po}$	138,3 j
↓	Thallium	Thallium	$^{206}_{81}\text{Tl}$	4,19 mn
↓	Plomb	Radium G	$^{206}_{82}\text{Pb}$	stable

FAMILLE 4 n + 2
URANIUM 238

TABLEAU 1 : Famille de l'uranium-238 (in : Pannetier, 1966)

Thorium	Thorium	$^{232}_{90}\text{Th}$	1,41.10 ¹⁰ a	α : 4,01 (76) - 3,95 (24) γ : 0,059 (24)
↓	Radium	Mésothorium I	$^{228}_{88}\text{Ra}$	6,7 a
↓	Actinium	Mésothorium II	$^{228}_{89}\text{Ac}$	6,13 h
↓	Thorium	Radiothorium	$^{228}_{90}\text{Th}$	1,91 a
↓	Radium	Thorium X	$^{224}_{88}\text{Ra}$	3,64 j
↓	Radon	Thoron émanation	$^{220}_{86}\text{Rn}$	54,5 s
↓	Polonium 100 %	Thorium A	$^{216}_{84}\text{Po}$	0,16 s
↓	Astate	Astate	$^{216}_{85}\text{At}$	3.10 ⁻⁴ s
↓	Bismuth 66,3 %	Thorium C	$^{212}_{83}\text{Bi}$	60,5 mn
↓	Polonium 33,7 %	Thorium C'	$^{212}_{84}\text{Po}$	0,3 μ s
↓	Thallium	Thorium C''	$^{208}_{81}\text{Tl}$	3,1 mn
↓	Plomb	Thorium D	$^{208}_{82}\text{Pb}$	stable

FAMILLE 4 n
THORIUM 232

TABLEAU 2 : Famille du thorium-232 (in : Pannetier, 1966)

ANNEXE 3

Résultats d'analyses chimiques

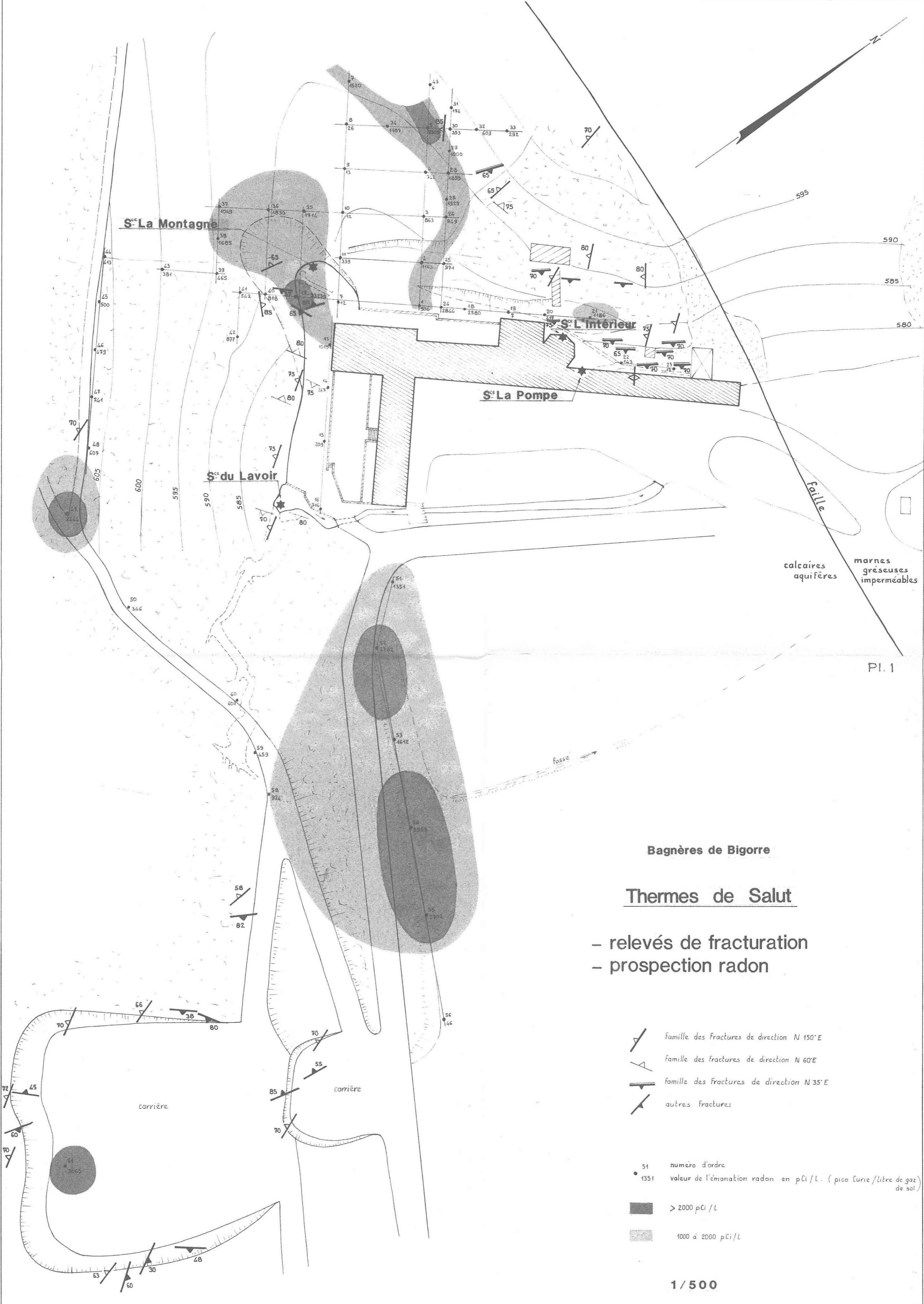
TABLEAU 3 : RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES

 * EDITION EN MILLIEQUIVALENTS/LITRE *

NUM.TERRAIN	INDR	CA	MG	NA	K	HCO3	CO3	CL	SO4	NO3	FE	B	SR	BA
Montagne	0001	13.77	2.59	5.04	0.09	-2.61	0.00	-5.64	-14.16	0.00	0.00	-0.02	0.08	0.00
Intérieure	0002	13.57	2.55	4.91	0.10	-2.51	0.00	-5.47	-13.54	0.00	0.00	-0.03	0.07	0.00
Lavoir	0003	7.98	1.35	2.30	0.05	-2.49	0.00	-2.57	-7.08	-0.02	0.00	-0.01	0.04	0.00
Source froide	0004	3.17	0.37	0.06	0.01	-3.29	0.00	-0.11	-0.19	-0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
Salies	0005	27.64	5.92	3.41	0.12	-2.10	0.00	-2.82	-32.71	0.00	0.01	-0.01	0.18	0.00

 * EDITION DE LA BALANCE IONIQUE *

NUM.TERRAIN	INDR	ANIONS	CATIONS	DIFFERENCE
Montagne	0001	-22.42	21.57	3.92 %
Intérieure	0002	-21.63	21.21	2.01 %
Lavoir	0003	-12.16	11.72	3.77 %
Source froide	0004	-3.68	3.61	1.97 %
Salies	0005	-37.63	37.29	0.93 %



Pl. 1

Bagnères de Bigorre

Thermes de Salut

- relevés de fracturation
- prospection radon

- famille des fractures de direction N 150° E
- famille des fractures de direction N 60° E
- famille des fractures de direction N 35° E
- autres fractures

- 51 numéro d'ordre
- 1351 valeur de l'émanation radon en pCi/L. (pico Curie/litre de gaz de sol)
- > 2000 pCi/L
- 1000 à 2000 pCi/L

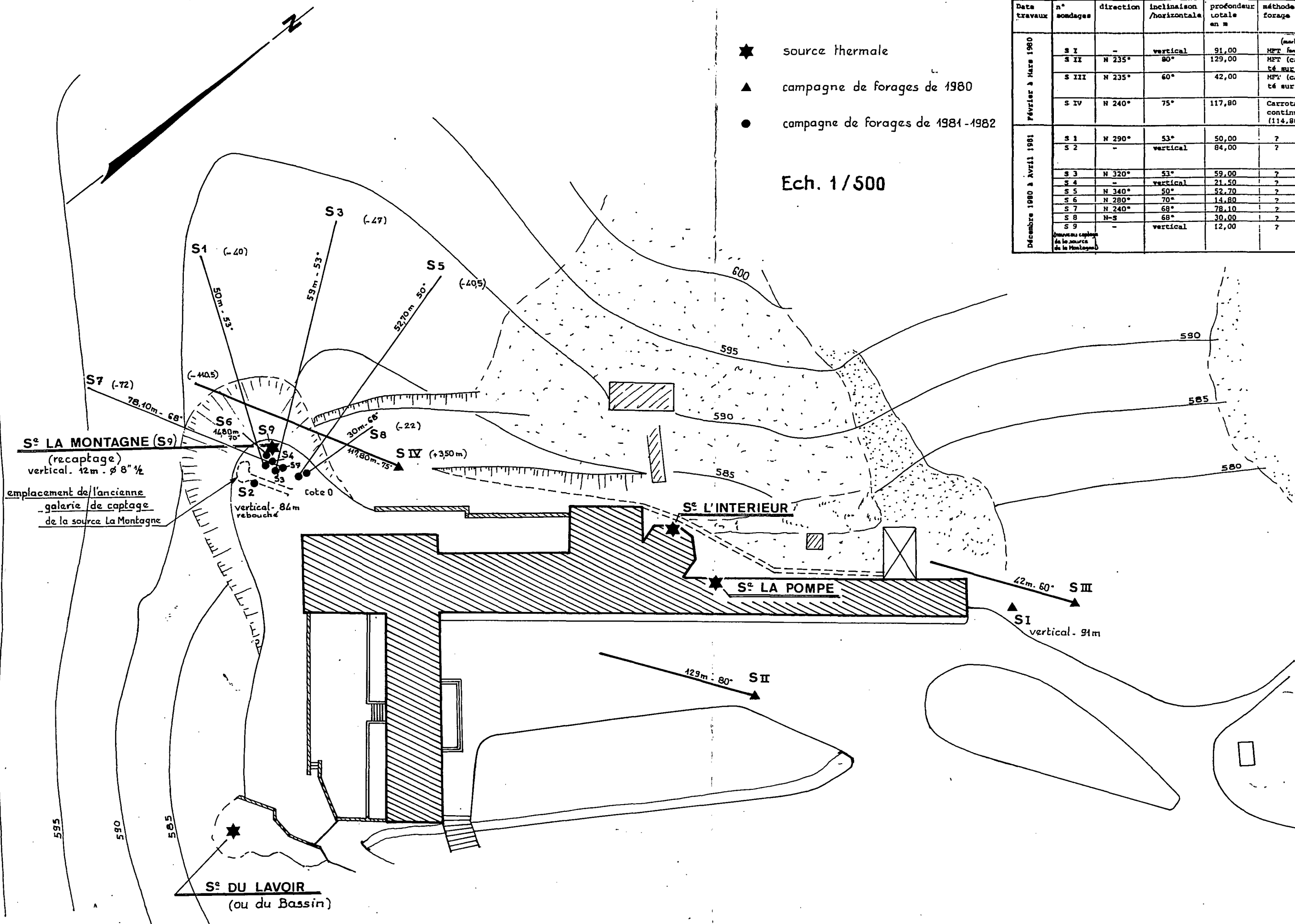
1/500

des différents sondages réalisés

Date travaux	n° sondages	direction	inclinaison /horizontale	profondeur totale en m	méthode de forage	diamètre	hauteur tubée en m
Février à Mars 1980	S I	-	vertical	91,00	(mariau MFT fond de tra.)	?	6,00
	S II	N 235°	80°	129,00	MFT (carroté sur 2,50m)	?	4,20
	S III	N 235°	60°	42,00	MFT (carroté sur 3,00m)	?	5,00 + 21,00 en PVC
	S IV	N 240°	75°	117,80	Carrotage continu (114,80 m)	?	8,00
Décembre 1980 à Avril 1981	S 1	N 290°	53°	50,00	?	5" 1/2	-
	S 2	-	vertical	84,00	?	8" 1/2 sur 30 m et 5" 1/2 - Rn	18,00
	S 3	N 320°	53°	59,00	?	-	-
	S 4	-	vertical	21,50	?	-	-
	S 5	N 340°	50°	52,70	?	-	-
	S 6	N 280°	70°	14,80	?	-	-
	S 7	N 240°	68°	78,10	?	-	-
	S 8	N-S	68°	30,00	?	-	-
	S 9	-	vertical	12,00	?	8" 1/2	7,50

- ★ source thermique
- ▲ campagne de forages de 1980
- campagne de forages de 1981-1982

Ech. 1/500



S° LA MONTAGNE (S9)
(recaptage)
vertical. 42m. ø 8" 1/2
emplacement de l'ancienne
galerie de captage
de la source La Montagne

vertical. 84m
rebouché

S° L'INTERIEUR

S° LA POMPE

S° DU LAVOIR
(ou du Bassin)