

LA PRESSE THERMALE ET CLIMATIQUE

ANNÉE 2006
143^{ème} Année

CONGRÈS INTERNATIONAL
D'HYDROLOGIE
LA BOURBOULE (Puy-de-Dôme)
20-22 mai 2003



Société Française d'Hydrologie et de Climatologie Médicales
PARIS

SOMMAIRE

AVANT PROPOS	i
L'AVENIR DU THERMALISME À LA BOURBOULE	i
<i>In memoriam</i>	ii
 THÈME I : L'ARSENIC À LA BOURBOULE	
PRÉSENTATION	1
LA TRADITION	1
INVENTAIRE DES MINÉRAUX ARSENICAUX DÉCOUVERTS DANS LE MASSIF CENTRAL FRANÇAIS	1
1 - Introduction	1
2 - L'arsenic – Données générales	2
2.1 - Répartition naturelle	2
2.2 - Métabolisme	3
2.3 - Arsénothérapie	4
2.4 - Toxicologie	5
2.5 - Modes d'action toxique	6
2.6 - Symptomatologie de l'intoxication	6
2.9 - Conclusion	7
SUIVI DE L'ARSENIC DANS L'ORGANISME	8
1 -Détection de l'arsenic en milieu biologique par microsonde LAMMA	8
1.1 - Matériels et méthodes	8
1.2 - Analyse des produits purs	10
1.3 - Analyse d'échantillons biologiques	11
2 -Conclusion générale	13
L'ARSENIC DANS L'ESPACE DE LA CHAÎNE HERCYNienne	13
1 - Introduction	14
2 - Les travaux anciens sur l'arsenic	14
3 -Les mesures systématiques	15
3.1 - L'arsenic dans les sols et dans les fines d'alluvions en tête de bassin	15
3.2 - L'arsenic dans les eaux souterraines	16
4 - Les bases de données sur l'arsenic	18
4.1 - Géochimie des sols et des fines d'alluvions	18
4.2 - Géochimie des eaux	18
5 - Applications pratiques permises par les bases de données	18
5.1 - Origine de l'arsenic dans les eaux souterraines	18
5.2 - Applications potentielles à deux questions pratiques	20
6 - Perspectives	20
7 - Références bibliographiques	22
8 - Rapports techniques	23
AUTRES PROCESSUS MOBILISATEURS DE L'ARSENIC	23
1 - Rôle des agents climatiques	23
2 - Rôle du couvert végétal	23
3 - Arsenic et salinité	24
4 - Arsenic et matières organiques	25
5 - Arsenic et force ionique	25

THÈME II : PRODUCTION D'EAU MINÉRALE

1 - Motivation de la réhabilitation	27
1.1 - Un ouvrage de captage de conception ancienne	27
1.2 - Une action anthropique fragilisant l'environnement	27
1.3 - Un captage sensible	27
1.4 - Une situation hydrogéologique complexe	29
2 - Définition et conception des travaux	33
3 - Déroulement	37
3.1 - Conditions de travail	37
3.2 - Nettoyage du puits Choussy 2	37
3.3 - Extraction des anciens tubages	38
3.4 - Nouveaux tubages	39
3.5 - Cimentation de l'annulaire	42
3.6 - Comblement des puits	44
4 - Situation après travaux	44
5 - Résultats	44

THÈME III : DISTRIBUTION DE L'EAU GÉOTHERMALE RÉNOVATION DES CIRCUITS

1 - Motivations	49
2 - Principes	49
3 - Points d'application	51
4 - Station de pompage	51
5 - Réseau de production	52
6 - Station de stockage	54
7 - Station de distribution primaire	55
8 - Station de distribution secondaire	57
9 - Réseaux de distribution tertiaire	59

THÈME IV : LES GAZ THERMAUX

PRÉSENTATION	61
1 - Le radon	61
1.1 - Etat naturel	61
1.2 - Démarche poursuivie à la Bourboule	62
1.3 - Résultats obtenus sur le site de la Bourboule	63
1.4 - Conclusion	65
2 - L'anhydride carbonique	66
2.1 - Dissociation	66
2.2 - Équilibre calco-carbonique	66
3 - Étude de la fracturation par la prospection du dioxyde de carbone	67
3.1 - Dans l'atmosphère	67
3.2 - En profondeur	67
3.3 - Production gazeuse	67
3.4 - Identification du dioxyde de carbone	67
3.5 - Moyens matériels	67
3.6 - Mode opératoire	67
3.7 - Prospection systématique de l'anhydride carbonique dans le périmètre élargi de la Bourboule	68

THÈME V : LES LÉGIONELLES

ESPACE VITAL ET POSSIBILITÉS DE LUTTE CONTRE LES LÉGIONELLES

1 - Signification sanitaire des Légionelles	71
2 - Conditions de vie des Légionelles	71
3 - Lutte contre les Légionelles dans les installations techniques	72
4 - Les eaux minérales de la Bourboule	72

NICHES ÉCOLOGIQUES PARTICULIÈRES AU GENRE *LEGIONELLA*

1 - Colonisation du biofilm	74
2 - Un biofilm discret	74
3 - Heureusement une mouche	74
4 - Conclusion en quatre points importants	74

THÈME VI : L'ALLERGIE

L'ALLERGIE

1 - Présentation	75
2 - Comment devenir allergique ?	75

L'ASTHME

3 - L'engrenage du immuno-métabolique.	76
4 - Approche et prise en charge des maladies allergiques	76
5 - Que dire du thermalisme ?	77

THÈME VII : LE PATRIMOINE HYDROTHERMAL DE LA GRÈCE

1 - Les Thermopyles un peu d'histoire	79
2 - De l'histoire à l'hydrogéologie	81
2.1 - Les Thermopyles	81
2.1.1 - Morphologie	82
2.1.2 - Orographie	82
2.1.3 - Les sources géothermales	82
2.1.4 - L'anhydride carbonique	83
2.2 - Méthana	
2.2.1 - Incidence de la mobilité des plaques	83
2.2.3 - Structure de l'île	84
2.2.4 - Modélisation du mécanisme géothermal	84
3 - De l'hydrogéochimie aux pratiques thermales	84
4 - Analyse physicochimique spécifique des eaux minérales à usage thérapeutique	85

INDEX DES FIGURES

THÈME I : L'ARSENIC À LA BOURBOULE

INVENTAIRE DES MINÉRAUX ARSENICAUX DECOUVERTS DANS LE MASSIF CENTRAL FRANÇAIS

1 - Cycle de l'arsenic dans l'environnement (Levesque, 1984)	2
2 - Mispickel ou arsénopyrite (FeAsS), système monoclinique ; échantillon provenant de la mine de San Antonio (Mexique)	6
3 - Réalgar (As_4S_4), système monoclinique ; échantillon provenant de la mine de Shimen (Hunan, Chine)	7
4 - Orpiment (As_2O_3), système monoclinique ; échantillon provenant de la mine de Twin Creeks (Nébraska, U.S.A.)	7

SUIVI DE L'ARSENIC DANS L'ORGANISME

5 - Appareillage	8
6 - Réalgar	9
7 - Triphénylarsine	10
8 - Arsénolite	10
9 - Spectre LAMMA obtenu par analyse d'un lysosome de cellule hépatique	11
10 - Sang - témoin - $[\text{As}] = 6 \text{ mg/kg}$	11
11 - Foie - traité - $[\text{As}] = 390 \text{ mg/kg}$	12
12 - Foie - témoin - $[\text{As}] = 109 \text{ mg/kg}$	12
13 - Foie - traité - $[\text{As}] = 109 \text{ mg/kg}$	12

L'ARSENIC DANS L'ESPACE DE LA CHAÎNE HERCYNienne

14 - Répartition des teneurs en arsenic dans les fines d'alluvions et/ou de sols dans le Massif central.	17
15 - Relation entre teneurs en arsenic dans les fines d'alluvions, et concentrations en arsenic dans les eaux.	18
16 - Teneurs en arsenic dans les fines d'alluvions, concentration dans les eaux de sources des granites, gneiss ou micaschistes.	19
17 - Schéma conceptuel : évolution des paramètres Eh, pH, conductivité, dans les eaux produites à l'avancement lors de l'exécution d'un forage destructif	19
18 - Localisation en Europe occidentale, des principaux gîtes minéraux avec présence d'arsenic, d'après Emberger (1984).	21
19 - Pays d'Europe ayant réalisé des campagnes de géochimie	22

AUTRES PROCESSUS MOBILISATEURS DE L'ARSENIC

20 : Coupe schématique dans un sol sous couvert résineux	25
--	----

THÈME II : PRODUCTION D'EAU MINÉRALE

1 - Architecture de l'ouvrage Choussy-Pérrière	28
2 - Etat des captages à la fin du XIX ^e siècle	30
3 - Carte géologique et vue perspective des environs de l'ouvrage	31
4 - Différents aquifères présents	32
5 - Images de l'intérieur du tubage Choussy 2, prises par caméras immergées	33
6 - Visite de la galerie à - 24 mètres	34
7 - (a) Architecture de l'ouvrage de captage Choussy-Perrière avant travaux, partie supérieure	35
7 - (b) Architecture de l'ouvrage de captage Choussy-Perrière avant travaux, partie inférieure	36
8 - Equipements des têtes de puits pour travaux et technique d'air lift	37
9 - Parement de brique dégagé par air-lift au fond du forage Choussy 2	38
10 - Système d'accrochage des anciens tubes	38
11 - Etat du pied du tubage ancien	38
12 - Trépan et soupape	39
13 - Implantation du nouveau tubage	40
14 - Installations à la surface du puits Perrière	41
15 - Nouvel équipement du puits Perrière	42
16 - Cimentation des annulaires	43
17 - Injection de béton et de pouzzolane dans les puits	45
18 - (a) Coupe de l'ouvrage de captage Choussy-Perrière après travaux, partie supérieure	46
18 - (b) Coupe de l'ouvrage de captage Choussy-Perrière après travaux, partie inférieure	47
19 - Plan et situation de la galerie à - 24 mètres	48

THÈME III : DISTRIBUTION DE L'EAU GÉOTHERMALE RÉNOVATION DES CIRCUITS

1 - Schéma de principe des réseaux de production et de distribution des eaux géothermales	50
2 - Mesures de paramètres physico-chimiques en tête de puits Choussy 2	51
3 - Schéma de principe du réseau de production	52
4 - Echangeur de chaleur permettant d'élever la température de l'eau du réseau de production à 70°C durant deux heures. L'énergie calorifique est fournie par une centrale de production de vapeur	53
5 - Nourrice de distribution de l'eau géothermale vers les quatre réservoirs	53
6 - Plan de la Grotte des Fées, localisation des quatre réservoirs	54
7 - Façade avant du réservoir OC1	54
8 - Schéma de principe du réseau de distribution primaire	55
9 - Équipement de la salle NA1	56
10 - Échangeur de chaleur permettant l'élévation de la température de l'eau circulant dans les réseaux de distribution	56
11 - Schéma de principe des réseaux de distribution primaire	57
12 - Équipement des trois canalisations amenant l'eau géothermale vers les trois établissements : Grands Thermes, Résidence thermique et climatique (R.T.C.) et Choussy	58
13 - Galerie technique souterraine reliant la station de distribution primaire à l'établissement des Grands Thermes	58
14 - Nourrices NW dans la salle Arvernes 3 située dans les sous-sols de l'établissement des Grands Thermes	58
15 - Sous-sol des Grands Thermes, salle Arvernes 1	59
16 - Sous-sol des Grands Thermes, salle Arvernes 1. Équipements complémentaires	59
17 - Sous-sol des Grands Thermes, salle Arvernes 2. Équipements complémentaires : surpresseurs pour les douches au jet	60
18 - Sous-sol des Grands Thermes, 9ème rue. Équipements complémentaires pour les douches filiformes	60

THÈME IV : LES GAZ THERMAUX

1 - Famille radioactive naturelle de l'uranium 238	62
2 - Famille radioactive naturelle de l'uranium 235	62
3 - Famille radioactive du thorium 232	63
4 - Appareils de mesure du radon et ses descendants	64
5 - Exemple de calcul de l'équilibre calco-carbonique selon les équation de Legrand et Poirier.	66
6 - Cartographie du gaz carbonique dans le parc Fenestre	68
7 - Vallée de la Dordogne, rive droite	69
8 - Parc Fenestre	69

THÈME V : LES LÉGIONELLES

1 - <i>Legionella sp.</i>	72
2 - <i>Psychoda sp.</i> avec ses poils sur le corps et les ailes, la forme de ses ailes lancéolées et la disposition de ses nervures	74

THÈME VI : L'ALLERGIE

1 - Différents genres de fleurs dont le pollen est allergène	77
--	----

THÈME VII : LE PATRIMOINE GÉOTHERMAL DE LA GRÈCE

1 - Situation actuelle des environs des Thermopyles	80
2 - Morphologie des défilés des Thermopyles à l'époque de la célèbre bataille	80
3 - Schématisation des relations inter-plaques dans l'espace méditerranéen	81
4 - Canal d'exhaure d'une source aux Thermopyles	81
5 - Directions majeures de néotectonique cassante dans les environs des Thermopyles	82
6 - En rouge l'arc volcanique hellénique	83
7 - Île de Nisyros	83
8 - Île de Milos	84
9 - Île de Santorin	84
10 - Image satellite de la presqu'île de Méthana	84
11 - Carte géologique simplifiée de Méthana	85

INDEX DES TABLEAUX

THÈME I : L'ARSENIC À LA BOURBOULE

I	- Indications de l'arsénothérapie	3
II	- Dérivés utilisés en thérapeutique	4
III	- Souches homéopathiques	5
IV	- Dérivés arsenicaux type	9
V	- Teneurs en As dans divers tissus provenant d'animaux	11
VI	- Principaux minéraux d'arsenic signalés sur le territoire français	15
VII	- Les différents horizons d'un sol	

THÈME II : PRODUCTION D'EAU MINÉRALE

I	- Caractéristiques de différents puits de l'ouvrage de captage	27
---	--	----

THÈME III : DISTRIBUTION DE L'EAU GÉOTHERMALE RÉNOVATION DES CIRCUITS

I	- Volumes utiles	54
---	------------------	----

THÈME IV : LES GAZ THERMAUX

I	- Récapitulatif des appareils de mesure	63
II	- Mesures anciennes de radioactivité	64
III	- Activités volumiques radon, I.P.S.N. en 1982	64
IV	- Sous-sol, activités maximales et moyenne	64

THÈME V : LES LÉGIONELLES

I	- Rappel : composition de l'eau minérale de La Bourboule	73
---	--	----

AVANT - PROPOS

Le Thermalisme pris dans sa globalité souffre depuis plusieurs décennies. En rechercher la cause est une démarche difficile, tant il est vrai que ce sont des causes, dont les effets cumulés sont dévastateurs.

Ayant complété notre formation hospitalo-universitaire (1949) par un doctorat des Sciences de la Terre (1964), nous étions préparés à rejoindre le noyau de bi-appartenants comptant 5 hydrologues formés aux écoles de santé militaire de Lyon ou de Rochefort sur mer, plus tard séduits par les attraits de l'eau.

Le signataire est le seul survivant de cette phalange dont les membres ont eu accès à une carrière honorable.

En cette époque pourtant, le langage des Thermes était resté celui des XVIII^e et XIX^e siècles, l'évocation d'un passé antique étant une

référence suffisante pour attester de l'excellence.

Les choses auraient pu évoluer différemment si notre Collègue Maurice LAMARCHE avec qui nous avions conçu des projets pédagogiques riches d'avenir, n'avait été prématurément soustrait à l'amitié de son entourage par la maladie.

Un malheur est rarement seul à frapper une activité professionnelle ; la suppression de l'enseignement de l'Hydrologie appliquée à la Santé dans les Facultés de Médecine, bientôt suivies par les Facultés de Pharmacie, la précarité de la démarche des Géologues aventurés sur les terres de la Chimie ce qui ne s'invente pas, tous les ingrédients étaient réunis pour se diriger lentement vers un scénario-catastrophe tout en affichant une radieuse auto-satisfaction.

Depuis quarante années, fidèle à

notre doctrine, nous nous sommes tenus à l'écart des honneurs fugitifs. Nos collaborateurs bénévoles, nos chercheurs, jouissent de l'estime internationale dont le témoignage résulte des congrès d'Athènes (1999), et Marseille (2002).

Le Professeur K. SAUER, chevalier dans l'ordre national de la Légion d'honneur, Président du service géologique du Land de Bade-Würtemberg, le Professeur H. KREUTZBURG avaient tenté de transférer en Auvergne leur irremplaçable compétence dans le domaine des eaux minérales, basée sur une conception résolument moderne de l'hydrogéochimie. Ils ont été reçus fraîchement, mais nous demeurons profondément fidèle à l'enseignement qu'ils nous ont apporté.

Raymond Laugier

La Bourboule, mai 2003

DE L'AVENIR DU THERMALISME DE LA BOURBOULE

Parce qu'il est parfois nécessaire de faire un état des lieux sans concession, le sentiment ambiant à l'égard du thermalisme se caractérise par :

- une perpétuelle remise en cause de la thérapie thermique dans le contexte de la santé humaine ;
- un rôle médical contesté ;
- des évaluations cliniques remises en cause par manque de protocole reconnu ;
- une place marginale dans le schéma thérapeutique (enseignement insuffisant, prescription sans conviction des médecins...).

De ce constat de précarité, une nouvelle ère semble se dégager d'où un certain nombre d'acteurs thermaux ont répondu positivement à ces critiques en faisant le choix d'investir tant sur le plan humain que sur le plan économique. Plus récemment et dans ce cadre, la Convention Nationale Thermale du 12 décembre 2002 a fixé la feuille de route de ces prochaines années en demandant aux opérateurs d'intégrer le thermalisme dans un schéma de service médical rendu. La démarche à La Bourboule s'inscrit largement, depuis nombre d'années, dans l'amélioration de sa prestation, ainsi que le meilleur contrôle de sa ressource thermique.

En choisissant de mieux comprendre le produit "eau thermique" dans sa qualité intrinsèque mais aussi en tentant d'appréhender et maîtriser parfaitement les possibles interférences liées à son environnement, nous posons les conditions, certes insuffisantes au regard de ce qui nous est demandé, mais ô combien nécessaires, pour asseoir la fiabilité des évaluations cliniques à venir. Ce chemin semé d'embûches devrait nous permettre, à terme, d'assurer la crédibilité médicale de notre cure face aux exigences fortes des instances tutélaires et de répondre clairement à nos curistes sur les bienfaits avérés de leur cure.

In memoriam

Robert TIFFENEAU Hommage du Docteur Pierre DRUTEL

Evoquer la carrière du Docteur R. TIFFENEAU, c'est rappeler une époque encore récente, au cours de laquelle quelques têtes chercheuses ont réoxygéné la physiologie respiratoire. Le jeune Robert, fils du doyen de la Faculté de Médecine de Paris, naturellement appelé à s'initier à la pharmacologie, en devint le chef de travaux.

En 1940, mobilisé en qualité d'officier "Z", spécialisé dans la lutte contre les gaz de combat, il s'attacha à la question des aérosols : caractéristiques, actions pharmacodynamiques. Il conçut alors un appareil qui fut longtemps une référence. "Capacité pulmonaire utilisable à l'effort", "volume expiratoire maximum / seconde" sont des notions définies dès 1947. En 1951 seulement outre-atlantique, d'où vient habituellement la vérité. La "C.P.U.E." s'avéra être une épreuve reproductible, réalisable par les patients eux-mêmes, y compris les jeunes enfants, donc providentiellement adaptée aux soins dispensés dans un établissement thermal. L'œuvre de Robert TIFFENEAU a ouvert la voie aux études originales sur "la force motrice alvéolaire" et le "calibre bronchique", aux recherches menées à La Bourboule avec l'I.R.C.H.A. sur le calibrage

des aérosols. Robert TIFFENEAU démontra encore les rôles distincts mais néanmoins conjoints des réactions allergiques et de la réactivité histamino-cholinergique des effecteurs broncho-pulmonaires dans le déclenchement des crises d'asthme. Tel est le considérable apport des travaux de notre Maître aux connaissances humaines.

Novembre 1983

Pierre DRUTEL Hommage de Pierre MAGNIN, Recteur de l'Université

Mesdames, Messieurs,
Parce que Pierre DRUTEL et moi étions amis depuis plus de 50 ans, permettez-moi de m'incliner au nom de tous ses amis de France, Belgique, Beaujon, La Bourboule, Nancy - devant sa mémoire, votre douleur et votre chagrin. Nous fîmes connaissance quand il vint à Nancy soutenir et entraîner la toute jeune Ecole de Physiopathologie Respiratoire qui venait de naître en 1948. Il était alors "regardé" comme le Précurseur qui apportait avec connaissance, la maîtrise d'un nouveau mode exploratoire des poumons. "Le Tiffeneau et son rapport à la C.V." dont il avait démontré l'intérêt et la fiabilité par ses premiers travaux bourboulis, et sa thèse. Le Tiffeneau devenu "V.E.M.S." - Tandis que d'aucuns voulurent le perfectionner, reste - même aujourd'hui- la pierre angulaire de toute

exploration dynamique respiratoire. Toute sa vie de chercheur à l'Institut National d'Hygiène métamorphosé en INSERM, fut consacrée à approfondir et enrichir les connaissances qui firent de lui une figure de proue et une référence incontournable de l'aérosologie et des épreuves pharmacodynamiques conduites en exploration dynamique pulmonaire. Des centaines d'articles, des ouvrages, dont le plus important restera sans doute la collection de Biologie Appliquée d'Olivier, jalonnent cette vie de travail désintéressée. Quand survint la retraite, il ne se replia pas dans l'aigreur, pas plus qu'il ne s'abandonna à la pêche à la ligne qui était pourtant l'un de ses grands plaisirs. Il prit un nouveau départ, se consacra à La Bourboule pour qui il construisit une oeuvre de promotion et d'expérimentation à laquelle on devra sans doute la pérennisation de l'usage thérapeutique de son Eau Thermale. Pierre Drutel était de cette veine d'hommes qui n'ont d'autre souci que le travail fait et dont la seule ambition est l'aboutissement réussi du besoin de comprendre, l'accès à la joie de connaître.

Indifférent à toutes les manifestations de la vanité et de la puissance, il ignorait toutes les formes de prothèses de la réussite. Il arrêta sa pensée à l'essentiel et y appliquait son comportement.

3 Mars 2000

THÈME I

L'ARSENIC À LA BOURBOULE

PRESENTATION

L'arsenic est un élément dangereux que l'on peut néanmoins consommer sans trop de précaution, témoins les arsenicophages tyroliens, la supplémentation de la ration des animaux à fourrure et l'éternel moteur de l'humanité : son pouvoir aphrodisiaque.

Aussi, les officines ont-elles joué un rôle dans sa distribution, soit anhydre, soit sous la forme du redoutable iodure.

Pour cette seule raison, lorsque l'analyse exprime la quantité d'arsenic véhiculée par une source, minérale dans le cas présent, la référence a été longtemps celle de l'anhydride arsénieux.

Cette espèce arsenicale a peu à voir avec les formes minérales naturelles ; l'arsenic natif est rigoureusement insoluble.

Le Thermalisme a toujours souffert, sans jamais désirer y remédier, de la façon d'exprimer une partie de la charge minérale d'une eau par référence à des espèces qui n'existent pas dans la nature. À côté du cas de l'arsenic, citons les introuvables sulfures de calcium et de sodium, la silice, enfin.

LA TRADITION

Au cours des deux précédents siècles, les populations laborieuses de la région partageaient leurs activités entre les estives, et l'hiver consacré aux extractions minières : charbon, minéraux, métaux. Le tout en petites quantités.

La demande en arsenic étant forte, sa satisfaction passait par un processus de concentration obtenue par l'incendie organisé d'une galerie murée. La combustion cessait d'elle-même après épuisement de l'oxygène ambiant. L'anhydride arsénieux sublimé, condensé aux parois, était récupéré par râclage.

INVENTAIRE DES MINÉRAUX ARSENICAUX

DÉCOUVERTS DANS LE MASSIF CENTRAL FRANÇAIS

Référence : Christine Van den Berghe,
Doctorat d'exercice du diplôme d'Etat de Pharmacien,
Université Paris XI, Faculté de Pharmacie ; Juillet 1983

Outre la cartographie régionale des lieux où s'écoulent des sources minérales chargées à moins de 2 mg/l en arsenic, la démarche consiste à collecter **toutes** les formes cristallines décrites dans la littérature.

Ainsi, 360 minéraux sont-ils pris en compte et présentés selon un classement reposant sur :

- le gradient d'oxydation : arsénates, arsénites, arséniures ;
- présence ou absence d'oxygène dans la molécule ;
- présence de soufre ;
- anion accompagnant : CO_3^{--} , SO_4^{--} , Cl^- , PO_4^{---}
- association à un radionucléide.

Dans une optique différente mais complémentaire, un second clas-

sement repose sur l'analyse des formes complexes, polymétalliques notamment.

De cette approche, résultent des certitudes :

- le produit de solubilité (ne pas confondre avec la solubilité directe dans l'eau) des formes cristallines reconnues est faible ;
- géothermalité élevée et solubilité ne sont pas compatibles ;
- l'équilibre de l'eau minérale doit être calculé pour une profondeur de genèse de 140° C ;
- dans ces conditions, le potentiel redox est situé au plus bas sur l'échelle des mesures ;
- l'éventail des ions reconnus par l'analyse implique la réunion à faible ou moyenne profondeur de circulations aquifères différentes ;

leur confusion correspond à la carte d'identité de l'eau jaillissante, considérée pour être monogénique, ce qui satisfait pleinement aux exigences traditionnelles même si ces dernières ont perdu toute réalité par référence aux lois des équilibres des solutions aqueuses soumises aux conditions thermodynamiques des grandes profondeurs.

1 - INTRODUCTION

L'eau de La Bourboule se distingue par sa forte teneur en arsenic : 6,8 mg/l. Utilisée à des fins curatives depuis plusieurs siècles, elle est aujourd'hui principalement employée dans le traitement des affections cutanées et respiratoires. L'arsenic hydrothermal est

supposé responsable de ses propriétés thérapeutiques, en dehors de toute argumentation scientifique.

L'inexistence de signe toxique consécutif au traitement, garantit la parfaite innocuité de la cure. Cependant, le caractère arsenical de l'eau thermale est un facteur psychologique limitant au développement et à l'extension des activités de la station.

Aux difficultés liées à l'arsenic s'ajoutent les problèmes de réactualisation que connaît le thermalisme depuis quelques décennies. L'empirisme sur lequel est fondée l'exploitation d'une eau thermale est désormais insuffisant pour assurer une réelle crédibilité tant auprès des malades que des praticiens.

Pour revendiquer une efficacité

de recherches que la station de La Bourboule s'est attachée à mener depuis plusieurs années. Différentes équipes collaborent dans cette voie, effectuant des travaux dans de nombreux domaines : Pharmacologie, Immunologie, Physio-pathologie respiratoire, Epidémiologie, etc... Dans la première partie de ce mémoire, nous nous sommes particulièrement attachés à réunir des informations en faveur de l'emploi des dérivés arsenicaux en thérapeutique. Nous avons également rassemblé un certain nombre de données générales sur l'arsenic et ses dérivés (répartition naturelle, métabolisme, toxicité, etc...).

Le devenir de l'arsenic hydrothermal après son introduction dans l'organisme étant imprécis, nous avons

2 - L'ARSENIC DONNÉES GÉNÉRALES

2.1 - Répartition naturelle

L'arsenic est largement répandu dans tous les milieux : air, eau, sols (Fig. n° 1). L'émission se réalise à partir de sources naturelles ou artificielles : volcanisme à 90%, feux de forêts et de prairies, émergences géothermales, industries métallurgiques, combustion du charbon et du fuel, usage de pesticides.

L'écorce terrestre contiendrait entre 2 et 5 mg/kg, conférant à l'arsenic le vingtième rang dans l'ordre d'abondance des éléments de la croûte. Il entre dans la composition de nombreuses roches à l'état de traces (blende, pyrites, galène) ou comme élément

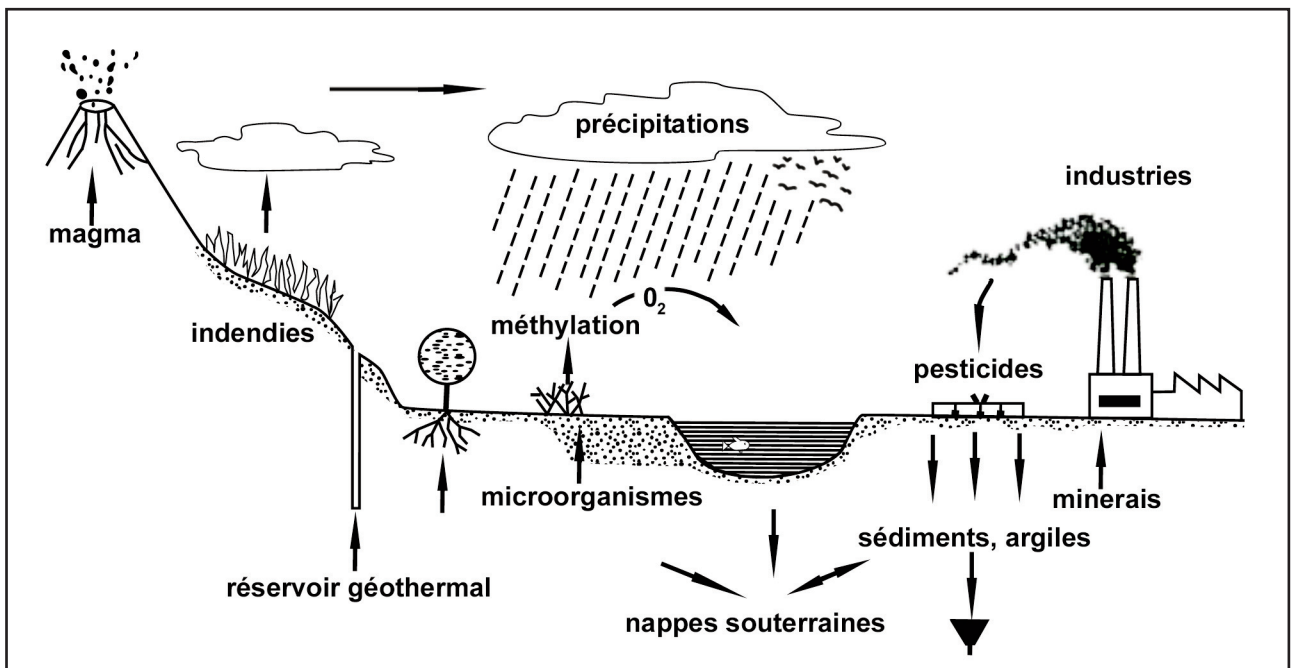


Figure 1 : Cycle de l'arsenic dans l'environnement (Levesque, 1984)

thérapeutique, l'eau thermale doit répondre à plusieurs critères :

- * maîtrise des conditions de genèse de l'aquifère ;
- * connaissance des paramètres physico-chimiques de l'eau thermale ;
- * constance de qualité du produit, de l'extraction à la distribution ;
- * démonstration d'une activité thérapeutique.

De ces objectifs découle la nécessité de mettre en place une straté-

tégie de mettre au point une nouvelle méthode de dosage.

La technique employée est une **microsonde à impact laser couplée à un spectromètre de masse**. Cette méthodologie n'a jamais été utilisée pour doser l'arsenic. Comparativement aux méthodes classiques, elle présente l'intérêt de pouvoir détecter les éléments présents à l'état de traces, localement à l'échelle cellulaire, voire subcellulaire.

constitutif.

L'arsenic natif est rare. A l'état naturel, il existe le plus souvent sous forme de sulfures, auxquels s'ajoutent des oxydes et de très nombreux arsénates métalliques.

Obtenu par grillage sous forme d'anhydride arsénieux, c'est aussi un sous-produit de l'industrie métallurgique (plomb, cuivre, zinc et or). La production mondiale, constituée presque exclusivement d'anhydride arsénieux, atteint plusieurs milliers de tonnes par an (55 000 à 60 000 T en 1976 – rap-

port CEE) (Levesque, 1984).

Les dérivés arsenicaux sont très largement utilisés dans différents secteurs économiques : fabrication d'alliages (plomb, cuivre, laiton), pigments, verrerie, produits phytosanitaires (pesticides, traitement du bois, dessiccation du coton), etc...

La fabrication de médicaments à base d'arsenic, actuellement réduite, ne représente que 5 % de la consommation.

Dans les eaux naturelles, l'arsenic se rencontre le plus souvent à l'état de traces. Les teneurs varient entre 0,01 et 0,08 mg/l. De fortes concentrations s'observent dans certaines régions en raison d'un enrichissement lié à une contamination accidentelle ou au contexte hydrogéologique. Le taux maximal admissible pour les réseaux de distribution est fixé habituellement à 0,05 mg/l.

En Europe, la majorité des eaux géothermales contient moins de 2 mg/l. Dans certains cas, le caractère arsenical est plus marqué.

Les minéraux responsables de la forte teneur des eaux arsenicales ne sont pas toujours identifiés. L'inventaire des dérivés minéralogiques de l'arsenic a révélé l'existence de plus de 250 espèces naturelles, dont les produits de solubilité sont généralement inconnus (Van den Bergh, 1983).

Les informations relatives à la géochimie de l'arsenic sont rares, peu de travaux ayant été effectués sur ce thème.

Dans les eaux naturelles, l'arsenic existe sous différentes formes, selon les conditions de pH et potentiel d'oxydo-réduction. Les mécanismes qui régulent sa concentration sont liés à l'état d'oxydation du milieu. Certaines espèces électro-actives, fer et sulfures, interviennent également.

2.2 – Métabolisme

La pénétration dans l'organisme s'effectue par différentes voies : digestive, respiratoire ou cutanée. Les quantités absorbées dépendent de la nature du produit et des conditions d'administration. L'absorption au niveau du tractus gastro-intestinal est très élevée, supérieure à 80 % pour la majorité des dérivés. Le passage à travers les barrières cutanée et respiratoire est également possible, mais peu de données quantitatives sont disponibles.

Les populations sont soumises à un taux d'exposition variable en fonction de leur situation géographique, activités professionnelles ou habitudes alimentaires. Des ouvrages anciens rapportent plusieurs cas d'arsenicophagie dans les régions du Tyrol, Styrie et Alpes autrichiennes. Les arseni-

cophages consomment de l'arsenic quotidiennement, lui accordant plusieurs vertus : force, vigueur, facilité de l'effort de la respiration en montagne. Les quantités absorbées sous forme d'anhydride arsénieux ou d'orpiment, sont importantes, jusqu'à 0,5 g d'As.

Ces coutumes ne sont pas sans danger puisque des accidents de surdosage ont été décrits.

De nos jours, l'arsenicophagie semble tombée en désuétude. Cependant, les quantités d'arsenic apportées par l'alimentation ne sont pas négligeables. La plupart des aliments en contiennent moins de 1 mg/kg (As). Certains produits, poissons, crustacés notamment, sont particulièrement riches en arsenic, en raison d'une accumulation dans les chaînes trophiques ([As] > 100 mg/kg).

D'une manière générale, les apports alimentaires sont compris entre 0,005 et 0,080 mg (As) par jour, les valeurs extrêmes allant jusqu'à plusieurs milligrammes.

L'absorption peut également se réaliser par ingestion de boissons contaminées ou inhalation : usage de pesticides dans les vignobles, contamination de nappes aquifères, résidus de pesticides dans le tabac, pollution atmosphérique. Après son introduction dans l'organisme, l'arsenic est véhiculé par le sang vers différents

Allopathie Dérivés minéraux (Usage abandonné) Dérivés organiques Aliphatiques Aromatiques	Asthénies physiques et psychiques, anorexie, anémies, cachexies (paludisme, tuberculose, diabète, leucémie myeloïde chronique, cancer) Dermatoses : eczéma, psoriasis, lupus érythémateux, dermatite herpétiforme, lichen plan, impétigo, etc Affections respiratoires, asthme, emphysème, bronchite chronique Arthritisme
	Idem à dérivés minéraux Syphilis (usage abandonné) Parasitoses, trypanosomiase, amibiase, trichuriase, trichomonase, paludisme, filariose. Trichocéphalose Maladies infectieuses angines de Vincent, stomatites, gingivites
	Homéopathie <i>A. album et iodatum</i> Fatigues physique et mentale, anémies, fièvres, névralgies Dermatoses prurigineuses: eczéma, psoriasis, urticaire Affections respiratoires : asthme, emphysème, bronchite chronique, pneumopathies, leucémie, cancers, gastro-entérites aiguës, néphrites
Crénothérapie	Goutte, diabète, obésité, paludisme, leucémie, lymphatisme Anémies Dermatoses: eczéma, psoriasis, lupus érythémateux, prurit, etc... Affections respiratoires: asthme, bronchites, sphère ORL Rhumatisme, gynécologie, troubles du métabolisme thyroïdien

Tableau I - Indications de l'arsénothérapie

organes. Chez le rat, il se fixe électivement sur l'hémoglobine, à l'intérieur des hématies. Par contre, chez les autres espèces, l'arsenic, réparti dans l'ensemble des tissus, se concentre plus particulièrement dans certains organes : foie, reins, rate, poumons et peau. Les autres tissus en contiennent de faibles quantités.

Chez l'homme, le contenu global de l'organisme, considéré comme normal, varie entre 1 et 21 mg, selon les données bibliographiques.

Dans le corps, les dérivés organiques sont éliminés tels quels, à l'inverse des produits inorganiques qui subissent des transformations partielles.

L'oxydation d'arsénites en arséniates a été démontrée *in vivo* chez l'homme et l'animal.

Ce phénomène serait une voie de détoxification, les dérivés pentavalents étant moins toxiques. La réaction inverse (réduction des arsénates en arsénites) a également été observée, chez l'animal uniquement.

La méthylation, second processus de métabolisation dont le siège est vraisemblablement hépatique a été démontrée *in vitro* et *in vivo*, chez l'homme et l'animal.

Qu'il s'agisse des dérivés tri- ou pentavalents, les métabolites sont

identiques : acide diméthylarsénique $(\text{CH}_3)_2\text{AsO}(\text{OH})$, et forme monométhylée $(\text{CH}_3)_2\text{AsO}(\text{OH})_2$. Le taux de méthylation avoisine respectivement 50 % et 14 % de l'arsenic absorbé.

L'excrétion se réalise presque exclusivement par voie urinaire. Une quantité négligeable est éliminée dans les fèces, la sueur et les phanères. Des différences importantes s'observent en fonction des conditions d'administration, du dérivé arsenical et de l'espèce animale. Les taux d'excrétion sont très variables : 50 à 90 % dans les urines, 1 à 10 % dans les matières fécales, avec des extrêmes atteignant 50 %.

En raison de l'existence *in vivo* de diverses formes (minérale, organique, métabolites), le dosage de l'arsenic en milieu biologique a pendant longtemps soulevé de nombreuses difficultés techniques. L'activité et la toxicité étant très variables d'un dérivé à l'autre, la mise au point de méthodes de dosage spécifique est apparue indispensable. Depuis une dizaine d'années, de nombreux travaux ont été effectués dans cette voie. Les progrès réalisés permettent actuellement de doser sélectivement les espèces arsenicales.

2.3 – Arsénothérapie

L'emploi de la médication arsenicale remonte à l'Antiquité. Les Anciens connaissaient déjà les vertus thérapeutiques des sulfures : réalgar et orpiment. Les Grecs utilisaient les scories de fonderies des ateliers de bronzier dans le traitement d'affections cutanées et ophtalmiques. Tour à tour délaissée puis réhabilitée, l'arsénothérapie a connu un large développement au XIXe siècle. Les indications rapportées par les ouvrages anciens sont très nombreuses, mais leur diversification n'est qu'apparente, la plupart étant communes aux différentes thérapeutiques.

◇ Allopathie

En allopathie, les composés minéraux ont été les premiers employés pour leurs propriétés toniques, érythro-poïétiques, topiques, bactéricides et antiparasitaires. Les formes organiques sont apparues plus récemment, avec la découverte de l'acide arsanilique en début de siècle (Erlach, 1907). Les résultats prometteurs ont conduit à la synthèse de dérivés aromatiques, qui ont été pendant plus de 50 ans, les seuls agents efficaces contre la syphilis, certaines parasitoses,

MINÉRAUX	Anhydride arsénieux Arséniate de fer Arséniate de sodium Arséniate de potassium Triiodure d'arsenic
ORGANIQUES Aliphatiques	Diméthylarsinate de sodium (cacodylate) Méthylarsinate de sodium (Arrhénal)
Aromatiques, dérivés de : - arsénoxyde - arsénobenzène - acide phénylarsinique - acide triazine arsinique - mercapto-arséniés	Oxyphénarsine, Dichlorophénarsine Arsphénamine, Thioarsphénamine, Néoarsphénamine Acétarsol, acétarsolate de quinine, éthanolamine d'acétarsol Carbasone Difétarsone Tryparsamide Médecine vétérinaire : Acide arsalanique, Roxarsone Mélarsen, Mélarsopros (Mel B), mélarsonyl potassique Arsthinol Médecine vétérinaire : Thiacétarsamide (Arsénamide)

Tableau II - Dérivés utilisés en thérapeutique

trypanosomiasés et amibiases. Trois produits étaient encore inscrits à l'*index nominum* de 1987 et prescrits de façon usuelle à ce moment lorsque le choix d'une autre thérapeutique était impossible :

- * Acétarsol : trichomonoses, trichocéphalose, vaginites à streptocoques, affections ORL, hygiène dentaire ;
- * Difétarsone : amibiases, trichuriasés, trichocéphalose (Keystone et al., 1983 ; Alvarez et al., 1976 ; Boyce et al., 1974 ; Kidney, 1974) ;
- * Mélarsoprol : seul agent efficace dans le traitement de la forme nerveuse de la trypanosomiasé (Buyst, 1975 ; Dumas et al., 1983 ; Eyckmans & Wéry, 1987).

L'arsénothérapie allopathique est actuellement abandonnée, en raison du danger de son utilisation et de la découverte des antibiotiques.

◇ Usage vétérinaire

Certains dérivés arsenicaux sont également prescrits comme stimulant de croissance, dans les batteries d'élevage ou encore comme antiparasitaires, bactéricides : acide arsanilique, thiactarmide sodique et roxarsone, particulièrement efficace contre la coccidiose du poulet (Edgar & Flanagan, 1979 ; Schildknecht et al., 1980).

Son caractère "essentiel" a été mis en évidence chez plusieurs espèces : rat, poulet, porc, chèvre. La carence arsenicale se traduit par différents symptômes (Nielson et al., 1975 ; Anke et al., 1976 ; Uthus et al., 1983) :

- * troubles de croissance et de reproduction
- * anomalies des phanères,
- * altération des hématies,
- * modification de l'hématocrite,
- * augmentation des teneurs tissulaires en cuivre, fer et manganèse.

L'arsenic serait indispensable au développement de certaines espèces animales. De ce fait, l'acide arsanilique et la roxarsone, sont

DENOMINATION	PRODUITS	TABLEAU
<i>A. acidum</i>	Acide arsénique	A
<i>album</i>	Anhydride arsénieux	A
<i>bromatum</i>	Bromure	
<i>citrinum</i>	Sulfure jaune	A
<i>hydrogenisatum</i>	Arsine	
<i>iodatum</i>	Triodure	A
<i>metallicum</i>	Arsenic métallique	A
<i>rubrum</i>	Sulfure rouge	A
<i>tibiatum</i>	Arsénite d'antimoine	A

Tableau III -Souches homéopathiques

employés comme additifs alimentaires, dans les batteries d'élevage de porcs et de volailles (0,5 £ DMA £ 1 mg/kg ; source : Food and Drug Administration).

◇ L'homéopathie

Contrairement à l'allopathie, l'homéopathie arsenicale est aujourd'hui largement utilisée (Quentin, 1973 ; Binet, 1979 ; Bouhana, 1981 ; Guernonprez, 1985 ; Basile, 1986). L'arsenic fut l'un des premiers remèdes expérimentés par Hahnemann, au début du XIX^e siècle. Plusieurs souches homéopathiques sont utilisées actuellement, *Arsenicum iodatum* et *A. album* étant particulièrement prescrites (Tab. N° III). Les indications majeures d'*A. album* sont les états d'épuisement physique et psychique, et l'agression cellulaire (histamine, toxines microbiennes, déchets métaboliques).

◇ Crénothérapie arsenicale

Quant à la crénothérapie arsenicale, elle connaît, à l'image de l'allopathie, des difficultés depuis les vingt dernières années. Autrefois, la présence d'arsenic dans la solution minérale donnait lieu à la revendication d'un caractère thérapeutique spécifique. Cet élément était considéré comme le principal agent médicamenteux, en dehors de toute argumentation scientifique.

Actuellement, l'appellation "eau arsenicale" est désuète. Certaines sources ne sont plus exploitées. C'est le cas à Bad Dürkheim (RFA) et à Roncegno (Italie). Il est difficile d'obtenir des informations sur les stations demeurant en activité. A Levico-

Vetriolo (Italie), une étude récente mentionne l'emploi d'une eau fortement arsenicale ([As] : 15,3 mg/l), employée diluée en balnéo et fangothérapie (Rastelli et al., 1985). En URSS, certaines sources arsenicales sont utilisées en thérapeutique, notamment dans le traitement de l'ischémie cardiovasculaire (Shliakhov, 1986) et des affections cutanées, à Zubioiskoiispa en Géorgie (Razenkova, 1971).

2.4 – Toxicologie

L'usage criminel de l'arsenic remonte aux temps les plus anciens. "Arsenic" provient étymologiquement de la réunion de deux termes grecs, signifiant "mâle" et "tuer, vaincre". Les hébreux utilisaient différents poisons, dont l'arsenic sous le nom de "Sam". Les Grecs l'employaient pour les exécutions capitales. Les romains furent les premiers à obtenir l'anhydride arsénieux "arsenic blanc" par grillage des sulfures, réalgar et orpiment, alors très utilisés pour leurs propriétés épilatoires et caustiques. L'emploi de l'arsenic à des fins criminelles est largement répandu, notamment à partir du XV^e siècle. L'histoire fournit une littérature abondante concernant des intoxications criminelles, professionnelles ou accidentelles. Il est associé à de nombreuses affaires : famille Borgia, "Toffana", marquise de Brinvilliers, Marie Besnard. Il y eut en France, cent dix empoisonnements de 1835 à 1840 (Bouhana, 1981). Plusieurs intoxications collectives ont également été rapportées, notamment au XIX^e siècle.

De nos jours, l'intoxication arsenicale survient le plus souvent à l'occasion d'une exposition professionnelle ou accidentelle : ingestion de dérivés arsenicaux, contamination d'aliments, pollution des nappes aquifères. Elle est plus rarement d'origine criminelle ou thérapeutique, à la suite d'un traitement médicamenteux prolongé.

L'arsine, hydrure gazeux, est le plus dangereux, mais les risques encourus sont réduits. D'une manière générale, pour l'homme comme pour les autres espèces, une plus forte toxicité est attribuée aux dérivés minéraux, comparativement aux organiques, les trivalents étant plus dangereux que les pentavalents.

L'expression clinique de l'intoxication est liée aux perturbations cellulaires induites, inhibitions enzymatiques, modifications métaboliques.

L'intoxication arsenicale s'exprime par une symptomatologie polymorphe, traduisant la variabilité du métabolisme des dérivés arsenicaux. L'intensité et l'expression des signes cliniques diffèrent suivant la dose absorbée et la durée de l'exposition. La toxicité des dérivés arsenicaux est ainsi déterminée par plusieurs paramètres :

- ◇ espèce animale ;
- ◇ susceptibilité individuelle ;
- ◇ conditions d'administration : voie, dose, durée et répétition de l'intoxication.

A plus long terme, les dérivés arsenicaux possèdent des effets cancérogènes. Un grand nombre d'enquêtes épidémiologiques ont révélé une association entre l'apparition de tumeurs et l'arsénicisme, dans différentes circonstances : exposition professionnelle, ingestion d'eau polluée, traitements médicamenteux.

2.5 – Modes d'action toxique

Inhibitions enzymatiques

- ◇ ATP-ase par les arsénates ;
- ◇ pyruvate déshydrogénase par les arsénates (Schiller, 1977) ;
- ◇ ALA synthétase et hème-synthétase hépatique par les arsénates (Woods & Fowler, 1977 & 1978) ;

- ◇ DNA et RNA polymérase, *in vitro* (Petres, 1977) ;
- ◇ adénylcyclase.

Modifications métaboliques

- ◇ Acides nucléiques
 - * Inhibition *in vitro* de l'incorporation des nucléotides dans les DNA, RNA (Petres, 1977) ;
 - * diminution de celle des triphosphates dans les acides nucléiques, observée dans les lymphocytes humains en présence d'arsénates (Baron et al., 1975) ;
 - * diminution de la répllication du DNA par les arsénites (Rossman, 1977).

2.6 – Symptomatologie de l'intoxication

a) Aiguë

- ◇ Gastro-entérite accompagnée de vomissements, diarrhée, douleurs abdominales. Anémie hémolytique légère, troubles de l'hémostase. Troubles cardiovasculaires (hypotension, syncopes, fibrillation ventriculaire, insuffisance circulatoire) ;
- ◇ atteinte neurologique avec céphalées, crises convulsives, coma et modification de l'E.E.G., polynévrite périphérique ;
- ◇ signes cutanés (mélanoses).



Figure 2 - Mispickel ou arsénopyrite (FeAsS), système monoclinique ; échantillon provenant de la mine de San Antonio (Mexique)

- ◇ Protéines
 - * Modification de l'incorporation d'acides aminés par les arsénates (Woods & Fowler, 1977; Baron et al., 1975) ;
 - * déplétion en ATP.

◇ Cycle de KREBS

- * Déplétion en acide lipoïque ;
- * accumulation d'acéto-acides.

◇ Glucides

- * Perte de glycogène hépatique et augmentation du taux d'acide lactique *in vivo* induites par les arsénates (Minden & Rothe, 1968) ;

b) Chronique

- ◇ Irritation de la peau ou des muqueuses, érythème, ulcères, conjonctivite, stomatite, gingivite, rhinite, ulcération de la cloison nasale pouvant aller jusqu'à la perforation ;
- ◇ signes cutanés réactionnels : kératodermie palmoplantaire, verrues, désordre vasculaire périphérique "maladie des pieds noirs", mélanodermie, dyskératose (maladie de Bowen) ;
- ◇ polyneuropathie, atteinte neurologique : motrice (paralysie), sensitive (douleurs), centrale (céphalées, insomnies) ;



Figure 3 - Réalgar (As_4S_4), système monoclique ; échantillon provenant de la mine de Shimen (Hunan, Chine)

- ◇ désordres hématologiques (anémies), hépatiques et rénaux (ictère, cirrhose, albuminurie) ;
- ◇ anomalies de phanères (alopecies, stries de Mees).

A l'ensemble de ces remarques, s'oppose la forte toxicité des dérivés arsenicaux.

En résumé, l'examen des données bibliographiques a révélé de

nombreuses lacunes et controverses, tant sur le plan pharmacologique que toxicologique. Selon les circonstances, l'arsenic se comporte soit comme un oligo-élément aux propriétés curatives, voire anticancérogènes, soit comme un puissant toxique cancérogène et mutagène.

Compte tenu du bilan réalisé au cours de cette première partie, le caractère arsenical de l'eau de La Bourboule soulève un certain nombre de difficultés.

L'arsenic hydrothermal est susceptible de pénétrer dans l'organisme par le biais des pratiques thermales : bains, douches, buvettes, aérosols, humages, etc... Le traitement thermal implique donc un risque toxicologique potentiel, pouvant s'exprimer à plus ou moins long terme.

À La Bourboule, bien que des signes d'intolérance aient été parfois constatés au cours de la cure, l'innocuité du traitement thermal ne peut, semble-t-il, être remise en cause. Par contre, sur le plan pharmacologique, la participation de l'arsenic à l'efficacité thérapeutique du médicament thermal est possible.

2.7 – Conclusion

L'arsenic, habituellement présenté comme un redoutable toxique, est en réalité à l'origine d'une véritable thérapeutique. L'emploi curatif et préventif de ses dérivés, que ce soit en médecine humaine ou animale, remonte aux temps les plus anciens.

L'arsénothérapie allopathique s'est particulièrement développée au cours des XIX^e et XX^e siècles, avec l'apparition de la série organique. Aujourd'hui, elle n'est plus guère utilisée. Seuls sont encore employés quelques dérivés arsenicaux de faible toxicité, dans le cas où aucune autre alternative n'est envisageable. Les dérivés arsenicaux sont également prescrits en homéopathie et, plus secondairement, en crénothérapie.

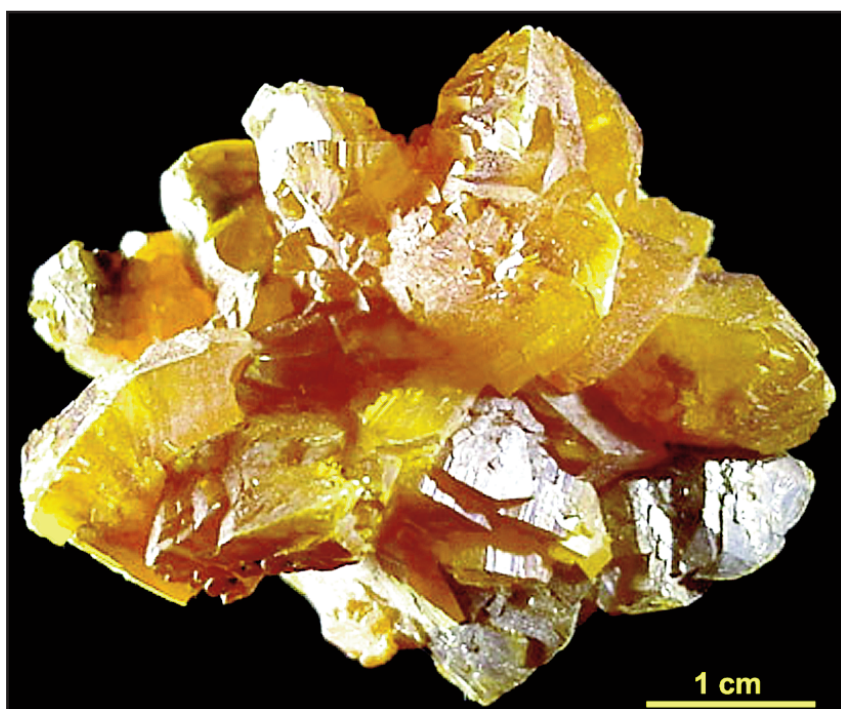


Figure 4 - Orpiment (As_2O_3), système monoclinique ; échantillon provenant de la mine de Twin Creeks (Nébraska, U.S.A.)

1983-1989

SUIVI DE L'ARSENIC DANS L'ORGANISME

Référence : Christine Van den Berghe
Titre : Arsenic et crénothérapie
Mémoire de doctorat de Sciences Pharmaceutiques
9 février 1989 – Université Paris-Sud

L'objectif est de suivre le transit de l'arsenic absorbé par voie buccale, soit dans la boisson, soit dans la poursuite d'un traitement thérapeutique reposant sur des doses prescrites. Le traçage de l'arsenic se poursuit dans les glandes digestives et aux émonctoires. La mise en oeuvre de ce travail résultant de la réunion des moyens d'analyse des Facultés de Médecine à Nancy et des Sciences à Metz, fait appel à la spectrométrie de masse couplée à une sonde nucléaire.

Le financement a été assumé par la Société des Eaux Minérales, complété par un contrat C.I.F.R.E.

1 - DETECTION DE L'ARSENIC EN MILIEU BIOLOGIQUE PAR MICROSONDE LAMMA

Parmi de multiples avantages, l'analyse par microsonde LAMMA 500 permet de détecter localement des éléments présents à l'état de traces, à partir de coupes tissulaires. L'arsenic a rarement fait l'objet d'investigations par microsonde. Les travaux mentionnés dans la littérature concernent l'analyse de produits d'origine géologique. Les données sur le métabolisme de l'arsenic étant insuffisantes, il nous a paru intéressant de mettre en oeuvre cette

technologie, afin de rechercher ses sites de fixation cellulaire, voire subcellulaire.

1.1 - Matériel et Méthode : l'appareillage est constitué de :

Un laser Nd-YAG de forte puissance. Utilisé pour sa capacité de délivrer une importante quantité d'énergie, en un temps très court, avec une faible résolution spatiale.

L'impulsion crée un microplasma au point d'impact. L'ionisation de la matière réalisée par réchauffement brutal donne naissance selon les conditions opératoires, à différentes structures : ions atomiques, ions et fragments moléculaires.

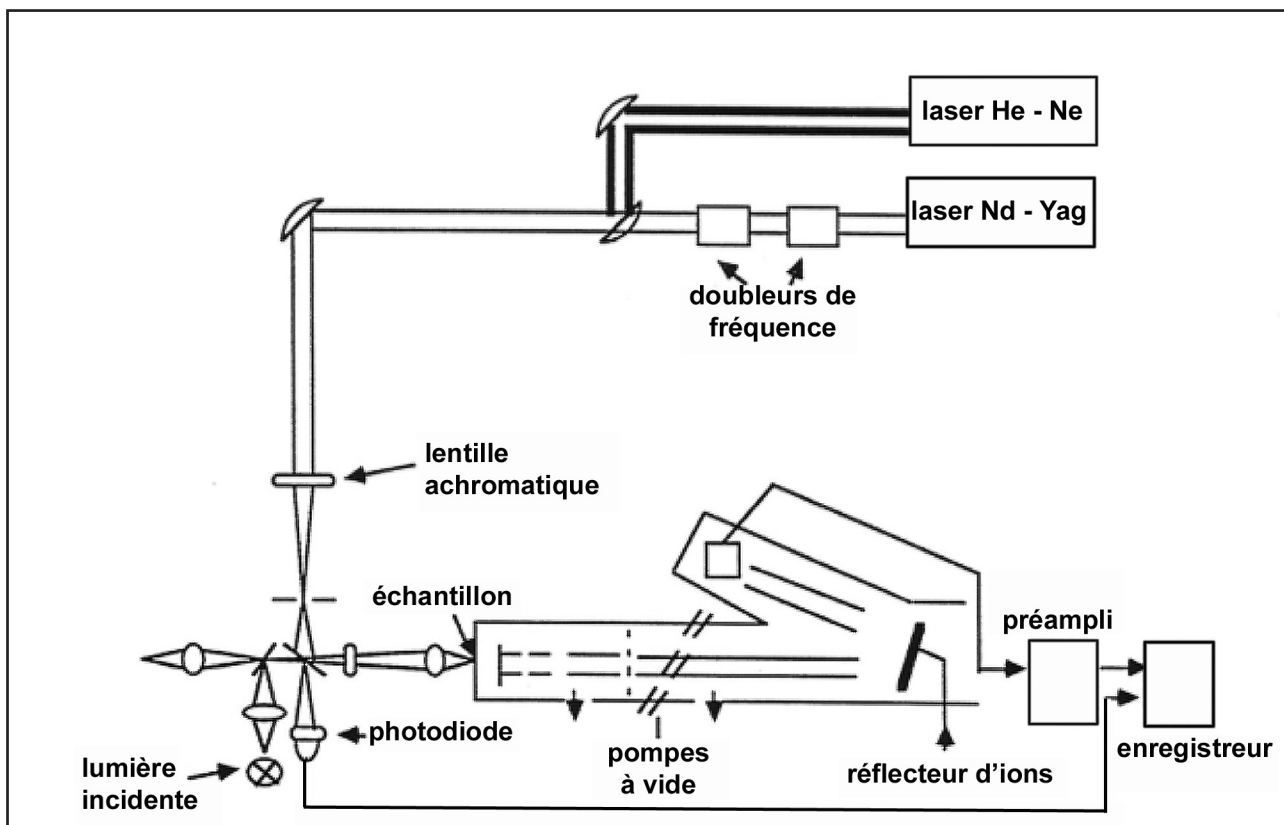


Figure 5 - Appareillage

Un second laser de type hélium-Néon. Employé comme laser pilote, il permet de visualiser l'impact au niveau de l'échantillon ou de le focaliser à l'endroit souhaité. L'échantillon est observé au moyen d'un microscope optique à haute résolution. L'échantillon, de faibles dimensions, est déposé sur une grille-support utilisée classiquement en microscopie électronique ($\Delta = 3 \text{ mm}$), introduite dans un porte-échantillon. L'ensemble s'insère dans l'appareillage. Les ions formés sont identifiés grâce à un spectromètre à temps de vol. L'analyse d'échantillons minéraux ou organiques par microsonde LAMMA fournit des informations quantitatives. La méthode possède les avantages suivants : rapidité

de mise en oeuvre, haute sensibilité et faible résolution spatiale. Les applications concernent de nombreuses disciplines (métallurgie, chimie, algologie, lichénologie, synthèse organique, géologie, etc...). Mise en évidence d'une corrélation entre la distribution de métaux et un état pathologique : plomb et artériosclérose (Schmidt & Zumkley, 1983) ; aluminium

chez les sujets dialysés (Kaduk et al., 1980 ; De Broe et al., 1984). Mise au point d'une méthode de détection du fluor dans le tissu dentaire, chez l'animal (Gabriel et al., 1981). **La mise au point d'une méthodologie visant à détecter l'arsenic par microsonde LAMMA en milieu biologique s'est révélée être un véritable défi technologique.**

Mineral-naturel	Arsénolite	As_2O_3	
	Réalgar	As_4S_4	
Anhydride	Arsénieux	As_2O_3	
	Arsénique	As_2O_5	
Organique	aliphatique	Acide cacodylique	$(\text{CH}_3)_2\text{AsOOH}$
		Cacodylate de sodium	$(\text{CH}_3)_2\text{AsOONa}$
	cyclique	Triphénylarsine	$(\text{C}_6\text{H}_5)_3\text{As}$

Tableau IV - Dérivés arsenicaux type

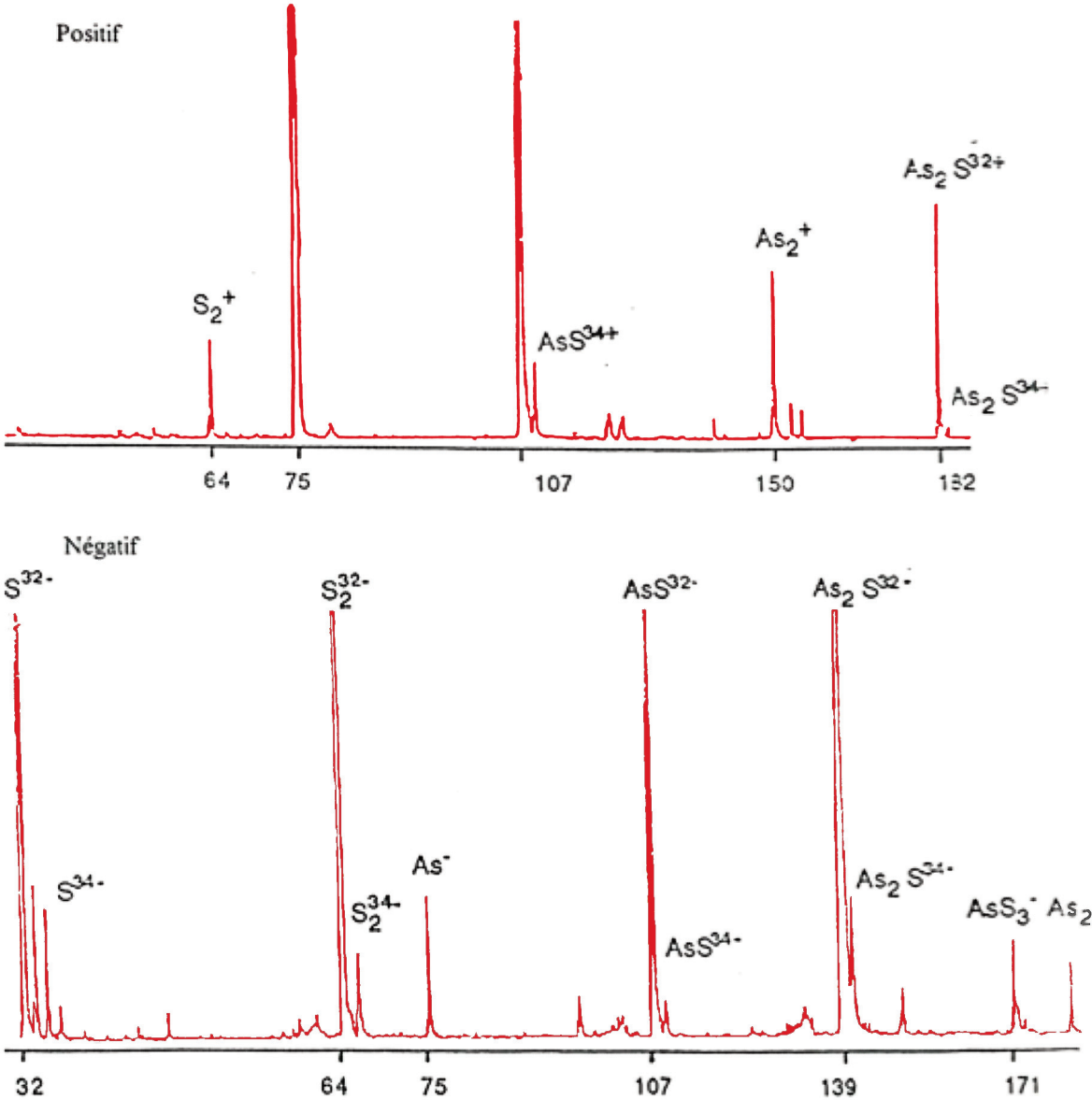


Figure 6 - Réalgar

Pour la mise au point de cet objectif, nous avons procédé à différents essais, dans le cadre d'une démarche analytique bien précise. La première étape a consisté à analyser des dérivés arsenicaux purs.

Positif

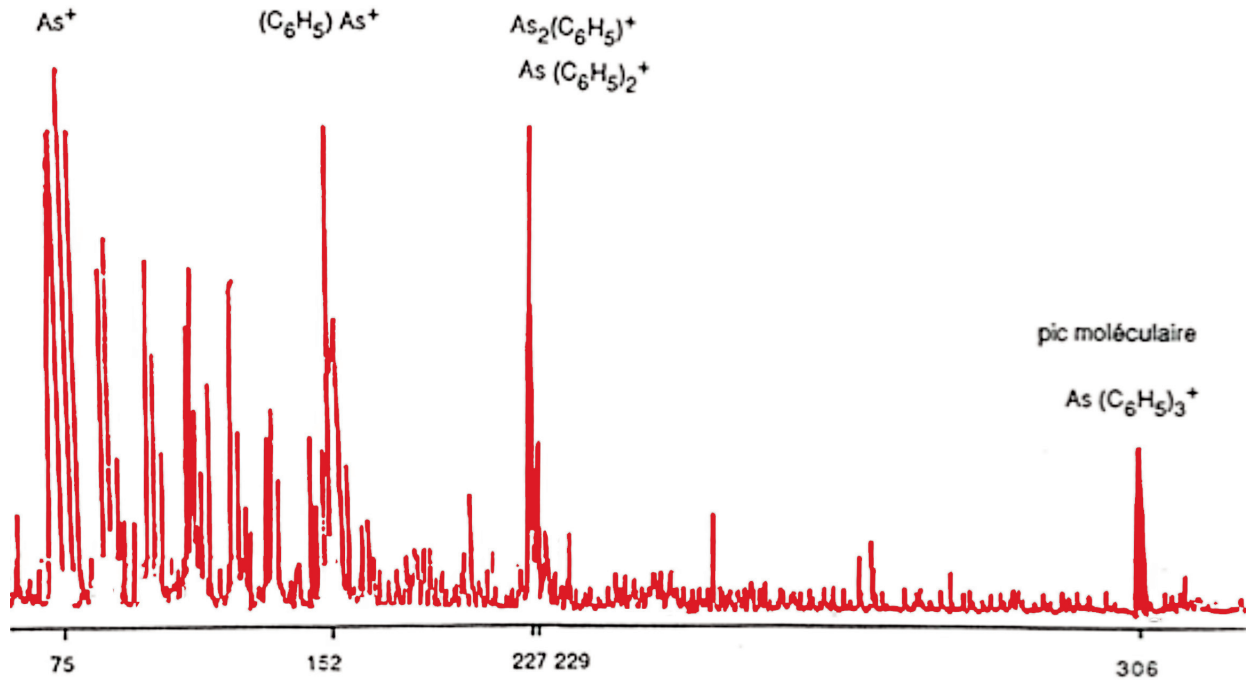


Figure 7 - Triphénylarsine

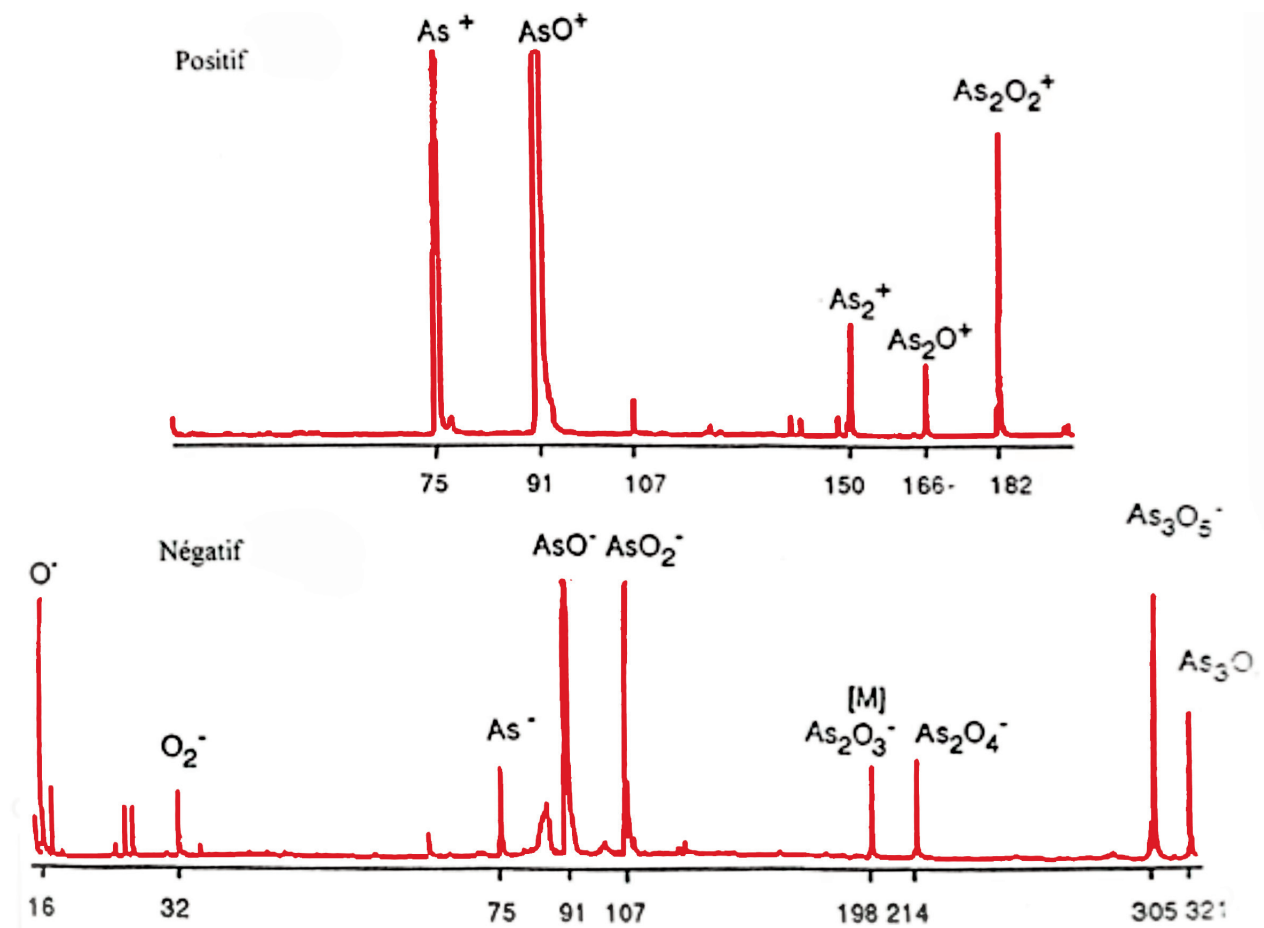


Figure 8 - Arsénolite

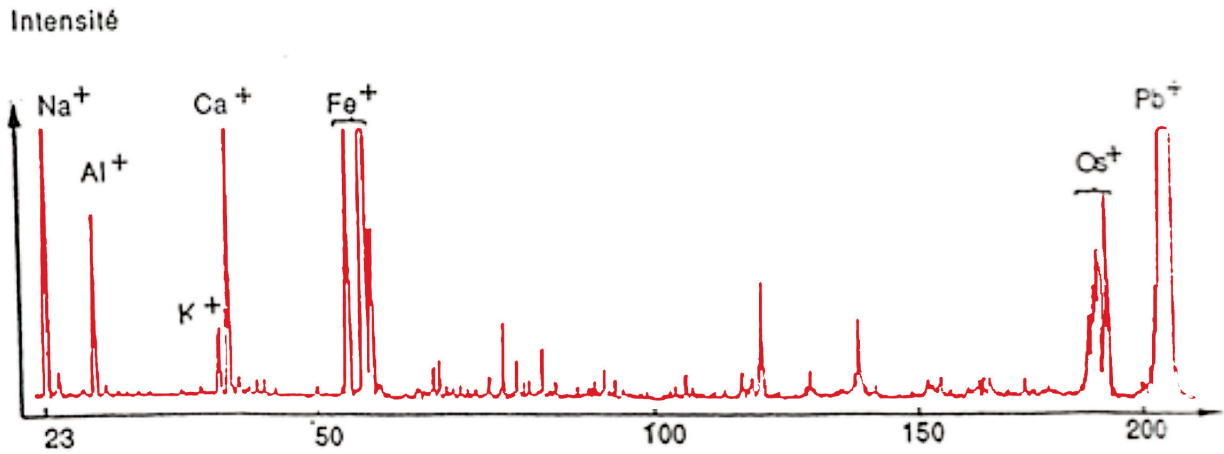


Figure 9 - Spectre LAMMA obtenu par analyse d'un lysosome de cellule hépatique, provenant d'un patient dialysé. Accumulation concomitante de l'aluminium et du fer (Verbueken et al., 1985)

1.3 – Analyse d'échantillons biologiques

La dernière phase de cette étude a consisté à analyser les prélèvements biologiques. L'inclusion en résines polymérisées étant incompatible avec la détection de l'arsenic par microsonde LAMMA, nous avons opté pour les techniques cryogéniques. Différentes séries d'analyses ont été pratiquées à partir de tissus provenant d'animaux entretenus à La Bourboule et en laboratoire. Pour chaque échantillon, la teneur en As a été déterminée par spectrométrie d'absorption atomique. La détection a été réalisée à partir de sang total (sans aucun prétraitement), lyophilisats et cryocoupes tissulaires (parenchyme hépatique et splénique). L'analyse des ions négatifs est à

LIEU	RACE	POIDS (g)	QUANTITE As RECUE PER OS (mg)	POIDS SEC (mg/kg)	POIDS SEC (mg/kg)
Laboratoire	Long Evans	300	0	Foie	0
	Long Evans	302	35	Foie	167
				Rate	583
	Long Evans	375	40	Sang	400
				Foie	109
La Bourboule				Rate	702
	Long Evans	534	0	Sang	6
	Long Evans	518	18	Foie	75
				Rate	490
				Sang	390

Tableau V - Teneurs en As dans divers tissus provenant d'animaux.

nouveau dépourvue d'intérêt. Par contre en positif, la détection est réalisée à plusieurs reprises : l'intensité du signal (As+ m/z = 75) est significativement supérieure pour des échantillons provenant d'animaux traités, comparative-

ment aux témoins. Des spectres illustrant ces résultats significatifs sont présentés. La qualité de l'analyse est étroitement liée à la nature de l'échantillon. L'intensité des réponses ne peut

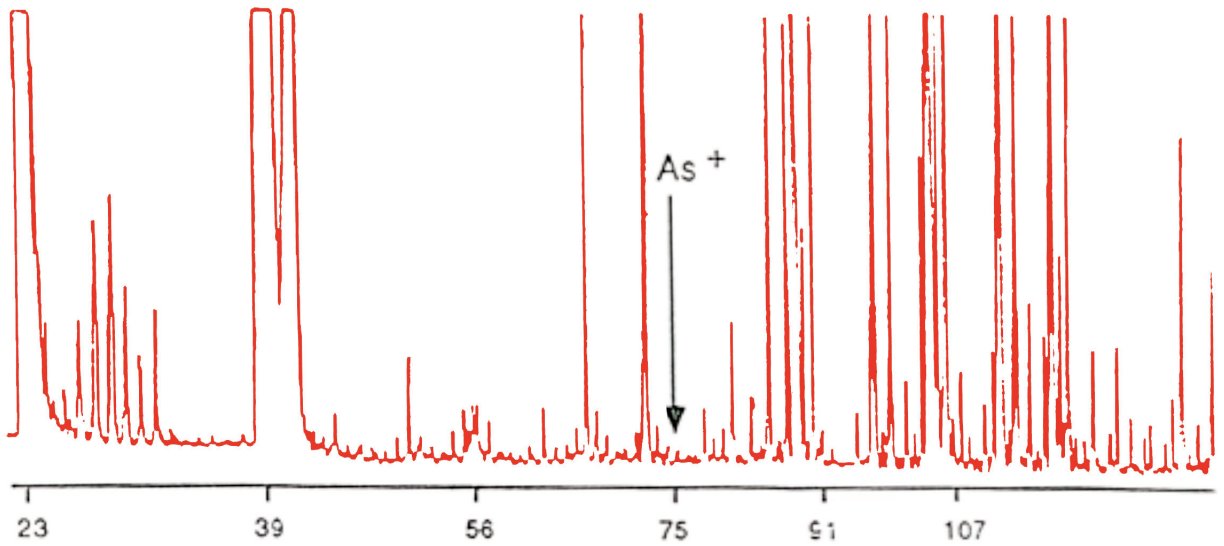


Figure 10 - Sang - témoin - [As] = 6 mg/kg

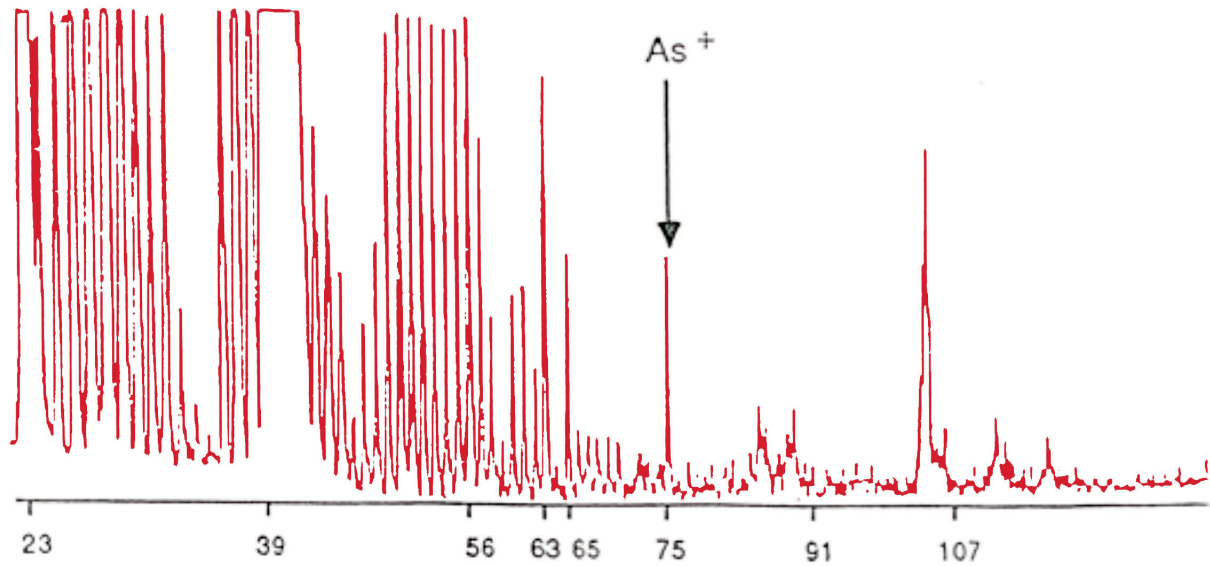


Figure 11 - Foie - traité - [As] = 390 mg/kg

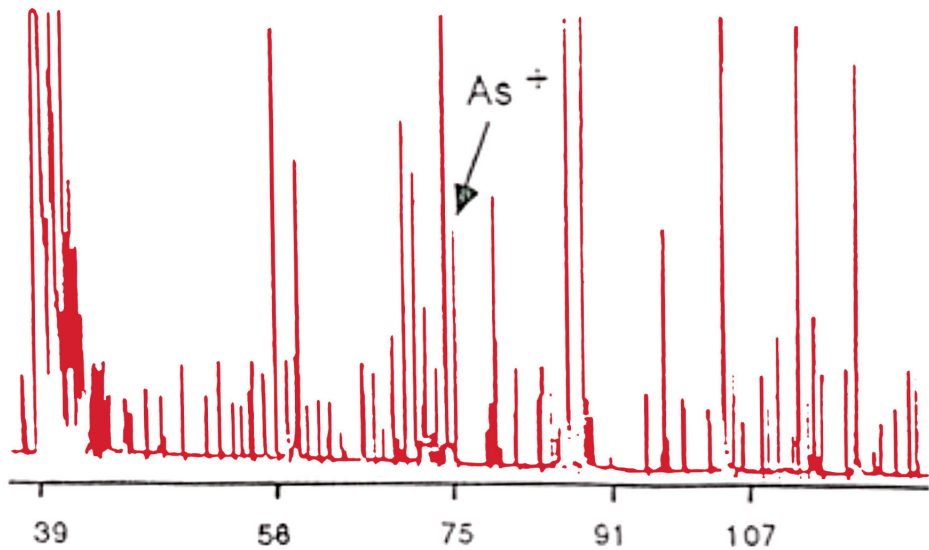


Figure 12 - Foie - témoin - [As] = 109 g/kg

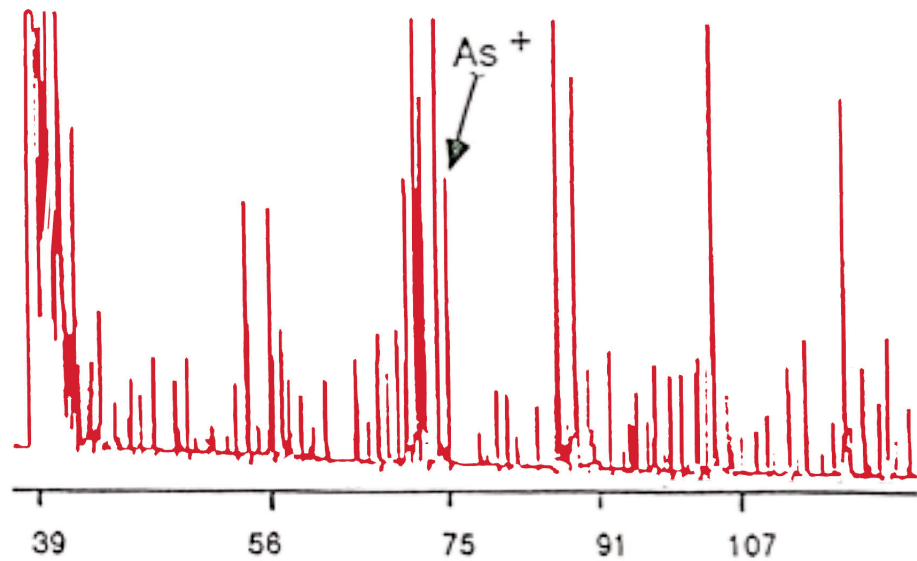


Figure 13 - Foie - traité - [As] = 109 mg/kg

être reliée de façon générale à la concentration en arsenic du prélèvement. Seuls sont comparables les résultats obtenus à partir d'échantillons de même origine, traités et analysés suivant des conditions opératoires strictement identiques.

Ce travail a été jalonné de nombreuses difficultés, levées une à une. Grâce à cela, nous sommes actuellement en mesure de formuler le protocole opératoire à suivre pour détecter l'arsenic en milieu biologique.

2 - CONCLUSION GENERALE

Nous avons tenté de réhabiliter l'arsenic, à travers l'analyse bibliographique. Cet élément de réputation légendaire, s'est révélé surprenant. L'arsenic est à l'origine d'une thérapeutique, qui, après avoir traversé les siècles, est récemment tombée en désuétude.

de. Le paradoxe s'accroît avec la démonstration expérimentale d'un intérêt nutritionnel, voire de propriétés anticancérogènes chez l'animal.

Actuellement, l'arsenic tend de plus en plus à être considéré comme un oligo-élément doué à la fois de propriétés curatives et d'une toxicité potentielle. Sur le plan analytique, les travaux que nous avons entrepris s'inscrivent dans l'évolution des méthodes de dosage spécifiques de l'arsenic.

Ce travail a fait l'objet d'une étroite collaboration entre les Universités de Metz, Nancy et Paris-Sud, selon une approche pluridisciplinaire. Nous avons pu travailler à la limite des performances techniques, tant en Biologie cellulaire qu'en Chimie laser. Le protocole de détection de l'arsenic en milieu biologique par microsonde LAMMA a ainsi été mis au point. Cependant, malgré les importants efforts consentis, la dernière étape, c'est-à-dire

la visualisation de sites de fixation, est techniquement irréalisable, sauf acquisition de nouveaux procédés.

L'ensemble des résultats témoigne de la multiplicité des facettes offertes par l'exploitation d'un produit naturel tel qu'une eau minérale et géothermale. Le concept de "thermalisme" globalise le problème en le défigurant.

La Société Thermale de La Bourboule, parfaitement consciente de cette situation, s'attache depuis de nombreuses années à privilégier les activités de Recherche. Malgré cela, la connaissance des eaux arsenicales reste encore trop sommaire. Poursuivre les travaux en direction d'une connaissance de plus en plus fine du produit thermal, est une obligation du présent comme de l'avenir. Elle s'impose : la cure est une prescription médicale, l'eau thermale est un médicament.

L'ARSENIC DANS L'ESPACE DE LA CHAÎNE HERCYNienne

Référence : Jean Barbier, Ingénieur Géologue E.N.S.G.,
Ingénieur au Bureau de Recherches Géologiques et Minières

Dans les travaux qu'il a publiés, l'auteur procède à un quadrillage systématique de la bande affleurante des terrains primaires qui constituent la branche ascendante du "V" varisque. Après avoir couvert le Massif Central, il prolonge ses observations dans les massifs schisteux rhénans, puis gagne l'Allemagne centrale et orientale.

Une anomalie positive arsenicale s'exprime à l'échelle de l'Europe. Nous saluons cette vision synthétique "arsenic", jusqu'ici confinée au binôme La Bourboule – Le Mont-Dore, ou encore au triangle infernal La Bourboule – Bad Dürkheim – Levico Vetriolo.

RESUMÉ

L'arsenic est un des éléments mineurs constituant l'écorce terrestre, à des teneurs de l'ordre de quelques mg/kg. Les données concernant le territoire français sont abondantes, mais dispersées dans de très nombreuses sources documentaires. Elles ont donc besoin d'être rassemblées et comparées.

Les observations anciennes sont surtout minéralogiques, faites à l'occasion d'études sur les vieilles mines ; par ailleurs, la présence très fréquente d'arsenic dans les eaux thermales a été signalée depuis longtemps, et notre pays ne déroge pas à la règle.

Ces dernières décennies ont vu l'acquisition de mesures systématiques d'arsenic dans différents milieux. La crise des matières premières du début des années 70, a induit l'analyse d'environ 300 000 échantillons de sols et de fines recueillies dans les alluvions de petits cours d'eau, essentiellement dans les massifs anciens (Bretagne, Massif Central, Vosges...). Par ailleurs le contrôle réglementaire des réseaux d'alimentation en eau potable (AEP), fournit également un nombre de mesures qui est probablement de l'ordre de quelques milliers annuellement.

La répartition de l'arsenic n'est

pas quelconque ; ainsi dans le Massif central, elle se localise de façon étroite le long de quelques structures géologiques, telles que la périphérie de **certain**s granites ou des niveaux de schistes. Il en résulte des traînées qui peuvent atteindre plus de 100 km de long, sur 0,5 à 2 km de large ; les teneurs dépassent localement 0,1 % (ou 1 000 mg/kg).

Une comparaison avec la localisation des eaux souterraines (non thermale) à arsenic semble montrer une assez bonne corrélation avec les structures géologiques en question. Une prochaine mise en ligne des données via le réseau Internet permettra d'affiner cette observation, en croisant les mesures sur les eaux et celles faites sur le milieu géologique. Une confirmation permettra sans nul doute d'implanter de futurs captages par forage, de manière à mieux contrôler la probabilité d'arsenic dans les eaux produites.

1 - INTRODUCTION

L'arsenic dans l'environnement relève de deux origines majeures ; l'une ou l'autre peut dominer selon les cas. La première tient aux activités humaines, la seconde est d'origine géologique, puisque l'arsenic est l'un des constituants (mineurs) de la croûte terrestre. Présent dans les roches à des degrés divers, il l'est également dans les sols qui en dérivent, dans les eaux de ruissellement, les rivières, les sédiments lacustres ou marins, etc. Même l'atmosphère en renferme des quantités infimes, certains composés de l'arsenic étant volatils.

Son comportement a fait l'objet de très nombreux travaux au cours de ces dernières années, notamment à cause de son impact sur la santé publique : dans le sud-est asiatique en particulier, la presse s'est faite l'écho d'atteintes graves dans la population des deltas. Toujours dans ces régions, des recherches auraient montré pour l'arsenic un certain rôle inhibiteur pour la croissance du riz. Aux Etats-Unis, les sites pollués et/ou les anciens sites de stockage ont été systématiquement

inventoriés. Dès le milieu des années 1990, un traité avait pour ambition de faire le point sur les connaissances alors disponibles, à propos du comportement de l'arsenic dans l'environnement (Nriagu, 1994).

En ce qui nous concerne, le point frappant était l'absence quasi-totale de référence sur les travaux français. Pourtant, ceux-ci sont loin d'être inexistant, mais ont été dans le passé la plupart du temps publiés dans la langue nationale. Leur caractère très dispersé, l'absence de synthèse et leur diffusion dans une langue peu prise en compte de la communauté scientifique internationale, les ont fait complètement ignorer.

Un colloque récemment tenu à Narbonne, organisé par la Société de l'Industrie Minérale, a permis de commencer à combler cette lacune, en rassemblant plusieurs contributions sur l'arsenic en France (Les Techniques de l'Industrie Minérale, n° 11, septembre 2001). De cette manifestation, il apparaît que les données sur l'arsenic sont très nombreuses ; fait nouveau, l'évolution des techniques rend ou va rendre très prochainement beaucoup de ces données, non plus captives, mais accessibles en ligne donc utilisables par un grand nombre de personnes.

2 - LES TRAVAUX ANCIENS SUR L'ARSENIC

L'arsenic est connu depuis la nuit des temps, aussi n'y a-t-il rien d'étonnant à ce qu'il ait été signalé sur notre territoire depuis plus de deux siècles : les références signalées par Lacroix (1893-1913) dans sa « Minéralogie de la France » proviennent pour l'essentiel du XIX^e siècle, mais certaines remontent au XVIII^e, telles les mentions d'antimoniure d'arsenic (allemontite SbAs), d'arséniure de nickel (nickélite NiAs), ou d'arséniure de cobalt (smaltite CoAs₂, variété d'un autre arséniure la skuttérudite). Ces observations sur les sulfures, arséniures ou antimoniures proviennent des anciennes exploitations minières (pour argent notamment).

L'arsenic natif existant dans les mines de Sainte-Marie-aux-Mines, exploitées depuis au moins l'an 963, il est fort possible que sa présence ait été connue dès cette époque ; cette présence aurait pu être quelque peu occultée par celle de l'argent, à la valeur marchande bien supérieure. Quant aux arsénates, ils auraient été décrits de façon plus récente ; certains d'entre eux (arséniate de cobalt ou érythrite) accompagnent de façon fréquente à l'affleurement les gîtes minéraux à sulfures ou arséniures de cobalt-nickel, et sont de plus de couleur vive (rose soutenu) : il est donc difficile de croire qu'ils aient pu passer inaperçus.

Le tableau VI récapitule les principales occurrences minéralogiques d'arsenic signalées sur notre territoire. Cette liste n'est bien sûr pas exhaustive : Van den Berghe (1983) a ainsi élaboré un inventaire des minéraux connus d'arsenic, dont le nombre s'élève à plus de 300. Une bonne part a été signalée en France (notamment les composés d'uranium), la plupart du temps en tant que curiosités : ce fait est à mettre en relation avec le caractère très répandu de l'arsenic.

L'arsenic est par ailleurs un soluté mineur fréquent dans les eaux de sources thermale. Un aperçu des concentrations mesurées sur les émergences à l'échelle mondiale a été donné par Onishi 1972 (in Wedepohl 1972, pp. 33-I-3 et 33-I-4) ; les concentrations sont souvent de l'ordre de 200 à 300 µg/l, mais peuvent dépasser 10 mg/l (Bad Dürkheim en Allemagne).

En France, c'est en 1854 que le baron Thénard révèle le caractère arsenical des eaux de la Bourboule (Van den Berghe, 1983), soit 7 mg/l environ. Plus récemment, Accoyer (1985) a donné une gamme de 28 à 72 µg/l pour les eaux de Vichy, avec une moyenne de 54 µg/l. Toujours pour le territoire français, des mesures plus récentes ont été publiées par Criaud et Fouillac (1986, 1989), avec des valeurs dépassant 1 mg/l. En bref, les

Eléments associés	Nom	Formule	Principales localités
Arsenic natif			
---	Arsenic	As	Ste Marie aux Mines (Vosges)
Sulfures d'arsenic			
S	Réalgar	AsS	Matra (Corse)
S	Orpiment	As ₂ S ₃	Luceram (Alpes Maritimes)
Arséniures			
Fe	Löllingite	FeAs ₂	Vaulry (Haute-Vienne) Le Châtelet (Creuse)
Ni	Nickelite	NiAs	La Baume (Aveyron)
Co	Skutterudite	CoAs ₃	Ste Marie aux Mines (Vosges)
			Les Chalanches (Isère)
Sulfoarséniures			
Fe	Arsénopyrite	FeAsS	Le plus fréquent des minéraux à As Chizeuil (Saône-et-Loire) Ste Marie aux Mines (Vosges)
Cu	Enargite	Cu ₃ AsS ₄	
Ag	Proustite	Ag ₃ AsS ₃	
Arséniates			
Fe	Pharmacosid	KFe ₄ (AsO ₄) ₃ (OH) ₄ .6H ₂	Echassières (Allier), Puy-les-Vignes (Haute Vienne)
	Scorodite	Fe ₃ (AsO ₄) ₂ .2H ₂ O	Fréquente
Ni	Annabergite	Ni ₃ (ASO ₄) ₂ .8H ₂ O	Les Chalanches (Isère)
Co	Erythrite	Co ₃ (AsO ₄) ₂ .nH ₂ O	Les Chalanches (Isère)
			Ste Marie aux Mines (Vosges)
Zn	Adamite	Zn ₂ (AsO ₄)(OH)	Cap Garonne (Var)
	Olivénite	Cu ₂ (AsO ₄)(OH)	Cap Garonne (Var)
	Conichalcite	CaCu(AsO ₄)(OH)	Cap Garonne (Var)
Cu	Tyrolite	Ca ₂ Cu ₉ (AsO ₄) ₄	Cap Garonne (Var)
			Ste Marie aux Mines (Vosges)
			Rabejac (Hérault)

Tableau VI - Principaux minéraux d'arsenic signalés sur le territoire français (une liste complète comprendrait probablement une centaine d'espèces, ou plus). Source : Bariand et al., 1985 ;cf. aussi pour plus de détail, Lacroix (1893-1913), et pour le Massif central : Van den Berghe, (1983)

eaux françaises se situent donc dans la fourchette de concentration en arsenic mesurées à l'échelle du globe pour les eaux thermales.

3 - LES MESURES SYSTÉMATIQUES

Les travaux signalés dans le paragraphe précédent portent sur des sites très localisés, anciennes mines ou émergences thermales.

Des recherches plus systématiques ont été faites ou sont en cours actuellement, portant sur l'environnement géologique d'une part, et sur la qualité des eaux de boisson d'autre part (OMS, 1994).

3.1 - L'arsenic dans les sols et dans les fines d'alluvions en tête de bassins

Un programme systématique de mesure d'éléments chimiques

(géochimie) dans l'environnement géologique a été initié à la fin des années 70 et poursuivi pendant une quinzaine d'années. Destiné à identifier des ressources minérales en divers métaux, il a consisté à échantillonner des alluvions de tout petits bassins versants (en principe de superficie < 1 km2) ou des sols.

La composition des alluvions est

censée correspondre approximativement à la composition moyenne des sols du bassin versant correspondant, ces sols dérivant eux-mêmes de la décomposition des roches. Les points de mesure correspondent à une densité de 2 à 3 au km², et sont localisés en tête de bassin; ils donnent une information sur une zone de l'ordre du km², ou moins.

Ce genre de technique est couramment utilisé de par le monde, aussi bien pour la recherche de concentrations métallifères, que pour des questions d'environnement : en terminologie anglo-saxonne, elle est appelée «stream-sediment». Mais de manière à éviter ici toute confusion avec les alluvions de rivières ou de fleuves, qui peuvent correspondre à de grands bassins versants, nous appellerons dorénavant cette technique **finer de têtes de bassin** (cf. ci-dessous). Lorsque le chevelu du réseau hydrographique n'est pas assez serré pour atteindre cette densité, les alluvions ont été remplacées en tant que milieu d'échantillonnage, par des sols pris en fond de vallons.

On essaie ainsi de profiter des mouvements de terrain imperceptibles qui depuis des millénaires, font descendre par gravité les sols vers les bas-fond. Dans les régions affectées par une activité extractive largement répandue, comme dans le sud du Massif central au XIX^e siècle, les alluvions ont été remplacées par l'échantillonnage de sols à maille 500 x 500 m environ.

Une technique de reconnaissance

Compte tenu de son ampleur (120 000 échantillons sur le seul Massif central), le programme a parfois été qualifié de « cavalerie lourde ».

En fait le qualificatif est inexact : destiné à couvrir aussi rapidement que possible de grandes distances, ce programme devrait plutôt être comparé à de la cavalerie légère ; à ce titre, toutes les procédures y ont été simplifiées et allégées au maximum, ne serait-ce qu'à cause d'un souci d'économies budgétaires :

- dans le cas de sols, la profondeur de l'échantillon a été fixée de façon très pragmatique (un fer de bêche sous la surface), et non pas en fonction de la nature des sols (pédologie),
- le traitement des échantillons s'est limité à un simple tamisage à 125 microns, il n'y a donc pas eu de broyage, nécessairement onéreux,
- la partie fine a été envoyée directement à l'analyse, après dissolution par attaque triacide à chaud,
- une vingtaine d'éléments ont été dosés simultanément par spectrométrie optique à plasma diffusif.

Dans le cas de l'arsenic, les mesures effectuées sont plutôt semi-quantitatives, et les valeurs chiffrées à moins de 40 ou 60 mg/kg doivent être considérées comme un simple bruit de fond. Pour notre propos cela n'a guère d'importance, car les teneurs les plus fortes peuvent dépasser 1 000 mg/kg. Les secteurs riches en arsenic se marquent donc nettement dans les mesures.

Milieus géologiques à arsenic

L'examen des cartes de répartition de l'arsenic, montre que cet élément est de façon évidente lié à certaines grandes structures géologiques. Ainsi dans le Massif Central, on relève du Nord au Sud (fig. 11) :

- les terrains d'âge secondaire situés à l'extrême Nord du Morvan, et à moindre titre sur la bordure cévenole,
- un faisceau de trois bandes de plusieurs dizaines de km de long à l'ouest de la Limagne,
- en Limousin, les bordures de granites à muscovite sur une centaine de kilomètres de longueur,
- en Lozère et dans le nord-Aveyron, les bordures des granites à biotite de la Margeride et du Mont-Lozère,
- enfin plus au sud dans la Montagne Noire, un horizon dans les schistes paléozoïques.

La coïncidence des secteurs où l'arsenic est à forte teneur, avec

des structures géologiques parfaitement identifiées et de très grandes dimensions, montre à l'évidence qu'il ne peut s'agir (pour l'essentiel) de pollution d'origine anthropique.

Cela ne veut pas dire que ces pollutions soient inexistantes : les prélèvements ont été faits précisément de manière à éviter les contaminations les plus importantes.

Pour mettre ces contaminations en évidence, il faudrait un autre type d'échantillonnage, comme celui des alluvions de cours d'eau de moyenne importance : des traînées de dispersion de plusieurs kilomètres sont ainsi connues en aval d'anciennes excavations ou d'anciennes usines.

3.2 - L'arsenic dans les eaux souterraines

L'arsenic est classé par l'OMS dans la catégorie des éléments toxiques (OMS, 1994). C'est donc un paramètre qui est surveillé lors des mesures réglementaires effectuées sur les réseaux d'alimentation en eau potable (AEP) : plusieurs milliers de données ont été acquises, mais n'ont été dépouillées que très partiellement. Le seuil analytique couramment employé, initialement de 5 µg/l, est souvent maintenant abaissé à 2 µg/l. La médiane des valeurs mesurées dans le Massif central, se situe entre ces deux chiffres : en d'autres termes, le fond géochimique en arsenic dans les eaux souterraines, serait du même ordre de grandeur que la limite analytique.

Des mesures plus précises par ICP/MS, ont indiqué une médiane située vers 2 µg/l (rapport BRGM R 39544, 1997). Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles publiées depuis les années 60 à l'échelle mondiale, pour les eaux souterraines (Onishi, 1972). Elles ne sont pas très éloignées du seuil de 10 µg/l, qui deviendra la norme pour l'eau potable à la fin de 2003 : en effet des concentrations beaucoup plus élevées ont été mesurées, jusqu'à 400 et même 3 000 – 5 000 µg/l sur quelques points.

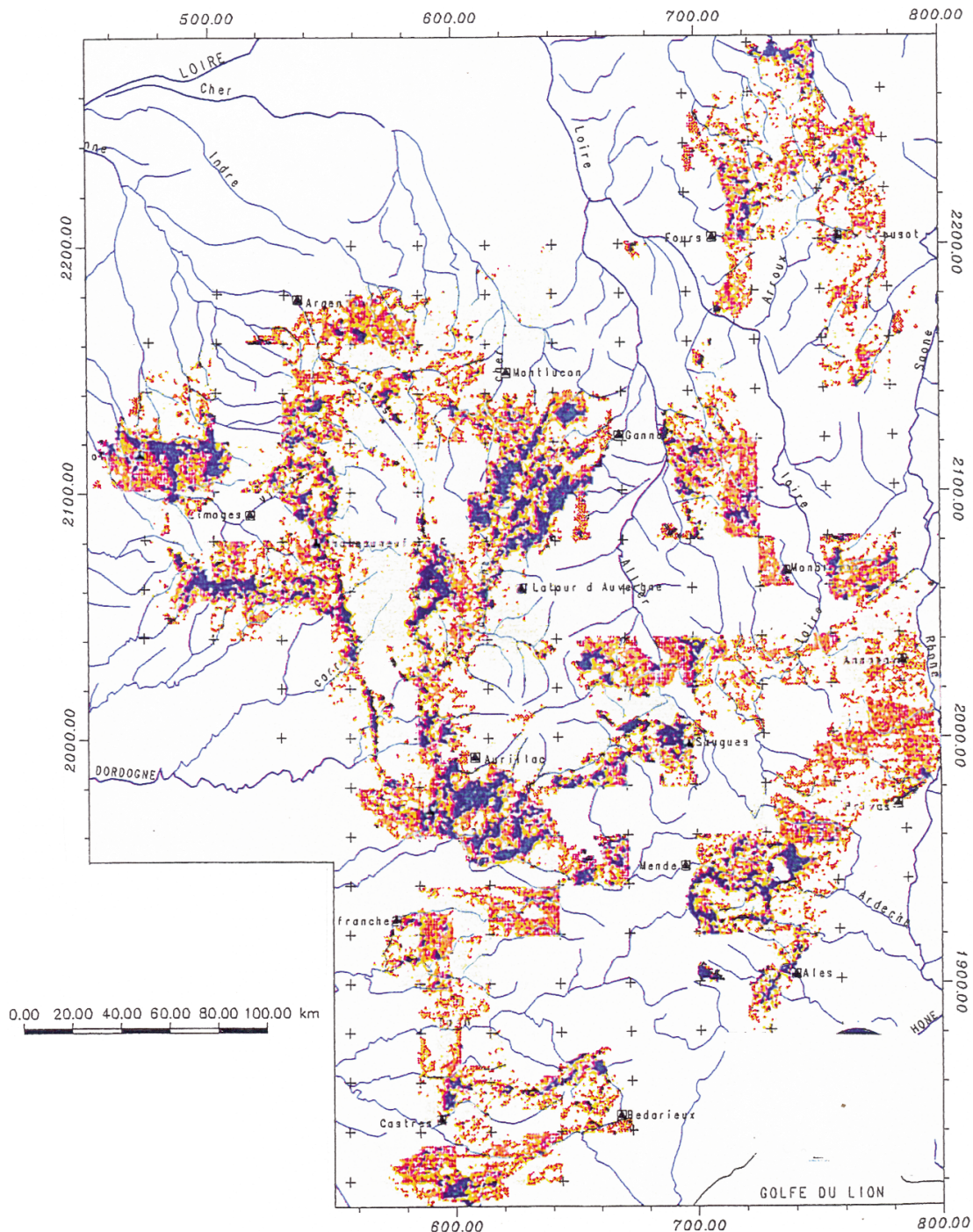


Figure 14 - Répartition des teneurs en arsenic dans les fines d'alluvions et/ou de sols dans le Massif central.
Bleu : > 100 mg/kg - Jaune-orange : 100 - 40 mg/kg - Jaune pâle : < 40 mg/kg ; d'après le rapport BRGM RP-50518-FR

De fait, les valeurs à plus de 10 µg/l pourraient représenter dans le Massif central, en l'état actuel des investigations, de 10 à 20 % des captages (fig. 12) ; cette estimation, qui ne porte que sur à peine une centaine d'observations, aura besoin d'être confirmée.

Nous sommes en présence de la fameuse question du verre à moitié plein ou à moitié vide, car on peut dire aussi que 80 à 90 % des captages d'eaux souterraines, ne

devraient pas présenter de problème....

Parmi les valeurs de plusieurs mg/l, certaines ont été rencontrées à l'occasion de forages, dans des contextes de roches métamorphiques dans lesquelles la présence d'arsénopyrite a été décrite à proximité.

4 - LES BASES DE DONNÉES SUR L'ARSENIC

Les concentrations en arsenic

dans les eaux dépendent de plusieurs facteurs, certains commençant à être identifiés, comme les teneurs en As et la richesse en fer des aquifères. Toutefois ces conclusions sont encore fondées sur un nombre faible d'observations, à peine une centaine. Les mesures existantes sont en fait beaucoup plus nombreuses.

Il sera possible de travailler sur des quantités beaucoup plus importantes, lorsque les données

seront accessibles en ligne. Les bases de données nécessaires existent en effet.

4.1 - Géochimie des sols et des fines d'alluvions

Les mesures des teneurs en arsenic réalisées dans le cadre de l'Inventaire géochimique de la France sont accessibles, mais en partie seulement, par le site InfoTerre du BRGM. Elles concernent environ 300 000 points de mesure, répartis essentiellement sur les anciens massifs hercyniens. Les renseignements disponibles portent sur la position des prélèvements, en coordonnées Lambert II étendu, ainsi que sur le type d'analyse effectuée. Par contre les valeurs numériques elles-mêmes ne sont pas encore accessibles directement en ligne. En tant que de besoin, le lecteur se reportera à une note technique (n° HYD/NT/96/078) reprise dans le rapport BRGM R50518-FR, qui donne les informations relatives aux techniques et procédures employées.

4.2 - Géochimie des eaux

Les données concernant l'arsenic dans les eaux souterraines, et d'une manière plus générale la qualité des eaux, vont très prochainement être accessibles en ligne via le réseau Internet. Le site

s'appelle ADES (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines), c'est un produit du Réseau National des Données sur l'Eau (RNDE). ADES réunit les données du réseau national et des réseaux de bassins. Les Maîtres d'Ouvrage sont partenaires des réseaux :

- des collectivités territoriales,
- d'autres organismes chargés de missions publiques,
- privés, comme ceux des industriels par exemple.

L'accès aux données (ades.rnde.tm.fr) devrait se faire de façons différentes, selon que les demandeurs appartiendront aux services de l'état, aux professionnels, ou au grand public. Les données elles-mêmes seront accessibles point d'eau par point d'eau, mais il sera possible également d'obtenir celles qui ont trait à un réseau entier.

5 - APPLICATIONS PRATIQUES PERMISES PAR LES BASES DE DONNÉES

La consultation et le recouplement des bases de données permettra des avancées dans plusieurs domaines, certains étant relatifs à la compréhension des phénomènes qui régissent les concentrations en arsenic dans les eaux

souterraines, d'autres pouvant trouver assez rapidement des applications très concrètes.

5.1 - Origine de l'arsenic dans les eaux souterraines

La confrontation des mesures figurant dans les bases de données, commence à fournir des informations intéressantes. Ainsi les concentrations en arsenic, relevées dans les eaux souterraines, mais hors eaux thermales, s'avèrent dépendre de celles du milieu géologique environnant. Les observations concernent d'une part les captages gravitaires, et d'autre part les forages exploitant des eaux situées à plus grande profondeur (50 – 100 m).

Captages gravitaires

Il existe une relation assez approximative, mais de signification non nulle ($R^2 = 0,47$), entre les logarithmes des concentrations en arsenic dans les eaux de sources, et celles des teneurs dans les fines d'alluvions situées dans un rayon de 500 m environ, donc au voisinage immédiat. En d'autres termes, c'est dans les terrains les plus riches en arsenic, que l'on risque de trouver les eaux à concentrations les plus élevées. Compte tenu du type d'échantillonnage pratiqué, il serait illusoire d'attendre une corrélation étroite

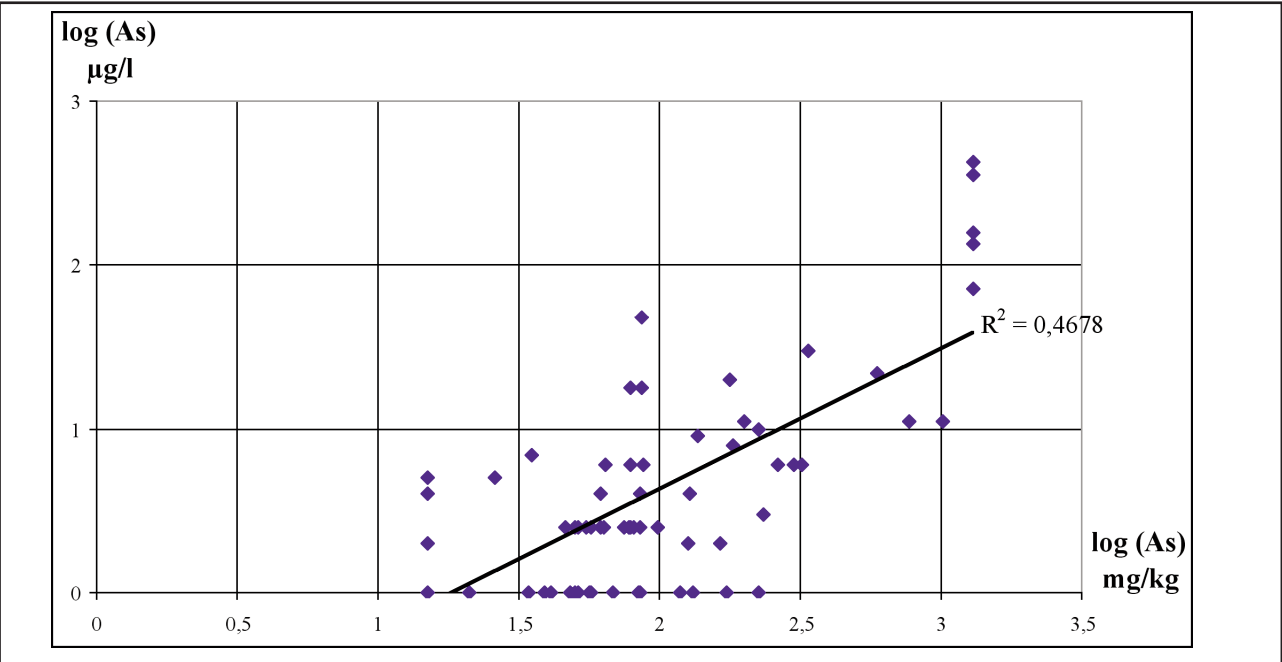


Figure 15 - Relation entre teneurs en arsenic dans les fines d'alluvions, et les concentrations en arsenic dans les eaux

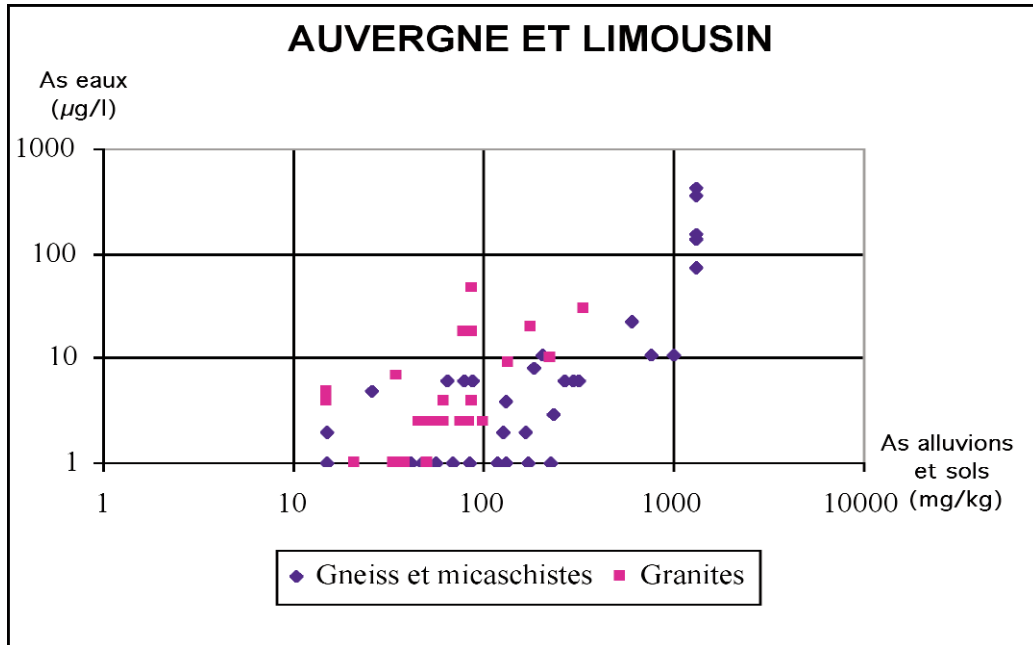


Figure 16 - Teneurs en arsenic dans les fines d'alluvions, concentration dans les eaux de sources de granites, gneiss ou micaschistes

entre les deux variables. En effet, les teneurs mesurées sur fines d'alluvions sont sous l'influence des sols situés en rive gauche comme en rive droite. Mais la nappe captée d'une part, et l'anomalie en arsenic d'autre part, peuvent fort bien se trouver sur des versants différents, et donc dans des contextes chimiquement très différents également.

En toute rigueur, il faudrait comparer les concentrations dans les eaux de sources, avec les teneurs de l'aquifère correspondant. Ce serait possible en échantillonnant des sols, au moins dans une pre-

mière approximation, car les sols donnent une image des roches sous-jacentes : mais il n'est pas possible à l'heure actuelle, de dire quels sont le nombre et la localisation des échantillons nécessaires. Des études, non plus à l'échelle du Massif central, mais à celle de quelques parcelles en amont des captages, seraient nécessaires.

Une autre indication sur les relations entre teneurs dans les eaux et milieu géologique, tient à la nature du réservoir. Pour une même teneur en arsenic, les eaux des granites semblent être légèrement plus riches en arsenic que

les eaux d'autres roches (fig. n°13).

Une explication plausible tient à l'affinité de l'arsenic pour les hydroxydes de fer, sur lesquels il s'adsorbe fortement (comme le phosphore, qui a un comportement identique). Or les granites sont parmi les roches les plus pauvres en fer : on peut penser que l'arsenic y est moins fortement fixé, et donc qu'il est mobilisé plus facilement par les eaux météoriques.

Eaux produites par forage

Dans les secteurs où les fines d'alluvions sont riches en As (plus de

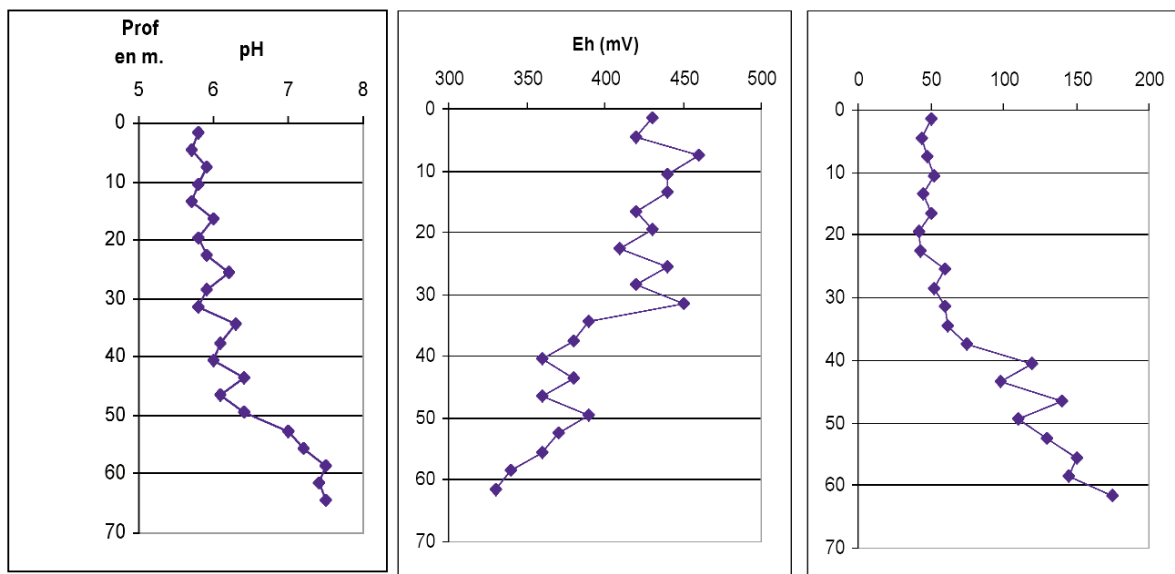


Figure 17 - Schéma conceptuel : évolution des paramètres Eh, pH, conductivité, dans les eaux produites à l'avancement lors de l'exécution d'un forage destructif (passes de 3 m). Le niveau zéro est celui du niveau hydrostatique

80 – 100 mg/kg), les eaux captées par forage en profondeur semblent contenir nettement plus d'arsenic que les eaux de sources. Deux forages effectués à 80 – 100 m ont ainsi fourni des eaux à 85 et 115 µg /l As, accompagnées de manganèse (50 à 80 µg/l).

L'explication doit être recherchée dans la présence, en profondeur, de sulfures d'arsenic dont l'oxydation amène la libération de As. Le Fe²⁺ issu des sulfoarséniures de fer, réduit le manganèse tétravalent en Mn²⁺, soluble. Ces réactions s'accompagnent d'une dénitrification : l'élimination d'un composé classé comme indésirable (nitrates) est donc malheureusement compensée par l'apparition d'un autre indésirable, le manganèse.

5.2 - Applications potentielles à deux questions pratiques

L'implantation de captages

La recherche d'eau par forage en milieu cristallin, se fait traditionnellement, en fonction de paramètres physiques, comme le degré de fracturation des roches ou l'existence d'une couche-réservoir d'arènes. Les observations exposées plus haut permettent d'envisager la prise en compte de paramètres chimiques, comme la teneur en arsenic et/ou en fer du réservoir.

Malheureusement, les relations montrées figures 12 et 13 sont encore trop floues pour être utiles à elles seules, à l'implantation d'un chantier. Comme évoqué ci-dessus, il serait bon de connaître ce type de relations non plus à l'échelle du Massif central, mais à l'échelle de l'aquifère qui alimente un captage. Le travail correspondant devrait se faire sur quelques parcelles en amont hydraulique du forage : ces aquifères sont certainement, dans des paysages de collines, d'assez faible extension et en tout état de cause, de dimension inférieure au kilomètre. Sur une telle superficie, quelques dizaines d'échantillons de sols analysés pour l'arsenic, devraient permettre une confrontation avec les mesures faites sur les eaux. Le but à court terme serait de

réduire ce nombre à une dizaine au plus et de savoir où les implanter, de façon à disposer d'une méthode peu dispendieuse (1/2 journée de technicien, 10 analyses d'arsenic au plus) d'aide à la décision pour l'implantation de captages.

La profondeur des eaux captées par forage

La comparaison des paramètres chimiques entre les eaux de sources d'une part, et les eaux captées par forage d'autre part, de même que le suivi de quelques (trop) rares forages en cours d'exécution, permettent d'esquisser un schéma conceptuel utilisable lors de l'avancement des chantiers. Selon ce schéma, les paramètres comme pH, Eh et conductivité, évolueraient depuis les eaux les plus superficielles, dont la composition est proche de celle des eaux de sources, jusqu'à celles d'eaux à plus forte minéralisation en profondeur (fig. n° 4). Dans des secteurs riches en arsenic et/ou en sulfures, cette minéralisation risque de s'accompagner d'éléments indésirables comme le manganèse, ou toxiques comme l'arsenic.

Il serait donc utile de mettre les forages en production à chaque changement de tiges, dès le passage sous le niveau hydrostatique, et de mesurer *in-situ* les paramètres en question. Leur évolution vers des caractères rencontrés dans les eaux profondes (pH neutre, Eh faiblement, conductivité plus élevée) devraient faire penser au risque d'atteindre des eaux à caractéristiques de non-potabilité. Par suite, on serait amené à peser le pour et le contre, entre d'une part la recherche d'un débit supérieur en cas d'approfondissement, et d'autre part une qualité d'eau peut-être dégradée. La décision d'arrêter la foration pourrait être envisagée.

En l'état actuel de nos connaissances, et pour ce qui concerne l'arsenic, le risque de trouver des concentrations élevées dans les eaux se limiterait aux milieux géo-

logiques riches en As, et facilement délimitables par les techniques décrites plus haut de fines d'alluvions ou de sols.

6 - PERSPECTIVES

Les faits qui viennent d'être exposés, ne concernent pas le seul Massif central français, et les mêmes observations sont très probablement à faire pour les autres massifs hercyniens, Pyrénées, Alpes, Maures, et Vosges. Le cas de la Bretagne est plus délicat : si le fond géologique ressemble à celui des Vosges par certains aspects, la question des sols et des alluvions de tout petits cours d'eau est différente. Dans le Massif armoricain en effet et surtout sur la marge orientale, il y a de nombreux écrans d'apports éoliens (les lœss), aux dépens desquels sont formés les sols, et dont la composition n'est pas nécessairement en rapport avec celle des roches sous-jacentes. Par suite il n'est pas aisé d'utiliser la composition des sols, pour avoir une idée des éléments nocifs éventuellement en solution dans les eaux des nappes souterraines.

En dehors du territoire national, le problème traité ici se rencontre selon toute vraisemblance dans le reste de l'**Europe hercynienne** :

♦ En Allemagne et en Tchéquie (Harz, Bohême), plusieurs localités ont donné leur nom à des minéraux d'arsenic :

- le secteur d'Annaberg en Saxe (SE de l'Allemagne fédérale), à l'arséniate de nickel, l'**annabergite** (Tab. VI),
- celui de Rammelsberg dans le Harz (idem), à l'arséniure de nickel NiAs₂ (**rammelsbergite**),
- le gisement de Kank en Bohême (Tchéquie), à la **kan-kite** (arséniate de fer hydraté).

♦ Plusieurs localités du sud-ouest de l'Angleterre, ouest de l'Espagne et du Portugal, sont célèbres également par les minéraux d'arsenic qu'elles fournissent ou ont pu fournir.

La figure 15 indique la position de ces différents sites, ainsi que les principaux gîtes arsénifères



Figure 18 - Localisation en Europe occidentale, des principaux gîtes minéraux avec présence d'arsenic, d'après Emberger (1984).

Pour le seul Massif central français, on comparera la densité d'information provenant des gîtes minéraux d'une part, et des prospections géochimiques d'autre part : cf. les cinq sites mentionnés figure 6, et les zones à arsenic cartographiées figure 11

d'Europe occidentale, d'après Emberger (1984) ; cette même figure indique que les régions en question ont été dans leur majori-

té, couvertes par des campagnes de mesure en fines d'alluvions, incluant de façon possible le dosage de l'arsenic.

Or, la comparaison des deux figures 5 et 1 montre à l'évidence l'énorme apport que peuvent représenter les mesures de géo-

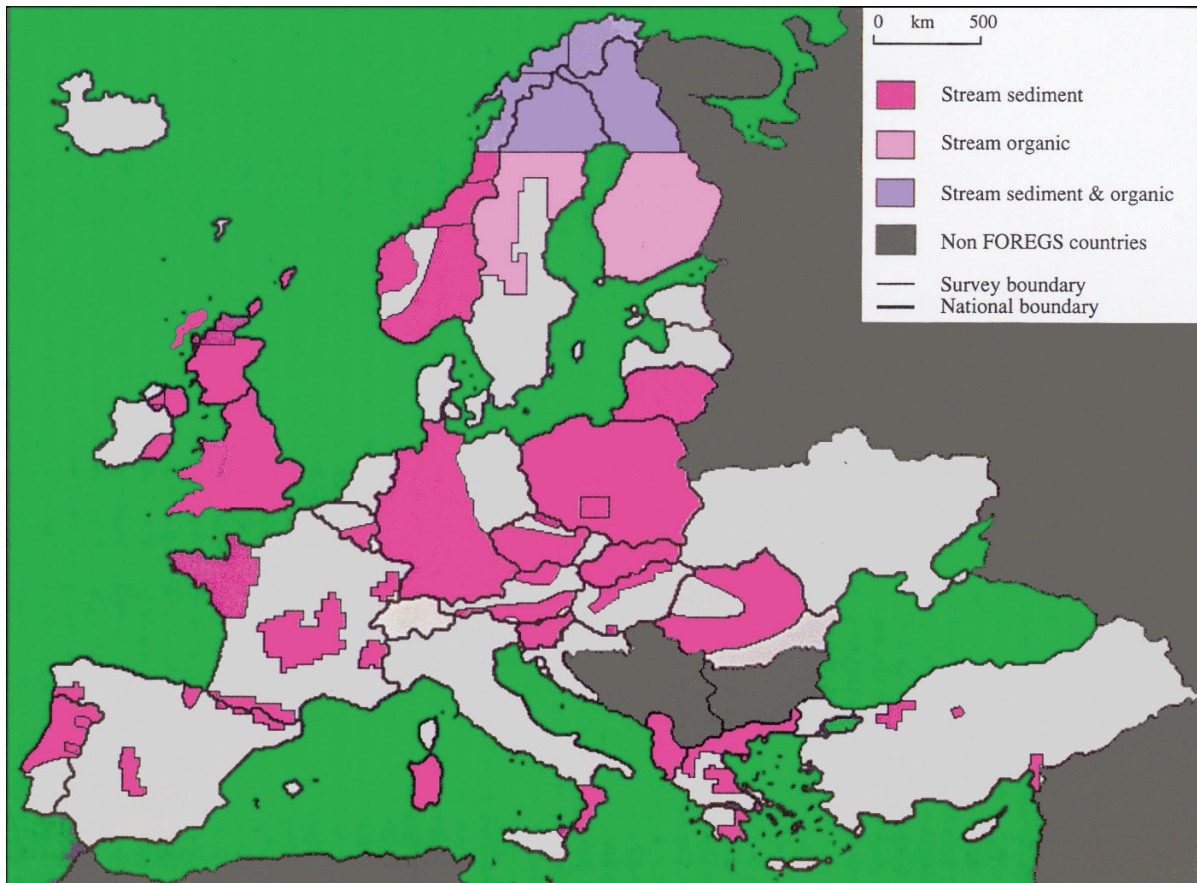


Figure 19 : En pourpre, pays d'Europe ayant réalisé des campagnes de géochimie la plupart du temps en fines d'alluvions ou stream-sédiments à grande échelle

chimie en «stream sediment» (fines d'alluvions), pour la localisation des secteurs où les eaux risquent d'être riches en arsenic : ces secteurs ne se limitent pas en effet au voisinage immédiat de gîtes métallifères connus.

Il y a donc par conséquent un travail important à faire à **l'échelle européenne**, pour délimiter les zones où l'application de la future norme de potabilité pour l'arsenic (10µg/l), posera problème. En effet il n'y a pas que la France qui ait procédé à des campagnes de géochimie à l'échelle de pays entiers.

La figure 16 désigne (Plant et al., 1996) les pays européens qui se sont lancés dans cette voie : Grande-Bretagne, Allemagne, Tchèque, Slovaquie, Pologne, Slovaquie, Lituanie, et pro parte Portugal et Grèce. Les travaux en Espagne, Italie et Autriche ont été beaucoup plus localisés. Toutefois à l'échelle du continent, deux grands ensembles devront être distingués (Barbier et Wilhelm, 1978) :

- d'une part les vastes plaines

d'épandage de l'Europe du Nord, où les dépôts morainiques et leurs remaniements ultérieurs rendent le lien entre sols et roches anciennes assez lâche,

- et d'autre part l'Europe méridionale et moyenne, où les sols et les alluvions gardent une composition qui correspond très bien à celle des roches-mères.

Dans le premier de ces ensembles, Scandinavie, Allemagne du Nord, Danemark, Grande Bretagne, le modelé glaciaire a induit une grande uniformité des paysages, voire de la pensée des hommes (Braudel, 1992) ; l'emploi de la géochimie sera peut-être assez problématique pour localiser des zones particulières riches en arsenic.

Mais le second de ces ensembles est caractérisé par des sols, dont la nature et la composition varient très vite : la notion de « terroir » y est défendue de façon jalouse. A cette partie médiane et méridionale de l'Europe correspond donc une réelle « géodiversité » des sols, et la géochimie devrait y être

un outil particulièrement efficace pour identifier les zones où les eaux sont potentiellement riches en arsenic.

7 - REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- * Accoyer P. (1965) – Les oligo-éléments dans les eaux de Vichy-Etat. Presse Thermale Climat, vol. 102, p. 161.
- * Barbier J., Wilhelm E. (1978) – Superficial geochemical dispersion around sulphide deposits : some examples in France. J. Geochemical Exploration, vol. 10, pp. 1-39.
- * Braudel F. (1992) - Identité de la France. Ed. multiples.
- * Collectif – Actes du Séminaire de la Société de l'Industrie Minérale, Narbonne, 28-29 septembre 2000. Les Techniques de l'Industrie Minérale, n° 11, septembre 2001.
- * Criaud A., Fouillac Ch. (1986) – Etude des eaux thermominérales carbogazeuses du Massif

- Central français. II. Comportement chimique de quelques métaux en traces, de l'arsenic, de l'antimoine et du germanium. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 50, pp. 1573-1482.
- * Criaud A., Fouillac Ch. (1989) – The distribution of arsenic(III) and arsenic (V) in geothermal waters : Examples from the Massif Central of France, the Island of Dominica in the Leeward Islands of the Caribbean, the Valles Caldera of New Mexico, U.S.A., and southwest Bulgaria. *Chemical Geology*, vol. 76, pp. 259-269.
 - * Emberger A. (1984) – Principaux gîtes minéraux de l'Europe et des pays limitrophes. BRGM (Orléans) – Carte au 18.750.000e. BRGM (Orléans)-UNESCO-CCGM-AMS.
 - * Lacroix L. (1893-1913) – Minéralogie de la France et des Territoires d'Outre-mer. 5 vol., Librairie du Muséum, réédition de 1977, Paris.
 - * Nriagu (1994) – Arsenic in the Environment. John Wiley & Sons, New York, 430 p.
 - * OMS (1994) – Directives de qualité pour les eaux de boisson. OMS, Genève, 202 p.
 - * Onishi (1972) – Arsenic. In : Handbook of Geochemistry, Wedepohl K.H. éd., Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 33B-33O.
 - * Plant J. A., Klaver G., Locutura J., Salminen R., Vrana K., Fordyce F. M. (1996) – Forum of European Geological Surveys (FOREGS) Geochemical Task Group 1994 – 1996 report. A contribution to IUGS Continental Geochemical Baseline. British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, Technical Report WP/95/14, 52 p.
 - * Van den Berghe C. (1983) – L'arsenic et les eaux minérales. Thèse Fac. Pharmacie Parix-XI, 70 p.
 - * Wedepohl K. H. (1972) - Handbook of Geochemistry, vol. 1-III. Springer-Verlag, New-York, Berlin, Heidelberg, pag. mult.

8 - RAPPORTS TECHNIQUES

- * Rapport BRGM R 39544 (1997) : Relation entre fond géochimique naturel et teneurs élevées en métaux lourds dans les eaux, 51 p.
- * Rapport BRGM R50518-FR (2001) : Fond géochimique national – Etat des connaissances à l'échelle nationale, 93 p.

AUTRES PROCESSUS MOBILISATEURS DE L'ARSENIC

Raymond LAUGIER

Le thermalisme français, plus que celui pratiqué dans les pays qui nous entourent, ne parvient pas à se dégager d'une tradition aux fondements chancelants : exprimer les concentrations des composants d'une eau en milligrammes/litre. Cette forme est adoptée depuis toujours par les laboratoires agréés qui délivrent des résultats.

L'analyste dissèque l'échantillon qui lui a été remis, il est dans son rôle. Mais ce rôle s'arrête en ce stade. Sauf exception, il n'a pas reçu la formation scientifique qui lui permet de se prononcer sur la géochimie d'une roche qui lui est inconnue.

Ce qui intéresse l'hydrogéochimiste est de **remonter des ions aux minéraux générateurs** par deux processus : **dissolution** et **hydrolyse**.

La référence aux Romains, pas plus que les architectures en

forme de bains-maure ne sont les deux mamelles du Thermalisme. L'immobilisme bi-centenaire constaté à conduit à la déconsidération que l'on sait.

L'analyste aura toujours un rôle à jouer et c'est très bien ainsi ; l'hydrogéologue intervient à sa suite. Ni opposition, ni répétition puisque les démarches sont différentes. L'addition de deux compétences est souhaitable dans un ordre d'intervention déterminé.

1 - RÔLE DES AGENTS CLIMATIQUES

Dans l'étage montagnard, la rigueur du climat, les larges écarts thermiques favorisent le morcellement des roches, filons et cristallisations. Ainsi en est-il pour l'Arsenic élémentaire qui finit par se résoudre en une fine poussière.

Lorsque la saison des grands les-

sivages pluviaux est de retour, cette poudre est entraînée à travers le réseau fissural, les éboulis cryoclastiques et les placages morainiques.

Elle s'accumule en fond de vallée et s'incorpore au tapis alluvial. Selon ce schéma dynamique *per descensum*, une anomalie positive en As devrait ressortir d'une étude systématique initiée à la source de la Dordogne, prolongée au moins jusqu'à la sortie de l'espace thermal de La Bourboule.

2 - RÔLE DU COUVERT VÉGÉTAL

Herbacé sur les estives, ligneux dans les massifs boisés, le couvert végétal joue un rôle important *in vivo*, comme *post mortem*.

In vivo

La flore des prairies d'altitude ne se contente pas de se développer là où les plantes se sont enraci-

nées. Celles-ci défendent leur domaine d'influence biologique : nutrition, expansion. Elles sont secondées en cela par les sécrétions extraradicaires qui jouent un rôle biostabilisant vis à vis de leurs concurrentes.

Ces exudats glyco-muco-pro-téiques sont actifs sur les roches aluminosilicatées et les complexes arsenicopolymétalliques ; ceux-ci sont hydrolysés.

Les sécrétions des résineux sont singulièrement agressives ; outre les oses énoncés, elles apportent des substances organiques aliphatiques, aromatiques et terpéniques. La roche-support est attaquée de la même façon ; mais, le plus souvent en milieu réducteur. L'eau du sol s'enrichit en fonction de son acidité, de sa **force ionique**, l'arsenic mis en circulation étant entraîné avec le flux des pluvio-lessivats.

Post mortem

Un sol se divise en trois ensembles (Tab. VII).

Ainsi, une pelouse herbacée rase couvre les plateaux élevés et correspond aux "estives". Un sol épais se développe sous les résineux, les acides organiques entraînés par les pluvio-nivo-lessivats sont porteurs d'une activité chimique intense, mais complètement inconnue. Ou plutôt négligée. Cette acidité agit par hydrolyse. Elle aide l'arsenic à suivre un cheminement *per descensum*. Dans le fond des vallées, il peut se mêler aux eaux géothermales et se présenter à leurs griffons tout en étant parfaitement étranger au phénomène géothermal. Il faudra, dans l'avenir, tenir compte de cette situation.

3 - ARSENIC ET SALINITÉ

Les estimables études poursuivies par P. MICHEL sur le comportement de l'arsenic en milieu salin nous ont convaincu de porter plus d'attention à la teneur des eaux de La Bourboule en chlorure de sodium.

Dans le périmètre du Sancy, il existe une série de sources dont la

charge chlorurée sodique est significative :

* Le Mont-Dore 0,350 g./l.

* Vic sur Cère 2,04

* **La Bourboule 5,64**

* Ydes – Bourg 7,58 à 8,30

Les valeurs citées ci-dessus varient de quelques centièmes d'unités selon les années, les analystes et le contexte saisonnier. Elles seront prises globalement, sans argumenter sur la seconde décimale.

En ce qui concerne La Bourboule qui est au centre de notre réflexion, les 5,64 g/l de sel gemme représentent 52 % de la minéralisation totale. Occulté par les 6,5 mg/l attribués à l'arsenic dans un rapport de 1/867,7 , le caractère salin occupe néanmoins le devant de la scène.

Pour cette raison, nous avons porté de l'attention aux travaux des auteurs qui ont étudié le comportement de l'élément As en milieu salin.

L'exportation de la charge minérale saline peut s'exprimer de la façon suivante, plus réaliste en

(A)	A 1	la litière est formée par l'accumulation, année après année, des feuilles, brindilles et bois tombés au sol. La chlorophylle est rapidement décomposée en substances tanniques. Les colorations vertes plus ou moins intenses font place à une teinte qui tire vers le brun.
	A 2	Le poids des apports saisonniers qui s'empilent les uns sur les autres, l'action des précipitations et des variations de la température donnent à A1 un aspect feuilleté caractéristique de A2 qui est le siège de la vie microscopique : cryptogames et bactéries, mollusques, animaux fouisseurs, larves d'insectes, annélides etc ... Ce milieu est très aéré. La coloration brune s'affirme. Tous les tissus végétaux sont encore reconnaissables.
	A 3	Est une couche plus compacte, plus sombre, granuleuse, le matériel végétal n'est plus guère reconnaissable au plan tissulaire. La compacité limite la circulation de l'atmosphère, le milieu devient anoxique.
(B)	B 1	C'est la partie supérieure de l'humus dont la granulométrie diminue de haut en bas. La coloration s'uniformise dans le brun-foncé. La granulométrie se ferme. Le milieu est réducteur. Il favorise l'activité bactérienne anaérobie qui prolonge la digestion aérobie des tissus. C'est le domaine des sulfo-bactéries, groupe cryptogène qui métabolise le soufre des thio-aminoacides cellulaires.
	B 2	L'humus est très élaboré, composé d'acides humiques et fulviques à haut poids moléculaire.
(C)		Ce troisième horizon pédologique est représenté par "la" roche. N'importe quelle roche, carbonatée (calcaire), siliceuse (sable, grès) ou encore cristalline (granite, laves diverses). La roche est toujours altérée au plan chimique selon un processus de fracturation climatique suivie de dissolution ou d'hydrolyse. Une végétation quelle quelle soit ne peut s'implanter sur une roche chimiquement intacte. La formation d'un sol est le résultat d'une longue évolution propre à chaque roche comme à chaque population végétale.

Tableau VII - Les différents horizons d'un sol

Pompage en saison	13 m3/h x 24 h x 250 j. x 5,64 = 439 920 kg
Pompage hors saison	10 m3/h x 24 h x 115 j. x 5,64 = 155 664 kg
Exhaure totale	595 584 kg
Tonnage de NaCl exporté annuellement arrondi à	600 tonnes

comparaison avec l'expression analytique à l'échelle du mg/l. Vue sous cet angle, la référence au milieu salin est justifiée.

4 - ARSENIC ET MATIÈRES ORGANIQUES

L'hydrolyse des minéraux arsenicaux libère des ions As sous plusieurs formes, comme il a été déjà expliqué. Dans des circonstances différentes, la complexation de l'élément As aux acides humiques et fulviques conduit à un autre mode de transport. Enfin, en milieu salin, la méthylation biochimique de l'arsenic (mono-di-tri) est le fait de processus bactériens. De tels composés existent peut-être dans la section des cours de la Dore et de la Dogne avant et après leur réunion. L'accumulation de vases d'origine végétale dans les méandres et boucles iso-

lées y sont favorables. La recherche de l'arsenic organique après enrichissement sur résine confirmerait le caractère polygénique de l'eau produite par le puits Choussy-Perrière.

5 - ARSENIC ET FORCE IONIQUE

Ce paramètre s'intègre dans la "Théorie des Eaux Naturelles" telle que conçue par F. LEGRAND et G. POIRIER (1976). Le second auteur avait, en son temps, apporté sa précieuse collaboration à nos enseignements. Toutes les eaux naturelles possèdent une **force ionique**, même si leurs analyses respectives font apparaître un parfait équilibre anions/cations. Mais la profession est restée sourde à cette conception de l'hydrologie appliquée aux eaux minérales.

A La Bourboule, toute dérive de la force ionique implique le dégagement d'une énergie relevant de l'ionisation des substances dissoutes. Il n'y a pas d'initiation d'énergie sans réaction. Il faut donc que le bulletin d'analyses aille au-delà de son caractère "réglementaire". Pour cette raison, la surveillance du point figuratif de Choussy-Perrière sur le diagramme des domaines d'existence (Tab. VI) est la démarche incontournable déjà adoptée par tous les hydrogéochimistes qualifiés, notamment ceux qui ont apporté leur collaboration à cette session de formation qui se veut être une source d'information aussi large que possible auprès du personnel des deux sociétés, et à tous les niveaux.

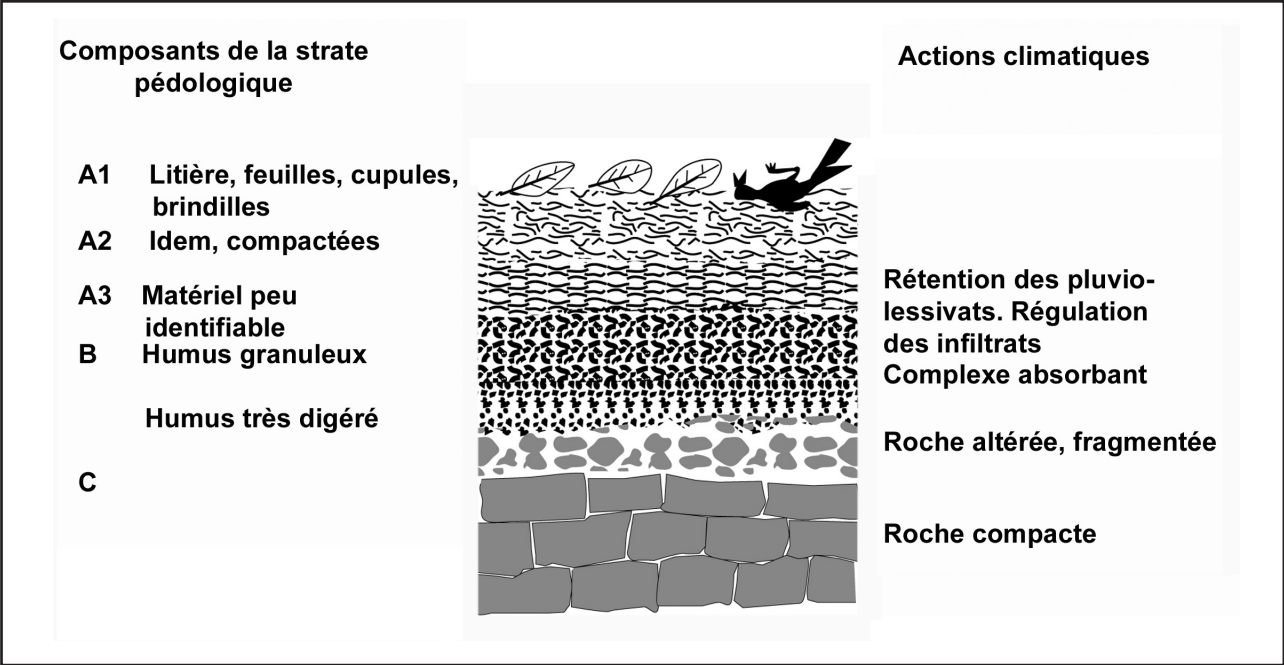


Figure 20 - Coupe schématique dans un sol sous couvert résineux. Remarques :
A1 – A3 : représente un milieu aéré, domaine de l'activité cryptogamique. Le caractère aérobique s'atténue avec la profondeur.
B1: plus compact est déficitaire en oxygène
B2 : est généralement en anaérobiose accentuée
C : est la surface d'érosion de la roche. Fissurée, elle est infiltrée par les précipitations chargées par des acides organiques

THÈME II

PRODUCTION D'EAU MINÉRALE GÉOTHERMALE RÉHABILITATION DU CAPTAGE CHOussy-PERRIÈRE.

J.-P. GIBERT
Docteur en Géologie.

1 - MOTIVATION DE LA RÉHABILITATION

1.1 - Un ouvrage de captage de conception ancienne

Datant de 1869, l'ouvrage de captage Choussy-Perrière, a été établi selon des conceptions largement dépassées. L'hydrogéologie n'existait pas encore.

Il est constitué d'un ensemble de trois puits, foncés à quelques mètres les uns des autres (Fig.1). Ces trois

Puits	Section m	Profondeur m
Perrière	4 x 2	53
Choussy 2	2 x 2	47
Réserve Choussy	2 x 4	23

Tableau I - Caractéristiques de différents puits de l'ouvrage de captage

puits sont interconnectés grâce à des galeries de circulation situées aux cotes :

- * - 23 m : Choussy 2 et Réserve Choussy (petite galerie) ;
- * - 53 m : Choussy 2 et Perrière (chambre).

Le dispositif est complété par les digitations d'une autre galerie, dont le plancher se trouve à la profondeur de 24 m. Ses caractéristiques sont :

- * longueur totale : 123 m ;
- * largeur moyenne : 2,5 m ;
- * hauteur moyenne : 3 m.

Toutes ces excavations dont les **parois sont nues**, représentent un volume déplacé de 1 820 m³, travaux considérables réalisés au pic de mineur (Fig. 1), dans des conditions d'hygrométrie et de

température difficiles.

Les deux premiers puits sont équipés de tubages en acier riveté. Leur dernière implantation partielle date de 1913.

Au cours d'essais de pompage, les mesures effectuées simultanément dans les différents puits et tubages montrent que les niveaux évoluent exactement en parallèle.

L'ensemble de l'ouvrage de captage est totalement interconnecté.

1.2 - Une action anthropique fragilisant l'environnement

Conséquence d'une guerre des puits au cours de laquelle plusieurs intervenants se disputent la propriété des ressources hydro-géothermales, neuf ouvrages de captage ont été foncés entre 1860 et 1880 (Fig. 2) ; deux points d'eau sont réellement exploités aujourd'hui.

Des risques importants de mélange du fluide géothermal avec des eaux provenant de la surface sont pris par le simple creusement d'une série de puits et de forages très rapprochés. Ces excavations constituent autant de drains vers la profondeur comme le remarque déjà V. NIVET en 1879 :

"Le vide créé dans les canaux qui "parcouraient ces anciennes "sources, y a attiré les eaux pluviales, qui sont venues se mêler "à l'eau minérale..."

Ces différents orifices, rebouchés avec du "tout-venant" selon l'expression d'un témoin oculaire, restent un danger jusqu'aujourd'hui, et ce d'autant plus que La

Bourboule, véritable ville nouvelle de la fin du XIX^e siècle, connaît un développement urbain explosif sans volonté de protection des ressources, si ce n'est celle destinée à empêcher la concurrence (poids d'une économie aveugle, faisant fi de la réalité de la nature) :

- * certains bâtiments construits en amont des flux aqueux, surplombent les captages ;
- * circulation automobile et des animaux d'élevage dans les zones sensibles ;
- * réseau d'assainissement enterré juste **au-dessus de la zone d'émergence**.

Bref, le catalogue quasi complet de ce qu'il aurait fallu éviter.

1.3 - Un captage sensible

Plusieurs observations montrent la sensibilité de cet ouvrage aux pénétrations d'origine superficielle :

- * des sondes de température, descendues dans les puits, révèlent à plusieurs profondeurs, des pics plus froids de plusieurs degrés ;
- * la géothermalité de l'eau pompée dans le puits Choussy 2 est inférieure de plusieurs degrés à celle recueillie dans le puits Perrière ;
- * pendant les pompages, la géothermalité de l'eau évolue, gagnant plusieurs degrés en quelques heures, avant de se stabiliser, ce qui correspond à l'épuisement d'un volume d'eau stockée, exportée et finalement se mêlant au flux géothermal au fil de l'eau.

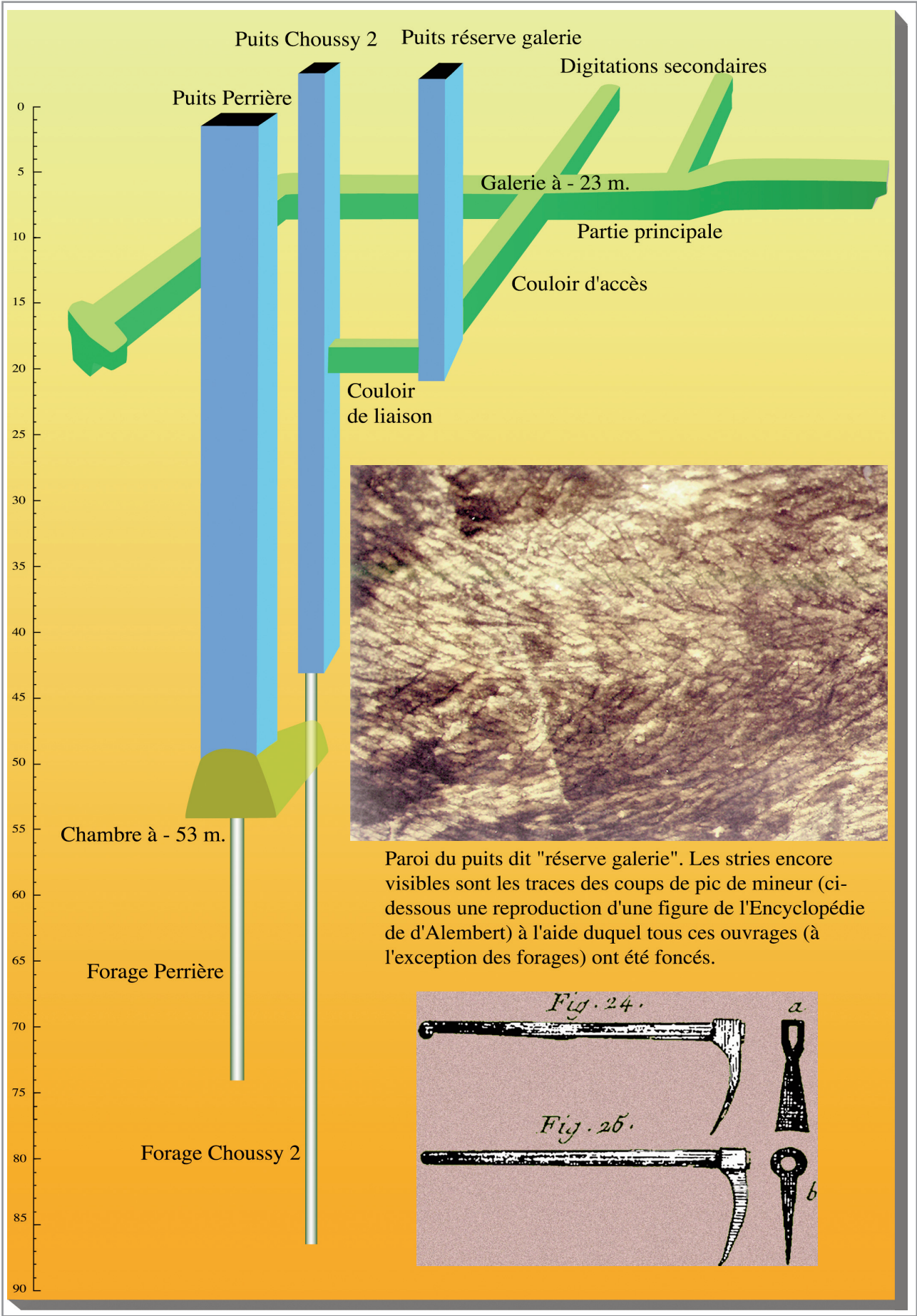


Figure 1 - Architecture de l'ouvrage Choussy-Périerre

1.4 - Une situation hydrogéologique complexe

• En profondeur

Le site se trouve sur la bordure ouest de la fosse d'effondrement volcano-tectonique (caldeira) de la Haute Dordogne, au cœur du grand massif volcanique du Mont-Dore.

Le fluide géothermal constitué d'eau, d'une minéralisation associée et des gaz d'accompagnement est d'origine profonde : la température d'équilibre est de 140 °C, soit une cote de - 4 500 mètres dans l'hypothèse d'un gradient géothermique normal de 3,3°C/100 mètres.

En fait, des mesures géophysiques employées lors d'une prospection géothermique, montrent que ce réservoir est situé à la profondeur de - 2 400 mètres, probablement au toit d'une chambre magmatique ancienne, relativement superficielle. Dans ce cas, le gradient géothermique local serait anormal : de 5 à 6 °C / 100 mètres. Héritage d'un volcanisme régional relativement récent ? En tout état de cause aller rechercher le fluide géothermal à ce niveau est une entreprise coûteuse. Qu'en-est-il plus près de la surface ?

• Près de la surface

Au voisinage du sol, le granite de La Bourboule constitue la bordure d'une cuvette, remplie de plusieurs centaines de mètres de matériaux d'origine volcanique constitués de dépôts volcano-sédimentaires, nappes de ponces remaniées et coulées de laves (Fig. 3).

Tardivement, les glaciers ont creusé la vallée de la Dordogne, puis, lors de leur fonte, l'ont partiellement remplie de plusieurs dizaines de mètres de sédiments récents.

Un réseau de failles croisées hache le granite et les terrains volcano-sédimentaires.

Une série de failles de direction SW - NE est recoupée et déplacée par une seconde, de direction NNW - SSE dont le dernier jeu est le plus tardif à l'échelle locale. Ce système de fractures

permet la remontée à la surface du tronc géothermal d'origine profonde.

Sur la carte géologique et la représentation en relief de la rive droite de la Dordogne au niveau de La Bourboule (Fig. 3), les terrains volcanosédimentaires butent sur la bordure granitique, tandis que le relief de la Roche des Fées est constitué d'un voussoir de granite orienté suivant une direction SW -NE.

Cette analyse du contrôle géologique des émergences nous aide à distinguer les points d'eau directement liés au tronc géothermal, de ceux situés à une distance plus grande. Ce sont des gisements secondaires, provenant de fuites du filon principal pénétrant par porosité ou par circulation le réticulaire fissural étroit des terrains volcano-sédimentaires. Ces eaux géothermales se mélangent avec d'autres, d'origine plus superficielle. La situation hydrogéologique du site peut se modéliser comme la conséquence de la confrontation d'au moins quatre systèmes aquifères, jouant les uns par rapport aux autres en contraintes de pression et contre-pression, se mélangeant en proportions indéterminées au niveau de leurs interfaces (Fig.4).

Le premier système aquifère est constitué d'eaux froides provenant d'infiltrations directes dans la montagne, en surplomb de La Bourboule, descendant dans les failles, fissures et diaclases du granite. C'est contre ce système en forte pression hydraulique (plusieurs dizaines de bars) que doit lutter le tronc géothermal, s'écoulant lui aussi par le même système fissural, pour accéder à la surface. A différents niveaux s'opèrent des mélanges abaissant la température, la concentration minérale et la teneur en gaz du fluide géothermal. Dans le détail, deux fluides ne se mélangent pas simplement comme dans un appareil ménager. Les deux

courants glissent l'un par rapport à l'autre par différence de température et de densité. La surface de contact est le siège du mélange s'effectuant de manière progressive.

Deux autres aquifères suivent le cours de la Dordogne.

L'un constitue les nappes dites d'accompagnement de la rivière, incorporées dans les niveaux graveleux et sableux des alluvions limno-glaciaires. La circulation s'effectue uniquement par porosité.

Le second, plus complexe, se développe dans les couches faiblement perméables et les fissures des terrains volcano-sédimentaires (c.f. photographies prises lors de la visite de la galerie à - 24 mètres) qui remplissent la fosse d'effondrement volcanotectonique (caldeira) de la Haute Dordogne.

L'eau provient de l'addition des infiltrations descendant depuis la surface du sol et des filets secondaires ascendants provenant du tronc géothermal principal. La faible perméabilité de l'ensemble explique la faiblesse des débits des puits de la Plage et Central. L'eau du puits Sedaiges en est sans doute un autre exemple. Dans ces conditions, la recherche de ressources géothermales plus profondes devient difficile : il s'agit de croiser par un forage, à quelques centaines de mètres de profondeur, un tronc géothermal épais de quelques décimètres, large de quelques mètres au maximum. Le fonçage de quelques quinze puits et forages pour un seul succès, celui de Perrière qui recoupe un filon géothermal à - 67 mètres de profondeur, montre toute la difficulté de l'affaire.

Sans abandonner ce projet de recherche de ressources profondes à long terme, il fallait envisager, pour l'exploitation à court et moyen terme, une première phase de réhabilitation des ouvrages de captage existants.

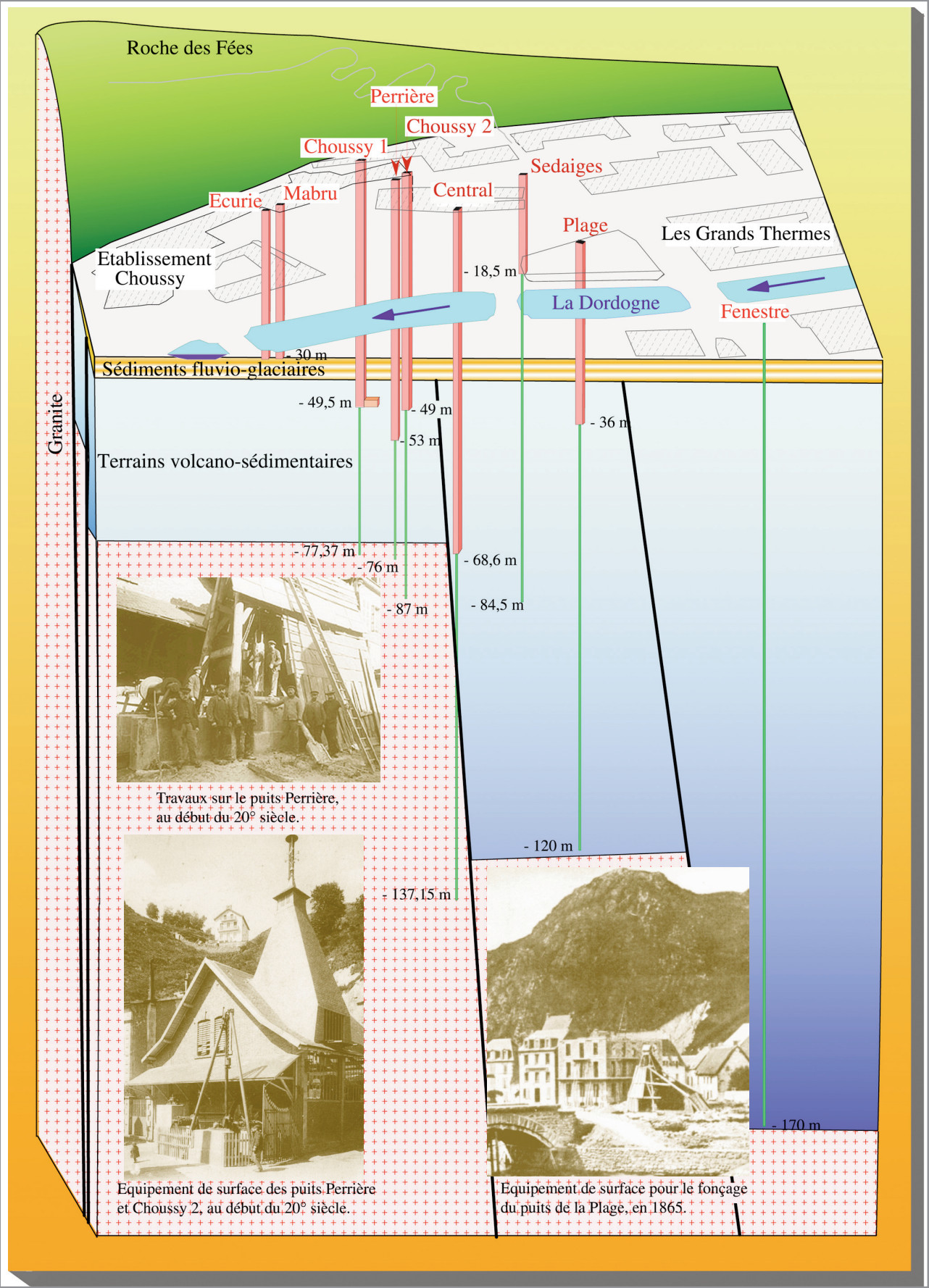


Figure 2 - Etat des captages à la fin du XIX^e siècle

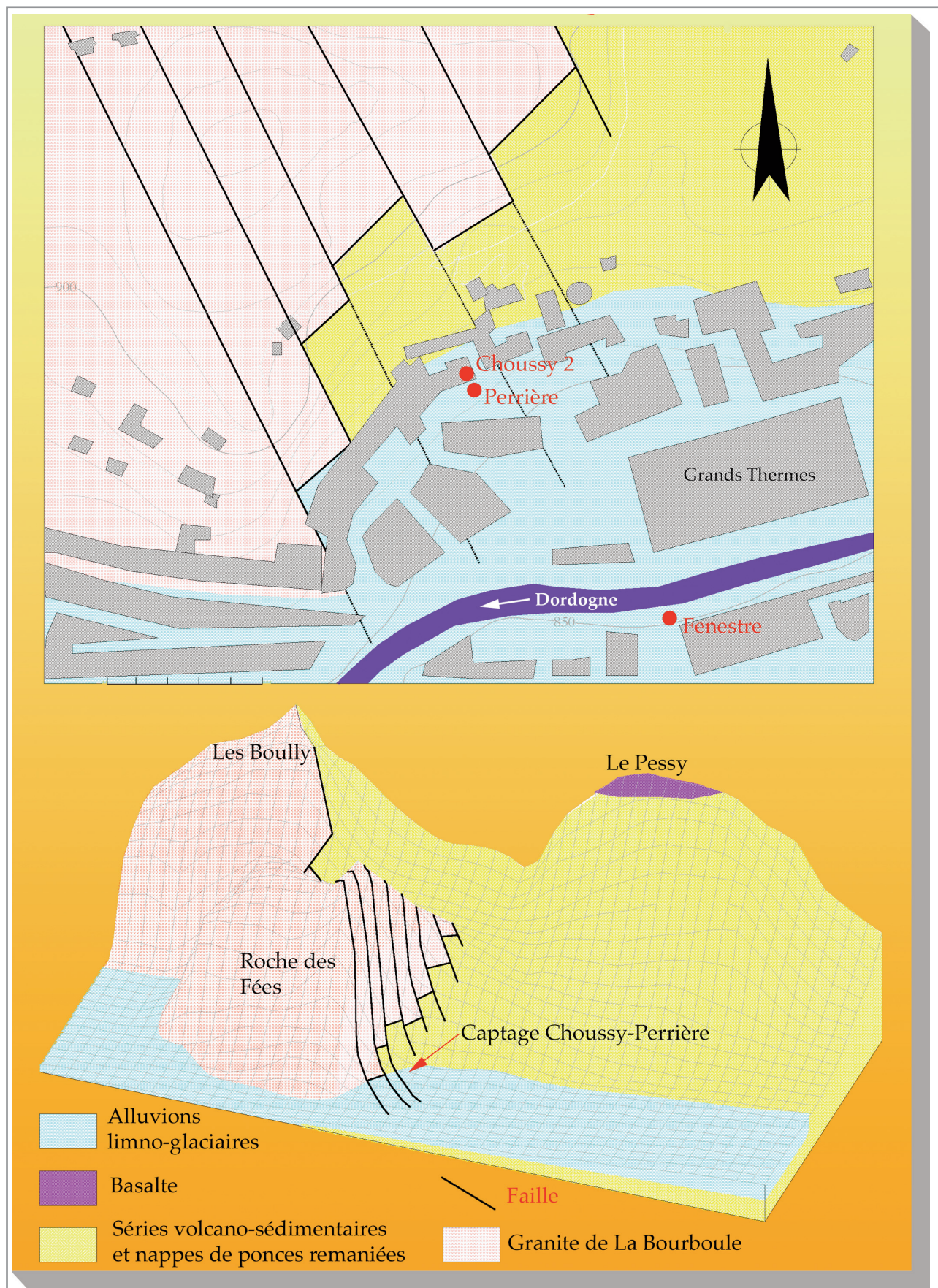


Figure 3 - Carte géologique et vue perspective des environs de l'ouvrage

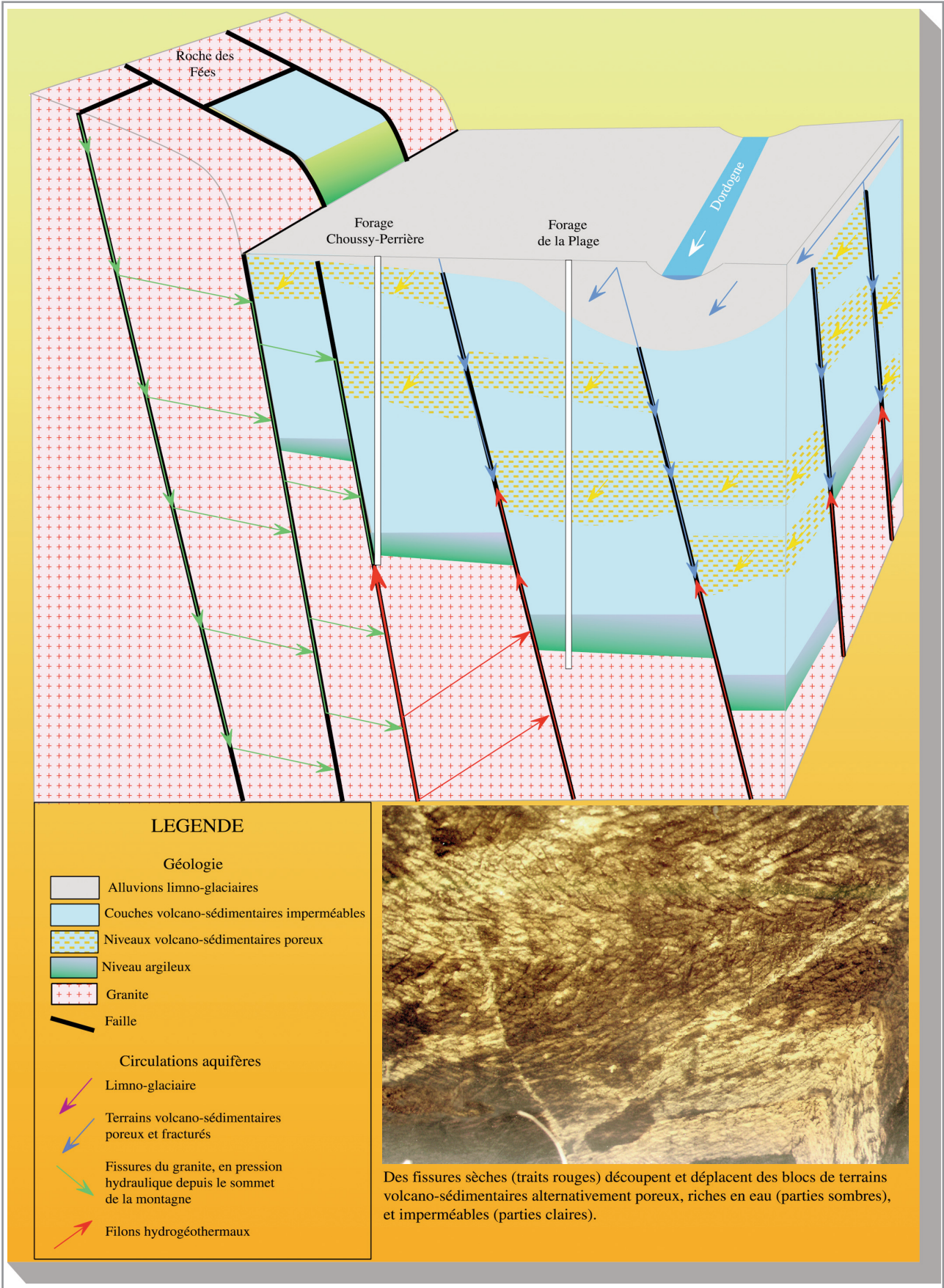


Figure 4 - Différents aquifères présents

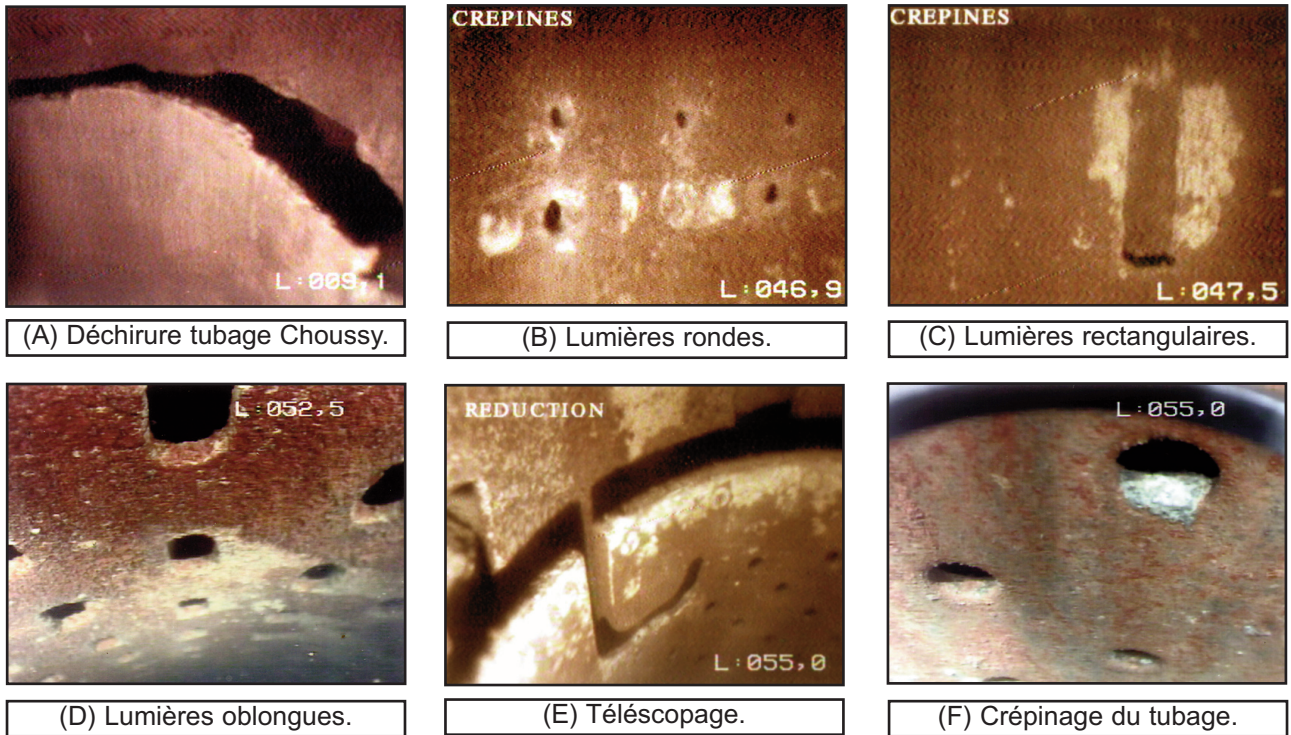


Figure 5 - Images de l'intérieur du tubage Choussy 2, prises par caméras immergées.

Les tubages anciens sont percés de nombreuses lumières, mettant en communication la circulation à l'intérieur de la colonne avec l'eau des **puits qui sont à parois nues**.

Sur les images ci-dessus (cotes de profondeur indiquées en blanc), il s'agit du tubage Choussy 2 qui est soit déchiré (A) soit ajouré volontairement à différents niveaux (B, C, D, E et F).

2 - DÉFINITION ET CONCEPTION DES TRAVAUX

L'objectif central revient à protéger, sur plusieurs dizaines de mètres de profondeur, l'ascension du fluide géothermal contre les irrptions d'eaux d'origine superficielle circulant dans les différents aquifères existant dans :

- * les failles et fissures du granite ;
- * le remplissage volcano-sédimentaire de la caldeira de la Haute-Dordogne ;
- * les dépôts limno-glaciaires occupant tout le fond de la vallée de la Dordogne.

- Une sonde descendue dans le forage Choussy 2 rencontre un sol solide à 57 mètres de profondeur, alors que le forage est réputé être descendu jusqu'à 84 mètres.

Décision : Il est décidé de procéder à un curage, au moins jusqu'au niveau du granite, afin d'augmenter la productivité.

- Une étude bibliographique approfondie, complétée par une phase d'exploration à l'aide de caméras immergées, aide à comprendre que les :

- * trois puits sont à parois nues (Fig. 4) ;
- * tubages anciens équipants les puits Choussy 2 et Perrière sont percés de nombreuses fenêtres (Fig. 5), expliquant l'interconnexion complète entre l'eau à l'intérieur des colonnes avec celle des puits.

Décision : un système de double protection est choisi :

- * extraire les anciennes colonnes afin de les remplacer par un nouveau tubage étanche, ou, en cas d'échec, introduire ce nouvel équipement à l'intérieur de l'ancienne installation ;
- * reboucher les anciens puits avec un matériau étanche tel que du béton. Toutefois, étant donné la masse très importante à injecter : plus de 600 m³, soit environ 1 500 tonnes de matériau, de la

pouzzolane sera utilisée aux endroits où l'étanchéité totale n'est pas absolument nécessaire.

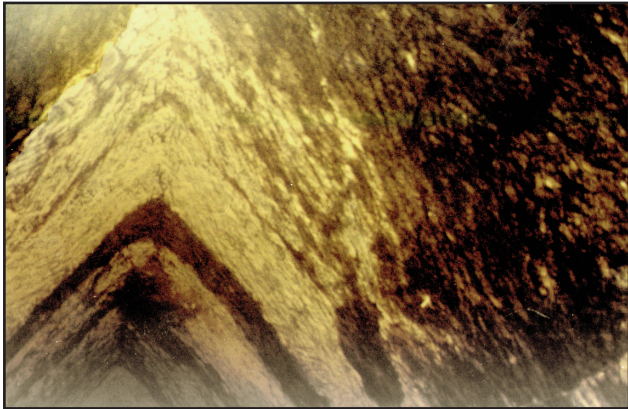
- Visitée, après assèchement et aération, la galerie à - 24 mètres a permis d'observer *in-situ* le rôle de drain joué par cet ouvrage, permettant aux eaux d'infiltration de faire irruption dans le système géothermal (Fig. 6).

Décision : il est jugé nécessaire d'établir une coupure étanche de la communication entre le puits Choussy 2 et l'ensemble constitué par le puits Réserve Galerie et la galerie à - 23 mètres, puis de maintenir cette dernière asséchée par pompage.

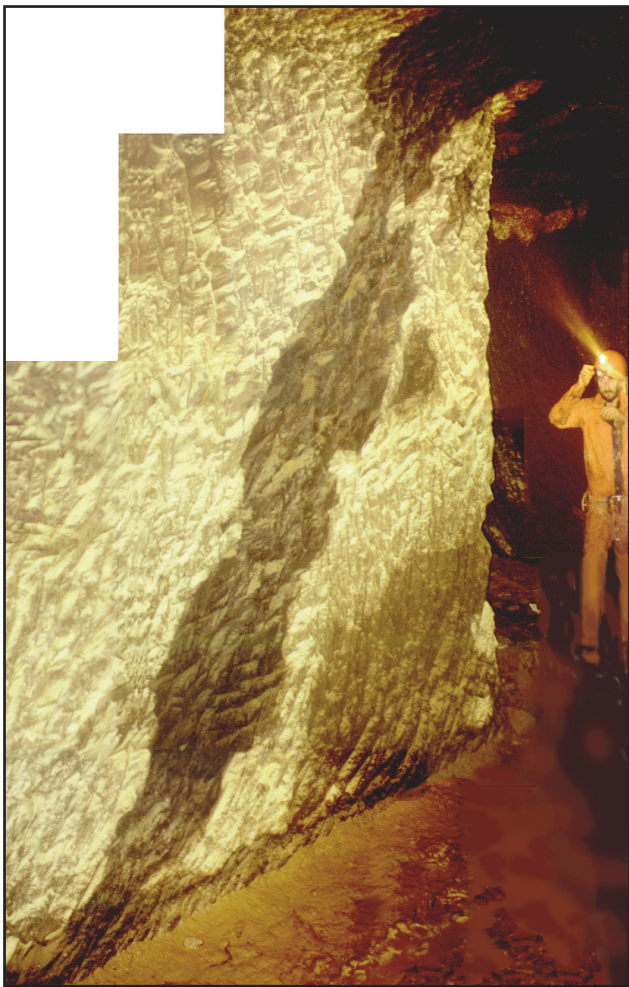
A la fin de ces travaux préliminaires, une reconstitution cohérente de l'architecture complexe de l'ouvrage de captage peu être exécutée : partie supérieure Fig. 7a et inférieure Fig. 7b.



Lors de la visite de la galerie à - 24m, des preuves directes ou indirectes d'infiltration sont observées, en tête de puits (A), sur les parois (B et C), ou sur le sol (D) de la galerie. Le fer réduit (Fe^{++}) dépose sous forme d'hydroxyde (Fe^{+++}) rouge après oxydation par l'oxygène apporté par les eaux de surface.



(B) Sur les parois du puits "Réserve Galerie", les parties sombres identifient les niveaux poreux.



(C) En sombre : fissure productive d'eau sur une paroi de la galerie à - 24 mètres.



(D) Dépôts rouges sur le sol de la galerie à - 24 m.

Figure 6 - Visite de la galerie à - 24 mètres.

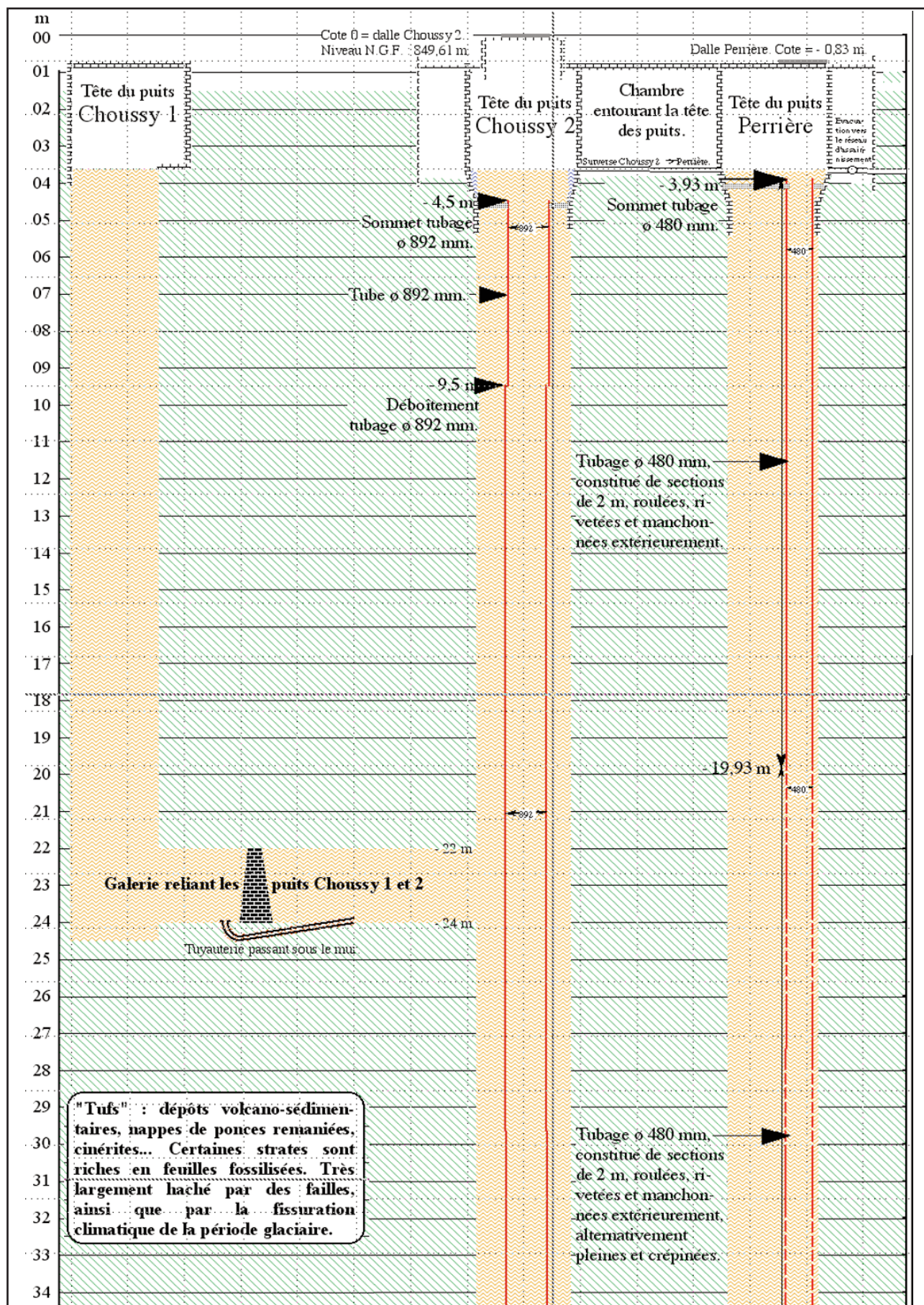


Figure 7a - Architecture de l'ouvrage de captage Choussy-Perrière avant travaux, partie supérieure

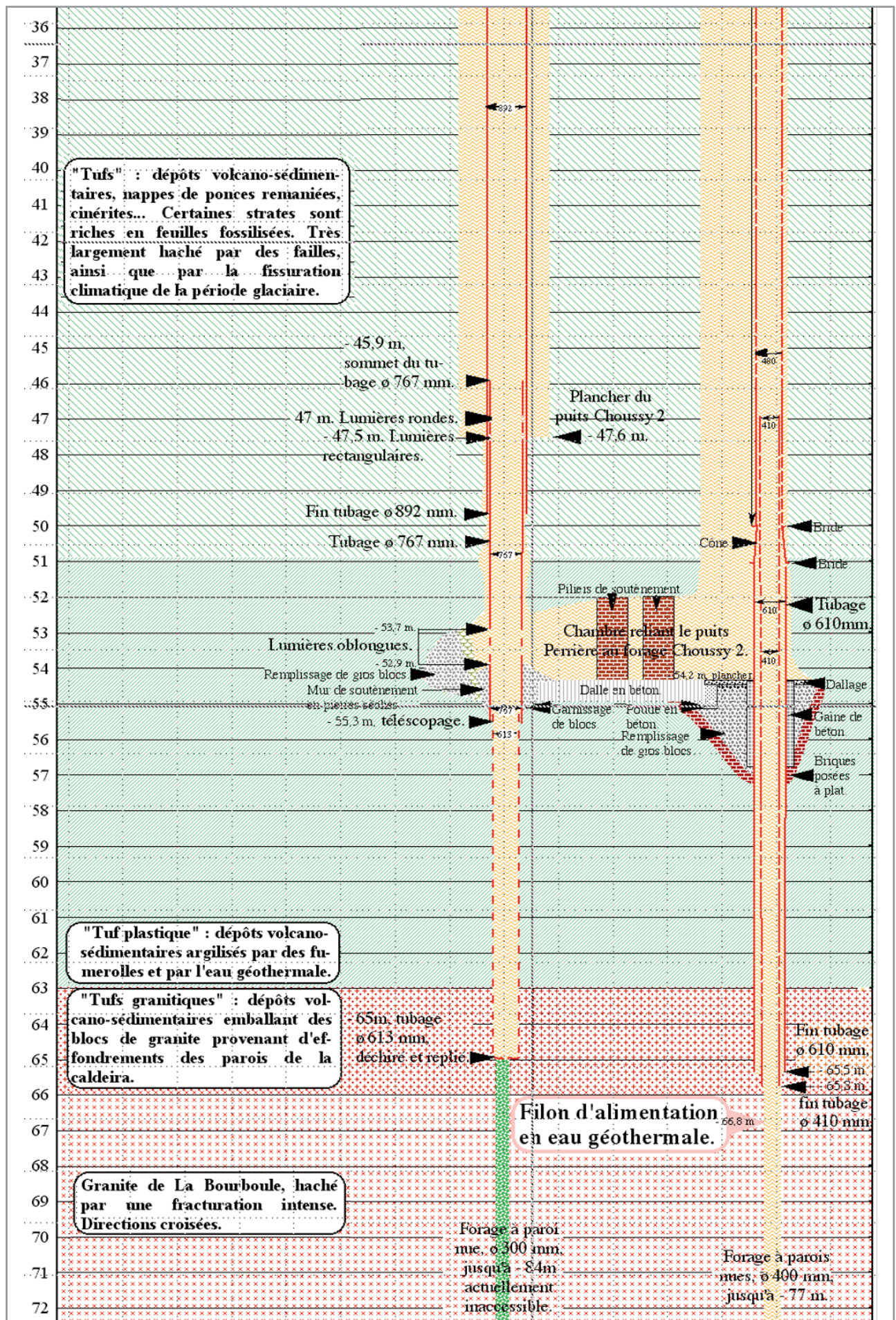


Figure 7b - Architecture de l'ouvrage de captage Choussy-Perrière avant travaux, partie inférieure.

3 - DÉROULEMENT

3.1 - Conditions de travail

Les temps d'intervention sont limités aux périodes d'interruption annuelles : premier novembre au quinze décembre, soit une durée maximum de six semaines par saison. En conséquence, les travaux se sont déroulés sur cinq campagnes enchainées de 1997 à 2001.

En plein hiver, le gel atteint - 20°C. La neige rend difficiles certaines phases de travaux. Par exemple, le béton, élaboré dans une centrale distante de 20 km ne pouvait être livré en temps utile, ou gelait dans les toupies.

Si l'accès au puits Perrière est très facile, des difficultés surviennent pour atteindre le puits Choussy 2 localisé à l'intérieur des bâtiments techniques :

- * hauteur de plafond limitée à 6 mètres ;
- * défaut d'alignement de la tête de puits avec la partie un peu plus élevée du plafond, il est regrettable que le petit clocheton existant lors des travaux au début du siècle (Fig. 3) ait été détruit entre temps.

Un aménagement avec une technique ancienne est alors nécessaire : chèvre équipée d'un treuil de faible puissance (Fig. 8). La longueur des éléments de tubages neufs doit être limitée à trois mètres, multipliant le nombre de soudures.

3.2 - Nettoyage du puits Choussy 2

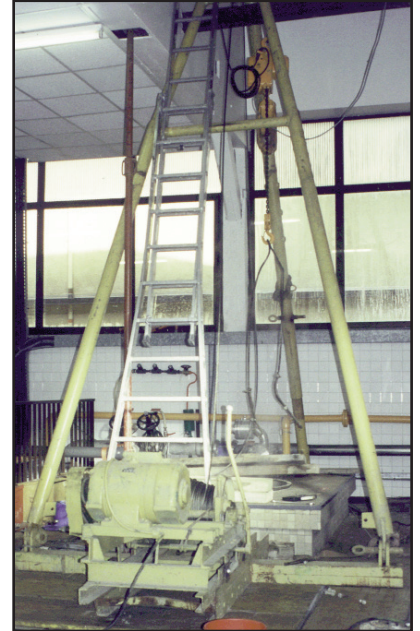
La première technique mise en œuvre est celle de l'air-lift : de l'air est injecté sous forte pression à la base d'un tube d'acier descendu dans le forage. A la base de la colonne de fortes turbulences arrachent les matériaux du fond. En remontant à l'intérieur du tube, l'air entraîne ces matériaux vers la surface (Fig. 8).

La progression de l'air-lift s'avère peu importante et la cote d'arrêt se stabilise à - 65 mètres, et ce malgré la mise en œuvre d'outils perforateurs (E, Fig. 8).

Une visite par caméra immergée permet d'identifier un plancher de brique impossible à transpercer par cette technique (Fig.9).



(A) Puits Perrière : extraction d'un élément de pompe.



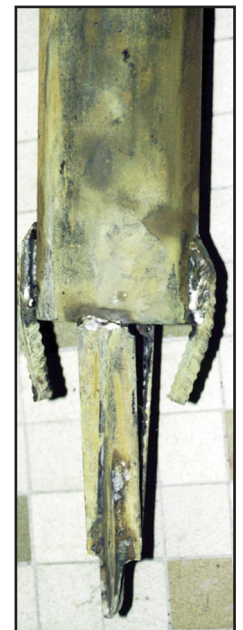
(B) Puits Choussy 2 : Installations techniques en tête de puits.



(C) Descente de la colonne pour l'air-lift.



<-- (D) Chambre à air en tête de la colonne d'air-lift.



(E) Tête de colonne perforatrice.

<-- (F) Bac de récupération et de filtration des boues extraites.

Figure 8 - Equipements des têtes de puits pour travaux et technique d'air lift.



Figure 9 - Parement de brique dégagé par air-lift au fond du forage Choussy 2.

Il est décidé de surmonter cet obstacle en poursuivant le nettoyage du forage au moyen de la technique trépan + soupape au câble (Fig. 11).

Plusieurs passages sont effectués sans résultat appréciable. Divers débris sont remontés : briquettes, granite, verre, boulons, bois, fil de fer ainsi qu'un élément en bronze (soupape de machine à vapeur ?). Une dernière opération d'air-lift nettoie le fond du puits afin d'y descendre une caméra.

A la cote - 65 mètres une tôle de tubage déchirée, repliée sur le fond du forage (F et G, Fig. 11), empêche tout avancement avec

les techniques d'air-lift ou de battage par trépan.

Ces déchirures sont **anciennes** et ont dû être produites au cours de tentatives de nettoyage antérieures. L'opération de curage du forage Choussy 2 est abandonnée à la cote - 60,25 mètres.

3.3 - Extraction des anciens tubages

La tentative d'arrachement des tubages s'avère délicate étant donné l'ancienneté des équipements ayant fragilisé l'acier et permis le développement de dépôts minéraux incrustants.

L'opération est tentée à l'aide

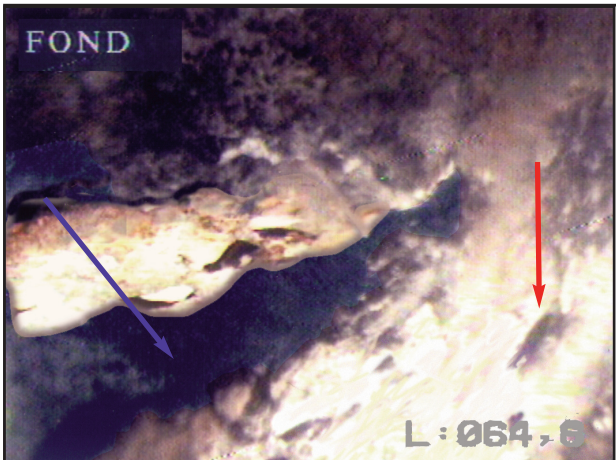


(A) Plaque permettant de tirer sur un tube.

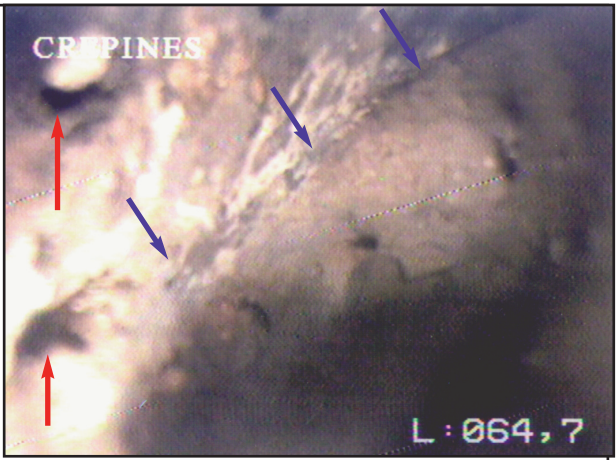


(B) Descente de la plaque.

Figure 10 - Système d'accrochage des anciens tubes.



(F) Déchirure du tubage (flèche bleue), celui-ci est crépiné (flèche rouge).



(G) Pliage du tubage (flèches bleues) au fond du forage Choussy 2.

Figure 11 - Etat du pied du tubage ancien.



(A) Mise en place du trépan.



(B) Couteau en tête de trépan.



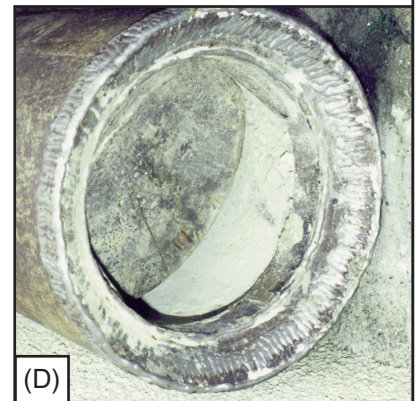
(C) Vidange de la soupape remontée à la surface.

Le trépan est un outil en acier lourd. Une lame à son extrémité inférieure concasse les terrains au fond du forage lorsqu'il est lâché sur une hauteur de plusieurs mètres.



(D)

Corps de la soupape (D), à son extrémité inférieure celle-ci est munie d'un clapet (E) s'ouvrant lorsqu'elle pénètre dans les matériaux broyés par le trépan. Ce clapet se referme lors de la remontée de l'outil en retenant les débris.



(D)

Figure 12 - Trépan et soupape.

d'une plaque oblongue, dont le grand axe est plus long que le diamètre du tubage. Un câble fixé à une extrémité permet de descendre la plaque en oblique au niveau du tiers supérieur de la colonne.

Redressée par un second câble accroché à l'extrémité opposée, elle se coince contre l'intrados du tube. L'opération de tirage peut alors commencer.

Malgré des efforts de 10 tonnes, les colonnes en place ne bougent pas. Il est alors décidé de stopper cette opération devant les risques de déformation susceptibles d'empêcher la descente des nouvelles colonnes voire des pompes.

3.4 Nouveaux tubages

Après passage de diamètres (A, Pl. XII) servant à mesurer le diamètre interne des anciennes

colonnes, des tubes nouveaux sont implantés à l'intérieur des anciens.

Pour lutter au maximum contre les phénomènes diélectriques et les corrosions qui les accompagnent, c'est un acier ordinaire, le plus proche possible de celui utilisé au 19^e siècle, qui est utilisé. Toujours dans le même objectif les centreurs sont construits en matériaux isolants (P.V.C.).

Choussy 2

Les tubages sont mis en place par l'intermédiaire d'une chèvre de 3,5 mètres de haut, munie d'un palan à chaîne de 4,5 tonnes (D, Fig. 13), autorisant la descente d'éléments de trois mètres de long (B, Fig. 13).

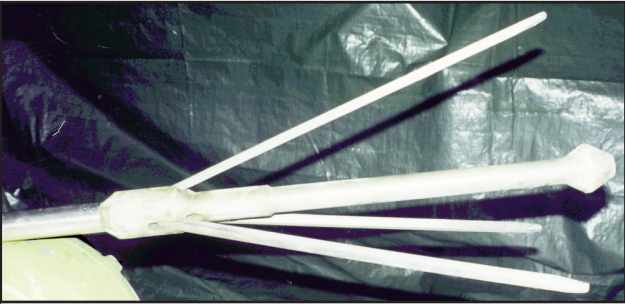
Chacun de ces tubes, manchonné (C, Fig. 13), est soudé au précédent et descendu dans le puits au fur et à mesure.

L'opération prend du temps, d'autant plus qu'une première colonne, longue de 40 mètres, doit être remontée et dessoudée : trop large elle ne peut pas descendre dans l'ancien tubage sans frottement excessif.

Cette impossibilité de coulisser est due à une accumulation de facteurs : erreur de conception du packer trop rigide, incertitude liée au type de diamètre utilisé (conçu pour des eaux froides, la température de l'eau géothermale a perturbé son fonctionnement) et inclinaison du puits.

Une nouvelle colonne, mieux adaptée, est ensuite redescendue.

En raison d'un compromis entre le poids total de la colonne et sa capacité à résister aux déformations, les tubes sont de deux diamètres et trois épaisseurs différentes :



(A) Diaméreur à trois branches.

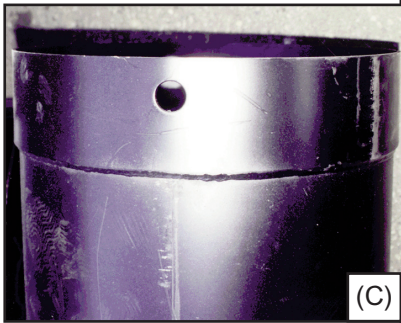


(B) Stockage des éléments de tubage (l ≈ 3 m).

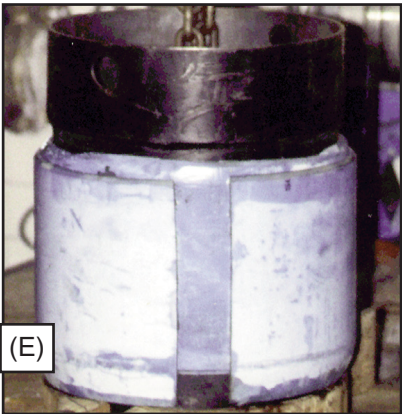


(D) Descente du tubage avec le palan à chaînes.

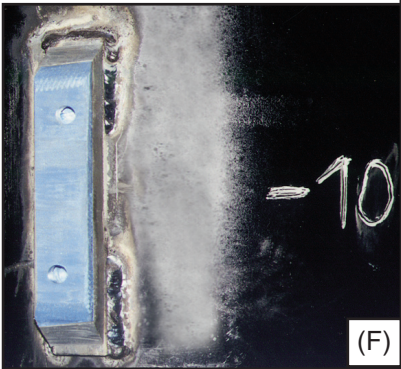
(C) Partie supérieure d'un élément de tube, manchonnée, afin de permettre l'emboîtement et le positionnement de l'élément venant dessus avant soudage. Les trous dans le manchon sont destinés au portage.



(C)



(E)



(F)

Dispositifs d'isolation électrique : manchon à la base du tube (E), centreur disposé le long de la colonne (F).

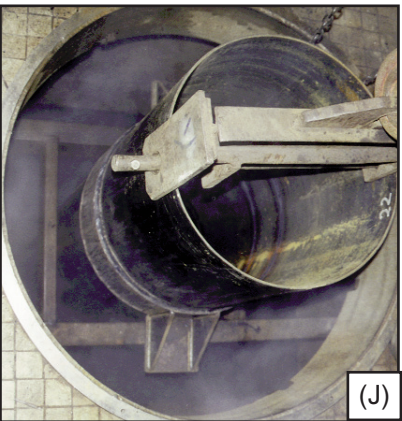


(G)



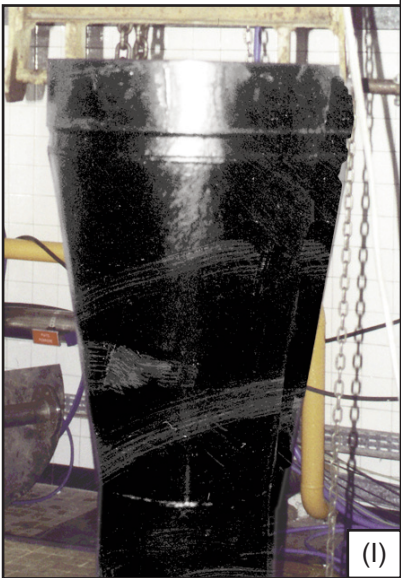
(H)

Fenêtres destinée à la pénétration de l'eau géothermale à l'intérieur de la nouvelle colonne : lumières oblongues à la base du tubage (G), rectangulaires au niveau de la chambre à - 53 m (H).



(J)

(J) Ancrage de la partie supérieure de la colonne.



(I)

(I) Cône de réduction du ø 500 mm au ø 300 mm.

Figure 13 - Implantation du nouveau tubage.

- * ø intérieur 300 mm, - 64,8 à 50,0 mètres :.....4 mm ø extérieur 308 mm ;
- * ø intérieur 500 mm, - 50,0 à 36,0 mètres :.....6 mm ø extérieur 512 mm ;
- * ø intérieur 500 mm, - 36,0 à 00,0 mètres :.....5 mm ø extérieur 510 mm.

Le passage du ø 500 mm au ø 300 mm se fait par l'intermédiaire d'un cône de réduction (I, Fig. 13). L'isolation électrique est assurée par un manchon de P.V.C. à la base de la colonne, et par quatre centreurs à patin de P.V.C., situés à la profondeur de - 10 mètres. L'ensemble est suspendu sur des poutrelles d'acier (IPN) mis en place sous la dalle de béton de tête de puits par l'intermédiaire d'un collier de suspension. A la base le tubage est bloqué dans un petit massif de 400 litres de laitier à la densité 1,83 kg/litre.

Perrière

La mise en place du nouveau tubage de Perrière a été contra-

riée par un incident grave : la chute d'une partie de la colonne qui s'est détachée du matériel de portage pour venir s'écraser sur le sommet de l'ancien tubage.

Chèvre et treuil (A, Fig. 14) n'ont pu résister à une nuit de gel intense. Un brusque déblocage du frein a provoqué une forte secousse.

Conséquence : la colonne en cours de descente s'est détachée pour tomber d'une hauteur d'une quinzaine de mètres.

La base de la colonne neuve se plie totalement (B, Fig. 14) en s'encastrant dans la partie supérieure de l'ancien tubage.

Il fallut exercer une force de 15 tonnes pour séparer les deux tubages, heureusement sans abîmer plus avant l'ancienne installation.

Une machine de forage, associée à une puissante pompe est ensuite nécessaire (C, Fig. 14) pour découper, à l'aide d'un outil spécialement conçu, une section de deux mètres de l'ancien tubage et

la remonter à la surface. L'opération de descente du nouveau tubage se poursuit ensuite à l'aide d'une grue pouvant porter des éléments de 10 mètres de long, ce qui a permis d'accélérer le processus (A, Fig. 15). Comme pour Choussy 2, chacun de ces tubes, manchonné, soudé au précédent est descendu dans le puits au fur et à mesure.

La partie inférieure, en forme de cône, vient s'appuyer sur la partie supérieure de l'ancienne colonne (B, Fig. 15).

L' isolation électrique avec les anciens équipements est assurée par des patins isolants en P.V.C. (E, Fig. 15).

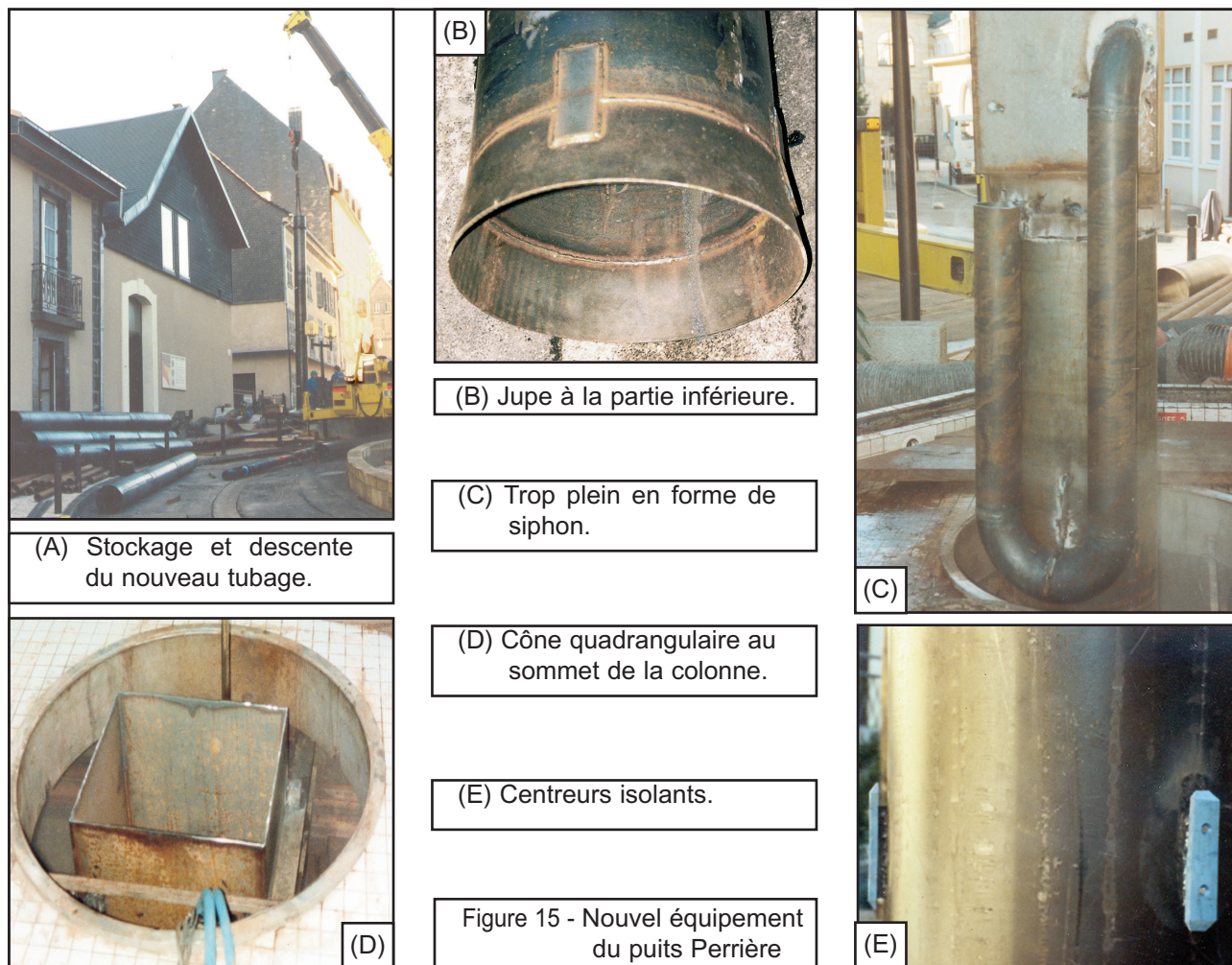
La partie supérieure se termine en cône à section carrée (D, Fig. 15). Elle est munie d'un trop-plein en forme de siphon, situé à 3 mètres de profondeur (C, Fig. 15).

Ce dispositif, branché sur un réseau d'évacuation, empêche l'eau géothermale de jaillir à la surface et d'inonder les installations techniques souterraines.



(B) Partie inférieure de la colonne après sa chute.
(C) Machine de forage installée afin de permettre le découpage et l'extraction d'une section de l'ancienne colonne abîmée par la chute de la nouvelle colonne.

Figure 14 - Installations à la surface du puits Perrière



3.5 - Cimentation de l'annulaire

Entre les anciens et les nouveaux tubages introduits à l'intérieur, existe un espace annulaire comblé par du laitier de ciment afin d'assurer une bonne étanchéité.

Le laitier, fabriqué dans différents types de machines (B, C, E et F, Fig. 16) selon la quantité nécessaire, la viscosité et la densité de la préparation, est injecté dans l'entrefer à l'aide de cannes (D, Fig. 16), descendues au plus près du dispositif chargé de bloquer le fluide à la bonne hauteur, ce qui évite les mélanges avec l'eau.

Dans les deux puits il est nécessaire d'implanter un système de blocage du laitier injecté : le packer.

Les modalités sont relativement différentes dans les deux puits en raison d'une architecture d'équipement spécifique.

Choussy 2

L'espace annulaire entre l'ancien tubage de \varnothing intérieur 892 mm et le nouveau de \varnothing extérieur 506 mm

permet l'implantation d'un packer large de près de vingt centimètres constitué de deux plaques de caoutchouc tenues par des anneaux d'acier (A, FIG. 16).

L'espace est normalement relativement large, mais l'ancienne colonne étant voilée, le laitier a dû être injecté par des cannes de diamètre 20/27 mm.

Au niveau ≈ 44 mètres l'ancien tubage est percé de fenêtres risquant de provoquer l'évasion du ciment vers l'extérieur où il se perdrait dans le puits.

Il fallut créer un produit $d = 1$, par adjonction de fines bulles de verre, à prise rapide (par mélange avec du plâtre), ayant la propriété de rester à l'endroit où il est injecté.

Après la réussite du dépôt de ce produit sur une hauteur d'un mètre, une cimentation normale peut reprendre.

Le haut de la colonne ancienne, déboîtée à - 9,5 mètres, est comblé avec du béton.

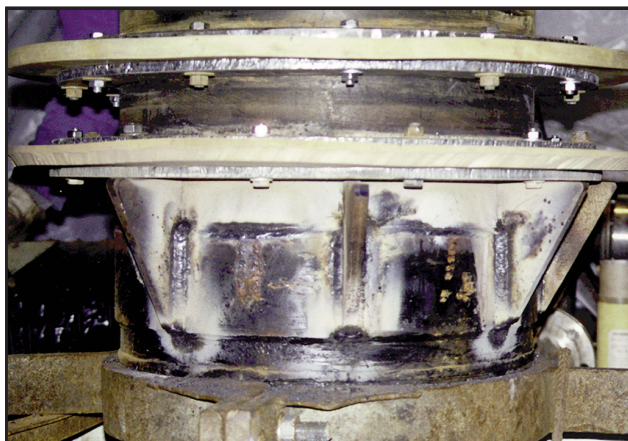
Perrière

La colonne ancienne au \varnothing intérieur de 480 mm, la nouvelle au \varnothing extérieur de 410 mm, laissent un espace annulaire large de 35 mm. Dans cet entrefer étroit, il faut concevoir un packer constitué d'une jupe de caoutchouc très souple (G, Fig. 16), fixée à sa base par un cerclage d'acier et ouverte vers le haut.

Les trois cannes d'injection, de faible diamètre (8 mm), sont soudées (H, Fig. 16 sur la colonne au fur et à mesure de sa descente, pour avoir la certitude d'injecter le laitier dans le cône inversé du packer.

La cimentation de l'annulaire se poursuit ensuite par injection, dans la partie supérieure des deux tubes, d'un laitier de forte densité, afin d'assurer sa descente dans l'entrefer.

Afin d'éviter la fuite de ce laitier dans le puits par les perforations de l'ancien tubage, du plâtre est mélangé au ciment afin d'assurer une prise très rapide.



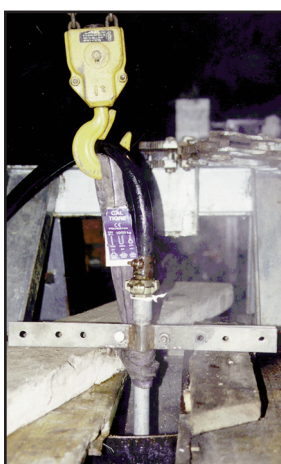
(A) Packer de Choussy 2.



(B) Pompe d'injection du laitier de faible densité.



(C) Fabrication du laitier de faible densité.



(D) Sommet d'une canne d'injection.



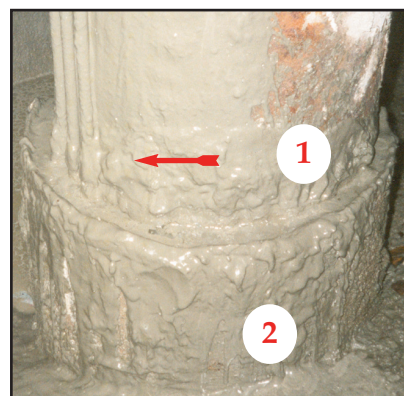
(E) Machine à fabriquer et injecter du laitier en faible quantité.



(F) Machine à fabriquer et injecter du laitier en forte quantité.



(G) Packer de Perrière.



(H) Cimentation de l'annulaire de Perrière, entre le nouveau (1) et l'ancien (2) tubage. La flèche identifie les trois cannes soudées sur le tube ayant permis l'injection du laitier dans le packer.

Figure 16 - Cimentation des annulaires.

3.6 - Comblement des puits

Le comblement des puits a pour ambition d'empêcher la circulation de fluides le long des colonnes de tubages tout en permettant un passage entre les forages Choussy 2 et Perrière au niveau de la chambre à - 53 mètres.

Dans cet objectif, les matériaux utilisés sont :

- * De la pouzzolane (nom local pour des fragments de roches effusives projetés par des volcans de type basaltique).

Ce matériau a pour avantage d'être léger, poreux et disponible régionalement en différentes granulométries.

Son amenée sur site s'effectue par toupie.

Un tapis roulant (Fig. 17-A) la conduit en tête de puits où, après désinfection (Fig. 17-B) elle est projetée dans un entonnoir situé à la partie supérieure d'un tubage de large diamètre.

- * Des bétons de différentes densités, fabriqués dans une centrale peu éloignée sont apportés sur site par toupie (Fig. 17-C).

L'injection s'effectue soit directement par tapis ou par une pompe spécialisée (Fig. 17-D).

Une colonne de tubage conduit le béton au plus près de l'ancien plancher afin d'éviter au maximum le mélange avec l'eau des puits. A l'extrémité inférieure de la colonne un dispositif rend impossible les effets de jet (Fig. 17-F).

Choussy 2

Ce puits ne descend pas jusqu'à la chambre à - 53 m, il en est séparé par une couche d'environ 5 m de terrains volcano-sédimentaires (Fig.18.b).

Il est possible que cette assise ne puisse pas résister au poids d'une couche de béton. Par ailleurs ce plancher n'est pas étanche et il existe des passages au contact

du tubage.

C'est pourquoi une couche de 7 m de pouzzolane de granulométrie de plus en plus fine vers le haut, est tout d'abord injectée.

Lui succède un bouchon de béton d'environ 2 m d'épaisseur. Le puits est ensuite rempli de pouzzolane jusqu'à la cote - 26,8 m, soit 1,2 m au-dessous du plancher de la galerie dite "réservoir" (Fig. 18.a).

Un gros volume de béton est alors injecté jusqu'à la cote - 16 m. Il a pour objectif de colmater le couloir de communication entre le puits Choussy 2 et le puits réserve galerie en s'appuyant sur le mur préexistant (Fig. 18.a).

Suit une couche de 11 m de pouzzolane, sur laquelle s'appuie les 2 m du bouchon de béton terminal. Au total 134 m³ de pouzzolane et 70 m³ de béton (environ 180 tonnes) sont utilisés pour reboucher le puits Choussy 2.

Perrière

Le puits Perrière aboutit dans la chambre à - 54 m, il faut assurer le passage de l'eau avec le tubage Choussy qui traverse le fond de cette même chambre.

Le comblement débute donc par de la pouzzolane à granulométrie importante : 80/150 mm, assurant une transmissivité de haut niveau. Cette opération continue jusqu'à la cote \approx - 49 m, à laquelle le niveau du toit de la chambre a été largement dépassé. 48 m³ de matériaux sont nécessaires pour cette opération.

Le seul comblement du puits en demandant 40 m³, une partie de la pouzzolane a donc coulé dans la galerie (Fig. 18.b).

Vient ensuite environ 40 m³ de pouzzolane de granulométrie diverse sur une hauteur d'environ 5 m.

Suit un bouchon de béton épais de 5 mètres, sur lequel une couche de laitier de 3,5 m d'épaisseur.

Ce laitier pénètre dans l'entrefer par les fenêtres de l'ancien tubage, au dessus du niveau du packer. Il permet d'assurer l'imperméabilité de l'espace annulaire à un niveau où il est quasiment

impossible de faire pénétrer des cannes d'injection en raison de l'étroitesse de l'interstice disponible entre les deux tubages.

Plus de 200 m³ de pouzzolane sont ensuite injectés, de la cote \approx - 35 m jusqu'à \approx - 8 m.

Un bouchon de béton complète le dispositif jusqu'à la cote - 3 mètres.

4 - Situation après travaux

Le fluide géothermal pénètre dans l'ouvrage de captage à - 66,8 mètres. Son ascension est protégée de toute pénétration d'autres fluides aux cotes \approx - 43 mètres pour le tubage de Perrière et \approx - 48 mètres pour celui de Choussy 2 par un nouveau tubage étanche. Ces nouvelles colonnes sont isolées des anciennes par une cimentation continue de l'entrefer. Les circulations de fluides divers dans les puits, si elle ne sont pas **totale**ment supprimées en raison de l'utilisation de pouzzolane poreuse, **sont fortement diminuées**.

Les infiltrations s'opérant en tête de puits, sont maintenant stoppées par les bouchons de béton situés près de la surface.

L'ancienne communication avec le puits et la galerie à - 24 mètres est **totale**ment obturée. La galerie est **maintenue asséchée** par une pompe située en pied de puits (Pl. XVIa).

En fait cette galerie sert de drain en amont des puits contre toutes les infiltrations venant de la pente du relief de la Roche des Fées.

5 - Résultats

Au cours d'essais de pompage réalisés lorsque les entrefers des tubages Choussy 2 et Perrière étaient cimentés, les puits n'étant pas encore comblés, nous avons constaté que le niveaux dans les colonnes sont abaissés de 25 mètres, tandis que celui des puits reste stable. L'**isolation** entre l'ouvrage de captage rénové et son environnement est donc **effective**.



(A) La pouzzolane, amenée par des toupies est injectée dans les puits par tapis roulant.



(B) Système de désinfection de la pouzzolane.



Le béton, fabriqué dans une centrale, est amené sur site par toupie. Il est ensuite injecté, soit directement lorsque c'est possible (C) ;

(C)

soit par l'intermédiaire d'une pompe (D).

(D)



(E) Sommet de la canne d'injection de grand diamètre du béton.

(F)

A son extrémité inférieure un brise-jet (F) empêche le béton de tomber avec violence en créant des tourbillons de mélange avec l'eau.



Figure 17 - Injection de béton et de pouzzolane dans les puits.

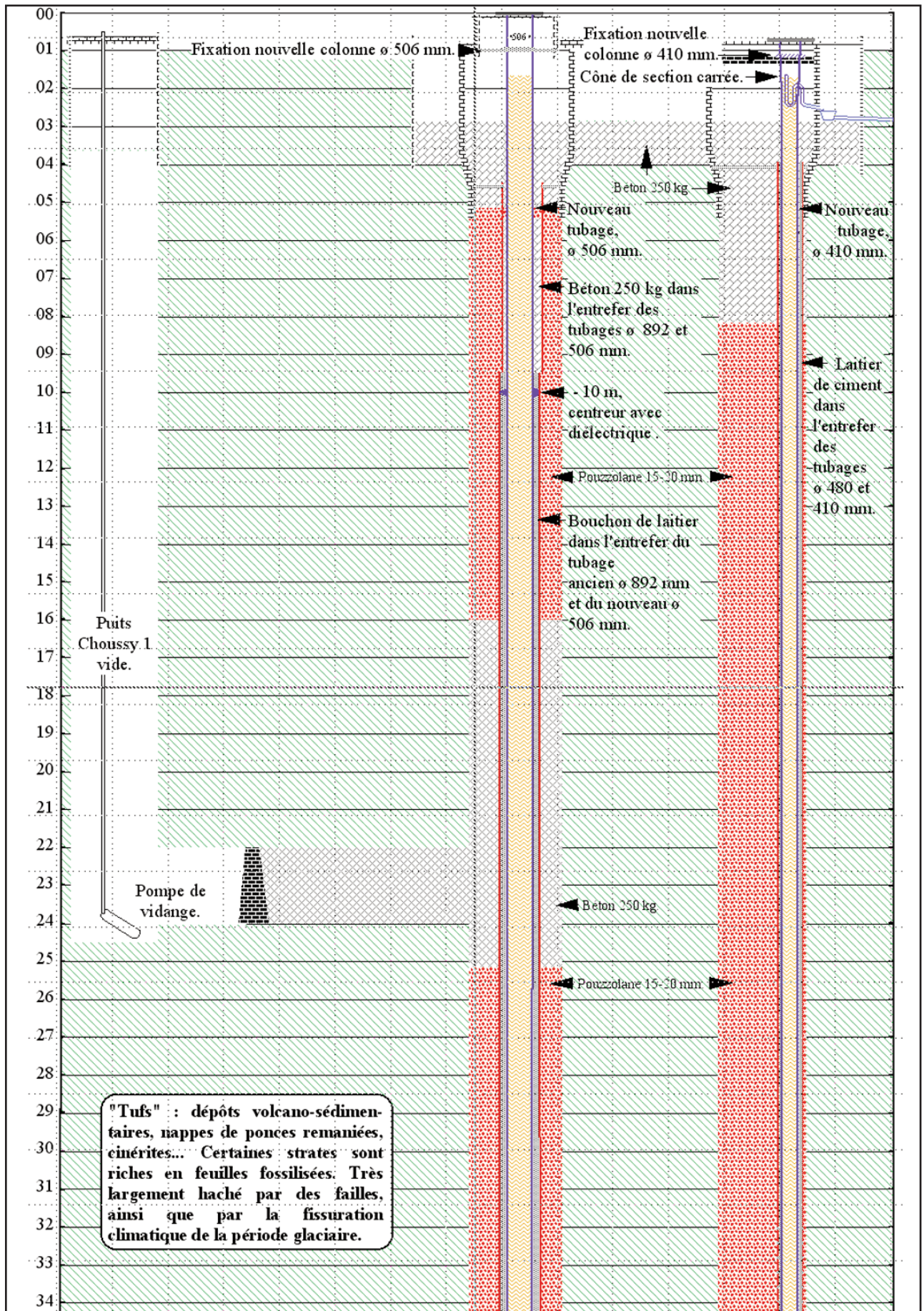
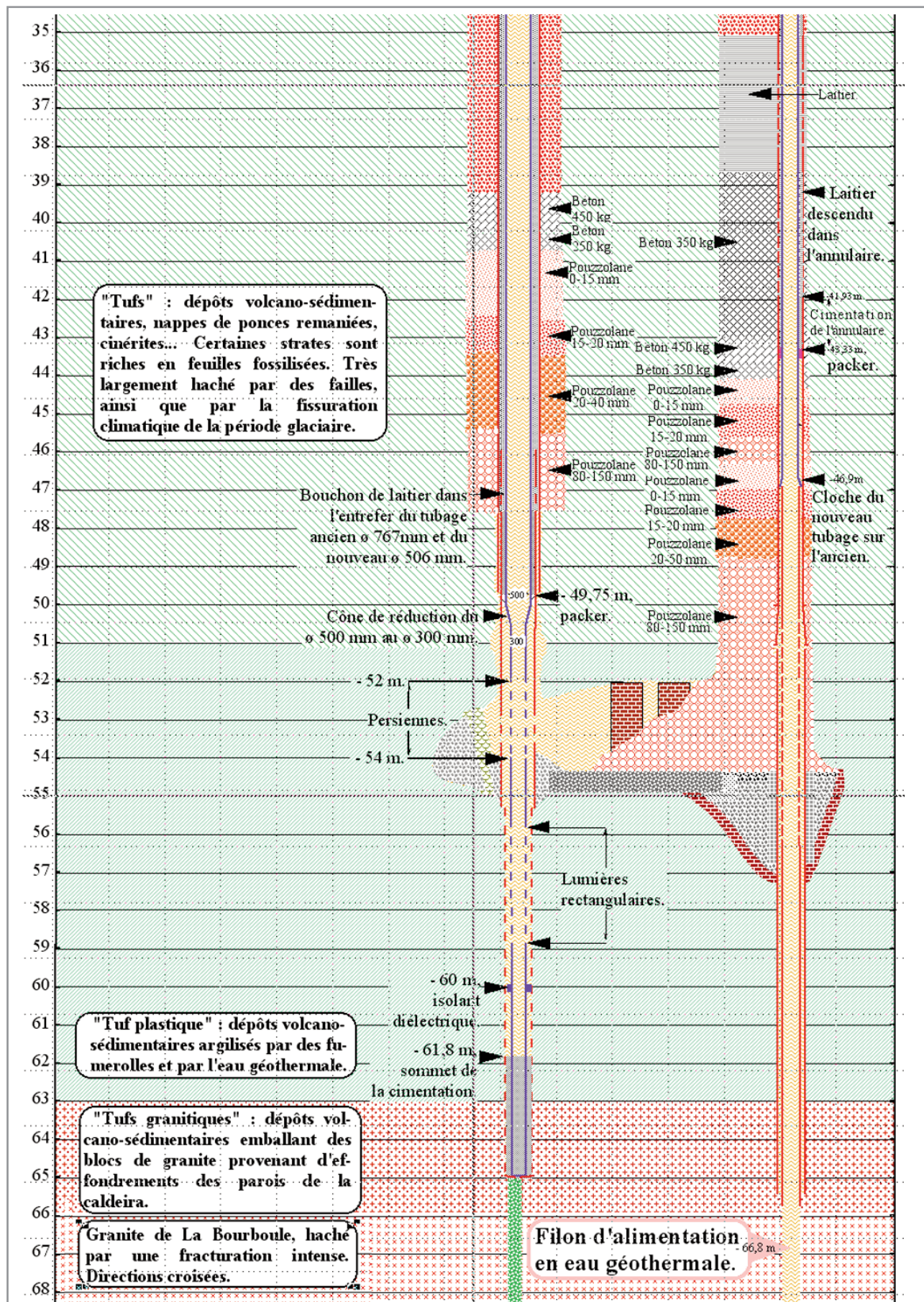


Figure 18a - Coupe de l'ouvrage de captage Choussy-Perrière après travaux, partie supérieure.



Une fois la galerie à -24 m et son

Figure 18b - Coupe de l'ouvrage de captage Choussy-Perrière après travaux, partie inférieure.

puits d'accès vidangés , la pompe installée dans une petite excavation (Fig. 18a) fournit à peine plus de 1 m³/jour d'une eau à 30°C. Cette galerie, située entre la pente de la Roche des Fées et le captage, sert donc bien de drain pour les eaux d'infiltration (Fig. 19). Ces dernières se mélangent avec des petits filets d'eau géothermale, fuites du tronc principal percolant lentement dans les

roches fissurées (granite et volcano-sédimentaire).

Mais les résultats les plus notables s'observent au niveau des caractéristiques de l'eau géothermale :

- Dans le passé, l'eau affichait une température variable sous pompage de :

- * Choussy 2, 52 à 54°C ;

- * Perrière, 54 à 56°C.

En condition de pompage d'ex-

ploitation régulier, la température des deux forage est aujourd'hui **invariable à 58°C, soit un gain de 2 à 6°C.**

- L'élévation des teneurs en **CO2 dissous libre dépasse 1 200 milligrammes par litre**; elle implique une diminution moyenne du pH de 0,3 unités.

- L'augmentation de la conductivité est de 2 à 300 micro Siemens par litre.

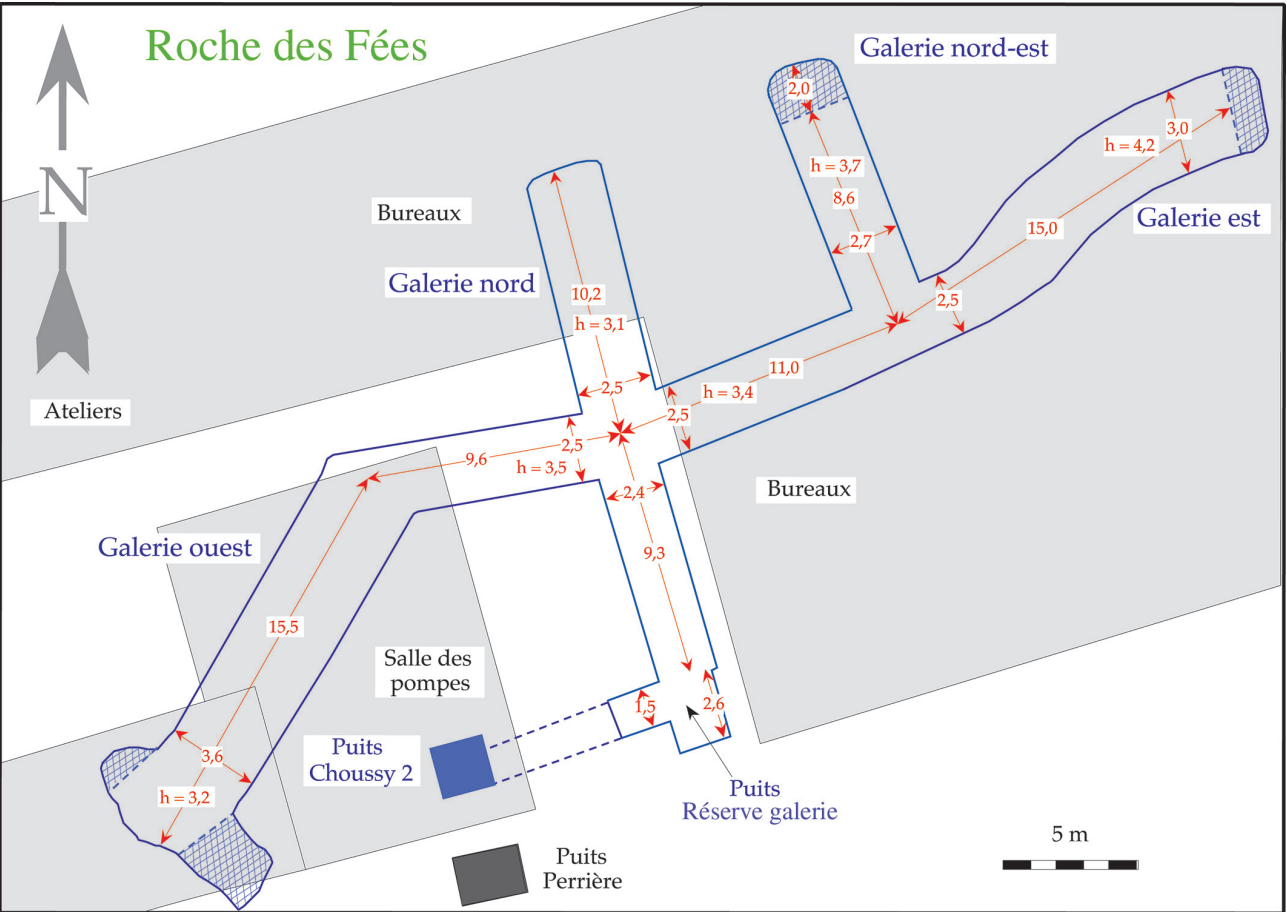


Figure 19 - Plan et situation de la galerie à - 24 mètres.



Figure 20 - Tubage Choussy 2 traversant le fond de la galerie. Cliché pris à - 53 m pendant les travaux de 1959.

THÈME III

DISTRIBUTION DE L'EAU MINÉRALE GÉOTHERMALE

RÉNOVATION DES CIRCUITS

J.-P. GIBERT - Docteur en Géologie.

J. JULLIARD - Directeur technique des Thermes

1 - MOTIVATIONS

Avant travaux, le système de distribution de l'eau géothermale est issu de rajouts successifs au fur et à mesure de besoins nouveaux d'équipements, ce qui a entraîné :

- Une architecture de réseau "en arbre", ayant pour conséquences :

- . une rupture d'alimentation au niveau d'une branche principale occasionnant la fermeture de plusieurs services ;
- . des difficultés à maintenir une pression régulière, ce qui nécessite la présence de by-pass induisant bouclage et risques de retours d'eau.

- une hétérogénéité des matériaux utilisés : divers aciers inox et galvanisés, P.V.C. ;
- des tuyauteries dont le diamètre n'a pas été calculé en fonction du débit, des ruptures de pente parfois importantes ; conséquence : dégazages intempestifs entraînant des baisses de pression en cours d'exploitation ;
- quatre pompes sont immergées deux par deux dans les deux puits. Deux sont en réserve, les deux autres fonctionnant au débit de ≈ 40 m³/h. Chaque matin, à 6 h, une personne du service technique assure manuellement la mise en route puis arrête le pompage lorsque les réservoirs sont pleins ; Conséquences :
 - . forte variation du niveau dans les puits ;

- . instabilité des caractéristiques physico-chimiques ;
- . mise en stockage d'un volume d'eau pendant 18 heures sans renouvellement ;

- installations de bâches secondaires réparties dans les combles ;
- refroidissement de l'eau pour certains services (bains, douches) éloignés des postes d'utilisation.

Malgré de très gros efforts de simplification des réseaux et la réduction des bras morts pendant les années 90 (plus d'un kilomètre de canalisations supprimé), la situation reste difficile à maîtriser. Suite aux travaux de réhabilitation de l'ouvrage de captage Choussy-Perrière, il est devenu nécessaire de reprendre l'ensemble du système de production, stockage provisoire et distribution de l'eau géothermale.

2 - PRINCIPES

Les principes suivants ont été strictement appliqués :

- **Architecture** des réseaux destinée à apporter une souplesse d'utilisation au niveau de la production, stockage et distribution :
 - conception des réseaux de canalisation en "étoile", permettant :
 - . d'isoler facilement les parties inutilisées ou demandant à l'être, même en cours d'exploitation ;
 - . la suppression de tout risque de maillage, bouclage et bras morts, malgré

plus de deux kilomètres de tuyauteries ;

- diamètre des différentes canalisations calculé pour assurer un écoulement le plus linéaire possible, évitant les tourbillons générateurs de dépôts ;
- après relevé systématique des altitudes par un géomètre expert, la pente des canalisations est toujours orientée dans le même sens, évitant "cols de cygne" et ruptures de pente, générateurs de bulles ;
- isolation thermique pour conserver au maximum la géothermalité de l'eau ;
- toutes les canalisations et tuyauteries sont accessibles, cheminant dans plusieurs centaines de mètres de galeries techniques souterraines ;
- multiplication des points de contrôle (dans les puits, leur tête, réservoirs et canalisations) dont les informations (température, pression, volumes stockés et distribués) sont rassemblées sur un tableau de contrôle centralisé).

- **Matériaux et équipements**

- suite à une série d'essais, choix d'utilisation (canalisations et différents équipements associés) d'un acier inox alimentaire 316L résistant aux attaques chimiques d'une eau chargée de plus de 5 g/l de matières minérales ;
- mise en pression permanente de l'ensemble des circuits, suffisante pour empêcher la libération des gaz dissous ;

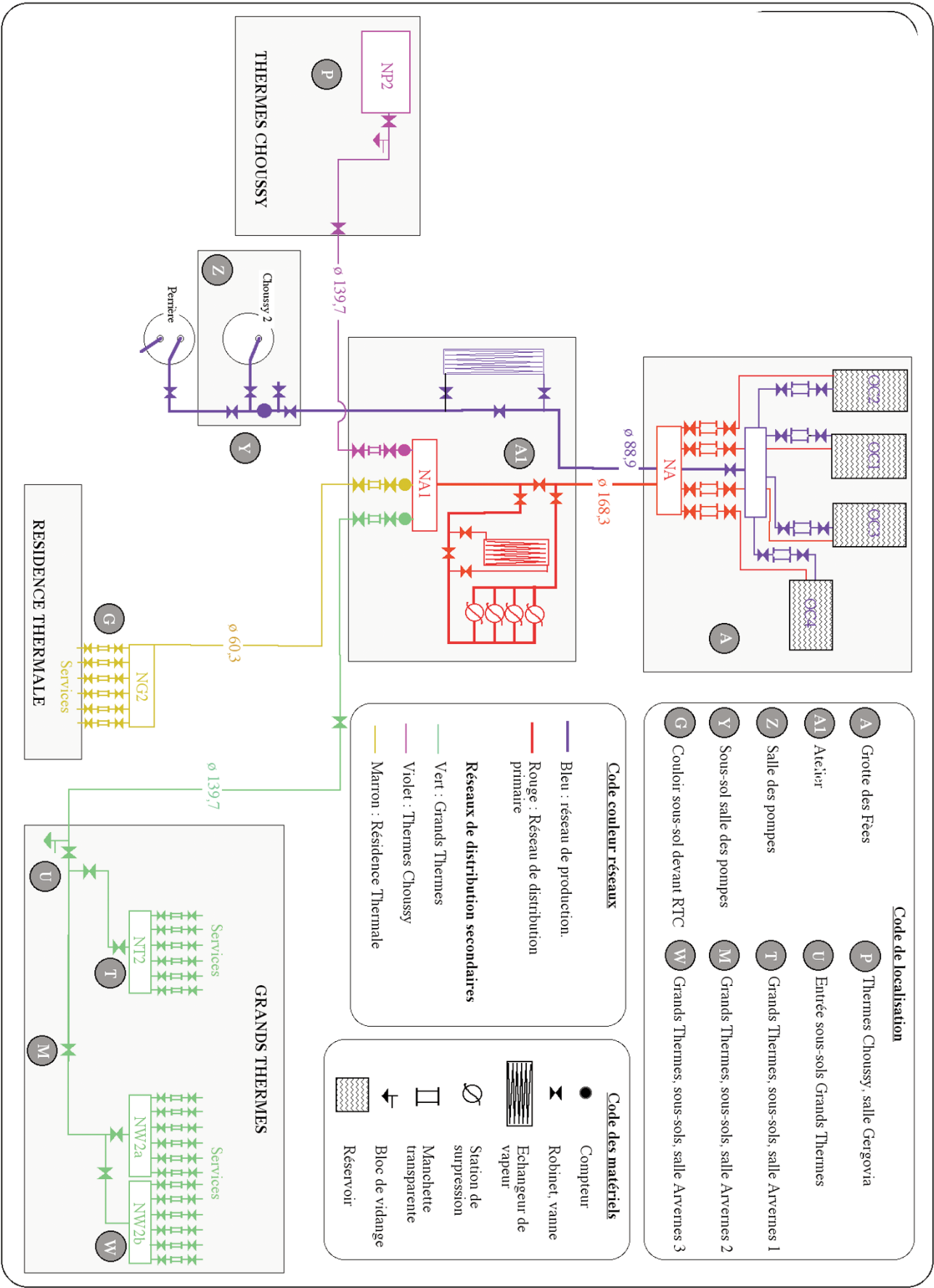


Figure 1 - Schéma de principe des réseaux de production et de distribution des eaux géothermales de la Bourboule.

- multiplication des points de contrôle, sur l'ensemble du système ;
- possibilité d'observer directement l'eau géothermale circulant grâce à des manchettes transparentes ;
- **Désinfection des réseaux**
 - L'intégralité des réseaux est désinfectée une fois par semaine par choc thermique : élévation et maintien de la température du fluide thermal à 70 °C, durant deux heures ;
 - pas d'utilisation de produits chimiques dans le réseau en

- exploitation (gestion de l'environnement) ;
- analyse bactériologique de validation de la désinfection.
- **Production** : elle est assurée de manière continue, 24h/24, ce qui assure la stabilité des caractéristiques physico-chimiques de la ressource.

3 - POINTS D'APPLICATION

Ces principes ont été appliqués à l'ensemble des six parties constituant le système de production, stockage et distribution de l'eau

géothermale :

- station de pompage ;
- réseau de production ;
- station de stockage ;
- station de distribution primaire ;
- réseaux de distribution secondaire : distribution du fluide géothermal vers les trois établissements de soins : Thermes Choussy, Résidence thermique et climatique, Grands Thermes ;
- réseaux de distribution tertiaire aux postes de soins.

4 - STATION DE POMPAGE

Objectif

Fournir de manière sécurisée les ressources nécessaires pour l'exploitation tout en assurant une préservation totale des qualités de l'eau géothermale.

Stratégie d'exploitation

- régime de pompage permanent et régulier 24h/24h ;
- maintien d'une pression de 3 bars en tête de puits pour conserver le gaz dissous ;
- les installations ne sont jamais

démontées en période d'exploitation.

Stratégie de surveillance

- contrôle quotidien de six indicateurs "qualité" ;
- suivi permanent de la qualité bactériologique.
- enregistrement continu de la pression et du débit.

Equipements

Trois pompes à débit variable, capables d'assurer chacune au moins 16 m³/h. Deux sont posi-

tionnées dans le tubage Perrière, une dans celui de Choussy. Deux d'entre-elles, sont en fonctionnement en parallèle, pilotées par un régulateur de débit par variation de fréquence. Une centrale d'alarme signale 24h/24 les éventuelles coupures électrique. La troisième est en réserve en cas de dysfonctionnement d'une des deux autres.



Figure 2 - Mesures de paramètres physico-chimiques en tête de puits Choussy 2

5 - RESEAU DE PRODUCTION

Objectif

Conduire de manière sécurisée les fluides géothermaux vers la station de stockage, située dans une grotte creusée dans le flanc de la Roche des Fées, 17 m plus haut, tout en assurant la préservation optimale de leurs qualités physico-chimiques.

Stratégie d'exploitation

Le réseau est maintenu en circulation permanente. Il n'est jamais ouvert en cours d'exploitation.

Stratégie de surveillance

Contrôle quotidien de la circulation de l'eau grâce aux manchettes transparentes. Mesures quotidiennes de paramètres physico-chimiques :

- température ;
- pH ;
- Conductivité ;
- potentiel d'oxydo-réduction.

Equipements

Ils comprennent :

- Une tuyauterie, rassemblant les flux provenant des deux pompes, pour les conduire à la nourrice de distribution.
- Un échangeur de chaleur, susceptible en cas d'alerte d'élever la température de l'ensemble du réseau à 70°C durant deux heures.
- Une nourrice, chargée de la répartition vers chacun des quatre réservoirs.
- Quatre tubulures conduisent l'eau géothermale jusqu'aux réservoirs.

Juste à la sortie de la nourrice chacune est équipée d'une manchette transparente encadrée par des vannes. Ces manchettes sont enlevées dans le cas où le réservoir correspondant n'est pas utilisé, ce qui évite toute possibilité de retour de fluides non géothermaux vers l'aval du réseau.

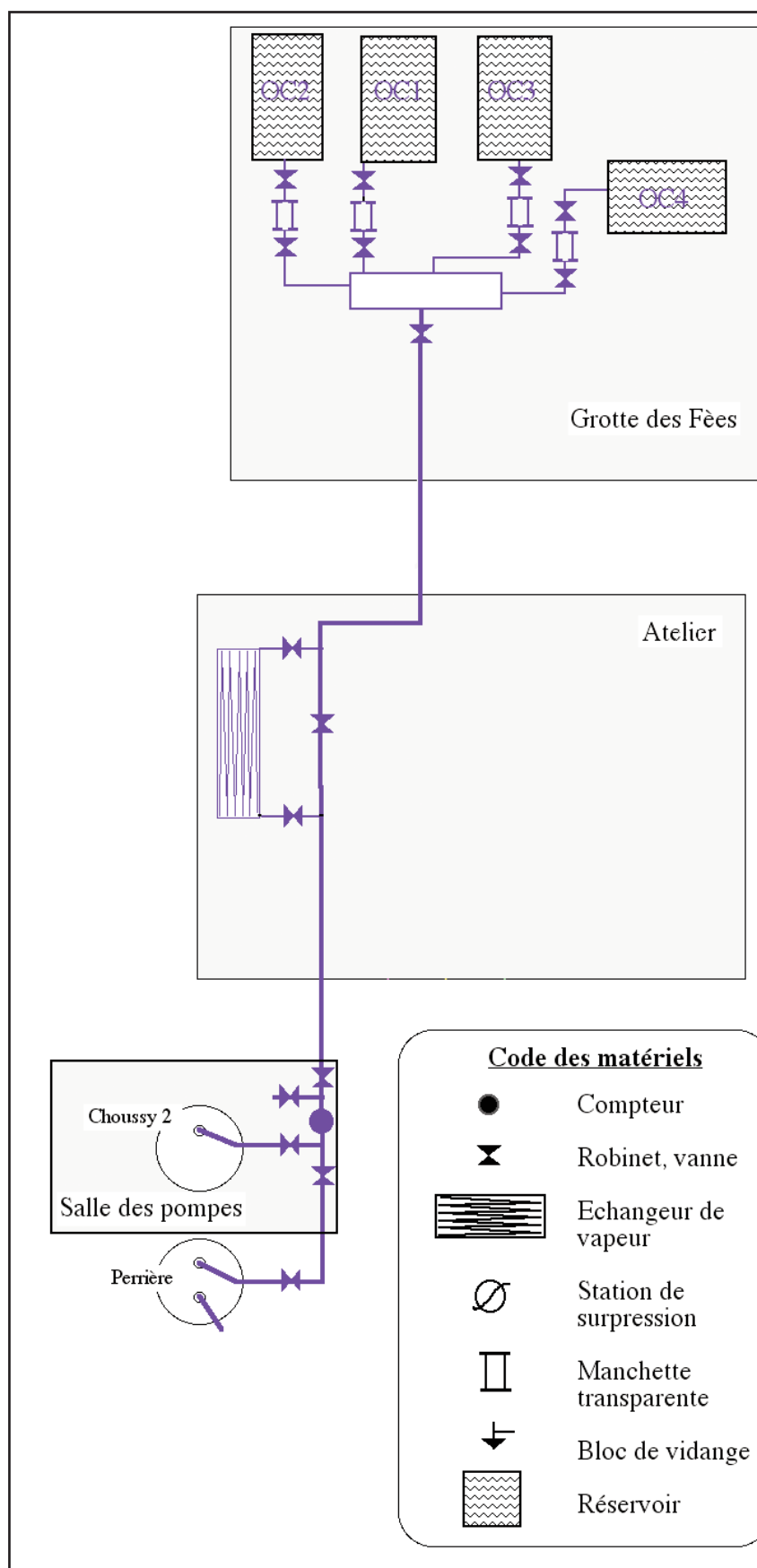


Figure 3 - Schéma de principe du réseau de production



Figure 4 - Echangeur de chaleur permettant d'élever la température de l'eau du réseau de production à 70°C durant deux heures. L'énergie calorifique est fournie par une centrale de production de vapeur.



Figure 5 - Nourrice de distribution de l'eau géothermale vers les quatre réservoirs.

6 - STATION DE STOCKAGE

Objectif

Les soins sont exercés le matin, période durant laquelle les besoins d'eau géothermale sont supérieurs au volume pompé, il faut donc assurer le stockage provisoire du fluide thermal avant distribution dans les trois thermes.

Stratégie d'exploitation

- écoulement permanent afin d'assurer un renouvellement constant de l'eau géothermale ;
- protection contre toute pénétration autre que celle de l'eau géothermale.

Stratégie de surveillance

- suivi en continu des volumes stockés, niveaux et températures ;
- contrôle quotidien de six indicateurs "qualité" ;
- suivi permanent de la qualité bactériologique.

Equipements

Un volume total disponible de 287 m³, réparti en quatre réservoirs (Fig. 3) construits dans une grotte artificielle creusée dans le talus de la Roche des fées, en surélévation de 13, mètres par rapport au niveau de la tête de puits.

n°	m³	n°	m³
OC1	82	OC2	79
OC3	80	OC4	46

Tableau I : Volumes utiles

Chaque bache est :

- en béton armé, totalement carrelée à l'intérieur avec des joints en résine alimentaire résistante à la chaleur et aux attaques acides ;
 - alimentée par un tube pénétrant près de son sommet (Fig.7, A), muni d'une vanne à guillotine afin de contrôler le débit et la pression (Fig.7, B).
- Après avoir traversé le mur du

réservoir, cette canalisation descend ensuite au plancher de la bache, près de sa face avant (Fig.7, C).

- transvidée par une canalisation dont l'embouchure se situe au plus près de sa face arrière. Au niveau de la face avant, le point de sortie se situe à 25 cm au dessus du plancher du réservoir (Fig.7, D), car celui-ci est incliné de l'arrière vers l'avant. Un volume d'eau reste donc au fond retenant les éventuels dépôts ;
- équipée d'une trappe étanche à son plafond et d'une vidange (Fig.7, E), ce qui permet sa vi-site, son nettoyage et son entretien durant l'intersaison thermique ;
- munie d'un hublot (Fig.7, F) afin de voir l'intérieur en cours d'exploitation ;
- pourvue d'un système d'échange gazeux avec l'extérieur, comprenant un filtre antibactérien ;
- dotée de sondes

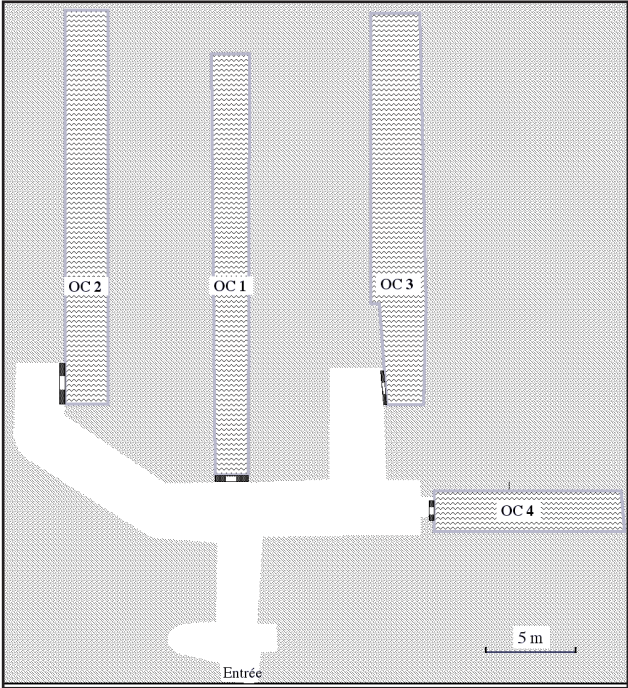


Figure 6 - Plan de la Grotte des Fées, avec localisation des quatre réservoirs.

mesurant son niveau, le volume et la température de l'eau stockée.

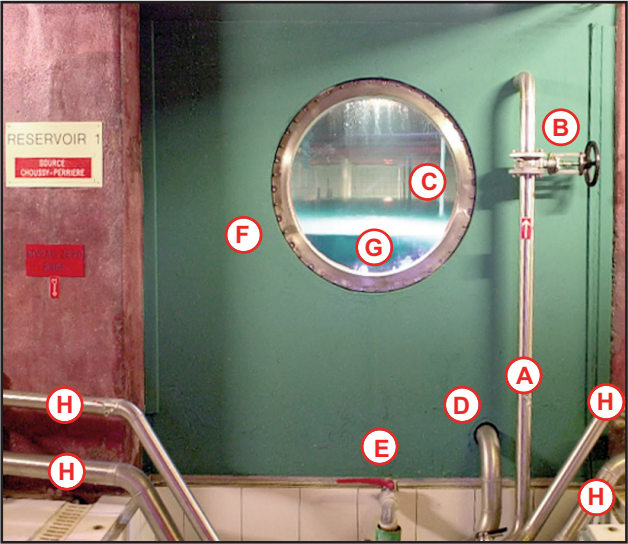


Figure 7 - Face avant du réservoir OC1.
A : canalisation d'alimentation.
B : vanne à guillotine.
C : canalisation d'alimentation descendant au fond du réservoir.
D : point de sortie.
E : vidange.
F : hublot d'observation.
G : niveau de l'eau géothermale.
H : canalisations d'alimentation et d'extraction des autres réservoirs.

7 - STATION DE DISTRIBUTION PRIMAIRE

Objectif

Assurer le recueil et le rassemblement de l'eau géothermale dans les quatre réservoirs, puis la redistribuer sous pression constante dans les trois réseaux de distribution secondaires.

Stratégie d'exploitation

- écoulement permanent, 24h sur 24 ;
- maintien d'une température et pression constantes dans les conduites.

Stratégie de surveillance

- contrôle quotidien de six indicateurs "qualité" ;
- suivi permanent de la qualité bactériologique.

Equipements

- quatre conduites amènent l'eau des réservoirs vers la nourrice de rassemblement NA ;
- chaque conduite est équipée d'une manchette transparente encadrée de deux vannes juste en amont de la nourrice ;
- une canalisation (\varnothing 168,5 mm) conduit ensuite l'eau par gravité jusqu'à la nourrice de distribution NA1 ;
- une dérivation en amont de la nourrice permet à un surpresseur à débit variable (110 m³/h maxi) de maintenir une pression constante de 2,5 bars dans le reste des circuits de distribution ;
- un échangeur thermique à source de vapeur permet de remonter la température de l'eau dans les réseaux de distribution à 70°C, le temps d'assurer un choc thermique suffisant.

Figure 8 - Schéma de principe du réseau de distribution primaire.

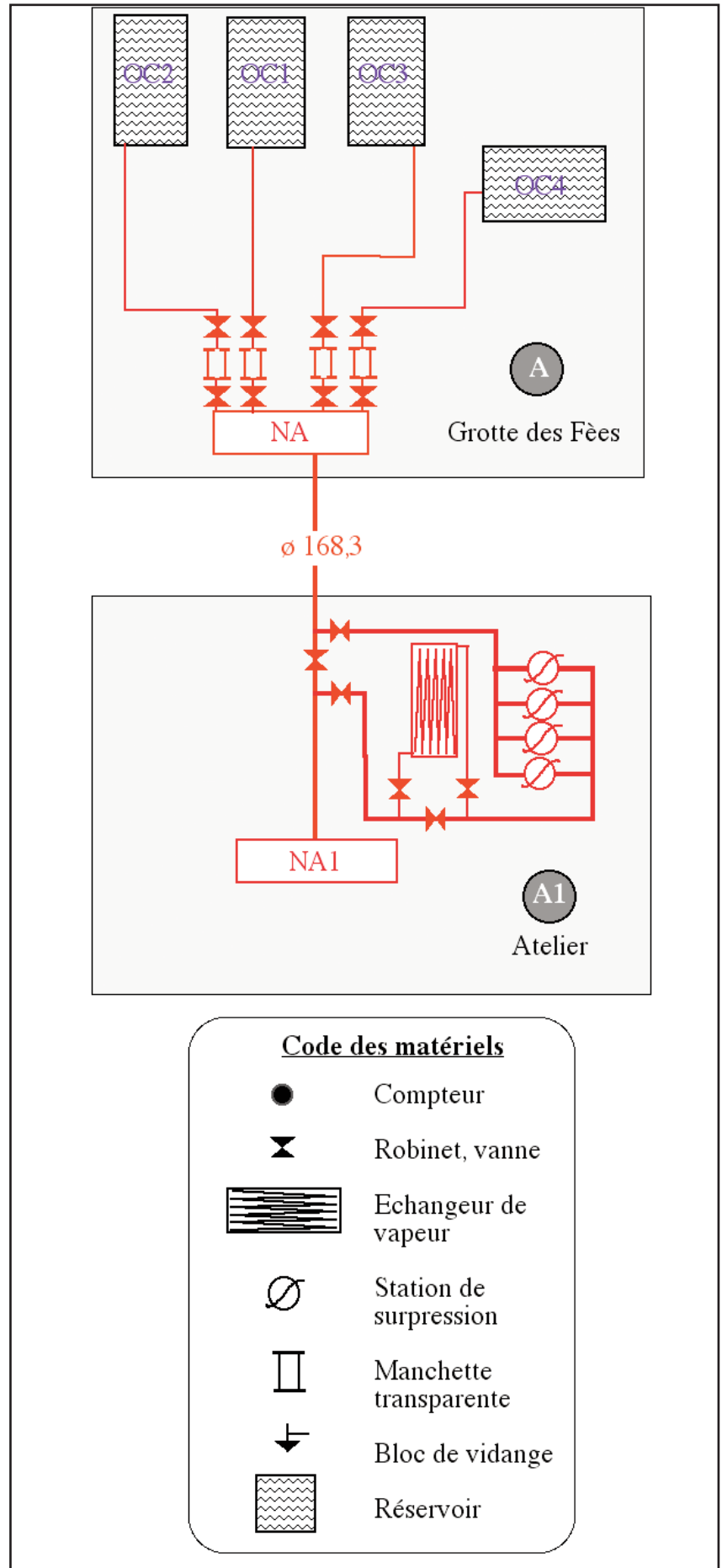




Figure 9 - Equipement de la salle NA1.

- A : Nourrice de distribution de l'eau géothermale vers les trois réseaux de distribution secondaires ;
- B : dérivation vers le groupe de surpression ;
- C : blocs de quatre surpresseurs à débit variable.

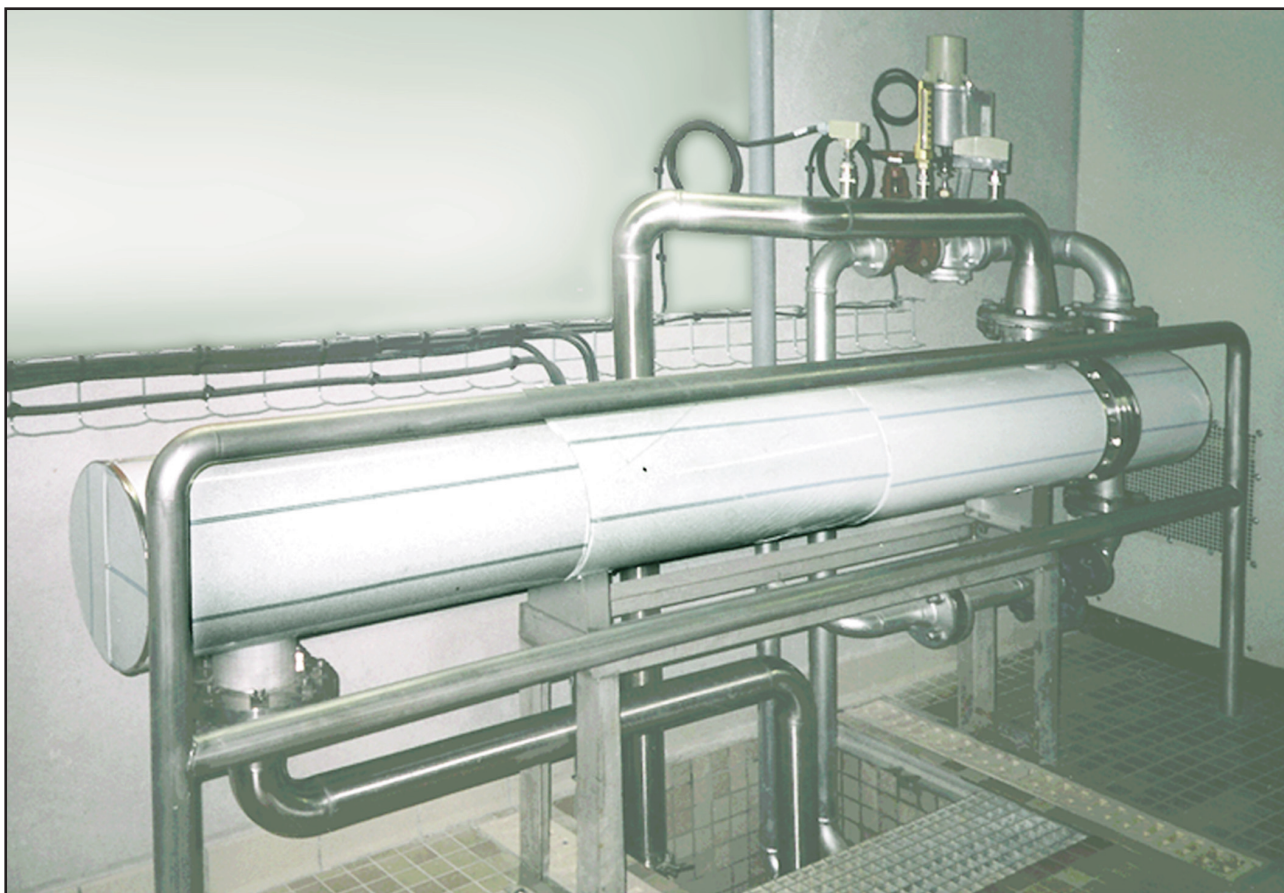


Figure 10 - Echangeur de chaleur permettant l'élévation de la température de l'eau circulant dans les réseaux de distribution.

8 - STATION DE DISTRIBUTION SECONDAIRE

Objectif

Amener indépendamment l'eau géothermale vers chacun des trois établissements.

Stratégie d'exploitation

- écoulement permanent, 24h/24 ;
- maintien d'une température et pression constantes dans les conduites.

Stratégie de surveillance

- contrôle quotidien de six indicateurs "qualité" ;
- suivi permanent de la qualité bactériologique.

Equipements

- Trois canalisations conduisent l'eau géothermale vers les nourrices de distribution des trois établissements.
- chaque canalisation est conçue pour être rapidement démontable, avec des vannes de vidange à l'entrée de chaque établissement.
- en sortie de la nourrice NA1, chaque canalisation est équipée d'un compteur volumétrique et d'une manchette transparente encadrée par deux vannes.
- chaque nourrice de distribution est équipée d'un :
 - . manomètre ;
 - . thermomètre ;
 - . vanne d'échantillonnage.

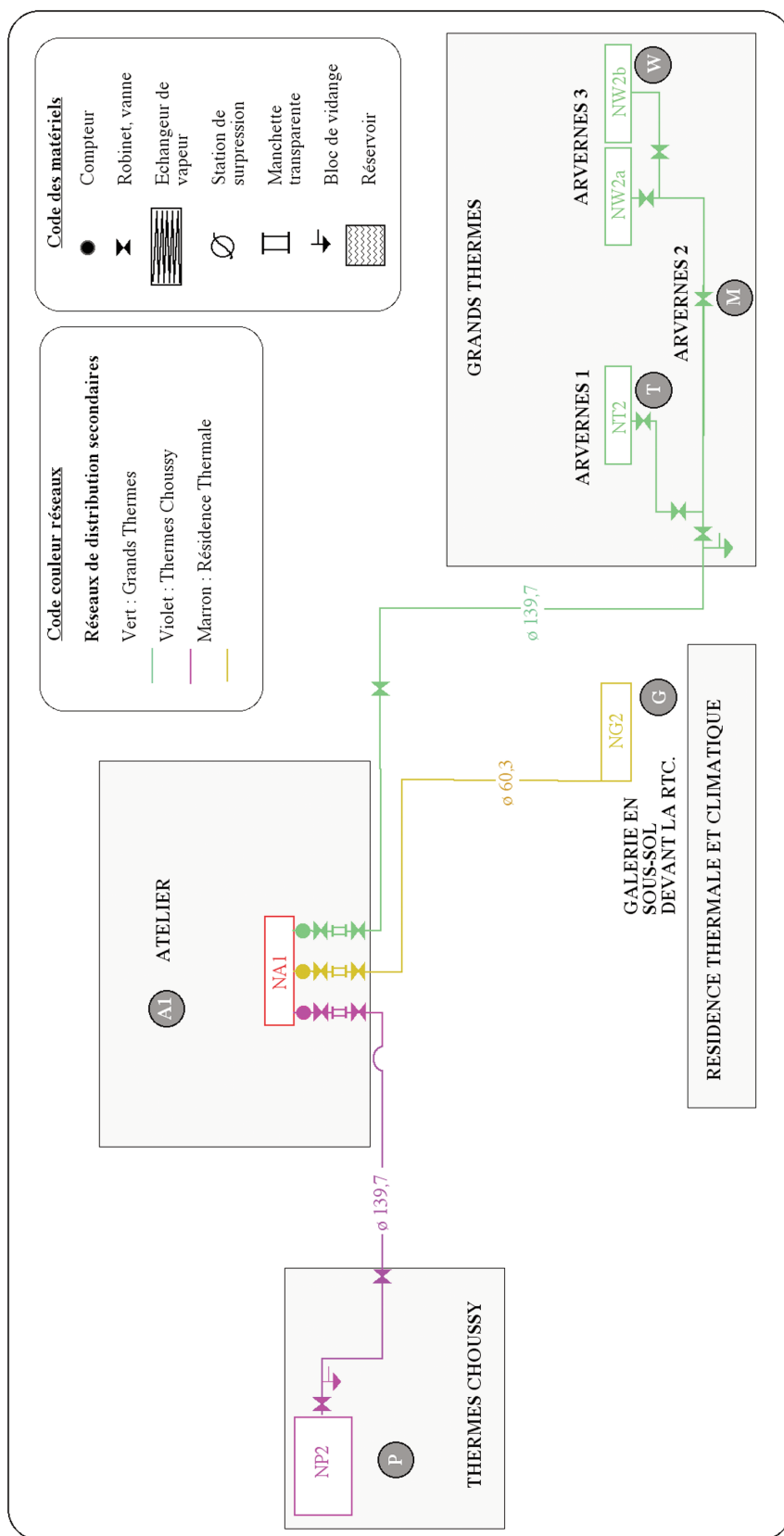


Figure 11 - Schéma de principe des réseaux de distribution primaire.

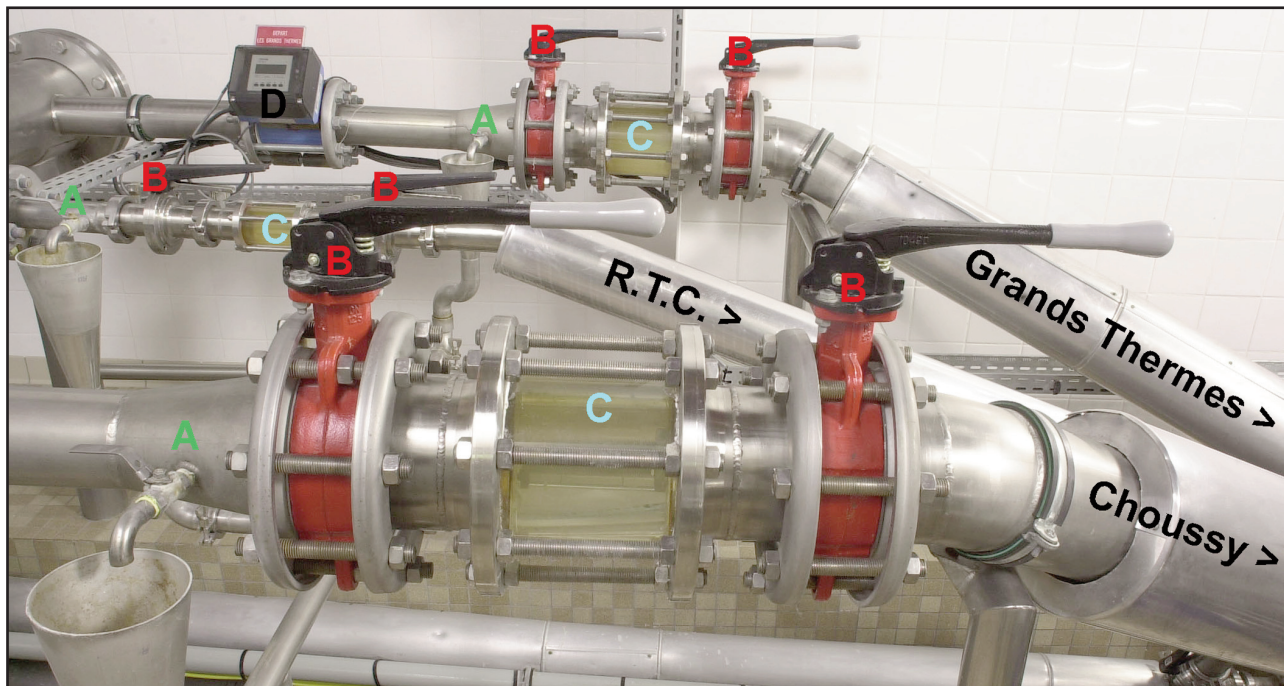


Figure 12 - Equipements des trois canalisations amenant l'eau géothermale vers les trois établissements : Grands Thermes, Résidence thermique et climatique (R.T.C.) et Choussy.
A : point de prélèvement ;
B : vanne de fermeture ;
C : manchette transparente ;
D : compteur volumétrique.



Figure 13 - Galerie technique souterraine reliant la station de distribution primaire à l'établissement des Grands Thermes.

Objectif

Figure 14 : Nourrices NW dans la salle Arvernes 3 située dans les sous-sols de l'établissement des Grands Thermes.
A : manomètre.

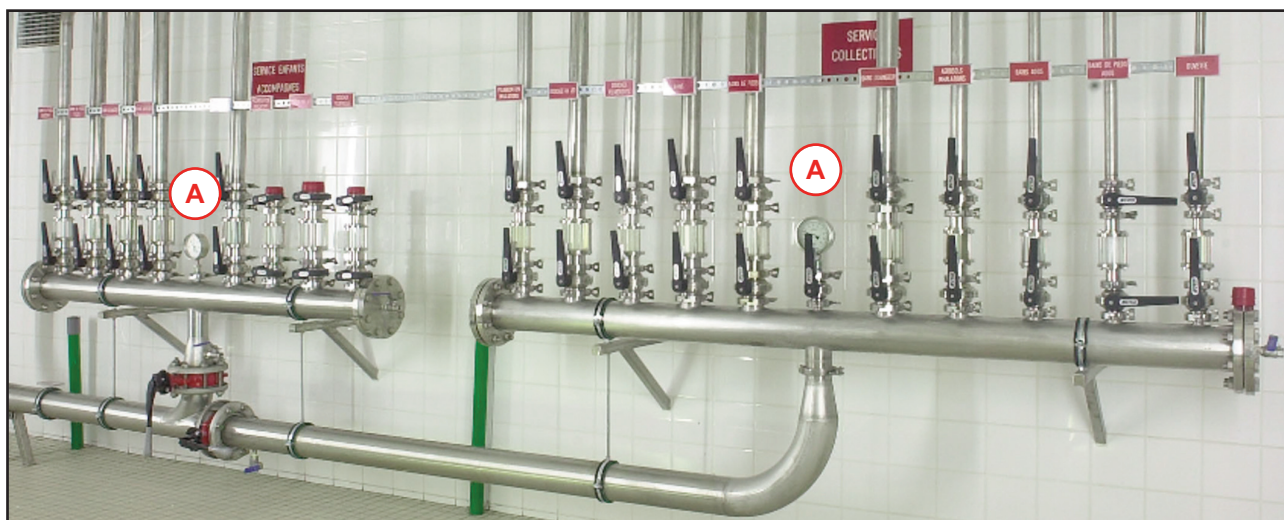




Figure 17 - Sous-sol des Grands Thermes, salle Arvernes 2. Equipements complémentaires : surpresseurs pour les douches au jet.



Figure 18 - Sous-sol des Grands Thermes, 9ème rue. Equipements complémentaires pour les douches filiformes. A : surpresseurs. B : échangeur de chaleur.

THÈME IV

GAZ THERMAUX

PRÉSENTATION

Au cours du XIX^e siècle, l'identification des gaz dans une eau minérale était une démarche systématique. L'interprétation des résultats était sujette à de sérieuses réserves pour cette simple raison que tout ce qui était extrait d'une eau thermique était assimilé à une origine profonde.

En 1837, géologie, géochimie, structurologie sont des disciplines *in statu nascendo*. Les Sciences de la Terre ont parcouru un long chemin depuis cette époque. La conception des gaz présents dans une eau a beaucoup changé.

Oxygène et azote sont deux "signatures" attachées à l'intrusion

directe ou indirecte d'eau de ruissellement dans un circuit thermique ; elles servent à affirmer le caractère plurigénique d'une eau. Les lois relatives aux gaz en solution dans l'eau : loi de Henry (1803), Dalton (1805), Gay-Lussac, Humboldt, la notion de pression-partielle, toutes énoncées au XIX^e siècle, sont progressivement tombées en désuétude tant au sein de la profession thermique, qu'au niveau des tutelles administratives.

Nous nous attacherons dans les pages qui suivent à deux gaz d'origine crustale :

- Radon
- Anhydride carbonique

Production à partir de l'ouvrage Choussy-Perrière, passage dans les deux réservoirs hypogés ou surplombants creusés dans la montagne, injection dans le réseau aux postes de soins.

Viennent enfin, les investissements attachés à la modernisation de l'installation en conformité avec une réglementation toujours plus exigeante.

La Société Thermale est si attentive à ce genre de pression que le lecteur constatera, comme pour les équinoxes, une politique active de précession sur l'évènement.

LE RADON

Analyse du mémoire d'ingénieur de
Stéphanie HUGO

La Compagnie thermique s'est intéressée de bonne heure au Radon pour plusieurs raisons. En premier lieu, il s'agissait d'articles de presse, diffusés sous la signature d'un journaliste ne pouvant prétendre à une compétence reconnue dans le domaine des sciences nucléaires, mais dont l'audience à travers le quotidien pour lequel il travaillait devenait dangereuse.

Il est imprudent en effet de délivrer au lectorat d'un journal des informations concernant un domaine à l'intérieur duquel une solide formation scientifique est requise.

Il est vrai que certains sites du Limousin sont le siège de filons de pechblende, le minerai d'uranium le plus courant, et que des maisons ont été bâties à proximité ou sur le filon affleurant lui-même. Ces édifices ont été reconnus pour être un site d'accumulation

de Radon pouvant donner lieu à quelques inquiétudes.

Une rumeur flote alentour sur ce thème.

La Compagnie thermique a donc pris l'initiative d'engager une recherche confiée à un étudiant de 3^e cycle. Les mesures ont duré 6 mois. Les résultats ont fait l'objet de la présentation d'un mémoire D.E.S.S. devant un jury siégeant à la Faculté des Sciences d'Avignon

Ce sont les acquits de ce travail que nous résumons ci-après, bouclé 2 ans avant la rédaction de la circulaire ministérielle.

La Compagnie Thermale préférant devancer l'évènement plutôt que de le suivre sous la contrainte a pris les dispositions qui découlaient des résultats obtenus.

1 - ÉTAT NATUREL

L'écorce terrestre contient des

éléments radioactifs en quantités variables. Leur caractéristique commune est d'être instables : ils se désintègrent pour donner naissance à des corps nouveaux, appelés produits de filiation ou fils, radioactifs ou non, et en même temps à des rayonnements.

La terre contient une vingtaine de radionucléides de longue période radioactive (>1 milliard d'années). La plupart, comme le potassium 40 ou le rubidium 87 se désintègrent directement en un élément stable. Trois d'entre eux : uranium 238, uranium 235 et thorium 232, conduisent, par décroissances radioactives successives, à une dizaine de radionucléides, puis à un isotope stable du plomb. Ils forment les trois grandes familles radioactives naturelles (fig. n°18). Les transformations font suite à des désintégrations.

Chaque famille contient un isoto-

pe du radon, seul produit de filiation à l'état de gaz. Ses propres produits de filiation ultérieurs sont des ions métalliques radioactifs.

1.2 - DÉMARCHE POUR-SUIVIE A LA BOURBOULE

Caractéristiques du prélèvement d'air

Les techniques de mesure de l'activité volumique du radon et de ses descendants dans l'air sont classées en trois catégories (CHARUAU et al. 1996) :

- Mesures **ponctuelles**. Elles correspondent à des prélèvements effectués sur une courte durée, de l'ordre de quelques minutes. L'analyse est effectuée rapidement ;
- Mesures **intégrées**. Elles consistent en une intégration temporelle des grandeurs physiques (nombre de traces, charges et atomes), liées aux décroissances du radon ou de ses descendants ;
- Mesures en **continu**. Basées sur un échantillonnage et analyse simultanés, ou en léger différé, elles permettent d'enregistrer les variations temporelles de l'activité volumique. Une mesure est qualifiée de continue lorsque le pas d'intégration est inférieur ou égal à une heure.

Le prélèvement d'air peut être actif ou passif. Actif, il met en œuvre un moyen mécanique tel qu'une pompe. Passif, il s'effectue par diffusion naturelle.

Mode de prélèvement

Toute mesure du radon et/ou de ses descendants doit être corrélée avec la durée, l'heure du prélèvement et la saison au cours de laquelle elle a été faite.

Les activités du radon présentent une très grande variabilité temporelle. De ce fait, des périodes de prélèvement de quelques minutes, heures ou mois rendent compte de résultats très différents et difficilement comparables entre eux.

METIVIER H. et ROBE M.-C. (1998) précisent les protocoles de prélèvement à l'extérieur ou l'inté-

rieur des bâtiments :

- **Extérieur**. Certaines conditions doivent être respectées :
 - hauteur optimale : 1,5 m du sol ;
 - obstacles naturels ou artificiels à l'extérieur d'un cône vertical, d'ouverture 140°, orienté pointe en bas, et d'une sphère de 1 m de diamètre sur ce point.

Le nombre de mesures doit être suffisant pour permettre une bonne représentativité dans l'atmosphère. Leur dis-

tribution doit tenir compte de tous les paramètres environnants : topographie, vents dominants, etc.

- **Intérieur**. Le choix de l'appareil de mesure et de son implantation dépend de l'objectif de mesure :
 - réalisation d'un diagnostic ;
 - connaissance de l'exposition humaine.

Il dépend des caractéristiques architecturales, nombre d'étages, nature des matériaux de construction et des caractéristiques de la

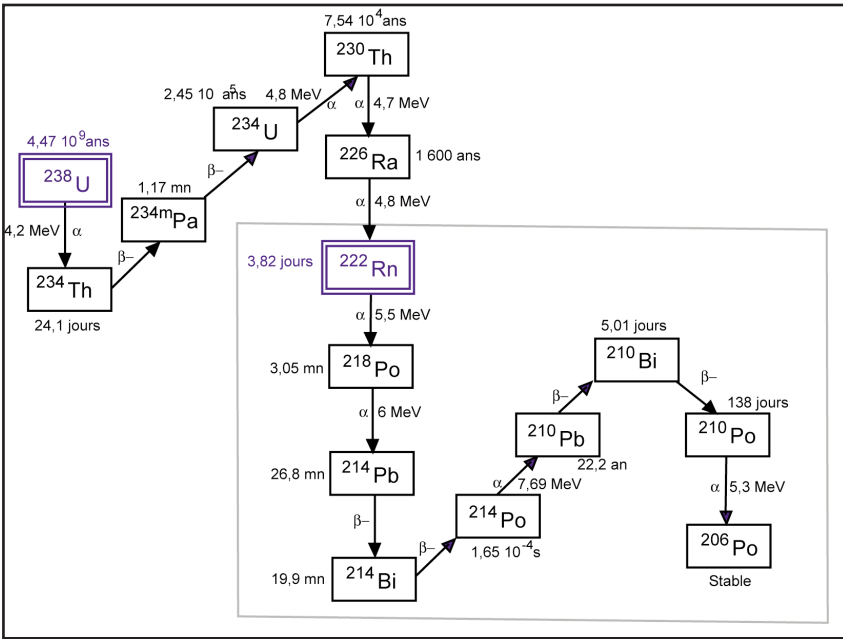


Figure 1 - Famille radioactive naturelle de l'uranium 238 (METIVIER H. et ROBE M.-C., 1998)

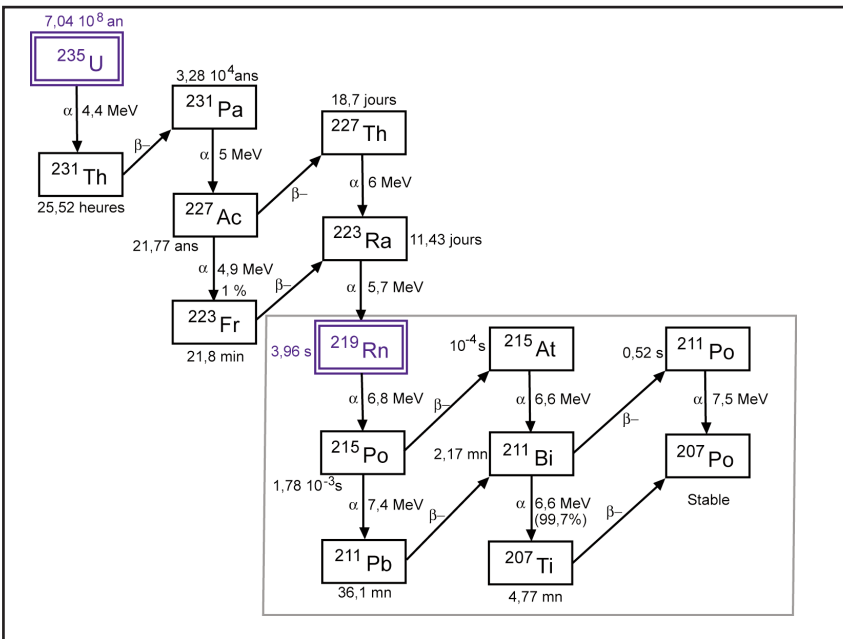


Figure 2 - Famille radioactive naturelle de l'uranium 235 (METIVIER H. et ROBE M.-C., 1998)

pièce. Les prélèvements sont effectués essentiellement dans les pièces de vie.

Remarque :

En établissement thermal se pose le problème de la **part du radon délivrée par l'eau géothermale**. En 1992, l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (I.P.S.N.) a réalisé une campagne de mesures du radon et de ses descendants dans les locaux de l'établissement thermal de La Bourboule mettant en évidence ce phénomène.

A l'exception d'une étude slovène (PLANINIC, 1990) et de celles des mines d'uranium, aucune campagne systématique de mesures a été réalisée sur les lieux publics (écoles, hôpitaux, stations thermales), et de travail (H. METIVIER et M.-C. ROBE 1998). **Ce constat donne une grande originalité à la démarche de la Compagnie des Eaux minérales de La Bourboule.**

Les modes de prélèvements doivent ainsi tenir compte de l'en-

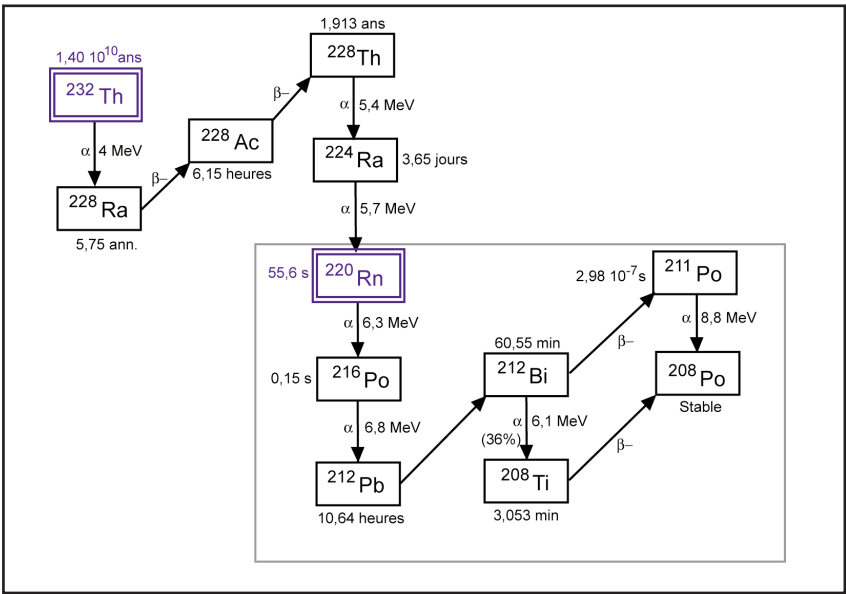


Figure 3 - Famille radioactive naturelle du thorium 232 (METIVIER H. et ROBE M.-C., 1998)

- activité volumique atmosphérique radon ;
- énergie Alpha Potentielle Volumique créditée aux descendants du radon.

Le tableau I, ci-dessous, présente les principes généraux des appareils utilisés.

t dans un volume d'air pris comme unité.

1.3 - Résultats obtenus sur le site de la Bourboule

Les premières analyses des eaux et des gaz de la station thermale de La Bourboule datent du début du XX^e siècle, quelques années

Appareil	Unité de mesure	Nature de l'échantillonnage	Principe
Activité Volumique Atmosphérique Radon			
Barasol	Bq.m ³	Continu	- mesure et enregistrement des variations temporelles de l'activité volumique du radon ; - détection des particules α par jonction silicium ; - expérimentations réalisées sur site
Dosimètre passif		Intégrée	- enregistrement des particules ionisantes sur un film en nitrate de cellulose ; - apparition des impacts des particules α après développement en laboratoire spécialisé.
Energie Alpha Potentielle Volumique due aux descendants du radon			
M.E.A.P. III	mJ.m ³	Ponctuelle	- prélèvement sur filtre des aérosols radioactifs, descendants à vie courte ; - valeur de l'E.A.P. automatique, selon la méthode de Rolle - manipulations réalisées sur site.
Dosimètre de site		Intégrée	- prélèvement des particules ionisantes sur filtre ; - enregistrement des émissions α des descendants des isotopes 222 et 220 sur un détecteur solide de traces en nitrate de cellulose (film photographique) ; - développement du film en laboratoire spécialisé.

Tableau I - Récapitulatif des appareils de mesure

semble des facteurs liés à l'eau thermique et à la dispersion de ses gaz dans l'atmosphère.

Appareillage

Deux types de mesures ont été réalisés :

L'Energie Alpha Potentielle (E.A.P.) est définie comme la somme des énergies des particules α émises au cours de la chaîne de désintégration de tous les produits de filiation à vie courte du radon, contenus à un instant

seulement après la découverte de la radioactivité naturelle.

Le 4 mai 1908, A. LABORDE, préparateur du laboratoire de Pierre et Marie CURIE, réalise la première mesure de radioactivité des eaux à La Bourboule : "10 litres

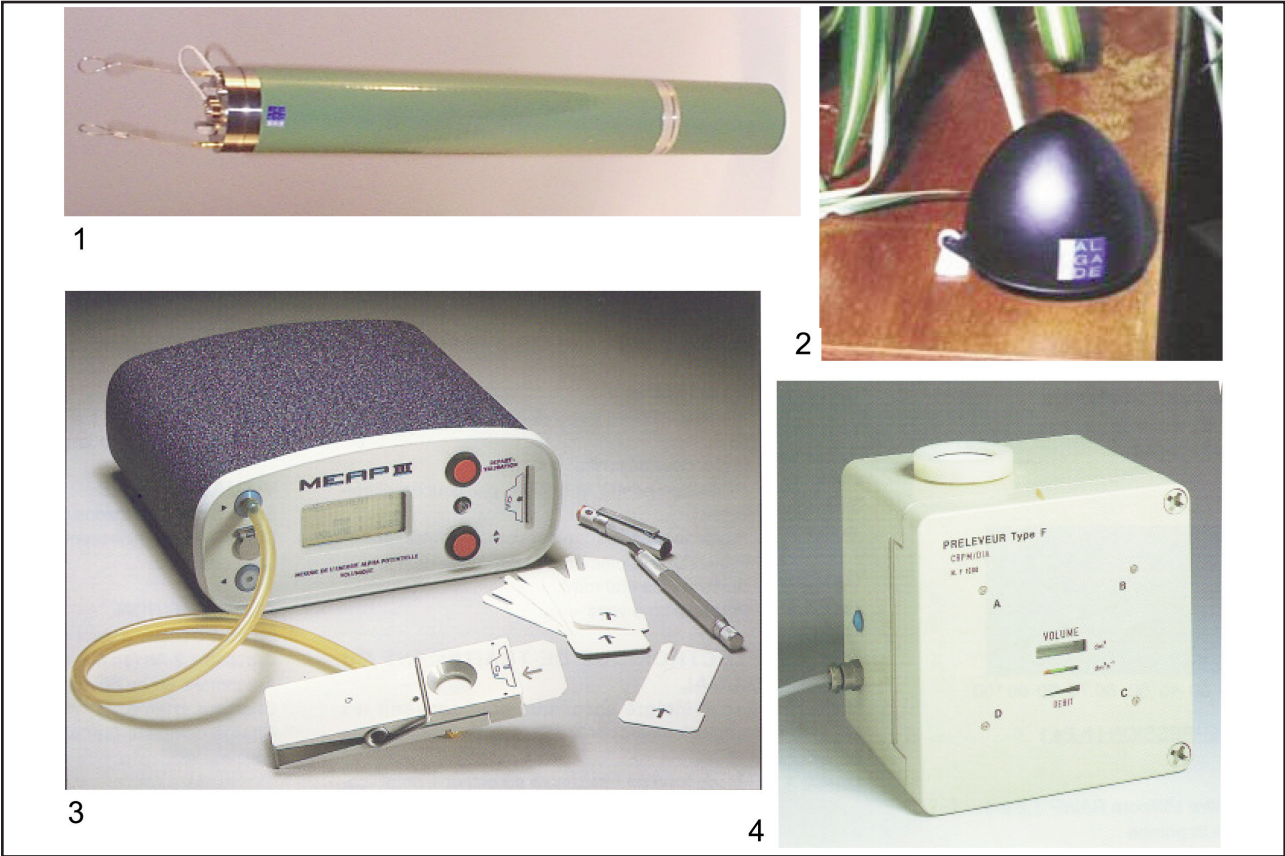


Figure 4 - Appareils de mesure du radon et ses descendants. 1: Barasol - 2 : Dosimètre passif – 3 : M.E.A.P. III – 4 : Dosimètre de site (ALGADE, 1996)

Date	Auteur	Résultats			
		nanocurie.l ⁻¹		Bq.m ⁻³	
		Gaz	Eau	Gaz	Eau
1923	A. LEPAPE	161,4	20,5	5 971 800	758 500
1959	Institut d'hydrologie et de Climatologie de Clermont-Ferrand	101,4	12,1	3 751 800	447 700
		157	25,8	5 820 100	935 360

Tableau II - Mesures anciennes de radioactivité (document interne C.E.M.B., juin 1998)

"d'eau du puits Choussy renfer-
"ment, quatre jours après extrac-
"tion, 1,78 milligrammes-minute
"d'émanation de radium. Le gaz"
"thermal renferme 11,02 milli-
"grammes-minute d'émanation de
"radium".
Il classe alors l'eau de La
Bourboule parmi les plus radioac-
tives de France.
Considéré comme un agent théra-
peutique, le radon fut l'objet
d'autres analyses.

Lieu de mesure	Minimum Bq.m ⁻³	Maximum
Laboratoire	30	2 740
Salle de soins	2 500	12 500
Air extérieur	75	295
Tête du puits	580 000	

Tableau III - Activités volu-
miques radon, I.P.S.N. en 1992

En 1992, l'I.P.S.N. (INSTITUT DE
PROTECTION DE SURETE
NUCLEAIRE, 1992) rend compte
d'activités volumiques recouvrant
une large bande de mesures.
De mai en août 1999, 79 mesures
de radon ont été réalisées :
- 29 mesures en continu sur 8,
24 ou 72 heures ;
- 50 mesures intégrées.

Variations temporelles

Une première série de mesures
en continu a été réalisée en mai

1999 dans les salles de soins et
sous-sols des bâtiments tech-
niques.
L'appareil de mesure Barasol
effectue un enregistrement toutes
les 15 minutes pendant 24
heures. Deux mesures réalisées
en sous-sol mettent en évidence
une augmentation nocturne de
l'activité du radon.

En moyenne, les activités sont :

Lieu de mesure	Moyenne		
	Nocturne	Journalière Bq.m ⁻³	Maximum
Grands Thermes, 1ère rue	1 500	1 000	3 400
Sous-sol de la salle des pompes	3 100	1 500	4 500

Tableau IV - Sous-sol, activités maximales et moyennes

1.4 - Conclusion

Les mesures de gaz radon et dioxyde de carbone dissous dans l'eau ne figurent pas au programme des analyses réglementaires des stations thermales françaises. Aucune campagne de mesures a été réalisée sur les lieux de cure. En 1999, la Compagnie de Eaux Minérales de La Bourboule, précède les recommandations nationales et internationales en prenant l'initiative de réaliser une campagne de mesures de radon et de ses descendants. Ce programme a permis d'estimer l'exposition au gaz des curistes, personnel médical, paramédical et technique.

L'ensemble des valeurs se situe dans le même ordre de grandeur que celui déterminé par l'I.P.S.N. en 1992. les constatations sont similaires : les concentrations en radon dissipé dans l'ambiance des locaux varient fortement en fonction de :

- arrivée d'eau thermale fraîche;
- situation géographique des bâtiments : réservoirs, sous-sols, rez-de-chaussée, étage ;
- période de mesure : matin, après-midi, nuit ;
- système d'extraction d'air ;
- volumes des pièces ;
- brassage de l'air.

Nous pouvons être interpellés par la concentration élevée en radon. Dans les salles de soins, l'eau thermale est la principale source du radon et de ses descendants. Les activités moyennes sur 72 heures évoluent :

- minima	12h30 – 7h30	200 à 400	Bq.m ⁻³
- maxima	7h30 – 12h30	1 000 à 8 000	
- moyenne		600 à 2 000	

Les disparités entre salles de soins dépendent des systèmes d'extraction et du brassage de l'air, paramètres non maîtrisés au cours de cette campagne.

Dans les sous-sols, les valeurs maximales sont observées la nuit : 1 500 à 4 000 Bq.m⁻³. Dans la journée les moyennes oscillent entre 500 et 1 500 Bq.m⁻³. Les activités sont plus élevées dans les lieux confinés et peu ou non ventilés. Dans les réservoirs de stockage, les valeurs moyennes saisies sur trois semaines sont supérieures à 10 000 Bq.m³.

En ces lieux, les activités volumiques sont supérieures aux niveaux d'action définis pour les locaux professionnels par la C.I.P.R. (1993).

A des doses plus ou moins élevées, les rayonnements ionisants peuvent avoir des effets à long terme. Le personnel intervenant aux réservoirs est exposé, d'une part à cette activité nucléaire, et d'autre part aux actions immédiates du CO₂. En l'absence de ventilation, les concentrations de ces gaz peuvent augmenter de 60 %.

La Résidence Thermale Choussy est l'unique lieu possédant un système d'extraction d'air fonctionnant en continu au moment des soins. Les activités volumiques journalières sont en moyenne de 200 Bq.m⁻³ dans ses locaux.

Les essais réalisés dans la Grotte des fées ont permis de mettre en évidence le rôle de la ventilation dans la diminution des activités du radon, descendants et concentration en CO₂. Le système de ventilation existant est inopérant lors du remplissage des bassins.

Une démarche simple consiste à

installer une ventilation efficace, fonctionnant en permanence au niveau des salles de soins des Grands Thermes, sous-sols et réservoirs.

De nombreuses interrogations

demeurent. Une seconde campagne de mesures s'avère nécessaire. Il serait intéressant de pouvoir contrôler les systèmes d'extraction et de brassage d'air. Les prélèvements passifs de radon sur plusieurs semaines ne rendent pas compte de l'exposition des curistes ou des personnels. Ces mesures intégrées seraient à réaliser sur une période de trois semaines, uniquement aux horaires de fréquentation.

Les mesures ponctuelles représentatives de l'E.A.P.V. pour la durée du prélèvement sont à proscrire dans une future campagne. Les prélèvements en continu permettent d'observer des variations temporelles du radon. L'un des objectifs d'une seconde campagne serait de réaliser une cartographie des valeurs d'activité volumique du radon et de ses descendants, relevées en continu.

Parallèlement à la poursuite de ces recherches, l'intervention du corps médical est indispensable dans l'évaluation des conséquences sanitaires des faibles doses sur l'organisme.

Le développement des études épidémiologiques a permis de connaître les effets de l'exposition au radon sur l'incidence des cancers pulmonaires chez les mineurs d'uranium. Les études actuelles faites auprès du public s'attachent à fournir une estimation du nombre de cancers pulmonaires en fonction du cumul de l'exposition des sujets.

A l'heure actuelle, les conséquences des faibles doses à long terme sur l'organisme ne sont pas scientifiquement démontrées. Les possibles dangers, comme les éventuels bénéfices des faibles doses restent dans le domaine des hypothèses.

2 - L'ANHYDRIDE CARBONIQUE

XXXXXXXXXX

XXXXXXXXXX

Il y a peu de temps encore, réduit au rang d'une curiosité, le gaz carbonique jouait un rôle d'une grande discrétion.

Cette situation tenait au fait que l'ensemble des gaz thermaux se dissipait dans l'ambiance des galeries souterraines, de sorte qu'une eau quasi dégazée était refoulée dans les réservoirs de la grotte aux fées, eux-mêmes dépourvus d'étanchéité.

En l'époque, nos observations avaient été taxées d'exagération. Depuis la fin des travaux de rénovation évoqués aux chapitres qui précèdent (thèmes II et III) il est confirmé que, dans les conditions actuelles de pompage, **1 550 ml d'anhydride carbonique dégagent d'un seul litre d'eau minérale, sous une géothermalité de 57 °C.**

Au chapitre de la représentation commentée des posters, l'anhydride carbonique sera à nouveau évoqué, mais dans une optique différente.

2.1 – Dissociation

Dans les conditions d'extraction forcée indiquées, soit :

- point d'aspiration fixé à 56 m de profondeur,
- débit d'exhaure : 13 m³/h,
- hauteur d'eau surmontant le point d'aspiration : +/- 20,30 m,
- géothermalité : 57 °C,
- turbulence du niveau dynamique.

La quantité de gaz libéré est de 1 550 ml/l.

Un dosage plus précis, au millilitre près mesurera la quantité de CO₂ total, ce qui est fondamental pour la suite de notre raisonnement.

Ce gaz se subdivise en 4 fractions :

- 1) Anhydride carbonique **excédentaire, agressif**, étranger à toute combinaison, maintenu dans l'eau par la simple pression hydrostatique.
- 2) Une seconde fraction d'anhydride carbonique, **semi-combinée** représente les hydrogénocarbonates dont la stabilité

fragile est susceptible de se déplacer en fonction du pH.

- 3) Une troisième fraction dite **"équilibrante"** suggère une possibilité de déplacement vers l'un ou l'autre des deux pôles acide/alcalin selon les modifications spontanées du rapport CO₂/Ca et du pH.

- 4) Au-delà de pH = 8,3 enfin, l'anhydride carbonique est **combiné** au calcium.

Retenons que : si l'équilibre calco-carbonique n'est pas maintenu en l'état constaté à la sortie de l'ouvrage producteur, des dépôts carbonatés sont initiés en diverses sections du réseau intérieur de distribution.

2.2 - Équilibre calco-carbonique

Dans la mesure où du gaz se dissipe, entraînant un réajustement du pH s'élevant en direction de la zone alcaline, la solubilité du calcium et à un moindre degré celles du magnésium et du fer sont remises en cause.

Deux solutions sont à envisager :

- a) L'anhydride carbonique équilibrant est déficitaire ; des carbonates déposent sous forme d'incrustations : aragonite, calcite, carbonate de magnésie, sidérose. Ces minéraux peuvent cohabiter ou déposer les uns à la suite des autres, le long de l'adduction aux postes de soins, en conformité avec la perte de température constatée.
- b) Le gaz carbonique équilibrant est disponible en quantité suffisante pour compenser la fuite. Il se déplace alors vers la zone acide pour rétablir l'équilibre existant avant de parvenir au point d'aspiration. Pas de dépôt.

Le calcul des équilibres conduira à la connaissance de la forme adoptée par le fer. Celui-ci peut flocculer sous forme hydroxylée Fe(OH₃) ou cristalliser sous forme carbonatée : Sidérose

FeCO₃.

Rien n'étant laissé au hasard dans la nature, le laboratoire se doit de suivre les variations (naturelles) de l'équilibre calco-carbonique par référence à la théorie des eaux naturelles déjà évoquée.

La courbe d'équilibre peut facilement être informatisée, et le point figuratif suivi à tout moment, voire être enregistré. Tout incident survenant en cours de distribution de l'eau est alors saisissable.

Remarques : Aragonite et Calcite sont les deux formes de carbonate de calcium naturel. La première est stable à chaud, la seconde, à froid.

Toute perte de la géothermie initiale contribue à modifier la cristallisation des deux minéraux. La situation est compliquée par leur différence de solubilité.

Ainsi, l'Aragonite peut cristalliser en tête d'une antenne de distribution, tandis que de la calcite déposera plus loin en moindre quantité, à température égale, en plus grande quantité si l'eau a perdu ne serait-ce qu'un degré Celsius de sa chaleur.

En résumé, la Compagnie des Eaux Minérales de La Bourboule se doit de donner au laboratoire tous les moyens de suivre l'équilibre calco-carbonique en continu.

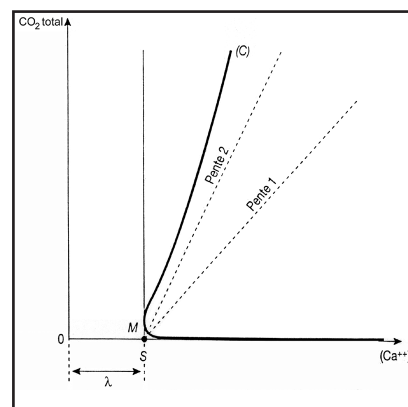


Figure 5 - Exemple de calcul de l'équilibre calco-carbonique selon les équations de L. Legrand et G. Poirier.

ÉTUDE DE LA FRACTURATION

PAR LA PROSPECTION DU DIOXYDE DE CARBONE

I.G.A.L. Université Cergy-Pontoise (95)

Séverine ROUGET – Elève-ingénieur

Dominique LEMAIRE – Maître de Conférences

Raymond LAUGIER – Professeur émérite des Universités

1 – Dans l'atmosphère

Le dioxyde de carbone plus communément désigné sous le nom de gaz carbonique est un composant normal de l'atmosphère.

Il ne dépasse pas la concentration de 0,1 ‰ et 0,2 ‰ au-dessus des grandes métropoles industrielles.

Ce gaz se trouve aussi normalement dans l'eau issue du ruissellement, depuis la source des fleuves jusqu'à leur embouchure. Sa concentration s'établit alors après équilibre à l'interface air/eau.

Cet équilibre, pH et thermodépendant, est en perpétuel réajustement.

Cette situation était inconnue au XIX^e siècle alors que les Sciences de la Terre étaient encore *in statu nascendo*.

A cette époque, les analystes produisaient tout ce qu'ils trouvaient dans une eau, notamment thermique, et c'est ainsi que sous la rubrique "gaz", figuraient l'azote et l'oxygène, tous deux d'origine atmosphérique.

Comme l'eau analysée accusait une géothermalité marquée, ces gaz étaient néanmoins déclarés "thermaux" bien qu'il ne s'agisse que de la signature du mélange des précipitations atmosphériques avec un tronc hydrothermal authentique.

2 – En profondeur

Dans les régions les plus profondes de la croûte, les roches que nous sommes habitués à échantillonner à l'état solide se trouvent dans des conditions de pression (225 hPa) et de géothermalité (+/- 450°C) tout à fait différentes.

Plus on s'enfonce vers la semelle de la croûte granitique et plus les minéraux cèdent la place à un

magma pâteux au sein duquel les ébauches cristallines emprisonnent des micro-bulles de gaz.

Si, par l'effet de la dynamique interne propre aux mouvements crustaux, les bulles peuvent migrer, s'agréger, donner lieu à un courant, celui-ci gagne la surface en suivant les grandes lignes de fractures du *reticulum* structural relayé par le *reticulum* climatique. Les gaz peuvent se dissiper, le gaz carbonique notamment et donner lieu à toute une série de phénomènes observables en surface :

- en forêt, aux abords de La Chaise-Dieu, par exemple, il est possible d'entendre fuser le gaz aux épontes d'un filon de quartz blanc, massif, affleurant dans un bois de résineux ;
- dans le parc thermal de Chatel-Guyon, la source Alice édifie en continu un travertin carbonaté et ferrugineux (R. Laugier).

3 – Production gazeuse

Parmi les gaz émis par la croûte, il faut distinguer :

- l'anhydride carbonique qui peut faire l'objet d'une exploitation industrielle comme ce fut le cas à Aigueperse (63) ;
- d'autres gaz rares, tel que l'Argon ;
- les descendants de certains radionucléides : Radon, Hélium.

4 – Identification du dioxyde de carbone

Dans les galeries d'exploitation souterraine (mines, carrières) et en hydrogéologie, la caractérisation du CO₂ repose sur une réaction d'addition : la phénylhydrazine mise en présence d'anhydride carbonique donne naissance à un composé d'addition : phénylcarbazone révélé par l'apparition

d'une belle coloration violette, veloutée, stable pendant 15' environ.

5 – Moyens matériels

Une campagne de mesures sur le terrain repose sur la réunion des moyens suivants :

- 1 véhicule tout-terrains ;
- 1 opérateur ;
- 1 manœuvre ;
- 1 marteau-piqueur et ses forets (L=1,20 m - $\Delta = 3"$) ;
- 1 aspirateur ;
- quelques tubes en matière plastique - Δ int. = 1,5" ;
- 1 coffret de mesures DRAEGER ;
- 1 batterie de gaz-tubes DRAEGER pour CO₂, concentrations assorties ;
- 1 thermomètre ;
- 1 rouleau de 25 m de tube polymère translucide ;
- 1 entonnoir plastique ;
- 1 trousse à outils .

6 – Mode opératoire

- Les points de mesures numérotés et piquetés selon une maille déterminée au cours de l'étude préparatoire, sont reportés sur un plan à l'échelle.
- Perforation d'un trou de 1,20 m de profondeur. Dépoussiérage. Tubage en polymère comme décrit ci-dessus. Descente d'un entonnoir raccordé au tuyau de Rodorsyl.
- Evaluation du volume total (entonnoir + tube).
- Purge de l'appareil.
- Pompage de 100 ml d'air en suivant les instructions du constructeur.
- Lecture directe après étalonnage.
- Archivage des résultats constatés.
- Transfert sur l'emplacement suivant.

7 – Prospection systématique de l'anhydride carbonique dans le périmètre élargi de La Bourboule

Vallée de la Dordogne

Deux profils de mesures à la maille de 50 ml* décalés d'une demi-maille ont été mis en place chacun sur l'une des routes reliant le Mont-Dore à La Bourboule, rives gauche et droite de la Dordogne. Quelques valeurs

significatives ont été relevées, notamment au droit de surfaces de friction ou encore dans une carrière située en rive droite découvrant un mini-émetteur de laves prismées.

Cette première démarche n'a pas apporté de résultats méritant d'affiner les mesures.

Parc Fenestre

La surface du parc Fenestre a été recouverte d'une maille de 50 ml abaissée à 25 ml puis 12,5 ml dans les zones les plus sensibles.

Des dégagements de gaz, masqué par des apports de terrains horticoles formant écran, ont permis de constater des valeurs singulièrement élevées reportées sur un fond topographique à l'échelle traduites en courbes équipotentielles (Fig. n° 1).

Il se confirme que la structure de roches cristallines, parallélépipédique, décalée en touches de piano, telle que représentée par J.P. GIBERT, se prolonge vers le sud et donne lieu à des ascen-

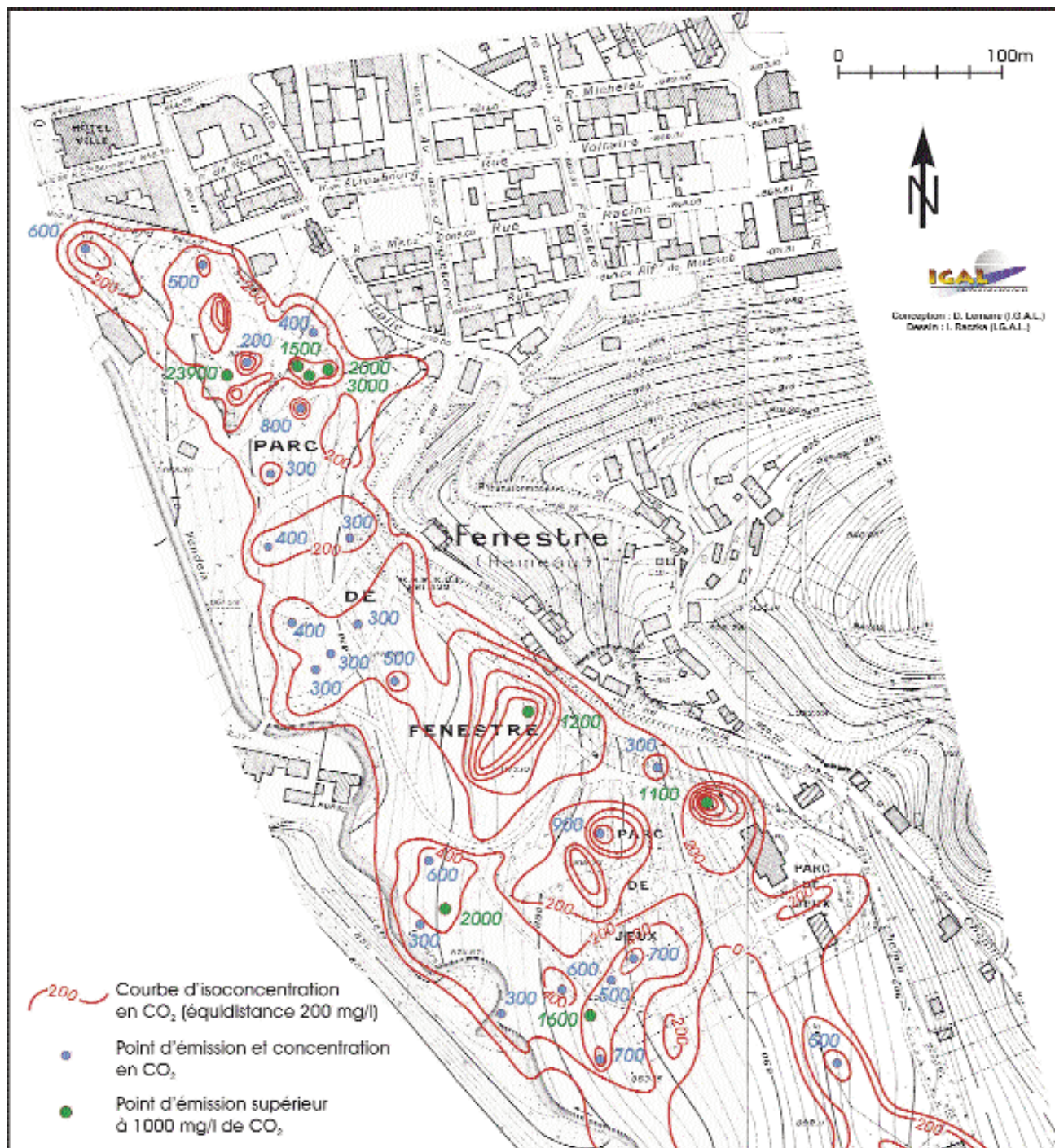


Figure 6 - Cartographie du gaz carbonique dans le parc Fenestre



Figure 7 - Vallée de la Dordogne, rive droite.

dances gazeuses vigoureuses. Le gaz étant, comme nous l'avons déjà expliqué, le moteur ascensionnel des eaux géothermales profondes issues de la caldeira, il devient impératif de confirmer la carte structurale. Une campagne doit être mise en place, selon un maillage et une géométrie différente, de façon à éliminer tout artefact.

De la comparaison entre les deux cartes de distribution du gaz, nous apprécierons l'opportunité de pro-

céder en un ou plusieurs endroits, à une vérification de la richesse en eau géothermale carbo-gazeuse.

Ce projet devrait être préparé dans l'intersaison 2003-04 avant l'arrivée des intempéries sévères, pour être réalisé à la fin des grands froids.

Programme de travaux

Séverine ROUGET a été investie du déploiement du programme sur le terrain, au titre du stage de fin d'études d'ingénieur-géologue.

670 mesures ont été réalisées selon le schéma dont nous avons donné la description.

Ce qu'il faut retenir :

- l'indifférence affichée envers le gaz carbonique au cours du siècle précédent n'a d'égal que la publicité faite autour de l'arsenic ;
- tous travaux de réhabilitation terminés, le titrage du CO₂ au fond de l'ouvrage Choussy-Perrière s'élève à 1 550 ml de gaz par litre d'eau ;
- dans le prolongement direct du groupe de failles dessinées au rebord de la Caldeira, la situation du parc Fenestre est privilégiée. Elle mérite de renouveler les mesures initiales, les confirmer, les affiner ;
- l'interprétation de la nouvelle campagne CO₂ devrait conduire directement à la désignation d'un point de contrôle par sondage carotté, appuyé sur les diagraphies électroniques habituelles. Cet ouvrage sera équipé en piézomètre d'observation ;
- il est prématuré de se livrer à toute spéculation hâtive et gratuite.

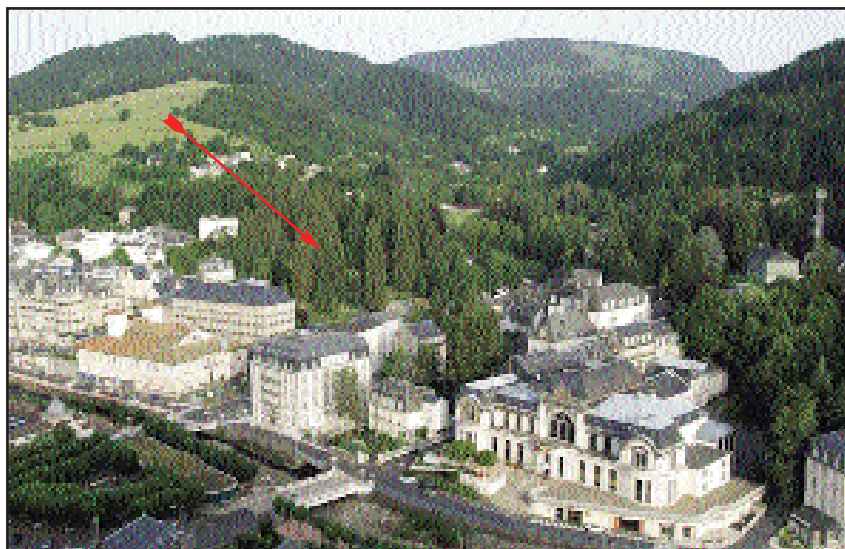


Figure 8 - Parc Fenestre (flèche rouge).

THÈME V

LES LÉGIONELLES

ESPACE VITAL ET POSSIBILITÉS DE LUTTE CONTRE LES LÉGIONELLES

Nicole RIEDLE – Docteur Ingénieur en Balnéologie
Privat Dozent près l'Université de Technologie de (D) Celle
Lauréate de la Société des Ingénieurs-civils d'Allemagne Fédérale

1 - SIGNIFICATION SANITAIRE DES LÉGIONELLES

Les Légionelles comptent parmi les éléments naturels de la microflore de l'eau ; il s'agit de germes des lieux humides, attendu qu'elles offrent une médiocre résistance à la dessiccation. A l'heure actuelle, 42 espèces différentes, ont été dénombrées. *Legionella pneumophila* est la représentante la plus fréquente.

Les Légionelles ont été découvertes en 1976, en relation avec le congrès annuel de l'American Legion. Au cours de cette rencontre dans un hôtel de Philadelphie, 211 personnes furent atteintes d'une violente inflammation pulmonaire, 34 décédèrent.

Il fut établi que la cause de la maladie était due au développement d'une bactérie dans l'humidificateur d'ambiance de la climatisation.

L'inhalation d'air chargé en Légionelles entraîne :

- bronchopneumonie fébrile grave, qui, si elle n'est pas traitée, provoque 15 à 20 % de décès ;
- affection de forme grippale (fièvre de Pontiac).

En Europe, 6 à 9000 personnes sont atteintes chaque année par une légionellose. La durée de l'incubation est de 2 à 10 jours ; l'accompagnement médical des patients est prolongé de 7 jours de façon à démontrer que les

Légionelles ne se développent plus sur milieu de culture artificiel. Les patients dont le système immunitaire est intact ne courent guère de danger en face d'une infection à Légionelles.

Parmi les personnes exposées, comptons :

- systèmes immunitaires déficients ; par exemple : malades, sportifs âgés ;
- diabétiques insulinodépendants ;
- fumeurs (irritation des voies respiratoires).

Chez de telles personnes immunodéprimées, une concentration de 100 Légionelles/litre d'eau chaude est équivalente à une concentration de +/- 10 000 germes/litre qui, chez des sujets sains serait capable de déclencher une maladie.

Il n'est pas contestable que les Légionelles introduites dans le corps soient passées par les voies respiratoires où elles se multiplient, puis atteignent les alvéoles pulmonaires grâce à leur taille particulière, inférieure à 5 µm.

Un risque d'infection aggravé réside dans les systèmes d'installations techniques ci-après désignées, siège d'une élévation de température :

- réseau de distribution alimentant une douche ; une climatisation automobile ;
- bassin d'eau bouillonnante (hot Whirlpool) ;
- appareils pour inhalations médicales ;

- humidificateurs dans les installations de climatisation.

Dans ces systèmes, l'eau est pulvérisée, surpressée, évaporée ou aérosolée, de sorte que les Légionelles peuvent être véhiculées jusqu'à l'intérieur du corps humain.

2 - CONDITIONS DE VIE DES LÉGIONELLES

Dans les cavités naturelles ouvertes dans les calcaires, de même que dans les carrières souterraines ou d'autres lieux encore, les incrustations carbonatées qui déposent aux parois ou recouvrent l'intérieur des canalisations sont d'admirables refuges pour des organismes microbiens, pathogènes ou non.

Les causes de formation des dépôts dans les installations sont :

- rupture de l'équilibre calco-carbonique ;
- dépôt des particules qui sont le support de la turbidité ;
- constitution d'un biofilm déposé ou adhérent ;
- dépôt de minéraux divers, instables en dissolution aqueuse, notamment des métaux plurivalents tels que Fe^{2+} et Mn^{2+} passés à la valence 3+.

Un certain nombre de conditions physiques sont exigibles pour que les causes énumérées ci-dessus puissent agir :

- faible vitesse de l'écoulement du courant d'eau ;
- ralentissement supplémentaire, voire stagnation de ce

- courant ;
- élévation de la température de l'eau ;
- évaison d'une portion des gaz dissous dans l'eau ;
- vitesse d'évasion de chaque gaz selon ses caractéristiques propres ;
- variation de la pression dans le réseau ;
- coups de béliet ;
- présence d'oxygène dissous permettant l'oxydation des hydroxydes métalliques réduits ;
- dépôt des hydroxydes sous forme de boue.

3 - LUTTE CONTRE LES LÉGIONELLES DANS LES INSTALLATIONS TECHNIQUES

Divers moyens ont été publiés en vue de détruire les Légionelles. Ceux-ci doivent être mis en œuvre rapidement et leur application spécifiquement adaptée aux eaux minérales et géothermales exploitées à la Bourboule :

- chloration de l'eau avec une grande quantité de chlore ;
- ozonation ;
- irradiation sous rayonnement UV ;
- traitement thermique de l'eau.

Ces 4 possibilités seront fondamentalement mises en œuvre pour le traitement des eaux dites « douces » ou « potables ». Les eaux minérales en seront exclues.

Chlore et ozone appartiennent au groupe des oxydants les plus puissants ; ils peuvent être employés dans la technique de la préparation d'une eau destinée à divers usages. On devine qu'en raison de son activité dévastatrice, cette méthode dont l'objectif est la destruction des germes, ait été sujette à controverse.

Dans le cas d'une eau minérale, la mise en œuvre de tels moyens d'oxydation conduirait obligatoirement à l'oxydation de toutes les substances oxydables véhiculées

par l'eau, et par voie de conséquence, à une modification de la composition initiale physique et chimique.

Ce constat est en contradiction avec les législations française et européenne.

Le rayonnement UV appliqué à une eau minérale est impossible à mettre en œuvre à la Bourboule en raison de sa composition en gaz thermaux ou hérités des apports d'eau climatique. En effet, les micro-particules gazeuses, infra-visibles, ont pour effet d'atténuer et disperser le rayonnement de sorte que la puissance bactéricide est amoindrie.

L'objectif : destruction des Légionelles, est considérablement dévoyé.

En résumé :

les moyens de lutte liés à l'oxydation conduisent à une modification de la composition des eaux dans le sens de la perte du pouvoir réducteur et la substitution d'un état oxydé exagéré. Cette composition minérale de substitution aurait peu de liens avec l'eau

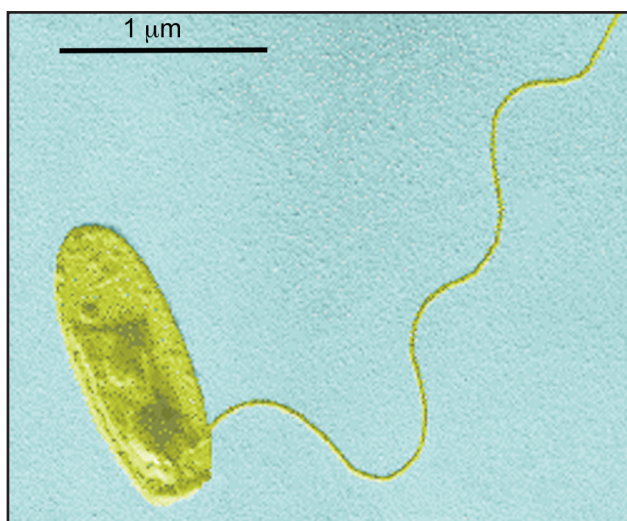


Figure 1 - *Legionella* sp.

minérale naturelle.

Le traitement d'une eau minérale par rayonnement UV n'est pas applicable aux eaux dont le potentiel curatif est lié à la richesse en gaz. C'est précisément le cas de La Bourboule.

Par contre, un traitement thermique a pu être appliqué avec succès aux eaux du réseau de distribution urbaine de l'eau potable.

Pourtant, une extension du traitement thermique conduirait obligatoirement à La Bourboule à une modification de la minéralisation de l'eau à usage thérapeutique. La conséquence d'une élévation de température est un déplacement de l'équilibre calco-carbonique. Le chimisme naturel de l'eau serait détruit. Le résultat serait une augmentation du dépôt de carbonates dans les installations. Celles des Légionelles qui ne seraient pas totalement tuées trouveraient un abri dans les incrustations pour s'y reconstituer une capacité de multiplication retrouvée.

Bilan : les différents traitements utilisés avec une satisfaction apparente dans le traitement des eaux douces ne sont pas applicables aux chimismes compliqués des eaux minéralisées et par surcroît, géothermales.

4 - LES EAUX MINÉRALES DE LA BOURBOULE

Le chimisme des eaux de La Bourboule repose sur la présence des minéraux qui sont rappelés dans le tableau ci-après :

Remarques : les éléments écrits en caractères gras sont susceptibles de déposer sous forme carbonatée, en cas de déséquilibre calco-carbonique

L'eau de La Bourboule est administrée aux patients à travers les formes de thérapie suivantes :

* **fondamentalement par inhalation :**

- individuelle ;
- collective ;

* **secondairement par :**

- bain ;
- cure de boisson.

L'eau minérale étant principalement utilisée pour les inhalations, de sorte que la problématique des Légionelles est, pour ces formes de traitement, particulièrement brisante.

Un problème ultérieur se pose à travers les instructions réglementaires publiées en France depuis ces deux dernières années. Elles

	CONCENTRATION	
ELEMENT	mg/l	mE/l
Chlorure	1761	49.68
Nitrites	<0,005	<0,01
Nitrates	0,01	<0,01
Sulfates	126	2,62
Hydrogénocarbonates	1702,5	27,9
Fluor	4,94	0,26
TOTAL ANIONS	---	-80,46
Ammonium	<0,05	<0,01
Calcium	31,8	1,59
Magnésium	8	0,66
Sodium	1 628	70,81
Potassium	90,2	2,31
Aluminium	0,01	<0,01
Arsenic	5,87	---
Baryum	0,21	0.01
Bore	13,2	---
Cadmium	<0,0005	<0,01
Fer	0,55	0,02
Lithium	5,9	0,85
Manganèse	0,03	<0,01
Plomb	<0,005	<0,01
Sélénium	<0,009	<0,01
Strontium	3,2	0,07
Zinc	0,067	<0,01
TOTAL CATIONS	---	76.31
BILAN	---	-4.15

s'appliquent à la notion d'Arsenic ZERO.

A La Bourboule, l'eau à usage thérapeutique est produite et stockée sous influence de l'air ; la production doit être protégée contre les baisses de pression qui conduisent à une modification du chimisme de l'eau.

Afin d'y parvenir, il faut procéder à un traitement préliminaire partiel mais spécifique dont l'objectif est la suppression des Légionelles identifiées dans l'eau. La pénétration des bactéries dans l'eau minérale souterraine, après mélange à des eaux souillées, ne peut pas être modifiée.

En conséquence, les conditions de vie et de croissance des bactéries doivent être prises au plan fondamental. Celles-ci sont accessibles lorsqu'elles ne sont pas camouflées dans les incrustations, ce qui signifie que les rares sources nutritives des bactéries ne doivent pas pénétrer ce milieu.

Tableau I – Rappel : composition de l'eau minérale de La Bourboule.

NICHES ÉCOLOGIQUES PARTICULIÈRES AU GENRE *LEGIONELLA*

Bernard VEDRY – Ingénieur biologiste au Syndicat Intercommunal d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (S.I.A.A.P.)

Nous avons expliqué que l'habitat des Légionelles est défini par trois critères :

- Ecoulement d'eau tiède ou chaude ;
- Existence d'un biofilm ;
- Aérobiose.

Or, dans certains établissements, l'eau, chaude ou tiède, s'écoule en permanence des évier dans le réseau, devenant une eau « usée ».

Le changement de statut de l'eau s'accompagne généralement d'un désintéressement puisque l'eau ayant rempli son rôle n'a plus d'intérêt économique.

Le passage à l'évier a modifié de façon importante l'eau de distribution :

1. elle a perdu sa pression de refoulement ;
2. sa chimie change du fait de la chute de pression. Le dégazage du gaz carbonique engendre des dépôts carbonatés ;
3. l'eau subit deux chutes de température :
 - en premier, au contact des appareils sanitaires en céramiques,
 - postérieurement, lors de la vidange des lavabos et autres bassins de faible capacité destinés aux soins ;
4. l'eau est saturée en oxygène dissous au cours de l'écoulement du robinet avec ou sans brise-jet.

Ces transformations agissent toutes dans le sens de la formation d'un biofilm à l'aval de l'évier dans les conduites d'écoulement des eaux usées.

Dans le cas des eaux riches en ions sulfure, le biofilm plus abondant encore contient une flore bactérienne adaptée : *Thiothrix*, *Beggiatoa*, éventuellement Cyanobactéries et quantité d'espèces unicellulaires. Les couches profondes de ce biofilm subissent une évolution anaérobie due à une décomposition putride caractérisée par une succession d'espèces bactériennes et de protozoaires spécifiques.

1 - COLONISATION DU BIOFILM

Ces biofilms sont bien entendu colonisés par les prédateurs naturels des biofilms bactériens : protozoaires, flagellés, ciliés, amibes et nématodes. Les amibes sont des hôtes intermédiaires propagateurs des Légionelles.

2 - UN BIOFILM TRÈS DISCRÉT

Le problème est que le biofilm des écoulements d'eau usée n'est pas visible, ne fait pas de bruit, n'engendre pas d'odeur et n'est jamais visité parce que jamais point de visite n'a été prévu dans l'installation ce qui démontre clairement que ce biofilm est considéré par l'état de l'art comme inexistant, ou au moins comme n'ayant aucune influence sanitaire.

3 - HEUREUSEMENT UNE MOUCHE

Le biofilm des eaux usées tièdes est le biotope d'élection d'un organisme extraordinaire pour sa faculté d'adaptation : la mouche *Psychoda*. Connue depuis des siècles sous le nom de : « mouche des

vitesse et sans pression, précisément le cas des écoulements d'éviers d'eau tiède et sulfurée.

La larve de la mouche est adaptée à la putréfaction des biofilms ; elle consomme la matière organique putride dans laquelle elle vit et respire l'oxygène par un siphon caudal. Les enzymes salivaires de la larve contribuent à la putréfaction et liquéfaction du biofilm... Les mouches *Psychoda* vivant donc dans les tuyaux d'éviers, douches, salles de bains, égouts, fosses septiques, n'apparaissent pratiquement jamais à l'air libre. Leur population est contrôlée et limitée par des organismes tels des Acariens qui mangent leurs œufs et probablement d'autres parasites encore.

Or il arrive exceptionnellement, à l'occasion d'une prolifération inhabituelle de mouches, à l'occasion d'une ouverture de regard ou rupture de conduite, que quelques mouches s'échappant de leur antre apparaissent sur les murs des salles. Leur petite taille, leur vol silencieux, leur petit nombre n'attire pas l'attention. Pourtant

- certains éviers, douches ou baignoires en stations thermales ;
- aérogénérateurs qui forment des biofilms puissants ;
- toutes les eaux usées industrielles chaudes.

4 - CONCLUSION EN QUATRE POINTS IMPORTANTS

1. Le réseau d'eaux usées des éviers, douches, baignoires, toilettes chroniquement chaudes ou tièdes abrite des biofilms plus ou moins abondants.
2. Ces biofilms sont souvent ignorés parce dissimulés à l'observateur.
3. Une mouche discrète, mais facile à reconnaître, révèle un biotope caché contenant potentiellement des Légionelles.
4. La mouche n'est probablement pas dangereuse par elle-même, encore que des proliférations de *Psychoda* sont connues pour avoir provoqué des allergies.

Interprétation de la dose infectante

La dose infectante de Légionelles est comprise entre des valeurs apparemment très variables. Cet écart étonnant s'explique par les différences entre :

1. sensibilité à l'infection des individus, c'est-à-dire à leurs différences immunologiques. Un individu immunodéficient étant sensible à des doses infectantes plus faibles qu'un individu en pleine forme immunitaire ;
2. sérovar de Légionelles, certains étant plus virulents que d'autres et pouvant eux-mêmes subir des mutations.

Cette plage de doses infectantes est très large. Sur le plan de la prophylaxie pratique ; elle ne doit pas faire illusion.

Un établissement hospitalier ou tout site à risque doit prévoir des équipements de prophylaxie dimensionnés sur la valeur minimale de la plage des doses infectantes annoncées. Ainsi seulement des infections mortelles pourront être prévenues.



Figure 2 - Mouche avec ses poils sur le corps et les ailes, la forme de ses ailes lancéolées et la disposition de ses nervures,

éviers », cette petite mouche poilue lucifuge, au vol court et maladroit, pond sur des biofilms putrides et tièdes. Or on sait qu'un biofilm aérobique en surface est toujours anaérobique en profondeur dans le cas d'écoulement d'eau en petite

elles révèlent l'existence à proximité d'un biofilm putride. En fait, ce sont des bioindicateurs de biotopes contenant potentiellement des Légionelles lorsque le site contient des eaux usées tièdes ou chaudes :

THÈME VI

L'ALLERGIE

Professeur DE MONTIS - Allergologue

1 - PRÉSENTATION

L'allergie est une réaction personnelle par rapport à quelque chose qui existe en dehors de soi et n'est pas toxique. C'est un rejet par l'individu, et par rapport à quelque chose.

L'idée de la médecine : l'organisme humain rejette quelque chose qui lui est étranger et ne correspond pas à son patrimoine constitutionnel propre :

- montre en nickel déclenchant un eczéma ;
- bretelle de soutien-gorge provoquant une irritation locale.

Les mécanismes de l'allergie sont nombreux et multiples, ils ne sont pas tous parfaitement identiques. En 1968, les problèmes que l'on nommait "hypersensibilité" ont conduit à établir une classification d'où ressortent quatre voies principales distinctes :

- 3 à médiation humorale sérique ;
- 1 à médiation cellulaire.
- hypersensibilité immédiate : réaction aux pollens ;
- hypersensibilité cyto-toxique : certains organismes réagissent à la prise de médicaments conduisant à une destruction cellulaire ;
- maladie sérique ;
- hyper-sensibilisation retardée.

Aujourd'hui, cette classification apparaît erronée, mais elle a été très pratique, permettant de décrire l'ensemble des situations auxquelles les médecins pouvaient être confrontés.

Parmi les mécanismes multiples, l'un d'entre eux est particulier : c'est l'allergie **atopique**, terme inventé par Coca en 1923. Personne ne peut en donner une définition précise. C'est une réaction d'une autre nature que développent certaines personnes et pas d'autres.

L'allergie est connue depuis longtemps, le premier type étant le rhume des foins dont l'observation clinique date d'Hippocrate mais dont l'explication remonte à 300 ans. Un schéma physiopathologie parfaitement connu est disponible.

Nous sommes confrontés à un corps étranger et notre organisme, à la place de fabriquer des Ig G, fabrique des Ig E. Et les choses en restent là.

L'allergie n'est pas une maladie mais un état qui se déclenche lors de la réintroduction du corps étranger dans l'organisme.

Le patient fait alors une réaction parfois mortelle comme c'est le cas avec la cacahuète parce que l'organisme a été modifié et qu'il ne supporte pas la réintroduction de cette substance étrangère. Une personne allergique à la cacahuète, si elle n'en mange plus jamais, ne sera jamais malade. Son organisme est modifié, mais elle n'est pas malade. La maladie apparaît lorsqu'elle sera à nouveau confrontée à l'allergène. Cette situation correspond à ce qui était désigné jadis sous le nom de phase : sensibilisante, déferlante.

Il suffit alors de déterminer l'élément auquel l'individu est allergique et de l'éliminer pour qu'il ne soit plus malade.

Pour empêcher que se développe une allergie, il faudrait un environnement idéal. Le problème est que nous ne sommes plus au jardin d'Eden et que les substances les plus anodines, voire nécessaires à notre vie, peuvent aussi devenir autant d'allergènes. Des bébés de quelques semaines peuvent être allergiques au lait.

Par conséquent, si on peut devenir allergique à tout, même envers ce qui est nécessaire à la vie, je crois qu'il faut se faire une raison : l'allergie atopique n'est pas prête de disparaître. Le reste n'est qu'une question de vocabulaire.

2 - COMMENT DEVENIR ALLERGIQUE ?

La prévention de l'allergie ne peut passer que par un aménagement maximaliste de l'environnement natal. Il a été très largement démontré que c'est pendant les premières semaines de vie que se joue l'avenir.

L'étude des pics de sensibilisation des sujets en fonction de la date de naissance fait apparaître un cycle saisonnier, tout particulièrement pour les pollens. Se sont les enfants qui atteignent deux ou trois mois au moment de la saison pollinique qui sont le plus souvent sensibles aux pollens. Beaucoup plus que tous les autres.

Dispersion des pollens et calendrier saisonnier

L'exposition aux pollens débute en septembre, en région parisienne. C'est la saison de pollinisation des cèdres, de tous les cèdres qu'ils soient originaires du Liban ou de l'Atlas. Acclimatés au régime tempéré, ils n'en ont pas moins gardé leur rythme biologique de type méditerranéen.

Passé l'hiver, ce sont les Trembles dès février, puis toutes les populacées. Le noisetier prend le relais début mars, puis la totalité de la flore, herbacée ou arbustive, jusqu'à la coupe des foins, en juin. D'où le rhume des foins dont la désignation est attachée aux travaux des champs.

Les premières manifestations

allergiques à des pollens exotiques ont été ressenties dans la région paloise. Au milieu du XIX^e siècle, des Anglais s'étaient installés en résidence à Pau, subjugués par la douceur du climat et le grandiose panorama sur la chaîne des Pyrénées. Ils avaient introduit palmiers, Cycas et autres arbres/arbustes exotiques qui s'étaient acclimatés de façon luxuriante. Ce fut l'époque d'un premier contact avec de tels pollens.

Plus tard, ces Anglais se transfèrent sur la côte d'azur. Le cortège pollinique les suit, avec les inconvenients qui s'y trouvent attachés. Sur la Côte d'Azur aussi, l'échelonnement des pollens est bien marqué. Une seconde acclimatation de nombreuses espèces de palmiers est suivie par la dispersion de pollens dont l'agressivité est très large.

Partout, les gaz de circulation automobile augmentent la gravité des réactions allergiques d'origine pollinique.

Quand, comment et pourquoi devient-on allergique ?

Il s'agit d'une rupture d'équilibre. C'est une surcharge antigénique dans l'environnement qui déclenche les symptômes.

La sensibilité au pollen est plus fréquente chez les gens vivant en milieu urbain que chez les ruraux. Paradoxal non ? Et pourtant simple à expliquer. Dans nos campagnes il y avait une diversité des pollens, donc compétition. Les populations rurales sont protégées alors que chez les urbains il y a exclusivement 1 ou 2 types de pollen et c'est là que des sensibilisations s'observent.

Les choses ont changé, depuis ces 35 dernières années, lorsque sur la Côte d'Azur, les propriétaires se sont retranchés derrière des haies de cyprès autour de leur petite villa. Des pollinoses du cyprès sont apparues à cause de la concentration en certain pollen, gonflée de façon artificielle.

Mais actuellement, le monde rural n'est plus épargné. Le remembrement a détruit les haies créant des champs immenses. Par exemple, des champs de colza sur 25 km

délivrent une concentration monopolinique inconnue jusqu'alors.

La diversité pollinique est effacée au profit (désastreux) d'une augmentation des sensibilités au pollen dans le monde rural.

Un facteur irritant s'y associe par exemple : la pollution.

Autre type : des infections induisent l'effet surajouté qui fait basculer vers l'asthme.

Dans les ruptures d'équilibre, les troubles de nature psycho-affective peuvent faire basculer vers la maladie.

Une image peut résumer et rendre compte du processus de l'allergie, prise dans son sens le plus large :

Un système d'engrenage, formé d'une série de roues dentées articulées les unes dans les autres. Chaque petite roue transmet l'énergie reçue de la précédente ; chaque petite roue ne peut tourner que dans la mesure où elle est synchrone avec celles qui la précède ou la suit. Qu'une roue soit bloquée et c'est tout le système qui est paralysé.

De la composition élémentaire et ionique de l'eau minérale dispensée à La Bourboule au cours des soins, il n'est pas interdit de retenir que l'arsenic mis à part à cause de l'hypertrophie accréditée à son rôle, d'autres critères analytiques : pH, potentiel redox, caractère réducteur, salinité proche de l'isotonie, équilibre cation-anions, forment un buisson d'arguments qui autorisent à penser que cette eau est sédative parce qu'elle offre l'occasion de bloquer la dynamique du processus allergisant.

L'asthme

La crise d'asthme sera-t-elle réversible ou entrons-nous dans une phase de traitement plus ou moins compliqué ? La différence est fondamentale.

Une crise d'asthme peut être sans suite. La maladie asthmatique est un traitement au long-cours, c'est une véritable prise en charge.

3 - L'ENGRENAGE IMMUNOMÉTABOLIQUE.

C'est l'arrivée de l'antigène sur la muqueuse nasale ou respiratoire

qui entraîne localement une réaction suivie de la libération de médiateurs. Ceux-ci agissent plus ou moins rapidement suivis par l'intervention d'autres médiateurs créant une cascade parvenant jusqu'aux bronchioles accompagnée d'une constriction qui empêche l'air d'être expulsé des poumons : c'est la crise d'asthme. Un facteur homéostatique se met en place, détruit les médiateurs chimiques, et l'on revient au point de départ.

La crise simple d'allergie, peut se reproduire mais sans conséquence. Traitement au coup par coup. Mais le système, en se bouclant, peut créer une inflammation locale auto-entretenu. On est entré dans un système continu dont l'expression typique est une hyper réactivité bronchique facile à constater au laboratoire d'exploration respiratoire fonctionnelle.

A tout moment la crise peut se réinstaller quelle que soit la cause sous jacente : apparition de l'antigène, augmentation de l'inflammation. Un traitement par corticoïdes inhalés, permet de réduire l'inflammation.

4 - APPROCHE ET PRISE EN CHARGE DES MALADIES ALLERGIQUES

Le praticien s'occupe de la maladie, mais il est important aussi de s'occuper du malade. Cette démarche n'est pas limitée à la maladie asthmatique, mais applicable à de nombreuses pathologies. Quatre facteurs sont associés :

- organe cible ;
- facteur de tension psychoaffective ;
- état biologique sous-jacent ;
- environnement.

Il faut intervenir sur ces facteurs pour trouver la meilleure thérapeutique et ne pas traiter exclusivement l'organe cible qui permettra d'obtenir un état satisfaisant. Il faut essayer de comprendre le malade allergique.

L'un de mes collègues m'a signalé qu'il parvenait à soigner les asthmatiques par psychothérapie. Lors de la création de l'hôpital de jour pour les asthmatiques à St

Vincent de Paul, j'ai souhaité que des psychologues soient intégrés dans mon équipe pour mieux comprendre l'état psychologique des sujets asthmatiques. Si bien que nous avons les tests cutanés, les tests Ig E, la radiologie et l'exploration fonctionnelle respiratoire pour les facteurs biologiques et la psychologie avec l'entretien. Une discussion finale sur les résultats obtenus permettait souvent au patient de se sentir mieux. La thérapeutique comporte un traitement de base : le médicament. Dans cette situation, le praticien prescrit des médicaments toute la vie du patient sans avoir vocation à le guérir. Maintenant le médecin entreprend l'éducation du patient en lui apprenant à prendre correctement ses médicaments et non pas à l'éduquer sur les causes (par exemple les acariens) de sa maladie.

La vaccination anti-allergénique doit s'associer au protocole de soins mais elle ne peut pas résumer la thérapeutique. La voie idéale est l'aménagement de l'environnement. Si l'environnement n'est plus pathogène, l'organisme ne deviendra pas insensible mais le seuil de déclenchement de la crise ne sera jamais dépassé. C'est souvent un vœu pieu. Dans le cas des acariens, 1 mm² de peau fait vivre des dizaines d'acariens pendant 6 mois. Ce sont leurs fèces qui sont allergisantes. La bonne méthode est d'équiper la literie avec des housses spéciales anti-acariens. Le résultat est spectaculaire. L'important, est de jouer sur tous les tableaux. L'aide psychologique que peut apporter le médecin généraliste est très importante.

5 - QUE DIRE DU THERMALISME ?

Je respecte toutes les autres pratiques médicales à partir du moment où elles ne sont pas commerciales et que le client est satisfait. Pour ce motif, j'ai toujours accepté les demandes de crénothérapie exprimées par les malades.

Il faut comprendre où se situe le thermalisme dans le concept que j'ai formulé.

Sur la réactivité de l'organe cible, il est possible que l'on modifie un certain nombre de paramètres en raison de son rôle anti-oxydant. mis en évidence par les travaux de Lille.

De plus l'enfant se retrouve au calme avec sa maman cela peut faciliter le dialogue et détendre les tensions psychologiques.

L'action directe de l'arsenic est mal envisagée.

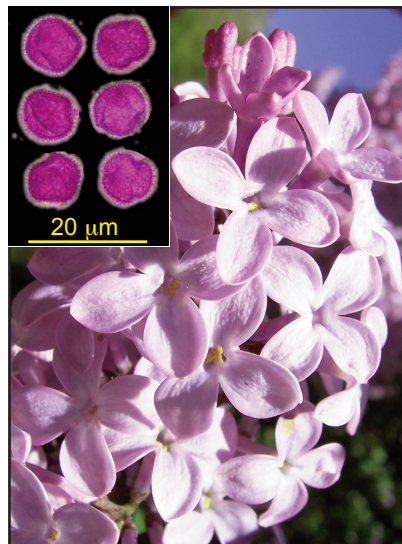
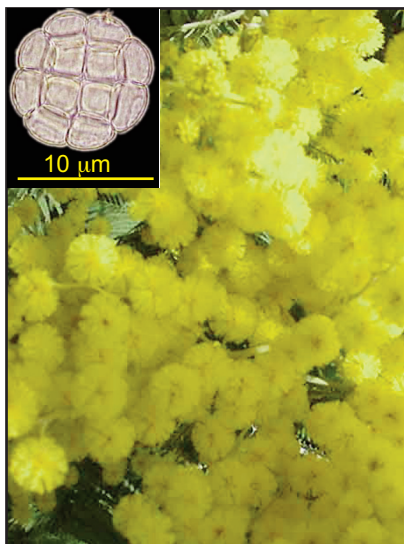
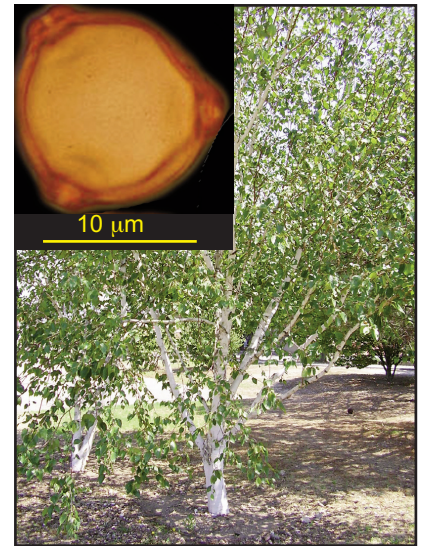
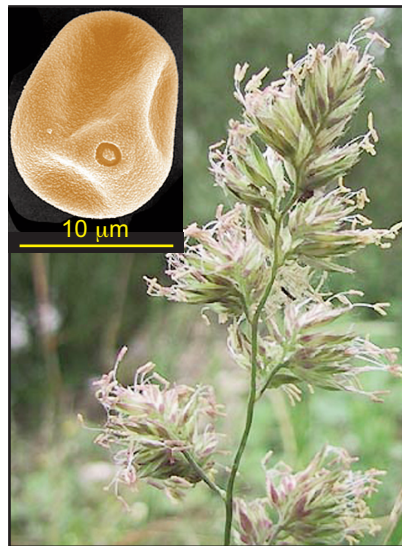
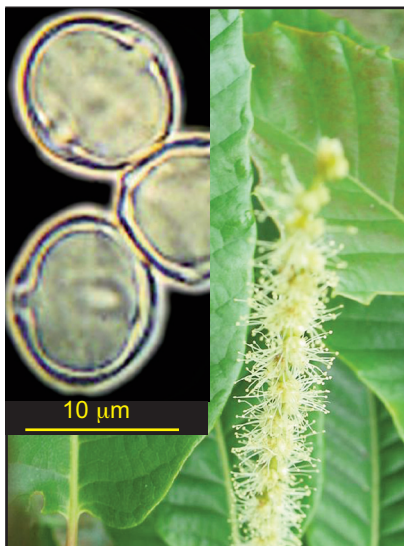


Figure 1 - Différents genres de fleurs dont le pollen est allergène.

- A - Châtaigner
- B - Graminée : *Dactylis glomerula*
- C - Bouleau
- D - Mimosa
- E - Lilas

Seuls les pollens de faible calibre, de l'ordre de 10 microns, pénètrent dans les voies aériennes supérieures.

THÈME VII

LE PATRIMOINE HYDROTHERMAL DE LA GRÈCE

Dr. Pr. hab. C. GARAGOUNIS

Dr. Pr. M. GARAGOUNIS

L. ECONOMIDIS

P. KOLLIAS

V. NASTOS

M. PAPADAKIS

J.-P. GIBERT

TRADUCTION & COORDINATION R. LAUGIER

L'évocation de quelques sources thermales dispersées sur le territoire grec, incorporée aux travaux du Colloque sous forme de posters, est le résultat de trois décennies de relations confiantes entre nos équipes et celles du département homologue de l'Université Nationale Technique et Scientifique d'Athènes.

Pendant cette période, notre souci a été de nous conformer à la doctrine des pays de la Communauté européenne les plus avancés dans les applications de l'Hydrologie à la Santé : universités de Fribourg en Brisgau, Heidelberg et Hambourg pour ne citer que celles-là.

Nous nous attachons aux paramètres physiques et chimiques évolutifs, à leur saisie au point d'émergence, répliquée au laboratoire, suivie par des corrections thermo-barométriques indispensables et la prise en compte de la part de chaque volume d'eau dont l'addition se traduit par cette irremplaçable spécificité répondant au concept des héritages cumulés.

Atteindre à ce but passe par la création d'un bulletin d'analyse spécialement conçu que nous reproduisons *in-fine*.

1 - LES THERMOPILES : UN PEU D'HISTOIRE

La bataille des Thermopyles qui eut lieu en 480 av. J.C. entre Grecs et Perses a eu des consé-

quences politico-historiques considérables dans le contexte méditerranéen. Les Grecs en ont retiré une formidable renommée ; celle-ci ne s'est pas effacée au cours du temps.

Un petit nombre de défenseurs du défilé des Thermopyles se réserve l'insigne honneur d'être les premiers à lutter avec courage et témérité contre les myriades de Barbares qui les envahissaient en créant une panique générale.

Ces défenseurs tinrent leurs positions pendant les incidents violents des deux premiers jours, mettant les chefs persans dans l'embarras en raison des pertes immenses que subissaient leurs armées.

Pourtant, au 3^e jour de la bataille, encerclés de toutes parts, les défenseurs du défilé avaient délibérément décidé de se sacrifier pour leur Pays.

Belle leçon, compte tenu de l'effacement de la notion de patriotisme, dans la période où nous vivons. La décision héroïque des défenseurs joua sur le moral des persans, retardant leur avance, encourageant le reste des troupes grecques à garantir la victoire sur deux autres sites : Salamais et Plataeae.

La plus importante récompense pour ces hommes reposait sur le fait qu'ils étaient devenus un symbole immortel pour tous ceux qui défendent une cause sacrée, telle la liberté de soi et celle de son

pays. Le courageux sacrifice de 700 Thespiis, 300 Spartes et de leur roi Léonidas, les avaient non seulement couronnés avec l'aurore de la gloire, avaient non seulement défini les Thermopyles comme un endroit de vénération pour les Grecs, mais aussi pour le monde entier dans les idéaux universels de l'honneur et de la liberté.

Le défilé où avait eu lieu la bataille mesurait 3 km (15 stades) dans la proximité du fleuve Phœnix. La passe était délimitée entre le mont Callidromon au sud et les eaux du golfe de Malan au Nord (Hérodote, VII 200) (Fig. n° 1-2)

Sa largeur était de 15 m, sa longueur : 1 300 m. Le lieu était stratégique, car le Callidromon était élevé et abrupt. A son extrémité ouest, les sources chaudes qui ont donné leur nom au lieu-dit étaient placées sous la protection d'Hercule. Un autel avait été édifié, consacré à son culte.

Aujourd'hui encore, les sources sont conduites à des bains modernes.

A l'est de la passe : deux buttes proches l'une de l'autre, le Kolomos et le Phocian Mur (Hérodote VII 200, 176 et 225).

Tous ceux qui ont donné leur vie en luttant vaillamment pendant la dernière bataille sont restés dans l'estime de Léonidas. Ils furent inhumés sur le Kolomos. Une colonne commémorative ayant à ses pieds un lion taillé dans la

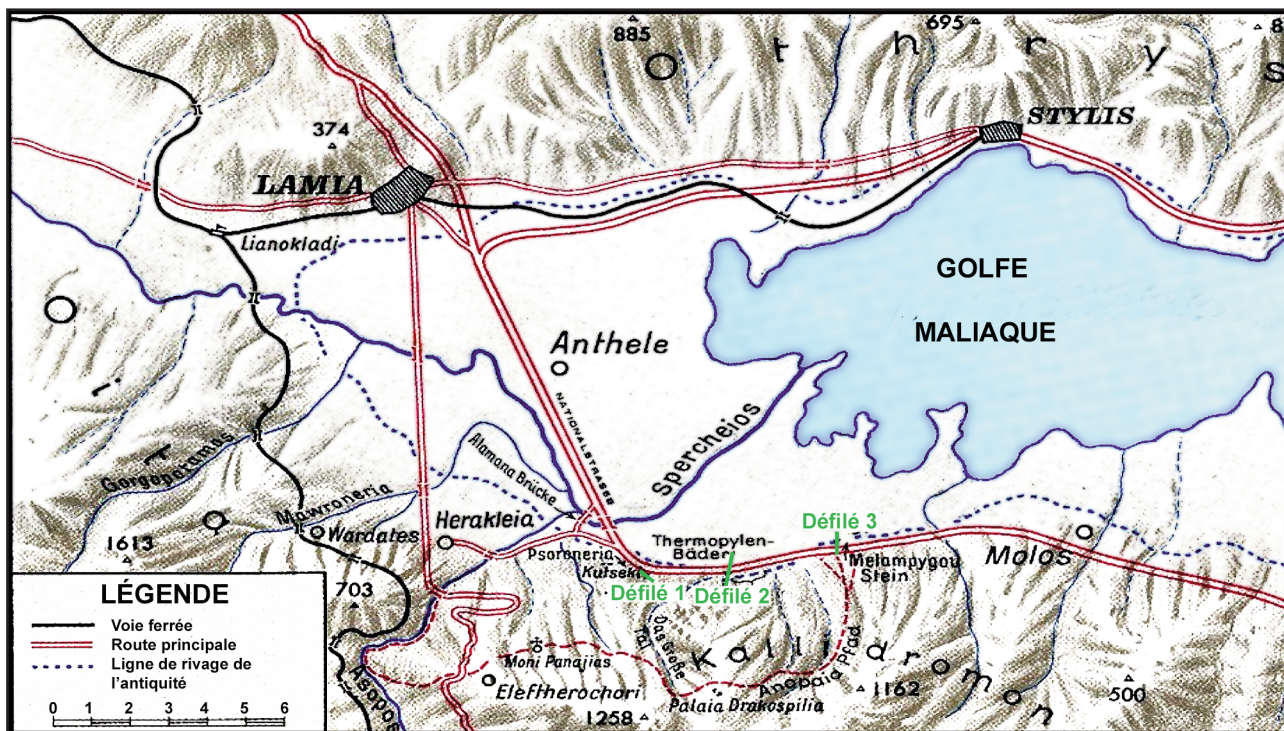


Figure 1 - Situation actuelle des environs

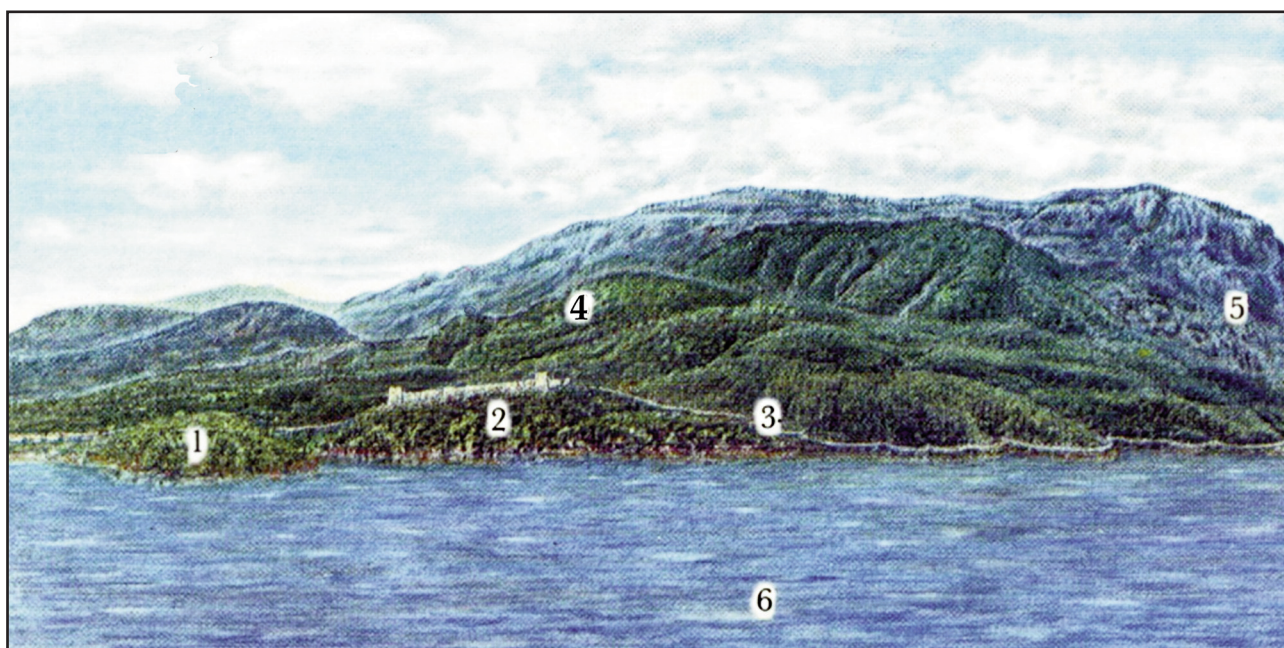


Figure 2 - Morphologie des défilés des Thermopyles à l'époque de la célèbre bataille

- 1 - Colline Kolonos, lieu du sacrifice volontaire des derniers défenseurs du défilé
- 2 - La colline avec son mur fortifié. En arrière, se trouvait le camp des Grecs. A l'extrémité orientale du défilé se trouvait le chemin.
- 3 - 4 le défilé des Thermopyles est jalonné par un chemin. Il mesurait environ 1300 m de long. Sa largeur variait de 15 à 30 mètres.
- 4 - Entrée occidentale du défilé, là où jaillissaient déjà des sources thermales.
- 5 - Le massif du Kallidromon, élevé, abrupt délimite la paroi sud de la passe.
- 6 - Le golfe de Malisch baignait dans l'Antiquité le pied du Kallidromon.

Pierre et une inscription en l'honneur de ceux qui tombèrent rappelaient aux générations le sacrifice de leurs pères (Hérodote VII 225 et 228).

Commentaire : depuis l'époque de

la bataille, le torrent nommé Spercheios a alluvionné vigoureusement de sorte qu'il a construit un important épandage alluvial. La ligne en tireté indique les contours du rivage à l'époque de

la bataille des Thermopyles dont les 3 défilés (Engpass 1, 2, 3) sont maintenant à l'intérieur des terres.

2 - DE L'HISTOIRE À L'HYDROGÉOLOGIE

2.1 - Les Thermopyles

La source des Thermopyles résulte d'un caprice compliqué de la nature.

Il n'y a aucune description, pas même la nôtre, qui rende compte de la réalité hydrogéologique et structurale du lieu.

à divers stades de leur exposition à l'oxygène dissous.

Cet oxygène est apporté en partie par l'eau de mer qui se mêle à l'eau thermique (environ 20 %).

L'eau minérale des Thermopyles est donc plurigénique.

La grande vasque qui est le point d'émission principal des filets d'eau secondaires s'écoulant de fissures voisines, est tapissée par

un bio-film d'un intérêt considérable, ce que nous avons affirmé à plusieurs reprises et depuis 1992.

Le bio-film est surtout constitué de Cyanophytes dont la pigmentation vert-bleu ressemble à celle de la turquoise. Mais ce groupe est très touffu : il comprend des espèces de jours longs et d'autres affines à des jours courts. Les fructifica-

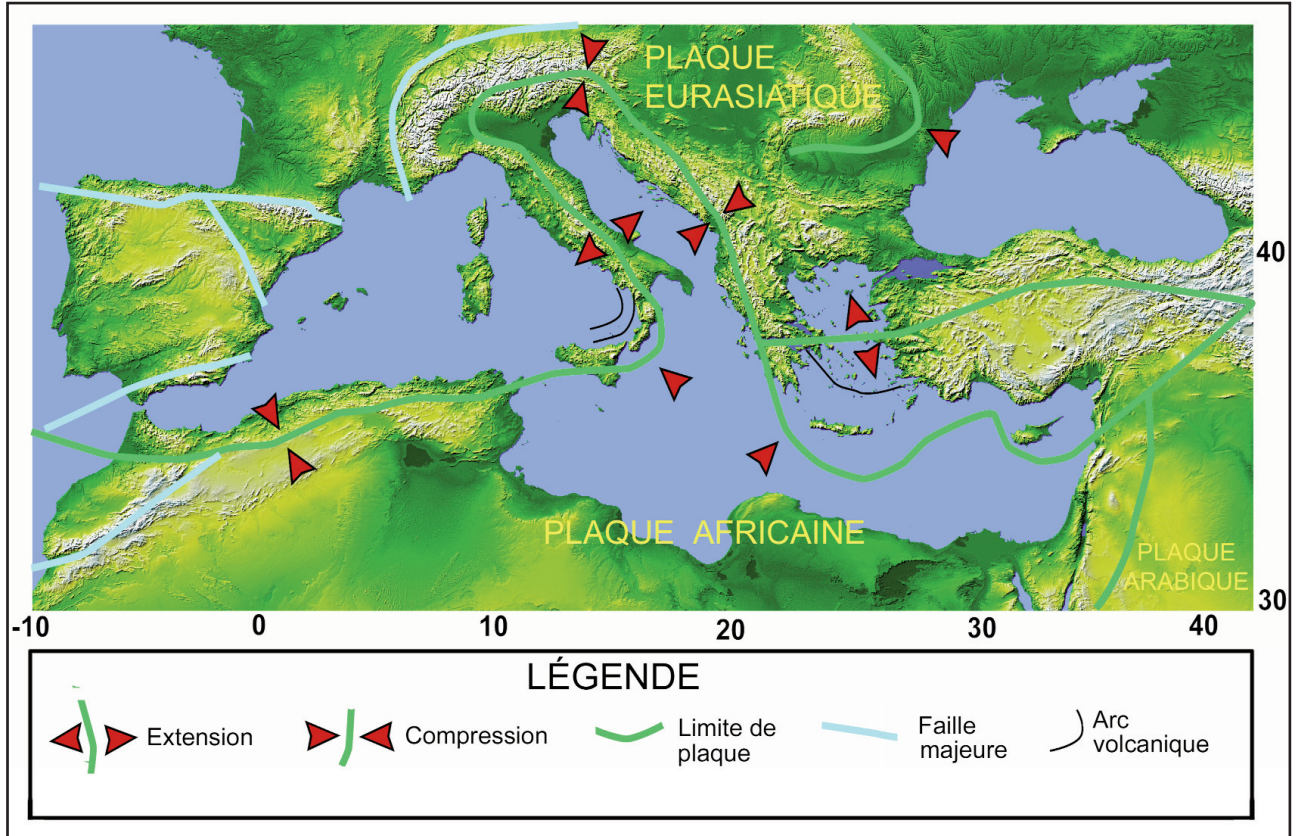


Figure 3 - Schématisation des relations inter-plaques dans l'espace méditerranéen (d'après les plus récentes acquisitions). C'est de ce phénomène tectonique majeur que dépendent les manifestations sismiques, volcaniques et géothermales.

D'un côté, le Callidromon dominant le rivage de plus de 800 m est formé d'une masse rocheuse calcaire.

Le long du rivage, le système fissural distendu a laissé remonter des filons de roches volcaniques noires affleurantes dont la radioactivité est appréciable.

D'une vasque vaguement circulaire, jaillit une eau géothermale remarquable par son débit : celui d'une rivière moyenne.

Pour une source thermique qu'en France nous mesurons en litres/minute, il s'agit ici de m³/seconde.

L'eau jaillit en l'état réducteur, chargée de substances soufrées



Figure 4 - Canal d'exhaure d'une source aux Thermopyles.



source, fûmante, éclaboussant alentour les roches comme si elle était bouillante.

La source des Thermopyles est encore carbo-gazeuse. Sa composition chimique, classiquement représentée en "camembert" est en cours de réévaluation en termes d'hydrogéochimie et de produit de solubilité de chaque minéral présent, dissous et ionisé.

Le profil d'un fleuve côtier (Spercheios) alimente un alluvionnement si abondant que la ville de Lamia a perdu son statut portuaire et se trouve de nos jours à plus de 10 km du rivage. Les dépôts torrentiels ensevelissent le couvert végétal arraché aux pentes à l'occasion des crues. La dégradation du matériel végétal en milieu réducteur déga-

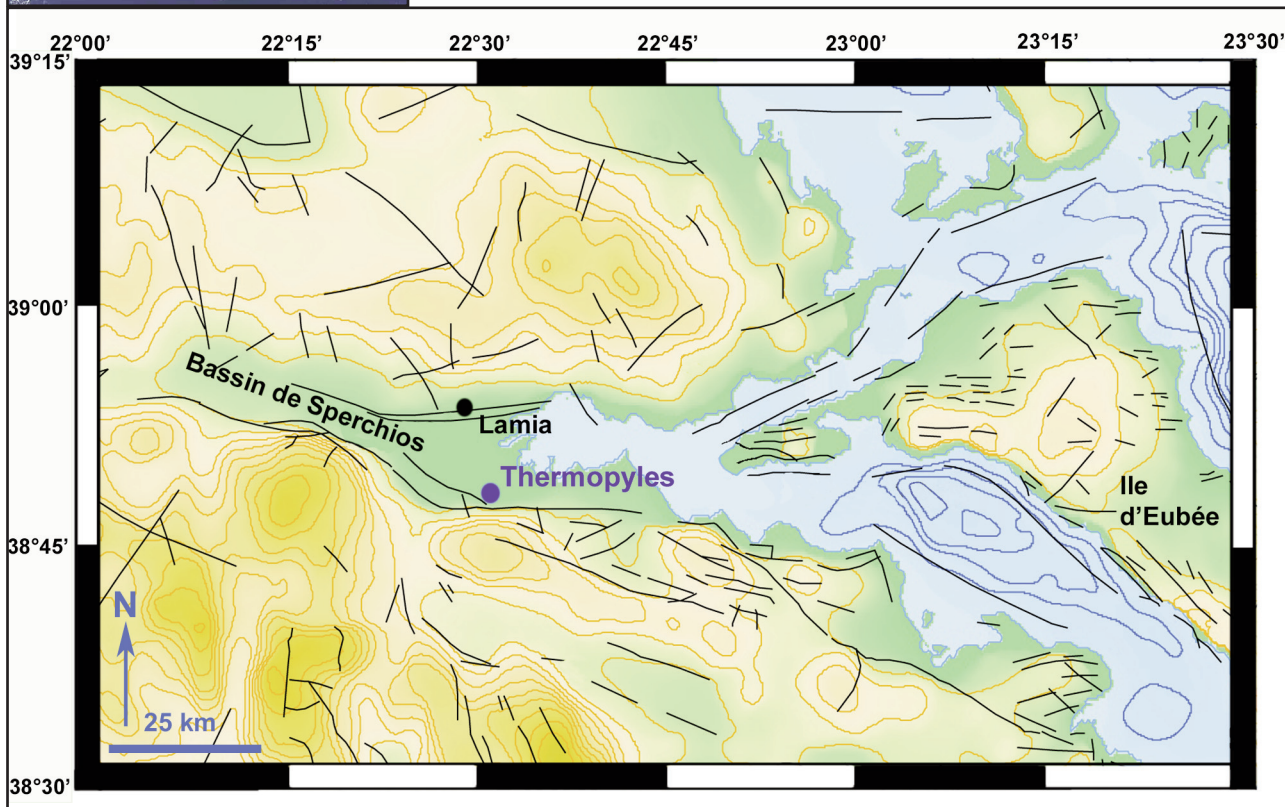


Figure 5 - Directions majeures de néotectonique cassante dans les environs des Thermopyles (d'après J. Makris et al. 2004, modifié).

tions sont visibles dès février, période au cours de laquelle se développent des *stroma* blancs ou pigmentés en rose lilas, verdâtre. Le repos végétatif est situé en été.

Les diatomées, silicicoles, sont d'une grande richesse et diversité.

Toutes les algues vertes, filamenteuses ou pélagiques, sont la signature des nitrates, dépendants de l'environnement et non de la structure géothermale.

La source, captée au XIX^e siècle a été conduite en surélévation profitant de son artésianisme ; elle servit de source d'énergie hydraulique. Celle-ci tombée en ruines, offre à l'eau une occasion de chûter en cascade. C'est en hiver qu'il faut observer cette

Quel lycéen s'est-il interrogé sur l'éthymologie de ce toponyme, haut lieu de l'histoire de la Grèce antique ?

Les Thermopyles étaient considérées comme l'une des portes des enfers ; les Romains croyaient en avoir identifié d'autres.

Adossé au monument commémoratif du sacrifice de Léonidas, le site hydrominéral est d'un intérêt tout à fait exemplaire.

2.1.1 - Morphologie

Les contours du rivage, ceux des deux façades de l'île d'Eubée sont conformes aux directions structurales de la région ; elles adoptent la direction N 270° et s'étirent de Marathon à Kalkida, Kamena-Vourla et Lamia.

ge de l'acide sulfhydrique et du méthane.

2.1.2 - Orographie

Un alignement de sommets (Kalidromon 1 570m) surplombe le littoral adossé à une paroi verticale impressionnante. Cette morphologie est en relation avec des failles majeures. C'est à leur pied que jaillissent les sources chaudes, appelées "Pyles" ou "Portes".

2.1.3 - Les sources géothermales

Elles se classent à notre avis et compte tenu de notre expérience, parmi les plus spectaculaires du bassin méditerranéen.

- Leur débit est impressionnant au point qu'une émergence a fait l'objet, pendant le précédent

siècle, d'un captage en vue d'exploiter sa force motrice : un canal exporte un débit qui se mesure en m³/s. Les maçonneries abandonnées et quasi-détruites donnent lieu à une cascade. L'hiver, un panache de vapeurs enveloppe le parcours en direction des thermes.

- La minéralisation est classique, hydrogénocarbonatée et sulfatée pour les anions : les 4 cations alcalino-terreux sont présents. Le sodium est surdosé en raison de l'hydrolyse des feldspaths du socle cristallin et de la délivrance d'hydrogénocarbonate de sodium. Celui-ci accompagne l'acide silicique. Le radon accompagne l'anhydride carbonique. L'acide sulfhydrique et ses dérivés devraient faire l'objet d'une étude spécifique. L'environnement volcanique est invoqué sans preuve établie. L'origine palustre du soufre réduit doit être prise en compte et démontrée ou rejetée.

2.1.4 - L'anhydride carbonique

Ce gaz est trop souvent considéré de façon anecdotique. Son déga-

gement est irrégulier, soumis à des rythmes horaires, quotidien, mensuel, annuel, situation qui a fait l'objet de milliers de mesures en Roumanie où un groupe de spécialistes de 6 nations ont travaillé.

Ce qu'il faudrait faire : équiper les sources de capteurs passifs, enregistrer les données, les transmettre à un centre de collecte informatisé. Il est à portée de nos mains de pouvoir prévoir la proximité d'un séisme à partir des irrégularités (maîtrisées) de la dissipation du gaz au niveau du sol. Nous sommes dans l'attente de recevoir les moyens d'une telle entreprise.

2.2 - Methana

Methana mène une existence discrète; nous pensons qu'elle mérite beaucoup plus. En effet, elle a donné son nom au **méthane** (H₄C) premier terme de la grande famille des hydrocarbures. Dans les régions où les fermentations palustres entretiennent une production de gaz spontanément inflammable au contact de l'air, feux follets et cortège de légendes plongent leurs racines dans la

Mythologie.

2.2.1 - Incidence de la mobilité des plaques

Le plongement de la plaque Afrique vers le nord sous la plaque Europe se mesure en cm/an. Il s'applique tout au long du domaine méditerranéen, provoquant des soulèvements et des arcs volcaniques insulaires.

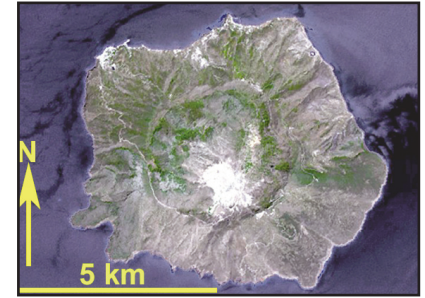


Figure 7 - Nisyros.

Le volcanisme actif de Methana, Milos, Santorin et Nisyros appartient à une telle structure : l'arc volcanique hellénique ; lequel se situe au nord du fossé de Crète.

2.2.2 - Les roches affleurantes

La partie émergée de la presqu'île se subdivise en deux types de roches :



Figure 6 - En rouge l'arc volcanique hellénique.



Figure 8 - Milos.

- sédimentaires et carbonatées, d'âge tertiaire,
- volcaniques, d'âge Pliocène-actuel.

La partie submergée, sédimentaire, repose directement sur le socle cristallin qui, largement fissuré et fracturé est favorable à des manifestations géothermales ponctuelles.

2.2.3 - Structure de l'île

Les épanchements volcaniques,

constitués de dômes et coulées de laves, sont le produit du fonctionnement de 32 cheminées.

2.2.4 - Hydrogéochimie

Les analyses réglementaires sont d'un autre âge, et celles que l'on peut consulter sur internet, un franc désastre. Les paramètres physiques fondamentaux de l'eau à son point d'émergence sont

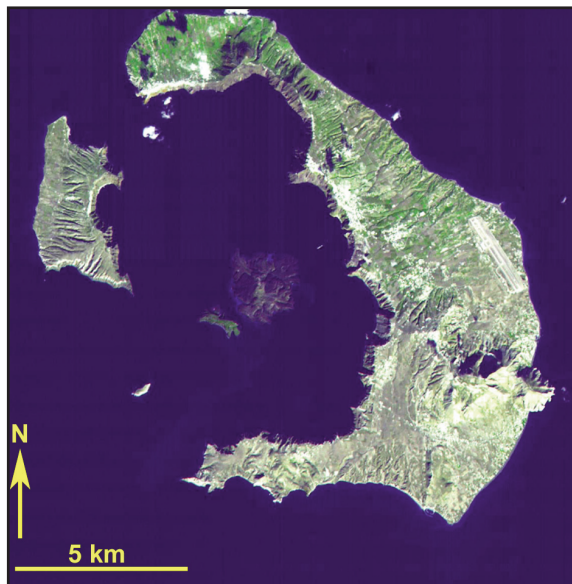


Figure 9 - Santorin.

ignorés. Ce qu'il faut retenir :

- dans le contexte naturel des sources, il est impossible de concevoir un aquifère débitant une eau minéralisée répondant aux critères artificiels de la classification.
- on ignore tout du niveau piézométrique et par conséquent de la valeur de la pression hydrostatique, laquelle conditionne l'évasion des gaz.
- les gaz ne sont pas mesurés sur place ; les chiffres annoncés ne sont que des *minima*.
- le gaz carbonique dissous n'est pas reconnu dans ses formes agressive, dissoute, semi-combinée et combinée.
- le soufre réduit n'est pas abordé de façon satisfaisante.

2.2.5 - Modélisation du mécanisme géothermal

La composition des eaux minérales de Methana est plurigénétique.

- **Actif, per ascensum.** Au pied (immergé) du système volcanique, les conditions thermobarométriques proches de l'état critique, sont favorables à la mobilisation des gaz. L'acide carbonique est sous la forme H_2CO_3 ; celui-ci entretient l'hydrolyse des feldspaths : plagioclases et orthose. De cette façon, l'acide silicique est la seule forme hydrosoluble de la silice.

Les gaz se déplacent de bas



Figure 10 - Image satellite de la presqu'île de Méthana.

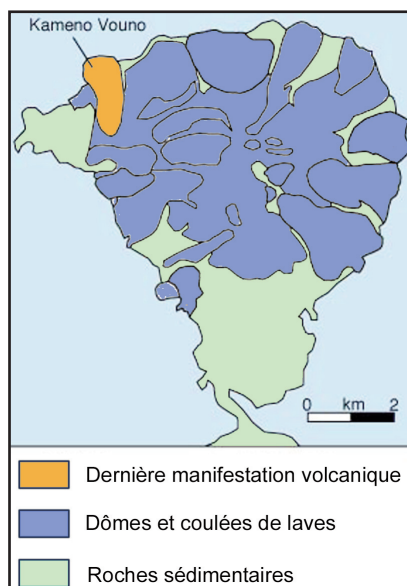


Figure 11 - Carte géologique simplifiée de Méthana.

en haut le long des cheminées des appareils volcaniques, lesquelles jouent le rôle de pompe à chaleur.

- **Passif.** L'eau de mer investit la presque île sur 350° ; les fractures distendues sont baignées ; une contre pression s'exerce s'opposant à l'évacuation du fluide géothermal. Un effet de dilution s'installe.
- **Actif, *per descendum*.** Ce rôle est dévolu aux pluvio-lessivats saisonniers infiltrés à travers les volcanites et les roches sédimentaires ensevelies. Ils sont le vecteur d'une autre cause intermittente de dilution.
- **Au final**, l'émetteur géothermal traverse à l'emporte pièce plusieurs aquifères avant d'émerger. Sa composition s'est modifiée.

3 - DE L'HYDROGÉOCHIMIE AUX PRATIQUES THERMALES

Le Thermalisme pratiqué aux Thermopyles est conforme au schéma du XIX^e siècle : bon enfant, convivial. Le vocabulaire est délicieusement désuet. Les eaux sont "sulfureuses" ce qui convient à chacun, vu le contexte volcanique de la mer Egée. Pourtant, il nous est apparu que ce conservatisme commercial plutôt que médical était éloigné des progrès réalisés par l'Hydro-géo-

chimie dans ses différentes facettes.

Ainsi, nous poursuivons et soutenons notre projet : déterminer les parts des fractions d'eaux différentes qui, en se réunissant à proximité de la vasque, forment un exutoire commun et général. Notre objectif est de réunir les moyens pour chercher le filon hydrominéral monogénique en son gisement. Cette ambition ne peut que s'appuyer sur un contrat européen de soutien financier et sur la réunion des compétences propres à quelques spécialistes de ces questions.

Un tel projet est la traduction de l'amicale collaboration établie avec notre estimé Collègue, Konstantin GARAGUNIS, depuis les années 1980.

Dans un pays comme la Grèce qui jouit d'un climat favorable au tourisme 12/12 mois, et dont le contexte archéologique ressort à chaque pas nous rappelant que la Méditerranée, cette "mer intérieure" a été de tous temps un foyer bouillonnant d'idées civilisatrices, il est clair que le patient en quête d'un soulagement à ses pathologies ne fait pas preuve d'une très grande exigence en matière d'hydrogéochimie.

Ses pensées sont ailleurs. Ils s'auto-satisfait de la tradition : un grand nombre de sources minérales étant aussi sulfurées, le tout est présenté sous forme d'un paquet-cadeau dont le lien est "sulfureux". Bien que cette appellation héritée du thermalisme français ne repose sur aucune réalité, les sources qui répondent à ce critère, toutes les sources, seront classées sulfureuses.

Il y a pourtant bien mieux à faire. Le contexte volcanique est partout apparent. L'activité sismique régionale est ressentie au quotidien. Le site de Méthana, dont la morphologie est caractéristique, offre les contours d'un cône volcanique immergé (Figure n° 1). Ce n'est point là la question essentielle.

Les études sismiques profondes, effectuées en Méditerranée, montrent que les émetteurs de

Méthana, Milos, Santorin, Kos, Yali et Nisyros étaient autant de points remarquables jalonnant un arc volcanique insulaire axé sur le front de soulèvement entretenu par la reptation de la plaque Afrique sous le rebord de la plaque Europe.

Ce constat nous intéresse au premier chef. En effet, de la collaboration entre notre laboratoire et l'Université de Messine, notamment avec le concours de feu notre Collègue et Ami le Professeur Cavallaro, nous avons étudié les sources géothermales sulfurées de l'arc insulaire des Iles Eoliennes.

Le poster présenté par le Docteur V. Nastos, au-delà de la description d'un point singulier aux rivages de la mer Egée, offre la possibilité d'établir des corrélations entre deux situations hydrothermales et structurales comparables, préciser leur âge et saisir autour du bassin méditerranéen, ce frémissement perpétuel résultant de l'affrontement de 2 masses continentales au-dessus desquelles des hommes organisent leurs activités quotidiennes... Mieux qu'à remplir des baignoires, les eaux de Méthana doivent révéler, à condition de le vouloir après installation de palpeurs électroniques fixes, quelles variations de pression des gaz thermaux sont les précurseurs d'un séisme prochain.

Nous n'évoquerons pas l'analyse ionique ; celle-ci n'est pas conforme aux décisions des congrès de Bad Aedipsos (1999) ni de Marseille (2002). Mais nous pouvons aider à surmonter les faiblesses des analyses des sources Vromolimni et St-Nikolaos.

Le développement touristique de Méthana n'a pas besoin de pseudo-science. L'Hydrologie qui est indépendante du moteur touristique se doit de répondre à une réalité. La Science pure a toujours précédé ses applications.

4 - ANALYSE PHYSICOCHIMIQUE SPÉCIFIQUE DES EAUX MINÉRALES À USAGE THÉRAPEUTIQUE

Il est tout à fait regrettable que la frontière entre les eaux de consommation humaine, et d'autres, strictement à usage médical, ait fait l'objet d'une confusion, bien pratique au demeurant.

Une eau de rivière, telle, celle empruntée aux grands cours d'eau pour répondre aux besoins des villes, est à l'équilibre physico-chimique. Son traitement (décantation primaire, floculation, décantation secondaire, filtration, chloration) consiste à déployer une démarche dont l'échelle est industrielle. La réglementation admet une tolérance pour certains postes de l'analyse réglementaire. Le cas des eaux qui ont reçu le label "**minéral**" voire "**thermal**" est différent. Il s'agit de médicaments prescrits par un docteur en Médecine. La posologie n'est pas libre, comme c'est le cas pour une boisson.

Les tolérances concernant l'azote ammoniacal, nitreux ou nitrique n'ont plus lieu d'être interprétées avec toutes les ressources du vocabulaire de la langue française.

L'azote, tel que venons de l'évoquer ne fossilise pas. Nitreux, nitrique ou ammoniacal, il s'agit de trois signatures de la pollution d'une eau souterraine irréprochable, par des apports incontrôlés d'origine superficielle.

Bien entendu, notre propos s'adresse à des sourds, tant il est vrai que l'ouverture de la saison ne sera jamais refusée à une station thermique pour quelques misérables fractions de milligrammes. Tel fut le laisser-aller qui a marqué le XX^e siècle, l'Hydrogéologue que nous sommes étant prié de ne pas se faire remarquer.

Pour toutes ces raisons, parce que les équilibres des solutions aqueuses n'ont jamais été pris en considération - en France - nous avons toujours soutenu la nécessité de séparer les deux activités analytiques selon la destination

de l'échantillon.

Le modèle de bulletin d'analyse que nous produisons a été approuvé par les autorités du Congrès de Marseille 2002 placé sous le signe du partage du savoir. Il sera adopté par tous les pays péri-méditerranéens qui ont recours aux eaux minérales.

L'instabilité de l'eau sous analyse sera constatée par la différence entre la valeur de la mesure *in situ* et sa réplique au laboratoire.

Ce modèle de bulletin d'analyse, conçu par l'équipe de chercheurs de l'IRTHERME répond à cette nécessité : analyser une eau minérale nouvelle ou déjà connue est une démarche qui doit être distincte de l'analyse d'une eau de rivière.

Tous les paramètres physiques d'une eau profonde en l'état d'émergence doivent être saisis sur place. Cette pratique, systématique au XIX^e siècle, a été abandonnée progressivement.

C'est une erreur de doctrine.

Bulletin d'analyse

Date de délivrance

N° d'enregistrement

Date du prélèvement

Lieu du prélèvement

Opérateur

Date de réception

Analyse demandée par

Début du traitement de l'échantillon Jour : Heure :

I - Paramètres mesurés obligatoirement *in-situ* , puis au laboratoire

Paramètres physiques

		<i>in situ</i>	Au laboratoire	Dérive constatée
Température extérieure	°C			
Pression atmosphérique	hPa			
Température de l'eau	°C			
Conductivité à 25 °C	µS/cm			
Potentiel électrique	mV			
pH corrigé à 25 °C	-			
rH2 calculé	-			
O2 dissous	mg/l			
	% de saturation			
Viscosité	m2.s			
Densité				
Point cryoscopique				
Couleur				
Odeur				
Mat. en suspension	mg/l			
Turbidité	N.T.U.			
Dépôts	mg/l			

II - Mesures au laboratoire

Résidu sec à 105 °C	mg/l	
Résidu sec à 190 °C	mg/l	

Caractères chimiques

Cations	mg/l	mmol/l	mE/l		mg/l	mmol/l	mE/l
Ca ²⁺				HCO ₃ ⁻			
Mg ²⁺				CO ₃ ²⁻			
Na ⁺				SO ₄ ²⁻			
K ⁺				Cl ⁻			
Sr ²⁺				F ⁻			
Σ ⁺				Σ ⁻			
Balance ionique							

Sulfuration

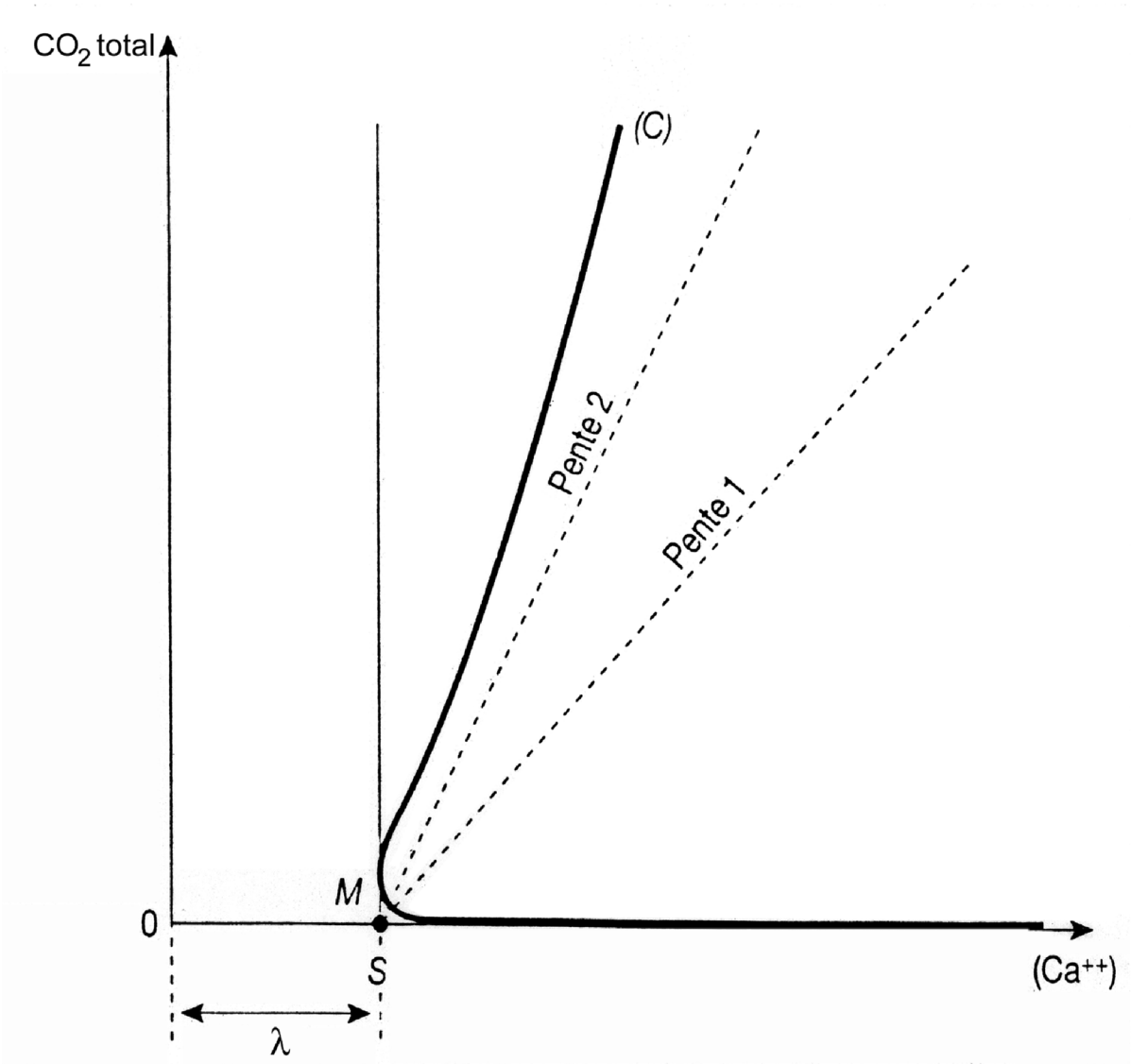
Éléments dosés, exprimés en S élémentaire		Ions analysés par électrophorèse	
	mg/l S		mg/l
Sulfures		HS ⁻	
Polysulfures		H ₂ S	
Soufre organique		S ₂ O ₃ ⁻	
		SO ₃ ⁻	

Gaz dissous

	mg/
O2	
CO2	
N2	
HE	
Ar	

III - Équilibre calcocarbonique
selon les équations de I. Legrand, G. Poirier et P. Leroy

TAC	ml HCl N/50	
CO2 libre	mg/l	
ACT	ml NaOH N/50	
CO2 équilibrant	mg/l	



IV - Indices de pollution

Dérivés de l'Azote

	mg/l	mmol/l
NH ⁺ ₄		
NO ⁻ ₂		
NO ⁻ ₃		

Dérivés du phosphore

	mg/l	mmol/l
HPO ²⁻ ₄		
PO ³⁻ ₄		

Principaux métaux lourds

	mg/l	mmol/l		mg/l	mmol/l
Fe ²⁺			Hg ²⁺		
Fe ³⁺			Sb ⁻		
Mn ²⁺			Li ⁺		
Mn ³⁺			Pb ²⁺		
Ni ²⁺			Zn ²⁺		

Hydrocarbures

	mg/l	mmol/l
Aliphatiques		
Cycliques		

Radionucléides

	Bq/m3		Bq/m3
Uranium-238		Radon-222	
Thorium-234		Polonium-218	
Proactinium-234		Plomb-214	
Uranium-234		Bismuth-214	
Thorium-230		Polonium-214	
Radium-226		Plomb-210	

Arsenic

	mg/l
As ³⁺	
AS ⁵⁺	
ASO ³⁻ ₄	