



**HAL**  
open science

# Etude hydrogéologique des sources thermominérales de Tarentaise (Savoie) : Brides-les-Bains, Salins-les-Thermes, La Léchère- Alpes Françaises

Yvette Simeon

► **To cite this version:**

Yvette Simeon. Etude hydrogéologique des sources thermominérales de Tarentaise (Savoie) : Brides-les-Bains, Salins-les-Thermes, La Léchère- Alpes Françaises. Hydrologie. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1980. Français. NNT : . tel-00602894

**HAL Id: tel-00602894**

**<https://theses.hal.science/tel-00602894>**

Submitted on 23 Jun 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



SIMEON (Y)

ex n°1

UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE DE GRENOBLE  
THESE DE DOCTORAT DE SPECIALITE  
GEOLOGIE APPLIQUEE  
OPTION HYDROGEOLOGIE

ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DES SOURCES THERMOMINERALES  
DE TARENTOISE (Savoie) :

BRIDES-LES-BAINS \* SALINS-LES-THERMES \* LA LECHERE

2

par Yvette SIMEON

UNIVERSITE DE GRENOBLE I  
INSTITUT DE GEOLOGIE  
DOCTORAT  
172, MATHIEU-GOISSY  
F-38051 GRENOBLE CEDEX  
TEL. (76) 97 46 43

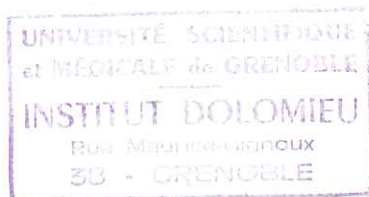
Soutenu le avril 1980 devant la commission d'examen

R MICHEL	Professeur à l'USMG	Président
R BARBIER	Professeur à l'USMG	Examineur
G PAGANON	Docteur en Médecine Maire de Brides-les-Bains	Examineur
J ROCHAT	Charge de cours à la Faculté de Pharmacie	Examineur
J SARROT REYNAULD	Professeur à l'USMG	Rapporteur



UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE DE GRENOBLE  
THESE DE DOCTORAT DE SPECIALITE  
GEOLOGIE APPLIQUEE  
OPTION : HYDROGEOLOGIE

UNIVERSITE DE GRENOBLE  
INSTITUT DE GEOLOGIE  
**DOCUMENTATION**  
RUE MAURICE-GIGNOUX  
F 38031 GRENOBLE CEDEX  
TEL. (76) 87.46.43



- 3 AVR. 1980

# ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DES SOURCES THERMOMINERALES DE TARENTAISE ( Savoie ) :

BRIDES-LES-BAINS \* SALINS-LES-THERMES \* LA LECHERE

par Yvette SIMEON

Soutenu le        avril 1980 devant la commission d'examen :

R. MICHEL	Professeur à l' U.S.M.G.	Président
R BARBIER	Professeur à l' U.S.M.G.	Examinateur
G PAGANON	Docteur en Médecine - Maire de Brides-les-Bains	Examinateur
J ROCHAT	Chargé de cours à la Faculté de Pharmacie	Examinateur
J SARROT REYNAULD	Professeur à l' U.S.M.G.	Rapporteur



## REMERCIEMENTS

Il m'est agréable de remercier toutes les personnes qui ont participé, de diverses façons, à la réalisation de ce travail.

En premier lieu, Monsieur le Professeur R. BARBIER qui a bien voulu en juger la partie géologique et me fait l'honneur de faire partie du jury.

Je remercie également Monsieur le Professeur R. MICHEL pour avoir proposé ce sujet de thèse, et avoir mis à ma disposition tous les papports des études effectuées antérieurement sur les stations de Brides-les-Bains et Salins-les-Thermes.

- Monsieur le Professeur J. SARROT REYNAULD qui m'a confié ce travail et a consacré beaucoup de son temps à la direction de cette thèse et à la résolution des problèmes de tous ordres qui se sont posés.
- Monsieur J. ROCHAT qui m'a aimablement guidée dans l'analyse chimique des eaux et spécialement le dosage des halogénures. Je lui exprime ici ma profonde reconnaissance.
- Monsieur le Docteur G. PAGANON, Maire de Brides les Bains qui est à l'origine de l'étude réalisée, ainsi que toute la commune de Brides pour leur généreuse contribution aux frais matériels de nos recherches.
- Monsieur STERN, Directeur de l'Etablissement thermal Radiana à La Léchère pour son accueil et sa participation à certains frais d'analyses.
- G. BUFFET avec qui j'ai réalisé les ACPN des eaux minérales étudiées et qui m'a appris à travailler sur ordinateur. Il a prolongé ses journées de travail pour faire ces analyses et je l'en remercie vivement.
- J.C. FOURNEAUX qui m'a prodigué de nombreux conseils particulièrement au cours de l'essai de traçage et m'a procuré une aide matérielle dont je lui suis reconnaissante.
- Messieurs Ph. OLIVE et B. BLAVOUX du Centre de Recherches géodynamiques de Thonon qui se sont chargés des analyses isotopiques des eaux et des gaz.
- J.P. GRATIER qui a bien voulu confronter mes résultats de mesures sur la fracturation des roches avec ses propres travaux.
- F. KELLER et G. VIVIER qui m'ont aidée dans les analyses des dépôts des eaux thermales.
- Madame B. USELLE pour les dosages d'éléments traces qu'elle a réalisés.
- Robert CHEDAL pour son aide précieuse durant ces deux années de travail. C'est grâce à son intervention que j'ai pu réaliser tous les essais de terrain et je lui exprime ici toute ma gratitude.
- Monsieur AMOURETTE, Directeur de l'Usine de La Coche, qui m'a facilité l'accès à l'usine souterraine, ainsi que Monsieur REYNARD qui m'a toujours aidée à faire les prélèvements.
- Monsieur GEORGES, Directeur des Services techniques de la ville de St Jean de Maurienne grâce à qui j'ai pu étudier la source de l'Echaillon.
- Monsieur et Madame SAMBUY qui m'ont chaque fois bien accueillie aux Vieux Bains de Salins.
- Monsieur POUCS d'EDACERE (Albertville) qui a mis à ma disposition les prélèvements automatiques nécessaires à l'essai de traçage.
- Mes ami(e)s du 3ème Cycle d'hydrogéologie de leur aide au cours de cette étude.

J'exprime toute ma reconnaissance à mes beaux parents qui m'ont toujours encouragée au cours de la réalisation de ce travail.

Je remercie très affectueusement mes parents pour leur soutien, leur aide, et pour tout ce qu'ils ont fait pour moi au cours de ces longues années d'étude.

J'exprime ma gratitude à ma soeur "Gigi" qui a bien voulu assurer la dactylographie de ce mémoire. Je la remercie, ainsi que Christian, pour le vif intérêt qu'ils ont porté à cette étude et pour la grande gentillesse dont ils ont fait preuve à mon égard.

Tous les mots restent incontestablement trop faibles pour exprimer tout ce que je dois à mon mari, Yves, et je lui dédie ce travail en témoignage de ma profonde affection.



## I N T R O D U C T I O N

Le développement d'aménagements hydroélectriques et la modernisation de la vallée de la Tarentaise amènent chaque année de nouveaux travaux à proximité des émergences thermominérales de Brides-les-Bains et de Salins-les-Thermes (Savoie). D'autre part, il s'avère qu'aucune étude scientifique n'a été réalisée sur ces eaux thermales depuis les derniers travaux qui sont ceux de M. MICHEL en 1966.

Compte tenu des résultats géologiques et structuraux récemment acquis sur cette région, et afin de parer aux éventuelles incidences qui pourraient modifier les caractères physico-chimiques des sources minéralisées, il est apparu nécessaire de réaliser une étude hydro-chimique détaillée des eaux thermales de ces deux stations.

Ainsi, à l'origine de notre étude, un programme de recherche a été établi sur les sources thermominérales de Brides-les-Bains et de Salins-les-Thermes.

Ce travail a été effectué en deux ans dans le cadre d'une allocation d'étude DGRST sous la direction de messieurs les Professeurs R.MICHEL et J.SARROT REYNAULD.

D'autre part, pour une meilleure compréhension de l'hydrogéologie du secteur étudié, nous nous sommes de même intéressés aux eaux thermominérales de La Léchère et La Coche Usine de Ste Hélène en Tarentaise, ainsi qu'aux eaux chaudes minéralisées de l'Echaillon en Maurienne.



T A B L E D E S M A T I E R E S

C H A P I T R E I

PREMIERE PARTIE - SITUATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

I-1. Situation géographique .....	p	1
I-2. Situation géologique générale :		
I-2.1. En Tarentaise .....	p	1
I-2.2. En Maurienne .....	p	1
I-3. Géologie régionale :		
I-3.1. Les massifs cristallins externes .....	p	2
I-3.2. La Zone Dauphinoise .....	p	2
I-3.3. La Zone Ultradauphinoise .....	p	2
I-3.4. La Zone Subbriançonnaise .....	p	2
I-3.5. La Zone des Gypses .....	p	6
I-3.6. La Zone Briançonnaise .....	p	6

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.  
MAISON DES GEOSCIENCES  
DOCUMENTATION  
F. 38041 B.P. 53  
Tél. 04 76 63 5427 - Fax 04 76 51 49 58  
Mail: phalour@ujf-grenoble.fr  
27 AOÛT 2003

DEUXIEME PARTIE - LITHOLOGIE ET STRATIGRAPHIE DES DIFFERENTES ZONES

II-1 La Zone Dauphinoise .....	p	6
II-2. La Zone Ultradauphinoise .....	p	6
II-3. La Zone Subbriançonnaise .....	p	7
II-3.1. La Nappe des Brèches de Tarentaise .....	p	7
II-3.2. La Nappe du Pas du Roc .....	p	13

TROISIEME PARTIE - DESCRIPTION TECTONIQUE DES DIFFERENTES FORMATIONS

III-1. La Zone Dauphinoise .....	p	14
III-2. La Zone Ultradauphinoise .....	p	14
III-3. La Zone des Brèches de Tarentaise :		
III-3.1. La Digitation du Niélard .....	p	14
III-3.2. La Zone du Quermoz .....	p	14
III-3.3. La Zone de Hautecour .....	p	15
III-3.4. La Zone des Etroits du Siaix .....	p	15
III-3.5. La Zone de Villette .....	p	15
III-3.6. L'unité de Salins .....	p	15
III-4. La Nappe du Pas du Roc :		
III-4.1. Le Faisceau du Perron des Encombres .....	p	16
III-4.2. Le Faisceau de la Grande Moenda .....	p	16
III-4.3. Conclusion .....	p	17
III-5. La Zone des Gypses .....	p	17
III-6. La Zone Briançonnaise .....	p	17

QUATRIEME PARTIE - SYNTHESE TECTONIQUE

IV-1. Les différents styles tectoniques .....	p	18
IV-2. Chronologie des faits tectoniques :		
IV-2.1. La période embryonnaire .....	p	19
IV-2.2. La période paroxysmale du plissement alpin .....	p	19
IV-2.3. La période post-paroxysmale .....	p	21
IV-2.4. Conclusion .....	p	21



## CINQUIEME PARTIE - ETUDE DU QUATERNAIRE

V-1. Au niveau de la station de La Léchère :		
V-1.1. Les formations alluviales .....	p	21
V-1.2. Les formations latérales .....	p	22
V-1.3. Conclusion .....	p	23
V-2. Au niveau de Salins-les-Thermes :		
V-2.1. La prospection géophysique .....	p	23
V-2.2. Les forages .....	p	25
V-2.3. Interprétations .....	p	26
V-3. Au niveau de la station de Brides-les-Bains .....	p	28

## SIXIEME PARTIE - COMPORTEMENT HYDROGEOLOGIQUES DES TERRAINS DU SUBSTRATUM

VI-1. Les terrains cristallins .....	p	29
VI-2. Les terrains sédimentaires .....	p	29
VI-3. Comportement hydrogéologique des terrains .....	p	30

## SEPTIEME PARTIE - ETUDE DE LA FRACTURATION

VII-1. En Tarentaise :		
VII-1.1. Interprétations .....	p	31
VII-1.2. Exemples .....	p	33
VII-1.3. Remarques .....	p	33
VII-2. En Maurienne .....	p	35
VII-3. Conclusion .....	p	36

## C H A P I T R E    I    I

### PREMIERE PARTIE - PRESENTATION DES SOURCES ETUDIEES

I-1. La station thermale de La Léchère .....	p	37
I-2. L'eau de La Coche .....	p	37
I-3. La station thermale de Salins-les-Thermes .....	p	39
I-3.1. Les sources chaudes minéralisées .....	p	39
I-3.2. Les sources froides minéralisées .....	p	41
I-3.3. Les eaux froides de la nappe alluviale du Doron .....	p	41
I-3.4. Utilisation thérapeutique des eaux à Salins .....	p	43
I-4. La station thermale de Brides-les-Bains :		
I-4.1. Les sources chaudes minéralisées .....	p	43
I-4.2. Les eaux froides environnantes .....	p	45
I-4.3. Utilisation thérapeutique des eaux à Brides .....	p	45
I-5. La station thermale de l'Echaillon .....	p	46

### DEUXIEME PARTIE - ETUDE DES PARAMETRES PHYSIQUES DES EAUX

II-1. La température :		
II-1.1. Le gradient géothermique local .....	p	46
II-1.2. Le volcanisme .....	p	46
II-1.3. Les mouvements orogéniques .....	p	46
II-1.4. Les réactions chimiques .....	p	47
II-1.5. La présence d'éléments radioactifs .....	p	47
II-1.6. Chute de la température .....	p	47
II-1.7. Température des eaux étudiées .....	p	47



V-2. Analyses en composantes principales et représentations graphiques :	
V-2.1. Présentation de l'analyse .....	p 119
V-2.2. Interprétation des graphiques obtenus .....	p 124
V-3. Conclusion .....	p 126

SIXIEME PARTIE - ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES NORMEES EFFECTUEE  
SUR LES ELEMENTS MAJEURS ET MINEURS

VI-1. Introduction - But de l'ACPN .....	p 130
VI-2. Choix des variables .....	p 130
VI-3. Etude de la matrice de corrélation .....	p 130
VI-4. L'analyse en composantes principales normées .....	p 132
VI-5. Interprétation des résultats .....	p 137
VI-6. Conclusion à l'ACPN effectuée sur les éléments majeurs et mineurs	p 140

SEPTIEME PARTIE - CONSEQUENCES DES ETUDES HYDROCHIMIQUES ET GEOCHIMIQUES  
DES EAUX THERMOMINERALES

VII-1. Etude hydrochimique .....	p 141
VII-2. Etude géochimique .....	p 142

C H A P I T R E I I I

PREMIERE PARTIE - ETUDE DES TEMPERATURES DES EAUX THERMOMINERALES  
PAR LES GEOTHERMOMETRES CHIMIQUES

I-1. Les géothermomètres Na-K et Na-K-Ca .....	p 143
I-2. Le géothermomètre silice .....	p 144
I-3. Le géothermomètre géologique .....	p 144
I-4. Résultats obtenus .....	p 145

DEUXIEME PARTIE - ETUDE DES EAUX PAR LES ISOTOPES

Introduction .....	p 149
Interprétation des résultats .....	p 152

TROISIEME PARTIE - ETUDE DES DEPOTS AUX EMERGENCES DES SOURCES  
THERMOMINERALES DE TARENTOISE

Introduction .....	p 158
Les Analyses en fluorescence X .....	p 159
Analyse des boues par diffraction X .....	p 160

QUATRIEME PARTIE - ETUDE DES GAZ DES SOURCES MINERALISEES DE TARENTOISE

IV-1. Origine du CO <sub>2</sub> .....	p 163
IV-2. Action du CO <sub>2</sub> sur <sup>le</sup> circuit hydrothermal .....	p 163
IV-3. Composition des gaz thermaux .....	p 164
IV-4. Résultats des analyses isotopiques des gaz .....	p 165
IV-5. Conclusion .....	p 165



II-2. Les débits :	
II-2.1. Les débits des sources minéralisées .....	P 49
II-2.2. Débits du Doron et des Sources Froides .....	p 52
II-3. Les résistivités :	
II-3.1. Résistivité des sources minéralisées .....	p 54
II-3.2. Résistivité des eaux superficielles .....	p 56
II-4. Relation résistivité-débit .....	p 56
II-5. Mesure du pH .....	p 57

### TROISIEME PARTIE - HYDROCHIMIE DESCRIPTIVE DES SOURCES

III-1. Présentation du faciès chimique des eaux :	
III-1.1. Station de Brides-les-Bains .....	p 58
III-1.2. Station de Salins-les-Thermes .....	p 60
III-1.3. Les eaux de l'Usine de Ste Hélène .....	p 60
III-1.4. Station thermale de La Léchère et de l'Echaillon ....	p 64
III-1.5. Conclusion .....	p 64
III-2. Etude des éléments majeurs des sources :	
III-2.1. La station thermale de Brides-les-Bains .....	p 65
A - Source hybord .....	p 65
B - Source Charles Albert .....	p 67
C - Source Amont du Pont .....	p 69
D - Source Leray .....	p 72
E - Source Les Moulins .....	p 74
F - Source de la Verpillère .....	p 76
G - Source Barral .....	p 79
H - Le Doron à Brides-les-Bains .....	p 81
I - Synthèse sur la présentation chimique des sources de Brides-les-Bains .....	p 83
J - Conséquences et conclusions sur Brides .....	p 86
III-2.2. La station thermale de Salins-les-Thermes :	
A - La Petite Source Chaude .....	p 86
B - La Grande Source Chaude .....	p 89
C - La Source Massiogo .....	p 89
D - Les sources froides minéralisées .....	p 91
E - Les eaux de la Nappe Alluviale et du Doron .....	p 93
F - Conclusion sur la chimie des eaux de Salins .....	p 99
III-2.3. La station thermale de La Léchère :	
A - Les eaux thermominérales .....	p 99
B - Les eaux superficielles de l'Isère .....	p 102
C - Conclusion à l'étude des eaux de la Léchère .....	p 104
III-2.4. La Station thermale de l'Echaillon (Maurienne) .....	p 105
III-2.5. Les eaux de La Coche .....	p 107
III-2.6. Conclusion à l'étude des éléments majeurs des sources	p 109

### QUATRIEME PARTIE - ETUDE DES ELEMENTS MINEURS

IV-1. Dosage par spectrophotométrie de flamme .....	p 111
IV-2. Dosage par électrodes spécifiques .....	p 111
IV-3. Dosage par colorimétrie .....	p 111
IV-4. Résultats obtenus .....	p 113

### CINQUIEME PARTIE - GEOCHIMIE STATISTIQUE DES SOURCES THERMOMINERALES DE TARENTAISE ET DE MAURIENNE

V-1. Etude de la matrice de corrélation .....	p 118
---	-------



## C H A P I T R E I V

### ETUDE DE L'INFLUENCE DU DORON SUR LES SOURCES THERMOMINERALES DE SALINS-LES-THERMES

I- But de cette étude .....	p	169
II- Présentation de cette étude .....	p	171
III- Matériel utilisé et données de départ .....	p	171
IV- Réalisation de l'essai de pompage .....	p	172
V- Interprétation des résultats obtenus :		
V-1. Dans les piézomètres .....	p	172°
V-2. Au niveau des sources minéralisées des Vieux Bains .....	p	178
VI- Etude de la composition chimique des eaux pendant l'essai de pompage .....	p	180
VII- Comparaison de l'effet de pompage avec les variations naturelles de la nappe .....	p	180
VIII- Conclusions à cette étude .....	p	180

## C H A P I T R E V

### ETUDE DES CONDITIONS DE PROTECTION DES EAUX THERMALES DE SALINS-LES-THERMES

I- But de cette étude .....	p	183
II- Etude de la circulation dans le versant :		
1) Préparation de l'essai de traçage .....	p	183
2) Déroulement du traçage .....	p	
III- Résultats de cette expérience .....	p	185
IV- Etude des boues et des terrains des lieux d'injection .....	p	189
V- Exploitation des résultats .....	p	191
VI- Conclusion .....	p	192

## C H A P I T R E V I

### SYNTHESE DES RESULTATS - ETUDE DE L'ORIGINE DES SOURCES THERMOMINERALES ETUDIEES

I- Synthèse des résultats .....	p	193
II- Origine des eaux thermales de Tarentaise .....	p	199
CONCLUSION .....	p	202
ANNEXE 1 - PRESENTATION DES ANALYSES PHYSICOCHIMIQUES ET ISOTOPIQUES .....	p	203
ANNEXE 2 - RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES EFFECTUEES DE MAI 1978 A JUIN 1979 .....	p	205
ANNEXE 3 - ACPN - REPORT D'UN POINT SUPPLEMENTAIRE SUR LES AXES FACTORIELS .....	p	209
BIBLIOGRAPHIE .....	p	213



LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

1 . FIGURE	- Situation géographique des stations étudiées...	p	1
2 . FIGURE	- Panorama du bassin de St Jean de Maurienne.....	p	2
3 . FIGURE	- Schéma structural des Unités entre l'Arc et l'Isère ( d'après R Barbier ) .....	p	3
4 . FIGURE	- Nouvelles subdivisions de la Zone Subbriançonnaise (Barbier et Antoine 1978).....	p	5
5 . FIGURE	- Carte lithologique du massif cristallin d'Hautecour (Barbier et Michel).....	p	8
6 . FIGURE	- Esquisse paléogéographique du cadre régional (Collart) .....	p	10
7 . FIGURE	- Schéma structural simplifié (Collart).....	p	11
8 . FIGURE	- Coupes des zones Ultradauphinoise et Subbriançonnaise (Barbier) .....	p	20
9 . FIGURE	- Coupe transversale de la vallée de la Tarentaise au niveau de La Léchère.....	p	22
10 . FIGURE	- Emplacement des piézomètres à Salins.....	p	24
11 . FIGURE	- Coupes lithologiques des forages de Salins-les-Thermes.....	p	24
12 . FIGURE	- Coupes interprétatives schématisant le remplissage alluvial à Salins.....	p	27
13 . FIGURE	- Diagrammes en roses de la répartition de la fracturation.....	p	32
14 . FIGURE	- Représentation des familles de failles sur canevas de Wulf.....	p	34
15 . FIGURE	- Report de la fracturation sur canevas de Wulf.....	p	34
16 . FIGURE	- Répartition de la fracturation mesurée à l'Echaillon.....	p	35
17 . FIGURE	- Plan des captages des sources de Salins.....	p	38
18 . FIGURE	- Situation géographique de la source Massiago à Salins-les-Thermes.....	p	40
19 . FIGURE	- Emplacement des piézomètres à la station de Salins-les-Thermes.....	p	42
20 . FIGURE	- Situation des sources de Brides-les-Bains.....	p	44
21 . FIGURE	- Diagrammes Températures-Temps des eaux étudiées.....	p	48
22 . FIGURE	- Diagrammes Débits-Temps des eaux étudiées.....	p	50
23 . FIGURE	- Variations dans le temps du niveau de la source Massiago.....	p	51
24 . FIGURE	- Comparaison des variations du niveau de la source Massiago avec celui du Doron.....	p	51
25 . FIGURE	- Variations dans le temps du niveau de la nappe alluviale du Doron à Salins.....	p	53
26 . FIGURE	- Diagrammes Résistivités-Temps des eaux étudiées.....	p	55
27 . TABLEAU	- Mesures moyennes des PH des eaux étudiées.....	p	57
28 . FIGURE	- Report des sources de Brides-les-Bains sur diagramme de Piper.....	p	59
29 . FIGURE	- Report des sources de Salins-les-Thermes sur diagramme de Piper.....	p	61
30 . FIGURE	- Report des sources de l'Echaillon, La Léchère, et La Coche sur diagramme de Piper.....	p	62
31 . FIGURE	- Report de toutes les sources thermominérales sur diagramme Piper.....	p	63



32 . FIGURE	- Source Hybord- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p 66
33 . FIGURE	- Source Hybord- Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques.....	p 66
34 . FIGURE	- Source Charles Albert- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p 68
35 . FIGURE	- Source Charles Albert- Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques.....	p 68
36 . FIGURE	- Source Amont du Pont- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p 70
37 . FIGURE	- Source Amont du Pont- Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques.....	p 70
38 . FIGURE	- Source Leray- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p 73
39 . FIGURE	- Source Leray- Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques.....	p 73
40 . FIGURE	- Source Les Moulins- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p 75
41 . FIGURE	- Source Les Moulins- Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques.....	p 75
42 . FIGURE	- Source La Verpillère- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p 77
43 . FIGURE	- Source La Verpillère- Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques.....	p 77
44 . FIGURE	- Source Barral- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p 80
45 . FIGURE	- Source Barral- Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques.....	p 80
46 . FIGURE	- Doron- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p 82
47 . FIGURE	- Doron- Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques.....	p 82
48 . FIGURE	- Report sur diagramme Schoeller des sources de Brides-les-Bains.....	p 85
49 . FIGURE	- Petite Source Chaude- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p 87
50 . FIGURE	- Petite Source Chaude- Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques.....	p 87
51 . FIGURE	- Grande Source Chaude- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p 88
52 . FIGURE	- Grande Source Chaude- Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques.....	p 89
53 . FIGURE	- Source Massiago- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p 90
54 . FIGURE	- Source Massiago- Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques.....	p 90
55 . FIGURE	- Sources Froides- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p 92
56 . FIGURE	- Sources Froides- Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques.....	p 92
57 . FIGURE	- Nappe alluviale du Doron- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p 94
58 . FIGURE	- Piézomètre F1- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p 94
59 . FIGURE	- Doron- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p 95
60 . FIGURE	- Nappe alluviale du Doron- Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques.....	p 95
61 . FIGURE	- Report des sources de Salins-les-Thermes sur diagramme Schoeller.....	p 98



90 .	TABLEAU	- Températures des eaux en profondeur calculées à partir des différents géothermomètres.....	P	146
91 .	TABLEAU	- Composition chimique des roches cristallines utilisées pour calculer T4.....	P	146
92 .	TABLEAU	- Teneurs des eaux en isotopes.....	P	150
93 .	FIGURE	- Situation géographique de la station de Bonneval.....	P	153
94 .	FIGURE	- Corrélation % O18-D des sources thermales de Tarentaise.....	P	157
95 .	FIGURE	- Corrélation % O18-H3 des sources thermales de Tarentaise.....	P	157
96 .	FIGURE	- Diagrammes obtenus par diffraction X des boues étudiées.....	P	161
97 .	TABLEAU	- Composition des gaz thermaux étudiés (Urbain et Lepape 1925).....	P	164
98 .	FIGURE	- Ceinture péri-alpine carbogazeuse de l'Europe occidentale (Risler et Maisonneuve 1979) .....	P	167
99 .	FIGURE	- Emplacement des piézomètres à Salins .....	P	170
100 .	TABLEAU	- Mesures effectuées avant l'essai de pompage...	P	170
101 .	FIGURE	- Droite de remontée de la nappe dans le piézomètre F2 .....	P	174
102 .	FIGURE	- Droite de remontée de la nappe dans le piézomètre F4.....	P	174
103 .	FIGURE	- Droite de remontée dans le piézomètre F1.....	P	177
104 .	TABLEAU	- Variation des débits des sources minéralisées de Salins pendant l'essai de pompage.....	P	177
105 .	FIGURE	- Baisse du niveau de l'eau dans la piscine de l'établissement thermal de Salins.....	P	179
106 .	FIGURE	- Situation géographique des points d'injection par rapport aux émergences thermales.....	P	184
107 .	TABLEAU	- Tableau des heures de restitution des traceurs aux émergences/.....	P	186
108 .	FIGURE	- Courbes de restitution des traceurs aux sources des Vieux Bains.....	P	188
109 .	FIGURE	- Courbes de restitution des traceurs à la source Massiago.....	P	188
110 .	FIGURE	- Schématisation des modes de circulations des traceurs dans le versant.....	P	192
111 .	FIGURE	- Représentation dans l'espace de l'origine des eaux minéralisées selon les deux hypothèses de départ.....	P	200

62 .	FIGURE	- Sources Radiana- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p	100
63 .	FIGURE	- Sources Radiana- Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques.....	p	100
64 .	FIGURE	- Isère- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p	103
65 .	FIGURE	- Isère- Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques.....	p	103
66 .	FIGURE	- Echaillon- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p	106
67 .	FIGURE	- Echaillon- Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques.....	p	106
68 .	FIGURE	- La Coche- Variation du chimisme sur diagramme Schoeller.....	p	108
69 .	FIGURE	- La Coche- Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques.....	p	108
70 .	FIGURE	- Report de toutes les sources thermominérales étudiées sur diagramme Schoeller.....	p	110
71 .	TABLEAU	- Tableau des teneurs en éléments mineurs.....	p	112
72 .	FIGURE	- Sources thermales de Bridés-les-Bains: géochimie des éléments mineurs sur diagramme semi-logarithmique .....	p	114
73 .	FIGURE	- Sources thermales de Salins-les-Thermes: géochimie des éléments mineurs sur diagramme semi-logarithmique.....	p	115
74 .	FIGURE	- Sources thermales de l'Echaillon, La Léchère, : géochimie des éléments mineurs sur diagramme semi-logarithmique.....	p	116
75 .	FIGURE	- ACPN des éléments majeurs- Représentation graphique dans le plan (F1,F2).....	p	122
76 .	FIGURE	- ACPN des éléments majeurs- Représentation graphique dans le plan (F1,F3).....	p	123
77 .	FIGURE	- Schématisation de la représentation selon (F1,F2).....	p	125
78 .	FIGURE	- Schématisation de la représentation selon (F1,F3).....	p	126
79 .	FIGURE	- Représentation des sources dans le diagramme triangulaire R, T°, SO4 .....	p	128
80 .	TABLEAU	- Coordonnées des sources dans le diagramme triangulaire R, T°, SO4 .....	p	128
81 .	TABLEAU	- Matrice de corrélation des sources thermales étudiées (18 éléments).....	p	129
82 .	TABLEAU	- Hiérarchie des corrélations.....	p	131
83 .	TABLEAU	- Coefficients de corrélations selon les 3 directions F1, F2 et F3.....	p	133
84 .	FIGURE	- ACPN des éléments majeurs et mineurs: Représentation graphique dans le plan (F1,F2)....	p	135
85 .	FIGURE	- ACPN des éléments majeurs et mineurs- Représentation graphique dans le plan (F1,F3)....	p	136
86 .	FIGURE	- Schématisation de la représentation selon (F1,F2).....	p	137
87 .	FIGURE	- Schématisation de la représentation selon (F1,F3).....	p	137
88 .	FIGURE	- Représentation synthétique dans l'espace tridimensionnel des sources thermales étudiées.....	p	139
89 .	FIGURE	- Schématisation dans l'espace de l'origine de la source Amont du Pont.....	p	140

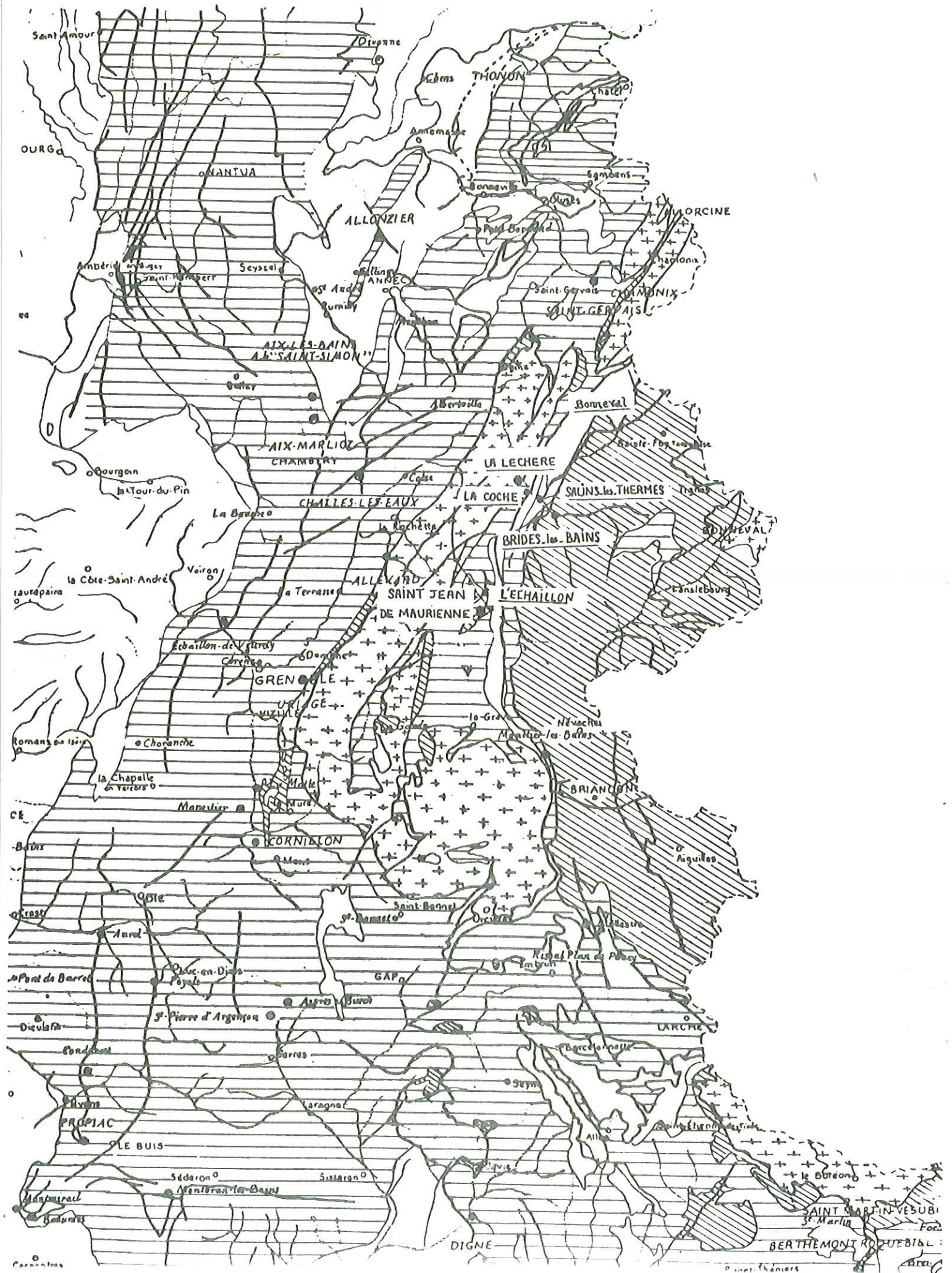


CHAPITRE I

---

Fig 1

SITUATION GÉOGRAPHIQUE DES STATIONS THERMALES ÉTUDIÉES





## PREMIERE PARTIE - SITUATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

### I-1. Situation géographique

Les sources étudiées se répartissent de la façon suivante :  
(cf. figure 1 )

- En Tarentaise, avec les stations thermales de Brides-les-Bains, Salins-les-Thermes et La Léchère.
- En Maurienne, avec la station thermale de l'Echaillon près de St Jean-de-Maurienne.

### I-2. Situation géologique générale

La description géologique qui suit dans les 4 premières parties du chapitre I est tirée des travaux de Messieurs R. BARBIER, P. ANTOINE, J. COLLART, R. MICHEL et E. ROCH .

Les quatre stations étudiées se situent à l'Est du massif cristallin externe de Belledonne, soit dans la zone comprise entre ce massif et le front des nappes internes : zone dauphinoise autochtone, et zone ultra dauphinoise parautochtone ; soit plus à l'Est, dans les zones internes subbriançonnaise et briançonnaise.

#### I-2.1. En Tarentaise : d'Ouest en Est se succèdent :

I-2.1.1. La station thermale de La Léchère qui est située au contact du massif cristallin externe de Belledonne avec sa couverture sédimentaire constituée par la zone dauphinoise.

I-2.1.2. La station thermale de Salins les Thermes qui est implantée dans la zone subbriançonnaise, et plus exactement dans le faisceau de Salins que nous examinerons plus en détail.

I-2.1.3. La station thermale de Brides-les-Bains qui se situe dans la zone des gypses - cette dernière ne formant qu'une mince bande allongée grossièrement Nord Sud et comprise entre la zone subbriançonnaise à l'Ouest et la zone houillère briançonnaise à l'Est.

#### I-2.2. En Maurienne :

Dans la vallée de l'Arc, nous avons étudié la station thermale de l'Echaillon située près de St Jean-de-Maurienne dans la zone dauphinoise, au contact du massif cristallin externe du Grand Châtelard et de la zone dauphinoise. (cf. figure 2 )

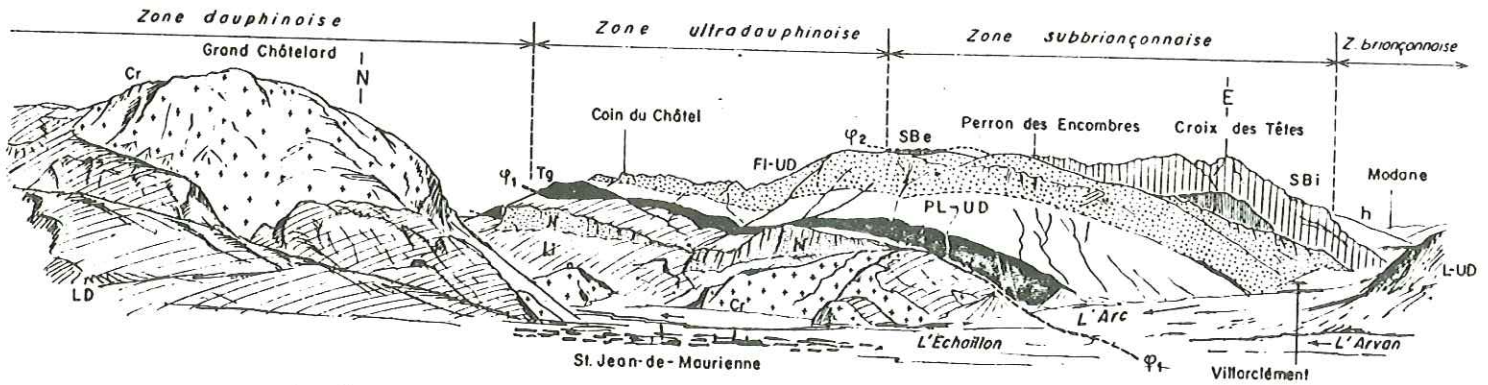


FIG. 2. - Panorama du bassin de St-Jean-de-Maurienne (vallée de l'Arc); (d'après R. BARBIER). In Debélimas (1962)  
 PL-UD : Paléozoïque à Lias ultradauphinois. - SBe, Sbi : écaillés subbriançonnaises externes et internes.

### I-3. Géologie régionale

La description géologique plus détaillée de la région étudiée sera faite le long d'une transversale plus ou moins parallèle à la vallée de l'Arc en partant du massif de Belledonne et en se dirigeant à l'Est vers les zones plus internes (cf. figure 3).

#### I-3.1. Les massifs cristallins externes

Les massifs cristallins externes sont de vieux massifs métamorphiques hercyniens ou plus anciens, repris dans l'orogénèse alpine et soulevés lors d'une phase alpine récente. Le massif cristallin externe de Belledonne est le plus externe de tous. Il est suivi au Nord par les massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges ; et, au Sud, par ceux des Grandes Rousses, du Pelvoux, du Mercantour. Au niveau de l'Arc, il est jalonné par le massif cristallin du Grand Châtelard.

#### I-3.2. La zone dauphinoise

Elle constitue l'épaisse couverture des massifs externes précédemment cités. Cette unité qui forme, sur notre transversale, la bordure orientale des massifs cristallins externes, a une série stratigraphique essentiellement marneuse, et, de ce fait, a été très touchée par l'érosion.

#### I-3.3. La zone ultradauphinoise

Bien développée au Sud de l'Arc, elle se lamine vite au Nord entre la zone subbriançonnaise et la zone dauphinoise, avant d'atteindre la vallée de la Tarentaise.

#### I-3.4. La zone subbriançonnaise

Cette zone se divise en deux grandes nappes qui sont, d'Ouest en Est, la nappe des Brèches de Tarentaise et la nappe du Pas du Roc ;



— Figure 3 —

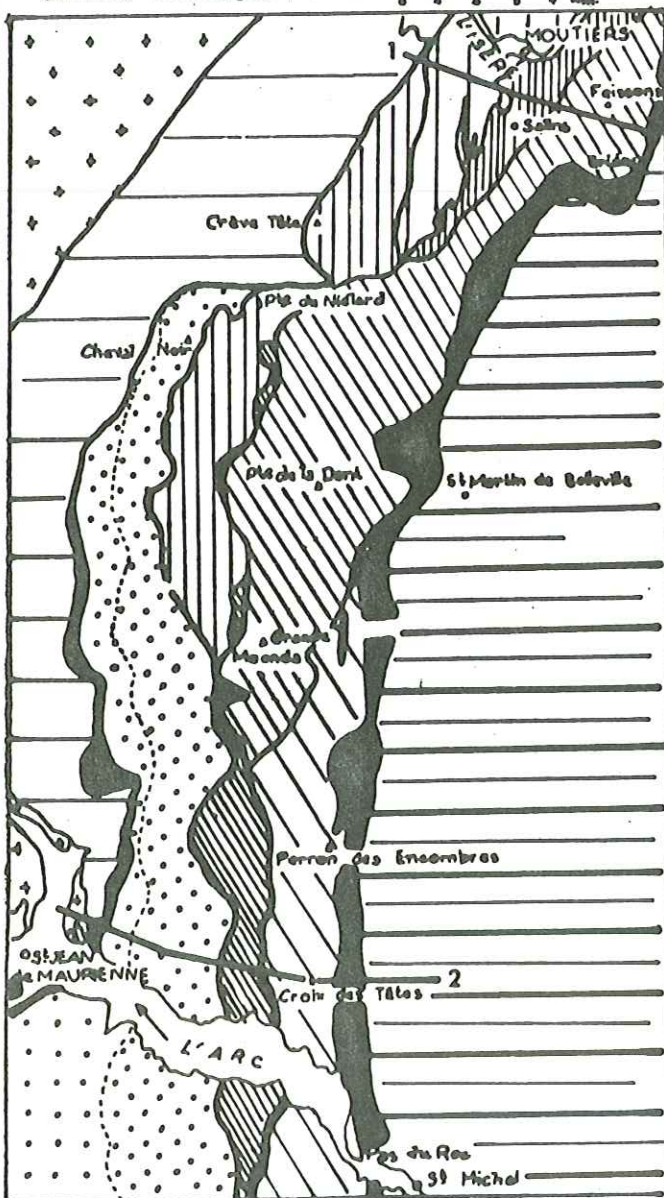
SCHEMA STRUCTURAL DES DIFFERENTES UNITES  
ENTRE L'ARC ET L'ISERE

LEGENDE

0 1 2 3 4 Km Echelle



SCHEMA TECTONIQUE : Echelle: 0 1 2 3 4 Km



■ Lames de gypse et cargneules

ZONE DAUPHINOISE :

▨ massifs cristallins externes et leur couverture

ZONE ULTRADAUPHINOISE :

▩ Flysch des Aiguilles d'Arves et son substratum

ZONE SUBBRIANÇONNAISE :

NAPPE DES BRÈCHES DE TARENTAISE

▨ Digitation du Niélard

▨ Faisceau de Moutiers

▨ Faisceau de Salins

NAPPE DU PAS DU ROC

▨ Ecailles Externes

▨ Digitation de la Grande Moenda

▨ Digitation du Perron des Encombres

■ ZONE DES GYPSES

▨ ZONE BRIANÇONNAISE

ces deux dernières étant à leur tour subdivisées de la façon suivante :

- Nappe des Brèches de Tarentaise { Digitation du Niélard (au Sud)  
Digitation de Moutiers (au Nord)
- Nappe du Pas du Roc { Ecailles externes  
Digitation de la Grande Moenda  
Digitation du Perron des Encombres

#### I-3.4.1. La Nappe des Brèches de Tarentaise

Cette unité n'affleurant qu'en Tarentaise, ses sédiments présentent les caractères de dépôt de cordillère, désignée sous le nom de "Cordillère Tarine" par M. R. Barbier. Du fait des différences de faciès qui existent d'Ouest en Est, la nappe des Brèches de Tarentaise a été subdivisée en deux digitations :

- la digitation du Niélard : forme la partie méridionale de la nappe. Cette formation affleurant entre l'Isère et l'Arc sans pour cela atteindre l'une ou l'autre des deux vallées, nous n'en parlerons pas car elle n'est pas précisément concernée par cette étude.
- la digitation de Moutiers : pour des raisons d'ordre tectonique, cette digitation avait de même été scindée en deux faisceaux par M. R. Barbier (1948) :
  - \* le faisceau de Moutiers qui se développe largement au Nord de l'Isère et forme la partie occidentale et septentrionale de la digitation.
  - \* le faisceau de Sâlines qui constitue la partie orientale de la digitation de Moutiers.

Récemment, cette digitation a été reprise et subdivisée en trois unités différentes tant du point de vue paléogéographique que du point de vue tectonique. (R. Barbier et P. Antoine 1978) Ces trois unités sont d'Ouest en Est : la zone du Quermoz, la zone d'Hautecour, la zone des Etroits du Siaix. Plus à l'Est, vient la zone de Villette qui constitue la bordure nord-orientale de l'ancien "Faisceau de Sâlines" (cf. fig 4).

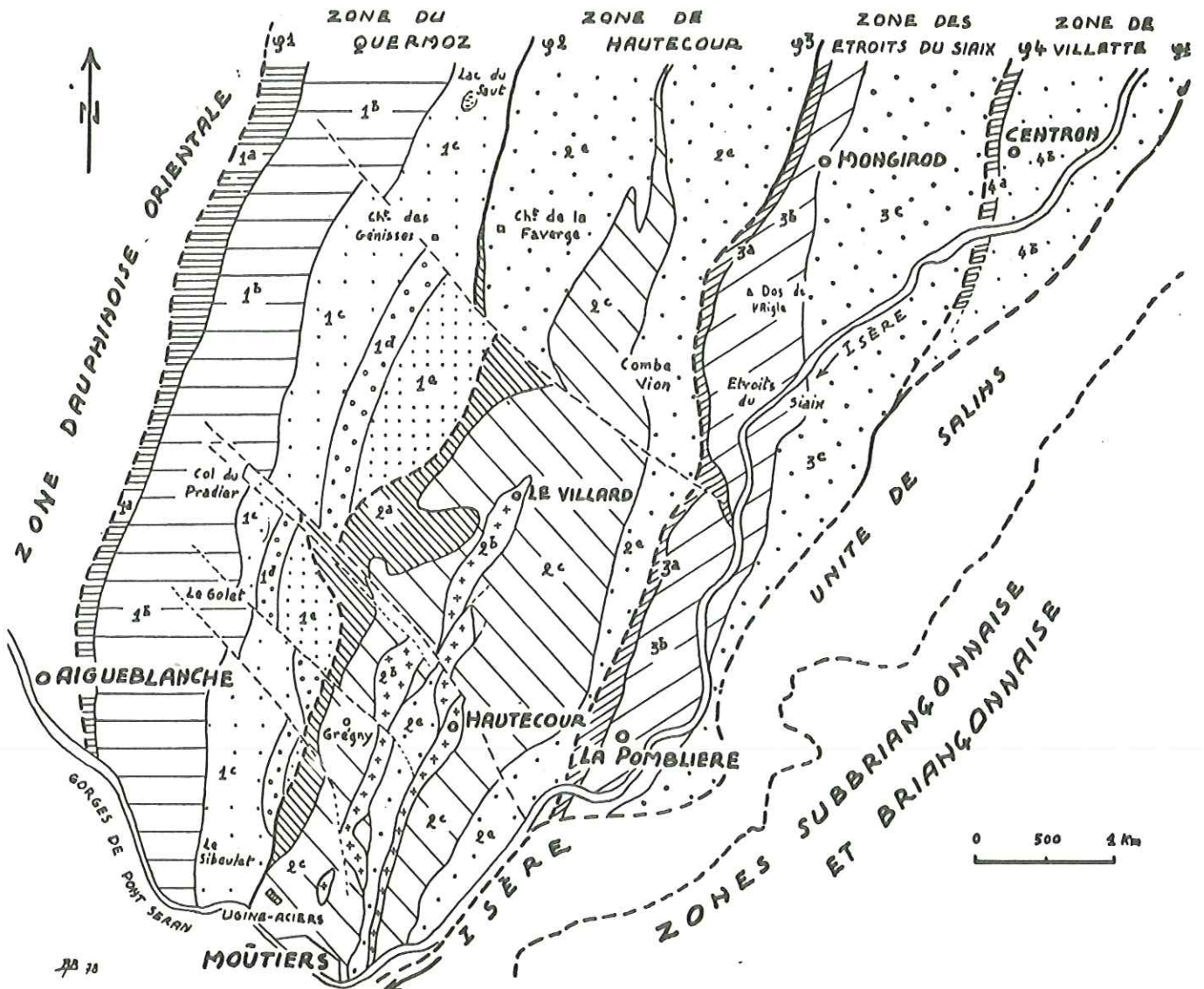
La nappe des Brèches de Tarentaise affleure surtout au Nord de l'Isère. Au Sud, elle se lamine et disparaît à l'Ouest des Aiguilles de la Grande Moenda.

#### I-3.4.2. Nappe du Pas du Roc

Cette unité est subdivisée en trois formations différentes tant du point de vue stratigraphique que du point de vue tectonique.

- la digitation de la Grande Moenda - elle apparaît entre l'Arc et l'Isère un peu au Sud des Aiguilles de la Grande Moenda. Plus au Nord, elle longe la digitation du Niélard plus le faisceau de Sâlines et se resserrant très vite, elle disparaît au Sud de l'Isère.
- la digitation du Perron des Encombres : elle relaie au Sud la digitation de la Grande Moenda et se poursuit jusqu'au niveau du col du Galibier au Sud de l'Arc.





Carte géologique schématique des environs nord de Moutiers (Savoie).

Comprise entre la zone dauphinoise orientale à l'Ouest et les zones briangonnaise et subbriangonnaise à l'Est, la zone des Brèches de Tarentaise a dû être subdivisée, dans cette région, en 5 unités différentes ( $\varphi 1$  à  $\varphi 5$ , contacts tectoniques à la base de ces unités).

1. *Zone du Quermoz.* 1 a, écailles de base (surtout permiennes); 1 b, série bréchique du Quermoz (Jurassique); la série détritique supérieure comprend 3 termes: 1 c, série à microbrèches; 1 d, conglomérats polygéniques; 1 e, série à faciès flysch.
2. *Zone de Hautecour.* 2 a, gypse et cargneules de base (contacts tectoniques); 2 b, écailles cristallines; 2 c, leur couverture allant du Houiller au Lias; 2 e, série détritique supérieure, crétacée.
3. *Zone des Etroits du Siaix.* 3 a, gypse et cargneules de base (contacts tectoniques); 3 b, série jurassique; 3 c, série détritique supérieure, crétacée.
4. *Zone de Villette.* 4 a, gypse et cargneules de base (contacts tectoniques); 4 b, série détritique supérieure, crétacée, seule apparente ici.
5. A l'Est, l'Unité de Salins, comportant surtout du Houiller, n'a pas été subdivisée ici.

Fig 4 - NOUVELLES SUBDIVISIONS DE LA ZONE SUBBRIANÇONNAISE  
(In Barbier et Antoine - 1978).

- les écailles externes : dans la série stratigraphique de la zone du Pas du Roc, la couverture formée par les terrains les plus récents a été décollée et refoulée vers l'Ouest sous forme d'écailles et de lambeaux étirés le long de la limite occidentale de la zone. C'est ce que M. Barbier a appelé "zone des Ecailles Externes".

La nappe du Pas du Roc, bordée à l'Est par la zone des gypses, chevauche successivement à l'Ouest : le faisceau de Sâlines, le faisceau de Moutiers, la digitation du Niélard, et enfin la zone ultradauphinoise.

### I-3.5. La zone des gypses

Cette unité, très étroite, sépare la zone subbriançonnaise à l'Ouest de la zone briançonnaise à l'Est.

Comme son nom l'indique, elle est essentiellement formée par des gypses, et de ce fait, a joué un rôle très plastique dans le jeu de la tectonique.

### I-3.6. La Zone Briançonnaise

C'est une nappe chevauchante vers l'Ouest et dont l'ossature est constituée d'un vieux socle granito-gneissique anté carbonifère. Dans la région étudiée, le houiller affleure parce que la couverture mésozoïque a presque totalement disparue ; et c'est pour cette raison que cette zone est encore appelée "Zone Houillère Briançonnaise".

## DEUXIEME PARTIE - LITHOLOGIE ET STRATIGRAPHIE DES DIFFERENTES ZONES

Dans ce paragraphe, nous nous limiterons à la description des Unités plus directement concernées par cette étude, à savoir les zones dans lesquelles ou près desquelles émergent les sources thermales.

Nous rappelons que le lecteur peut trouver la description lithologique et stratigraphique de toutes les Unités dans les travaux de Messieurs R. BARBIER (1948), ANTOINE et BARBIER (1978), COLLART (1973), FUDROL (1973).

### II-1. La Zone Dauphinoise

Couverture orientale des massifs cristallins externes, cette zone présente un Trias réduit surmonté par une épaisse série vaseuse allant du Lias à l'Oxfordien. Le Jurassique supérieur et le Crétacé manquent souvent, et quand ils existent, restent minces et de type marneux. Le sommet de la série est constitué par un flysch épais.

### II-2. La Zone Ultradauphinoise

Le Houiller, formé par des schistes noirs, passe progressivement au Trias par les schistes violets ou verts du Permien.



Dans cette unité, au Nord de l'Arc, le Trias n'est représenté que par des quartzites et calcaires dolomitiques et se trouve surmonté par un Rhétien assez indistinct.

Ensuite vient le Lias qui conserve ici son "faciès Dauphinois" c'est-à-dire un faciès uniformément marneux.

Enfin, ce qui distingue surtout la Zone Ultradauphinoise de la Zone Dauphinoise, c'est l'importance que prend le Nummulitique dans la Zone Ultradauphinoise sous forme de flysch encore appelé "Flysch des Aiguilles d'Arves" transgressif et discordant sur tous les termes antérieurs plissés et érodés.

### II-3. La Zone Subbriançonnaise

#### II-3.1. La Nappe des Brèches de Tarentaise

II-3.1.1. La Zone du Quermoz : elle chevauche à l'Ouest la Zone Dauphinoise.

La base de la série est formée par des lambeaux et écaillés de terrains divers tels que des schistes bariolés du Permien et des écaillés de calcaires blancs du Lias accompagnés de schistes et brèches.

Ensuite, vient la série du Quermoz qui présente des alternances de schistes noirs avec des bancs ou lentilles de brèches dolomitiques et des calcaires.

Cette série du Quermoz est surmontée par une formation détritique à caractère discordant, essentiellement représentée par des microbrèches à altération jaunâtre.

La série stratigraphique de la Zone du Quermoz se termine par une deuxième série détritique dont la base est constituée par un conglomérat polygénique à éléments roulés en grande partie siliceux triasiques et antétriasiques.

Sur ce conglomérat, vient une épaisse série litée, calcaréodétritique à allure flysch, dont l'appartenance paléogéographique à la Zone du Quermoz n'est pas certaine.

Les niveaux constituant la base de la série étant bien connus plus au Nord, leur datation n'a pas posé de problèmes (schistes permiens de la Bagnaz, calcaires cristallins du Lias inférieur, série jurassique du Quermoz.).

Par contre, les deux séries détritiques qui forment le sommet de la série n'ont pas encore révélé de fossiles, et ne présentent pas les mêmes caractéristiques que les zones plus internes ou septentrionales.

De ce fait, au stade actuel des études, la série de microbrèches serait attribuée au Crétacé, et celle des conglomérats polygéniques au Tertiaire (à cause de la reprise d'érosion marquée par ces conglomérats).

Il faut cependant noter que ces deux séries détritiques ne comportent pas l'élément caractéristique des séries "valaisanes", à savoir les "schistes noirs à quartzites verts" de H. Schoeller ou "couches des Marmôtains" de R. Trümpy.

II-3.1.2. La limite entre la Zone du Quermoz et la Zone d'Hautecour :

Très souvent masquée par le Quaternaire, cette limite se suit relativement bien dans ses grandes lignes car elle est soulignée par des amas de gypses et cargneules notamment au Nord.

II-3.1.3. La Zone d'Hautecour : cette zone est caractérisée par la présence de deux écailles principales de cristallin orientées grossièrement Sud-Sud-Ouest - Nord-Nord-Est.

La série stratigraphique de cette zone est la suivante :  
les schistes cristallins : du point de vue stratigraphique, les deux lames cristallines du massif d'Hautecour sont très différentes.

\* la lame orientale : la composition minéralogique y apparaît relativement constante : les schistes cristallins formant cette lame sont des micaschistes à phengite, très quartzeux et peu chloriteux.

Les variations de composition minéralogique qui peuvent être rencontrées dans cette partie cristalline orientale, sont essentiellement représentées par des structures plus mylonitiques avec laminage et écrasement du quartz.

\* la lame occidentale : sa structure est beaucoup plus complexe car la schistosité cristallographique orientée SW-NE est oblique par rapport à la direction générale de la lame SSW-NNE. Ainsi, du Nord au Sud, plusieurs faciès pétrographiques ont pu être mis en évidence : des micaschistes à deux micas, des faciès amphiboliques et prasinitiques, et des micaschistes à deux micas feldspathisés.

En conclusion, ces schistes cristallins du massif d'Hautecour affleurent sous des faciès pétrographiques très différents d'une écaille à l'autre. (cf. figure 5).

### Carte lithologique du massif cristallin d'Hautecour

(Levés de R. Barbier et R. Michel)

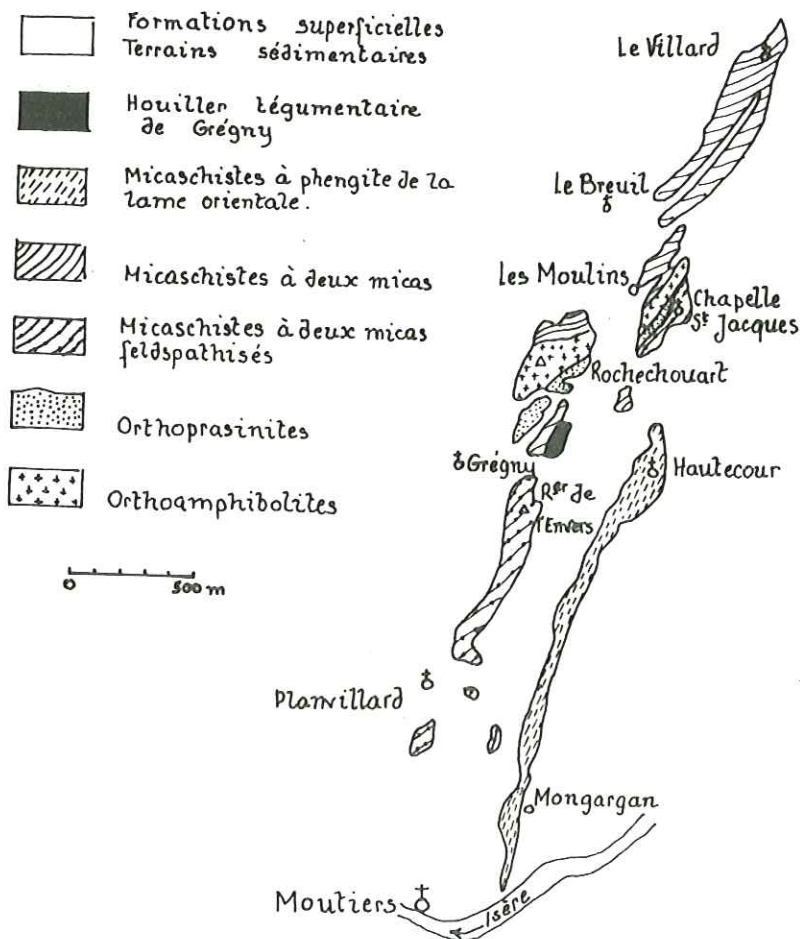


Fig 5



Cependant, malgré cette différenciation, tous ces faciès sont connus dans le massif cristallin externe de Belledonne situé plus à l'Ouest.

De ce fait, ces deux lentilles de cristallin sont à rattacher aux faciès pétrographiques du massif cristallin externe de Belledonne, et non à ceux des zones plus internes.

- Le Houiller : il est représenté par des alternances de schistes noirs et de grès noirâtres micacés.
- Le Permien : il se caractérise par des schistes violacés ou verts.
- Le trias : il présente la succession suivante : quartzites, calcaires plus ou moins dolomitiques, schistes et dolomies accompagnés de gypses.
- Le Lias inférieur : calcaire, il repose souvent sur le Trias moyen, et même parfois sur le cristallin.

Ainsi, dès cette époque, cette zone a été le siège de mouvements et érosions.

- Aucune couche jurassique plus élevée n'a pu être mise en évidence dans le massif de Hautecour.
- La série stratigraphique de cette zone se termine par une série détritique restreinte présentant des analogies avec les séries crétacées valaisanes, à savoir :
  - . des conglomérats de base peu épais, transgressifs sur le cristallin,
  - . des schistes noirs à bancs quartziteux,
  - . des calcschistes et schistes à aspect de flysch.

Contrairement à la Zone du Quermoz, la série stratigraphique de la Zone d'Hautecour ne présente aucune difficulté du point de vue chronologique.

En effet, par analogie avec les faciès des zones plus internes, la série détritique supérieure de la Zone d'Hautecour est très voisine de la série crétacée valaisane.

De ce fait, il faut distinguer l'une de l'autre la Zone du Quermoz et la Zone d'Hautecour :

à l'Ouest, se trouve la Zone du Quermoz caractérisée par une épaisse série de calcschistes surmontée par une série détritique à allure flysch.

à l'Est, la Zone d'Hautecour, sans couche jurassique plus élevée que le Lias inférieur, et présentant une série détritique supérieure très comparable à la série crétacée valaisane.

Du point de vue paléogéographique, ces deux zones se distinguent encore l'une de l'autre. Dans la série de la Zone du Quermoz, la série détritique supérieure repose sur la série du Quermoz, alors que la série crétacée de la Zone d'Hautecour repose sur des terrains plus anciens (Trias ou cristallin).

II-3.1.4. La Zone des Etroits du Siaix : cette zone est "coincée" entre le massif d'Hautecour à l'Ouest, et les unités qui la chevauchent à l'Est (bordure orientale de la Zone Sub-briançonnaise).

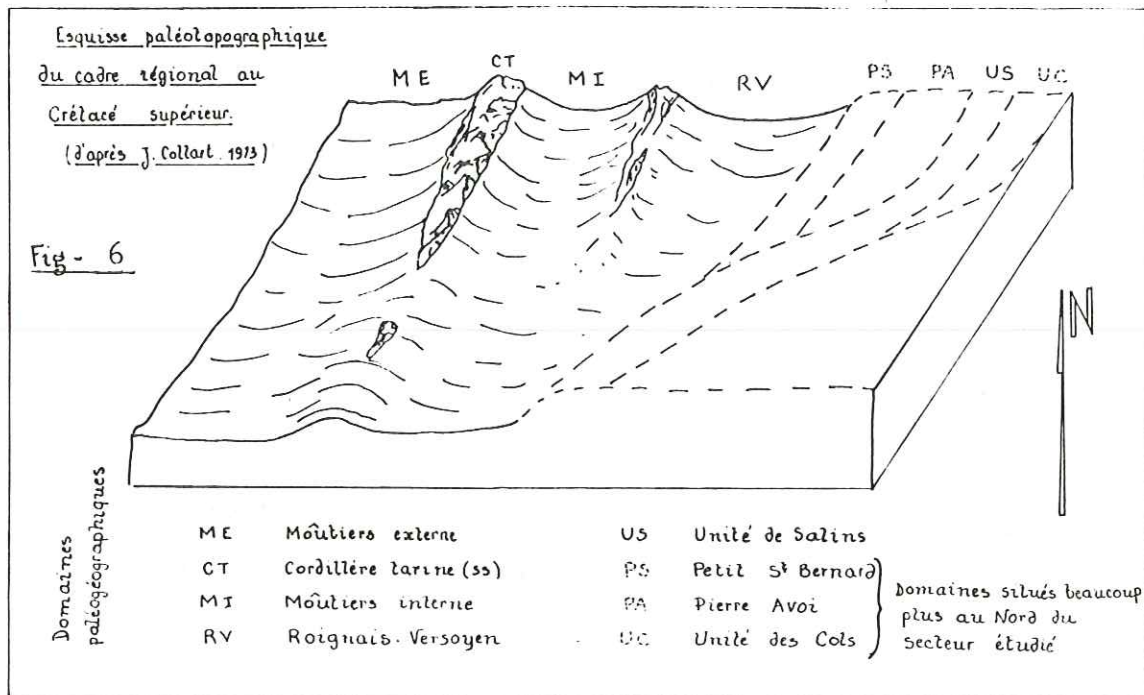
L'ossature de la zone est formée par les calcaires blancs marmoréens du Lias et se présente actuellement sous la forme d'écaillés lenticulaires.

D'Ouest en Est, la série est la suivante :

- des gypses et cargneules de base formant la partie occidentale de la zone,
- une série jurassique constituée par les calcaires marmoréens épais du Lias inférieur surmontés par une importante série schisteuse attribuée au Lias supérieur (et fin du Lias moyen).  
(Cette série schisteuse n'existe pas dans la zone précédemment décrite)
- une série détritique crétacée dont les importants recouvrements quaternaires ne permettent pas de voir les contacts.

II-3.1.5. La Zone de Villette : celle-ci fait partie de l'Unité de Moutiers interne dans la nomenclature de J. Collart.

En effet, pour cet auteur, dans la série détritique de Tarentaise, deux rides et deux bassins se mettent en évidence :  
(cf. figure 6 )



La ride de Laval : reliquat de la cordillère Tarine, elle se trouve dans le prolongement du massif Portetaz-Grand Fond situé plus au Nord. Cette ride partage l'Unité de Moutiers en deux sous-unités :

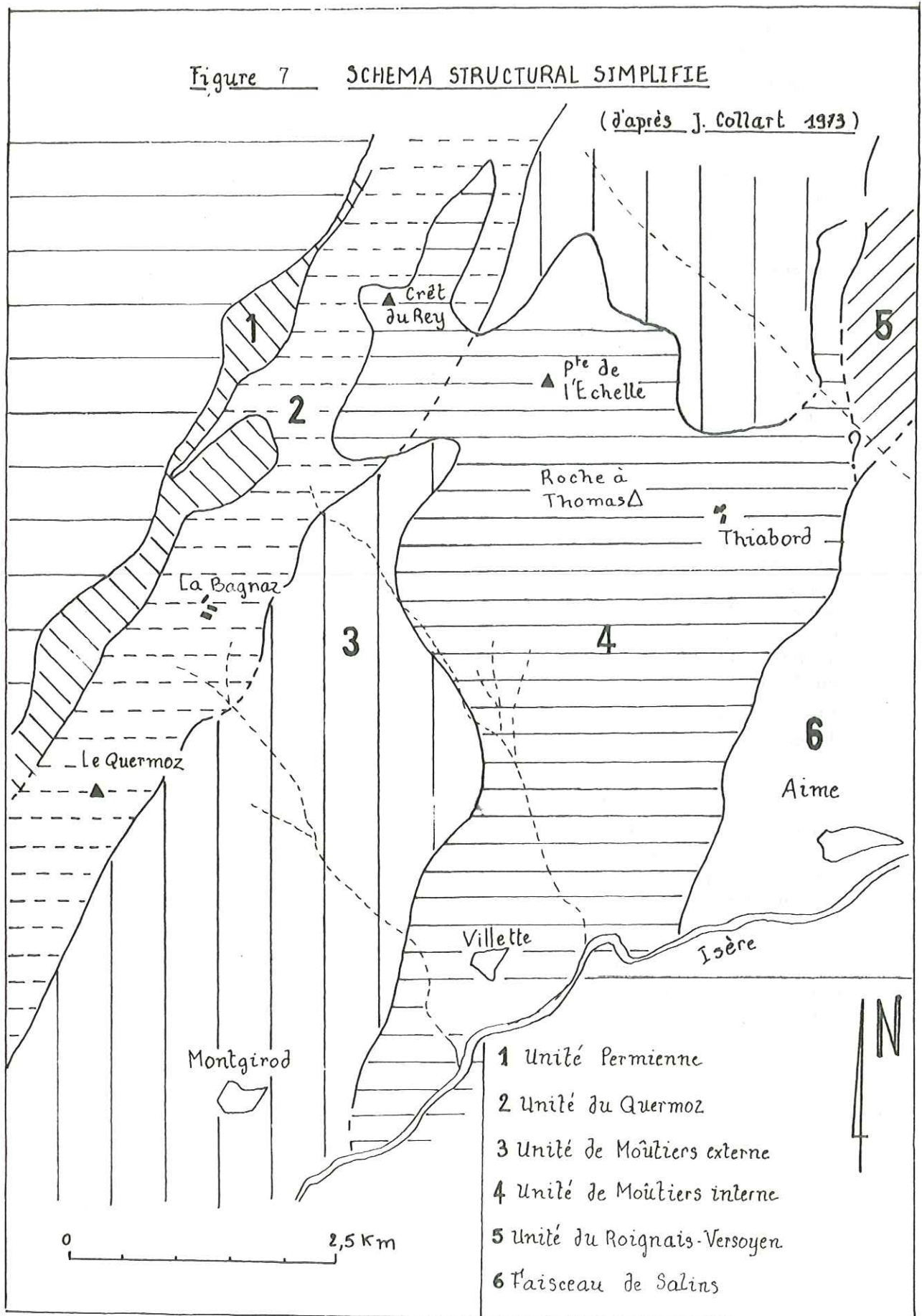
- \* l'Unité externe à l'Ouest : Zones de Hautecour et des Etrois du Siaix
- \* l'Unité interne à l'Est : Zone de Villette.

La ride de Thiabord située plus à l'Est, sépare l'ensemble de Moutiers de l'Unité du Roignais-Versoyen.



Figure 7 SCHEMA STRUCTURAL SIMPLIFIE

(d'après J. Collart 1973)



- 1 Unité Permienne
- 2 Unité du Quermoz
- 3 Unité de Moûtiers externe
- 4 Unité de Moûtiers interne
- 5 Unité du Roignais-Versoyen
- 6 Faisceau de Salins

Les deux rides délimitent deux bassins :

- \* le bassin externe de l'Unité de Moultiers : caractérisé par une série détritique importante intercalée entre les schistes noirs à quartzites verts et le flysch ou couches de St Christophe.
- \* le bassin interne de l'Unité de Moultiers : au sein duquel la formation détritique comprise entre les schistes noirs à quartzites verts et le flysch a une épaisseur modeste.

La Zone de Villette correspond au départ du talus interne de la Ride de Laval : l'épaisseur des terrains est assez importante, la granulométrie y est grossière, et il y existe de nombreuses "crachées détritiques" grossières. Topographiquement, la série rencontrée dans la Zone de Villette est la suivante :

- bancs calcaires dolomitiques jaunâtres ou violacés qui appartiennent déjà aux couches liasiques.
- Au-dessus, viennent des schistes noirs associés à des bancs dolomitiques gris-noirs à patine rousse présentant des passées luma-chelliques.
- Ensuite, il existe des conglomérats localement entrecoupés de schistes gris ou verts.
- Au-dessus de ces conglomérats, en certains points, apparaissent des dolomies grises avec des brèches intraformationnelles du Trias.

Il s'agit là d'une série renversée avec du Rhétien à la base et du Trias supérieur essentiellement bréchique au sommet de la série. Or, Villette se trouve dans la zone d'enracinement d'un vaste pli couché dont l'axe anticlinal est bien marqué par des gypses juste au Nord de Villette.

Ce pli couché, d'environ 6 kms d'amplitude, englobe les massifs de Roche à Thomas et du Crêt du Rey situés plus au Nord. Il a été mis en évidence et décrit par J. Collart en 1973. (cf. figure 7 ).

Ainsi, la région de Villette correspond à la terminaison méridionale de ce pli couché et représente l'extrémité de son flanc inverse.

II-3.1.6. L'Unité de Salins - Elle correspond à la fois au Faisceau de Salins de R. Barbier et à la "bande occidentale de Houiller" de H. Schoeller.

Du point de vue stratigraphique, il est impossible de faire une coupe synthétique de tous les terrains ; cependant, les observations de terrains ont permis d'établir la succession suivante :

- Le Houiller : représenté par des alternances de schistes noirs à micas détritiques, de grès noirâtres micacés.
- Le Permien : caractérisé par des schistes violets ou verts n'a été reconnu de façon certaine.
- Le Trias : il est constitué par des quartzites, dolomies, gypses et dolomies à patine rousse. Le Trias supérieur est représenté soit par des évaporites, soit par des brèches polygéniques et des schistes noirs.
- Le Lias : il est formé par les calcaires blanches marmoréens, très massifs, totalement azoïques.



- Au-dessus de ces calcaires liasiques, vient une série assez épaisse de schistes brunâtres avec quelques passées microbréchiques. La série mésozoïque est très incomplète.

Cette Unité de Salins représente la limite orientale de la Nappe des Brèches de Tarentaise.

### II-3.2. La Nappe du Pas du Roc

Nous ne décrivons dans cette nappe que la digitation de la Grande Moenda qui affleure largement en Tarentaise entre les stations thermales de Salins les Thermes et Brides-les-Bains.

Les deux digitations de cette nappe étant décollées au niveau des gypses du Trias supérieur, aucun terme inférieur n'est connu dans cette Unité.

La série débute donc par des gypses et cargneules triasiques en position souvent anormale, jalonnant d'importantes lignes de dislocations. Les cargneules semblent surmonter les gypses et faire le passage aux argilolites et dolomies supérieures ; les argilolites dominant au Trias supérieur dans la digitation de la Grande Moenda.

Il faut noter ici que le Trias montre de nettes variations de faciès d'Ouest en Est. En effet, le Trias supérieur uniquement formé d'argilolites dans la Zone Ultradauphinoise est constitué dans la digitation de la Grande Moenda par des argilolites toujours dominantes, mais accompagnées de dolomies. Plus à l'Est, dans la partie la plus interne de la nappe du Pas du Roc, les argilolites font place aux dolomies qui, à leur tour, deviennent prédominantes.

Suite aux argilolites du Trias supérieur, le Rhétien apparaît sur 10 mètres d'épaisseur sous forme de dolomies grises avec des intercalations de schistes noirs et de calcaires coquilliers. Il est surmonté par un calcaire massif de 10 mètres d'épaisseur et un calcaire spathique gris représentant la base du Lias.

Le Lias se décompose en trois termes montrant des variations de faciès au sein même de la digitation :

Le Lias inférieur : formé de calcaires en gros bancs à l'Ouest ou de calcaires à silex à l'Est.

Le Lias moyen : constitué par des marnes et marnocalcaires sur une puissance d'environ 300 mètres.

Le Lias supérieur : caractérisé par des schistes noirs très tendres (150 mètres).

Cette sédimentation vaseuse se poursuit au Dogger avec des calcaires et calcschistes un peu gréseux formant une corniche au dessus des schistes tendres du Lias supérieur. Puis vient une importante série de marno-calcaires et calcschistes foncés de 200 mètres d'épaisseur, représentant le callovo-oxfordien.

Contrairement à la Nappe des Brèches de Tarentaise, dans la Nappe du Pas du Roc le Jurassique supérieur ainsi que le Crétacé inférieur et supérieur sont présents. Cependant, ceux-ci se retrouvent dans la zone des Ecailles externes car ils ont été refoulés, avec les terrains formant le sommet de la couverture, au front de la Nappe du Pas du Roc.

Le même phénomène se produit au niveau du Nummulitique qui est aussi décollé du reste de la série, et de ce fait, se retrouve en différents endroits : à l'Ouest, dans la Zone des Ecailles Externes ; à l'Est sous forme de lambeaux plus ou moins bien conservés dans la région de Gitamelon au Nord-Est des Aiguilles de la Grande Moenda.

En conclusion, la série stratigraphique de la digitation de la Grande Moenda comprend schématiquement :

- \* un ensemble marno-calcaire et schisteux allant du Lias moyen à l'Oxfordien.
- \* une barre calcaire représentée par le Lias inférieur et le Rhétien.

En fait, la série de la Nappe du Pas du Roc, très réduite en épaisseur, est presque complète et ne révèle pas de discordance. De plus, elle présente de nombreux faciès néritiques.

Toutes ces indications confèrent à la nappe les caractères d'un haut-fond assez stable.

### TROISIEME PARTIE - DESCRIPTION TECTONIQUE DES DIFFERENTES FORMATIONS

#### III-1. La Zone Dauphinoise

Dans la couverture Dauphinoise, plusieurs niveaux de décollements tels que le Trias, le Lias supérieur et l'Oxfordien ont permis l'indépendance tectonique de cette zone.

#### III-2. La Zone Ultradauphinoise

Cette partie la plus orientale de la Zone Dauphinoise, chevauche largement à l'Ouest la couverture autochtone des massifs cristallins externes, et se trouve chevauchée à l'Est par les Unités Subbriançonnaises.

La sédimentation de cette zone a été très perturbée par une phase tectonique anténummulitique aboutissant à la formation de plis qui seront ultérieurement érodés profondément, parfois jusqu'au socle cristallin (car cette nappe comprend non seulement des terrains post-triasiques, mais aussi du Houiller, et parfois même du socle cristallin.) Ensuite, elle est recouverte en discordance par le flysch des Aiguilles d'Arves.

Lors d'une phase post nummulitique, la masse de flysch a été décollée et basculée vers l'Est.

#### III-3. La Zone des Brèches de Tarentaise

##### III-3.1. La Digitation du Niélard

Cette unité affleurant au Sud de la région étudiée, nous n'avons pas repris sa série stratigraphique. Cependant, très brièvement, nous en donnerons les caractéristiques tectoniques :

La Digitation du Niélard a subi deux phases de plissements : l'une anténummulitique très intense, l'autre postnummulitique très violente également, transformant les nombreux plis en écailles chevauchantes les unes sur les autres.

##### III-3.2. La Zone du Quermoz

La structure d'ensemble paraît isoclinale avec un plongement vers l'Est.



Cependant, sans qu'il soit possible de les détecter, de nombreux replis complexes affectent la série. Ces replis sont nettement visibles en rive gauche de l'Isère, dans les gorges du Pont de Séran entre Aigueblanche et Moûtiers.

Il faut remarquer que tous ces replis ne perturbent pas la structure d'ensemble de cette zone.

### III-3.3. La Zone de Hautecour

Comme nous l'avons déjà dit, le massif de Hautecour est formé par deux lames cristallines qui pincement en synclinal une série crétacée importante.

Les mouvements anciens ont joué un rôle important :

- . lacune fréquente à la base du Lias,
- . absence de l'épaisse série jurassique du Quermoz,
- . transgression du Crétacé sur des termes anciens (même le cristallin).

La couverture de ce massif cristallin d'Hautecour est représentée :

à l'Ouest des lames cristallines, par une série verticale normale qui, plus au Nord, entoure le cristallin en une sorte de fermeture anticlinale.

entre les deux lames cristallines, par un synclinal pincé caractérisé par une importante série crétacée accompagnée de lambeaux de Houiller, Permien ou Trias.

à l'Est des lames cristallines, par une série écaillée avec Houiller, Permien et Trias. Cependant, la phase de serrage finale a considérablement affecté les séries qui ne se retrouvent pas dans leur ordre normal.

En définitive, le massif cristallin de Hautecour se présente comme un anticlinorium enveloppé de sa couverture, avec effondrement et pincement d'un synclinal médian dans sa partie Sud.

### III-3.4. La Zone des Etroits du Siaix

Au Nord, elle apparaît sous forme d'une lentille de Lias et Trias supérieur de Montgirod.

Au Sud, elle disparaît sous le Faisceau de Sâlines qui la chevauche.

### III-3.5. La Zone de Villette

Elle correspond à la zone d'enracinement d'une importante structure anticlinale déversée et couchée vers l'Ouest. Cette structure englobe les massifs de Roche à Thomas, Crêt du Rey, situés plus au Nord.

### III-3.6. L'Unité de Salins

Il existe une évolution tectonique nette depuis la partie méridionale de l'Unité (région de Salins-les-Thermes), en se dirigeant vers la partie septentrionale.

En effet, dans la région de Salins, les différentes lames de terrains qui constituent l'Unité sont verticales ; elles deviennent horizontales au Nord de Bourg-St-Maurice et forment alors une sorte de nappe de recouvrement.

Il s'est alors produit un clivage au toit du Carbonifère avec disparition presque complète du Permien.

#### III-4. La Nappe du Pas du Roc

Deux niveaux de décollements majeurs ont subdivisé cette nappe en trois sous-ensembles possédant chacun leurs caractères stratigraphiques et tectoniques propres.

- Un décollement dans les marnes oxfordiennes a provoqué le déplacement vers l'Ouest de la partie supérieure de la série (Crétacé et flysch). Cette dernière forme un empilement d'écailles ("Zone des Ecailles externes") sur la bordure orientale de la Zone Ultradauphinoise. La constitution géologique de ces écailles "externes" a permis de distinguer trois phases de plissements :
  - \* une phase anté-Sénonienne peu accentuée
  - \* une phase anté-Nummulitique - peu violente et dont les mouvements s'amortissent d'Ouest en Est dans les différentes écailles.
  - \* une phase post-Nummulitique - à l'inverse des phases précédentes celle-ci a été très violente ; la couverture nummulitique est décollée de l'Oxfordien et découpée en une série d'écailles.
- Les gypses du Trias ont provoqué dans toute la nappe un décollement de la série qui a séparé la partie supérieure de la série de son substratum.

##### III-4.1. Le Faisceau du Perron des Encombres

Schématiquement, cette unité est formée par la superposition d'une barre rocheuse calcaire (Lias et Dogger) et d'une épaisse série schisteuse (callovo-Oxfordien).

Dans cette unité, de nombreux plis synclinaux et anticlinaux d'axe Nord-Sud se succèdent d'Ouest en Est.

La phase anté-nummulitique étant de très faible amplitude, ces plis ont été attribués à la phase post-nummulitique et leur formation est due à l'action de deux mécanismes successifs : une phase d'écoulement donnant naissance à des plis réguliers, puis une phase d'écrasement qui impose une disposition isoclinale redressée à l'ensemble de la série.

##### III-4.2. Le Faisceau de la Grande Moenda

L'allure essentiellement schisteuse du faisceau provient du fait que la partie rocheuse de la série est uniquement représentée par le Lias inférieur et le Rhétien.

Dans la série, tous les termes supérieurs à l'Oxfordien manquent ; et, de ce fait, aucune distinction entre différentes phases de plissements ne peut être observée d'autant plus que la phase alpine très violente a fait disparaître toute trace de tectonique ancienne.

Tous les plis observés dans cette digitation ont donc été formés lors d'une phase post-nummulitique. L'existence de charnières régulières et de l'aspect isoclinal que révèle l'ensemble (toutes les couches plongent vers l'Est) peut-être expliquée, comme dans la digitation du Perron des Encombres, par deux phases de plissements successives : une phase d'écoulement suivie d'une phase d'écrasement.



### III-4.3. Conclusion

La Nappe du Pas du Roc se caractérise, non pas par une tectonique "cassante" comme dans la Nappe des Brèches de Tarentaise, mais par une tectonique souple aboutissant à la formation de plis réguliers et à l'écoulement vers l'Ouest de la partie supérieure de la série.

### III-5. La Zone des Gypses

Dans les gypses frontaux de la Zone Briançonnaise, d'énormes blocs-klippes sont emballés, caractérisés par le fait que leurs faciès correspondent à des unités plus internes que la Nappe du Pas du Roc.

### III-6. La Zone Briançonnaise

Du point de vue tectonique, cette Zone peut être scindée en deux ensembles :

- La couverture secondaire et tertiaire Briançonnaise
- Le socle Briançonnais.

#### III-6.1. La couverture secondaire et tertiaire

Celle-ci est presque toujours décollée de son substratum au niveau des gypses et des carneules du Trias.

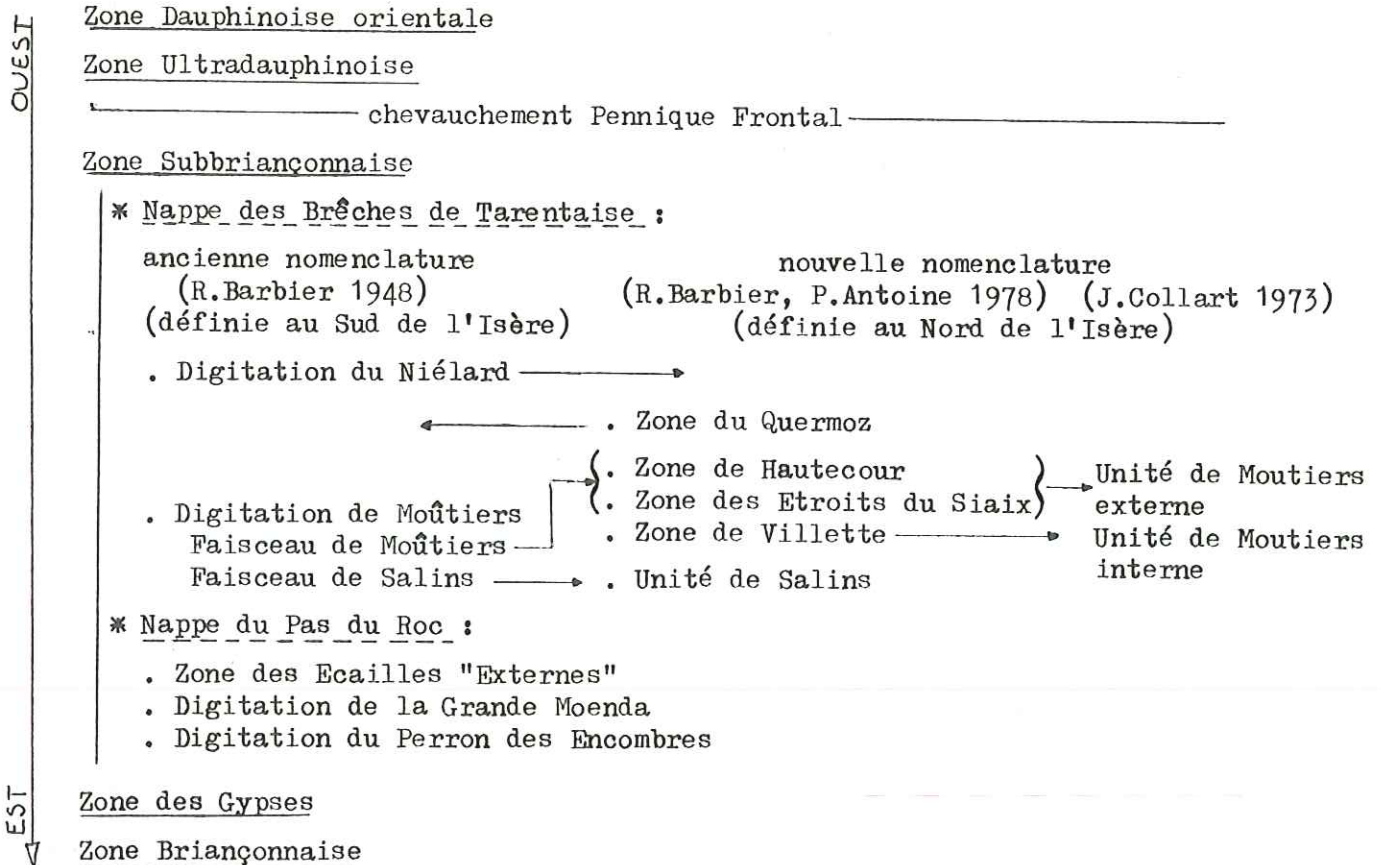
Repliée sur elle-même, cette couverture a été affectée par un r trocharriage qui est à l'origine de nombreux écaillages.

#### III-6.2. Le socle Briançonnais

Le style tectonique de ce socle est mal connu. Dans la région  tudi e, au Nord de l'Arc, la couverture de la nappe a presque totalement disparu : il ne reste que quelques lambeaux. C'est pour cette raison que la Nappe Briançonnaise est encore appel e nappe Houillère Briançonnaise car, dans cette région, elle affleure uniquement sous forme d'une énorme masse de Permo-Houiller (par contre, au Sud de l'Arc, la couverture est beaucoup mieux conserv e). Ce permo-Houiller se présente en grands d mes anticlinaux faillés dont les bordures externes et internes sont chevauchantes selon des directions oppos es.

QUATRIEME PARTIE - SYNTHESE TECTONIQUE

Nous présenterons tout d'abord un tableau général montrant les raccords des différentes unités étudiées entre elles : d'Ouest en Est :

IV-1. Les différents styles tectoniques

L'aspect structural actuel de la région résulte de plusieurs styles tectoniques différents :

- . Une tectonique embryonnaire alpine précoce
- . Une tectonique alpine souple et tangentielle
- . Une tectonique tardive cassante

La tectonique embryonnaire :

Les premiers mouvements de la tectonique embryonnaire sont sans doute liés au jeu de failles profondes orientées environ N 50°. Ce sont ces dernières qui sont à l'origine de l'orientation des zones paléogéographiques observées.

La tectonique souple :

Elle est liée à la période paroxysmale du plissement alpin. Elle se caractérise par deux phases de plissements ayant une direction commune proche de N 30°.

La première phase est une phase de tectonique tangentielle qui aboutit à la formation de plissements.

La deuxième phase peut encore être appelée phase de serrage: elle provoque, par son action, le développement d'un plissement de style isoclinal à plan axial subvertical.



### La tectonique cassante :

Elle est postérieure à la tectonique souple et se marque par deux directions de fractures sensiblement orthogonales :

- une direction de fractures voisine de N 30° qui peut correspondre au rejeu tardif le long de contacts anormaux.
- une direction de fractures voisine de N 110°.

Ces fracturations sont postérieures à la tectonique souple car elles affectent des terrains déjà plissés.

### IV-2. Chronologie des faits tectoniques

Malgré la parfaite continuité des mouvements qui ont affecté les formations, plusieurs "périodes et événements tectoniques" ont été distingués, permettant une schématisation de la chronologie des faits tectoniques.

Ainsi, l'évolution tectonique de la région peut être résumée en trois périodes et six événements.

#### IV-2.1. La période embryonnaire

Dans la région, les mouvements embryonnaires débutent dès le Trias, deviennent très importants au Dogger puis s'estompent à la fin du Crétacé.

Cette période de tectonique cassante synsédimentaire peut être décrite en deux événements :

Évènement 1 - Le rejeu vertical des fractures hercyniennes orientées sensiblement N 50° provoque la formation et l'individualisation des bassins et cordillères (Trias - Lias).

Évènement 2 - Au Dogger se produit une activation des cordillères qui se poursuit jusqu'à la fin du Crétacé avec le dépôt du flysch.

Ainsi au Dogger, s'individualise la Cordillère Tarine qui se suit tant au Nord qu'au Sud de l'Isère. Le soulèvement de cette zone de cordillère constituant la partie orientale de l'unité de Moutiers externe provoque à l'Ouest de celle-ci une zone subsidente correspondant à la zone du Quermoz.

L'unité de Moutiers externe, en position alors rehaussée est érodée par endroits jusqu'au Trias supérieur et se retrouve de ce fait, exempte de Lias. Le même phénomène se produit au Sud de l'Isère avec l'érosion du Lias qui est à l'origine de la formation des brèches jurassiques du Niélard.

Les effets précoces de cet événement 2 se produisent en même temps au Nord et au Sud de l'Isère. Par contre, les effets tardifs (dépôt de flysch) se produisent à des périodes différentes au Nord (Crétacé) et au Sud (Tertiaire).

Ainsi, à la fin du Crétacé, au Nord de l'Isère, sont individualisés :

- . l'unité du Quermoz
- . le bassin externe de Moutiers
- . la ride de Laval (reste de la Cordillère Tarine)
- . le bassin interne de Moutiers
- . la ride de Thiabord (qui sépare le bassin interne de Moutiers de l'unité du Roignais-Versoyen situé plus au Nord).

#### IV-2.2. La période paroxysmale du plissement alpin (fin Eocène)

Évènement 3 - Au Tertiaire, cet événement correspond à la mise en place du grand pli couché chevauchant de Roche à Thomas.- Crey du Rey avec la formation de plis d'entraînement. (Le départ des klippen préalpines est relié à cet événement).



COUPES DES ZONES ULTRADAUPHINOISE ET SUBBRIANÇONNAISE (d'après . . . . . R. BARBIER)

1 En Tarentaise au niveau de Salins et Brides

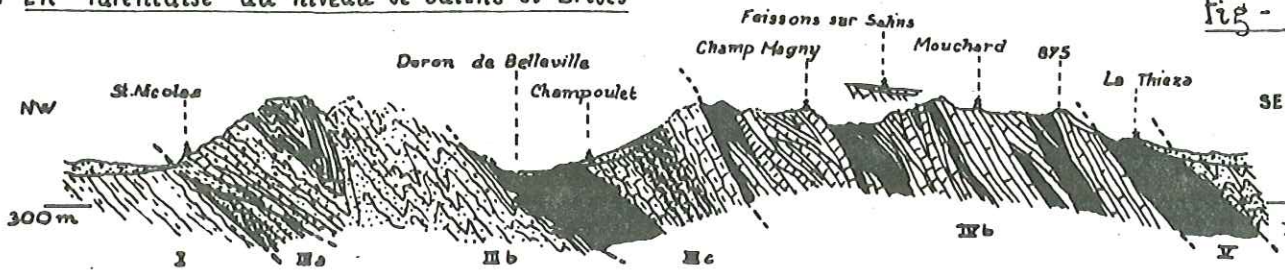
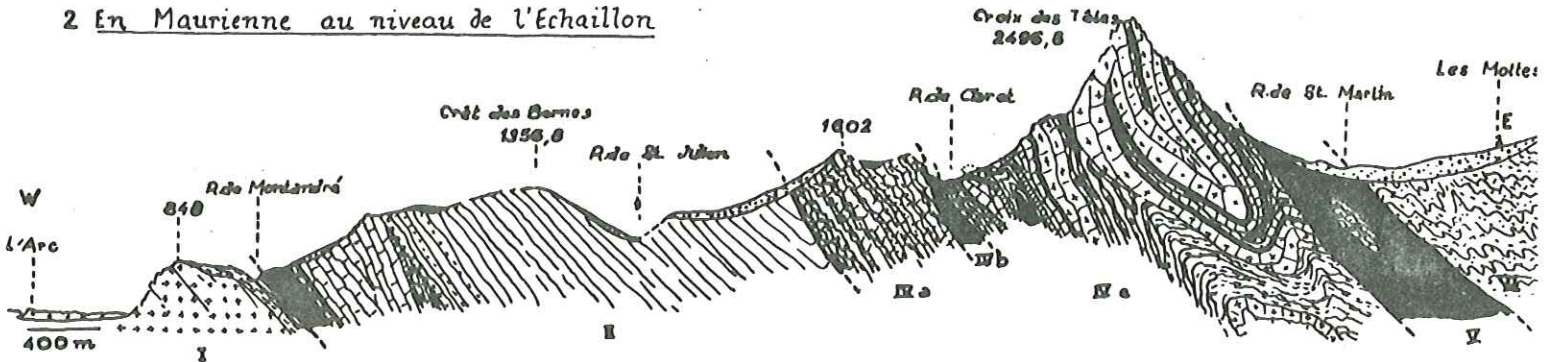
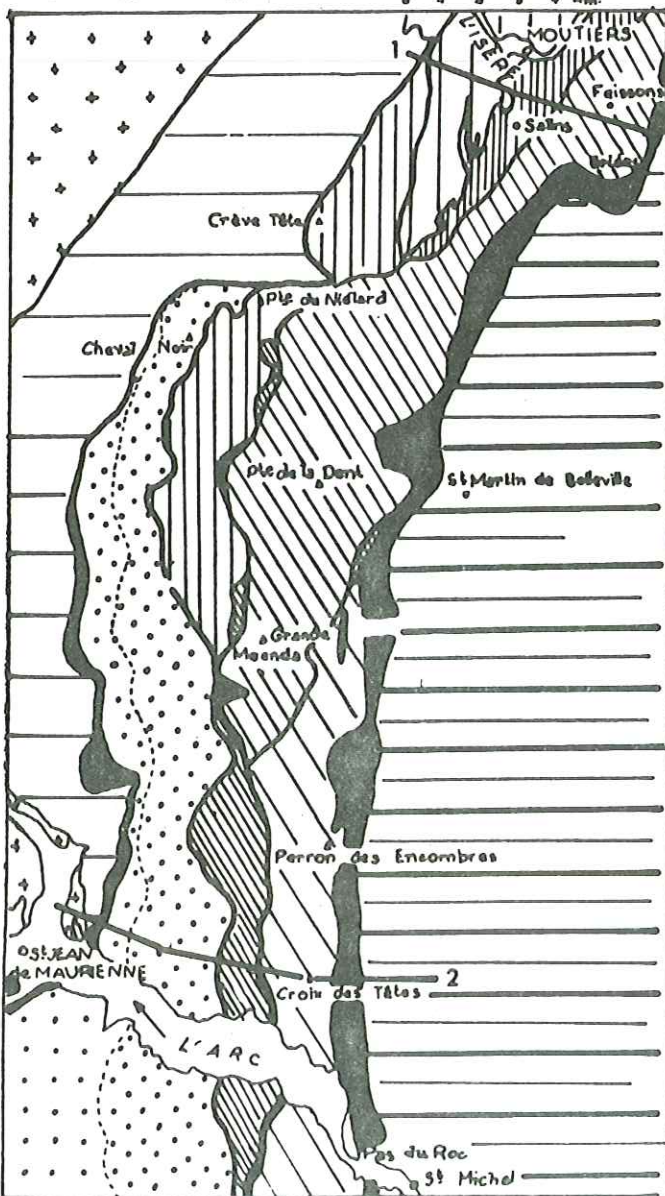


Fig - 8

2 En Maurienne au niveau de l'Echailon



SCHEMA TECTONIQUE : Echelle :



I ZONE DAUPHINOISE

- Lias schisteux
- Lias calcaire
- Série de l'Echailon
- Lias supérieur et moyen
- Trias
- Cristallin

II ZONE ULTRADAUPHINOISE

- Flysch
- Lias et Rhétien
- Trias {argilites, gypse; dolomies, quartaites}
- Permo-houiller

- Chevauchement pennique frontal
- Limites des unités principales

- Alluvions
- Ebois
- Glaciaires

Légende du schéma tectonique

- 1 Trace et numéro des coupes
- Lamas de gypse et cargneules
- ZONE DAUPHINOISE: massifs cristallins externes et leur couverture
- ZONE ULTRADAUPHINOISE: Flysch des Aiguilles d'Arvas et son substratum
- ZONE SUBBRIANÇONNAISE
- Nappe des brèches de Tarentaise
- Digitalion du Nillard
- Faisceau de Moutiers
- Faisceau de Salins
- Nappe du Pas du Roc
- Ecaïlles externes
- Digitalion de la Grande Moenda
- Digitalion du Perron des Encombras
- ZONE DES GYPSES
- Gypse et bloc-Mippes
- ZONE BRIANÇONNAISE
- Trias dolomies et quartaites
- Permien
- Houiller

ZONE SUBBRIANÇONNAISE

NAPPE DES BRÈCHES DE TARENTEISE

- IIIa Digitalion du Nillard
- IIIb Faisceau de Moutiers
- IIIc Faisceau de Salins
- Nummulitique
- Jurassique {brèches (a); calcschistes (b)}
- Lias et Rhétien
- Trias supérieur, moyen et inférieur
- Permo-houiller
- Micaschistes

NAPPE DU PAS DU ROC

- IVa Ecaïlles externes
- IVb Digitalion de la Grande Moenda
- IVc Digitalion du Perron des Encombras
- Nummulitique et Crétacé (a et c)
- Oxfordien {schistes et grès; brèches du Télégraphe (a)}
- Couches à Cancrolophycus
- Dogger
- Lias supérieur, moyen et inférieur (b)
- Lias supérieur, moyen et inférieur (c)
- Rhétien et Trias supérieur

V ZONE DES GYPSES

- Gypse et bloc-Mippes

VI ZONE BRIANÇONNAISE

- Trias dolomies et quartaites
- Permien
- Houiller

Echelle 0 500 1000m



Evènement 4 - C'est une phase de serrage qui aboutit au style isoclinal des différentes unités tectoniques. L'orientation des axes de plis est sensiblement N 30°.

#### IV-2.3. La période post-paroxysmale (âge pontopliocène)

Evènement 5 - Le rejeu le long des contacts anormaux provoque l'apparition d'une fracturation à N 30° environ.

Evènement 6 - L'ultime évolution des mouvements de socle se marque par la formation d'une fracturation orientée N 110° environ. Cette fracturation N 110° est postérieure ou conjuguée à la fracturation N 30°.

#### IV-2.4. Conclusion

Toutes ces "étapes" de l'évolution tectonique permettent de mieux comprendre le style structural actuel des différentes formations.

En fait, tous les mouvements tectoniques sont en **continuité** avec bien entendu des amplitudes variables selon les faciès et les niveaux affectés.

Ainsi, l'évolution tectonique a imprimé à chaque unité un style différent selon la lithologie des formations représentées.

Pour conclure, nous reprendrons deux coupes des zones Ultra-dauphinoise et Subbriançonnaise faites par R. Barbier (cf. figure 8 ).

coupe n°1 - au niveau de la Tarentaise

coupe n°2 - au niveau de la Maurienne

Le tracé des deux coupes est noté sur le schéma tectonique à 1/50 000 établi par R. Barbier (1948)

### CINQUIEME PARTIE - ETUDE DU QUATERNAIRE

#### V-1. Etude du quaternaire au niveau de la station thermale de La Léchère (Tarentaise)

Les différentes formations quaternaires rencontrées le long de la vallée de l'Isère sont les suivantes :

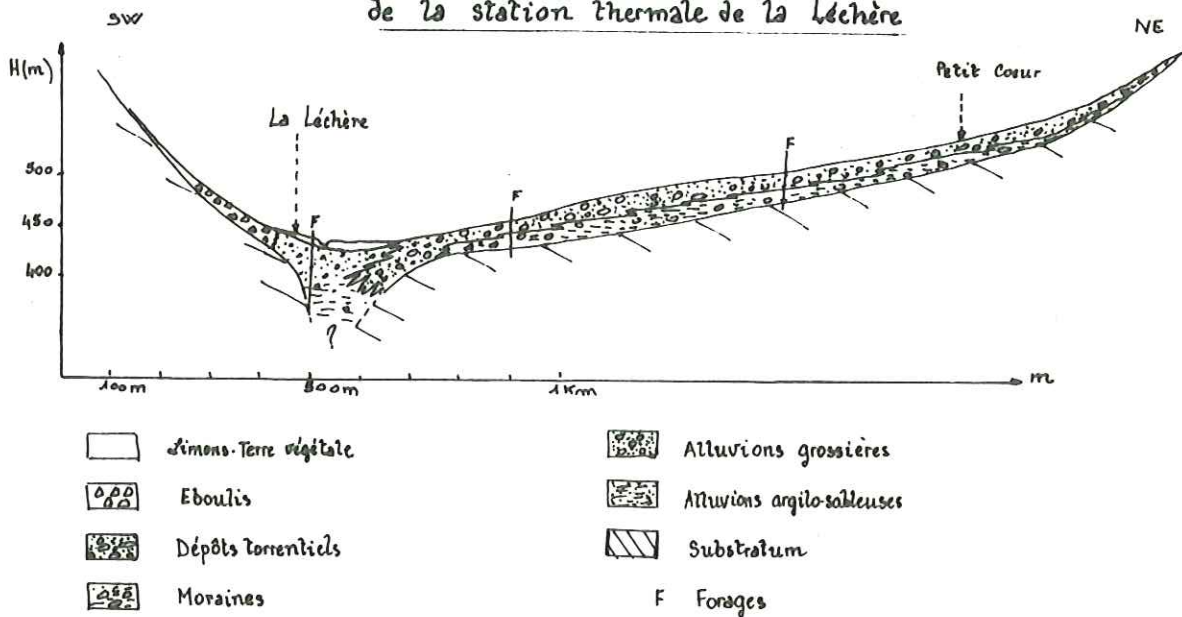
- . les alluvions (anciennes et récentes)
- . les moraines
- . les cônes de déjections (actifs ou anciens)
- . les éboulis (vifs ou stabilisés)
- . les glissements de terrains (actifs ou stabilisés)
- . les écroulements
- . les tufs.

La coupe transversale de la vallée de l'Isère au niveau de la station thermale de La Léchère permet de bien montrer les relations qui existent entre les différentes formations quaternaires (cf. figure 9 ).

Ces dernières peuvent être subdivisées en deux groupes : les formations alluviales et les formations latérales.

Fig. 9

Coupe transversale de la vallée de l'Isère au niveau  
de la station thermique de La Léchère



### V-1.1. Les formations alluviales

Elles comprennent des limons superficiels et les alluvions récentes et anciennes.

V-1.1.1. Les limons superficiels : ils forment une mince couche d'argile et de sable argileux sous la terre végétale ; parfois même ils sont absents.

Ils peuvent avoir plusieurs origines : ils peuvent correspondre à des dépôts très récents dus aux débordements de l'Isère, ou provenir du lessivage des parties fines des éboulis (c'est surtout le cas des limons rencontrés au pied des versants) ; ou encore être déposés par des coulées boueuses.

V-1.1.2. Les alluvions récentes et anciennes : elles constituent la plus grande partie du remplissage alluvial. Elles sont représentées par des formations grossières très hétérogènes comprenant des lentilles de galets graviers et sables passant en profondeur à des alluvions argilo-sableuses.

Leur épaisseur est très variable et au niveau de La Léchère, un forage de 60 mètres n'a pas atteint le substratum.

### V-1.2. Les formations latérales

V-1.2.1. les moraines : elles sont représentées par des blocs et galets englobés dans une matrice argileuse.

En général, ces dépôts glaciaires forment des placages morainiques sur les versants. Cependant, à La Léchère, un forage a mis en évidence la présence de moraines à environ 15 mètres de profondeur, sous des dépôts torrentiels.

Les moraines peuvent être remaniées par les glissements de terrains, et se trouvent alors intimement mêlées avec les matériaux constituant ces derniers.

V-1.2.2. Les cônes de déjection ; ils sont formés par les dépôts torrentiels et leur composition pétrographique dépend donc de la nature du bassin d'alimentation du torrent. Ils sont composés de blocs de dimensions et de formes variables.

Leur nombre assez élevé dans la vallée de l'Isère, et leur étendue permettent une forte infiltration qui joue un rôle important dans l'alimentation en eau de la nappe alluviale de l'Isère.



V-1.2.3. Les éboulis : ils tapissent le pied des versants sur les deux rives de l'Isère. En principe, sur les versants raides, les éboulis prédominent.

Au niveau de La Léchère et Aigueblanche, les versants sont peu pentus et, de ce fait, les éboulis existants sont surtout des éboulis anciens stabilisés.

Ils représentent eux aussi une aire d'alimentation importante pour la nappe alluviale de l'Isère.

V-1.2.4. Les glissements de terrains : dans la région de La Léchère et Aigueblanche, les formations liasiques ont été le siège de grands glissements de terrains qui sont, actuellement, stabilisés.

Quelques petits glissements se produisent encore, mais ils sont d'extension très réduite, et ne font intervenir que de faibles quantités de matériaux superficiels.

V-1.2.5. Les écroulements : ils sont importants dans la région d'Aigueblanche et se produisent aux dépens des falaises calcaires très fissurées qui surplombent les versants.

V-1.2.6. Les tufs : ceux-ci, qui continuent encore à se déposer, sont dûs au lessivage des formations calcaires des versants par les eaux qui se chargent alors en carbonates.

Certains tufs sont antérieurs aux alluvions de l'Isère. En effet, des travaux effectués à l'usine de Moûtiers ont révélé la présence de plus de 10 mètres d'épaisseur de tufs sous la vallée de l'Isère.

D'autre part, à Aigueblanche, il a été découvert des tufs sous les alluvions, reposant directement sur les assises du Lias.

### V-1.3. Conclusion

Dans la région de La Léchère et d'Aigueblanche, le remplissage quaternaire est donc constitué en partie par les formations alluviales, et en partie par les formations latérales.

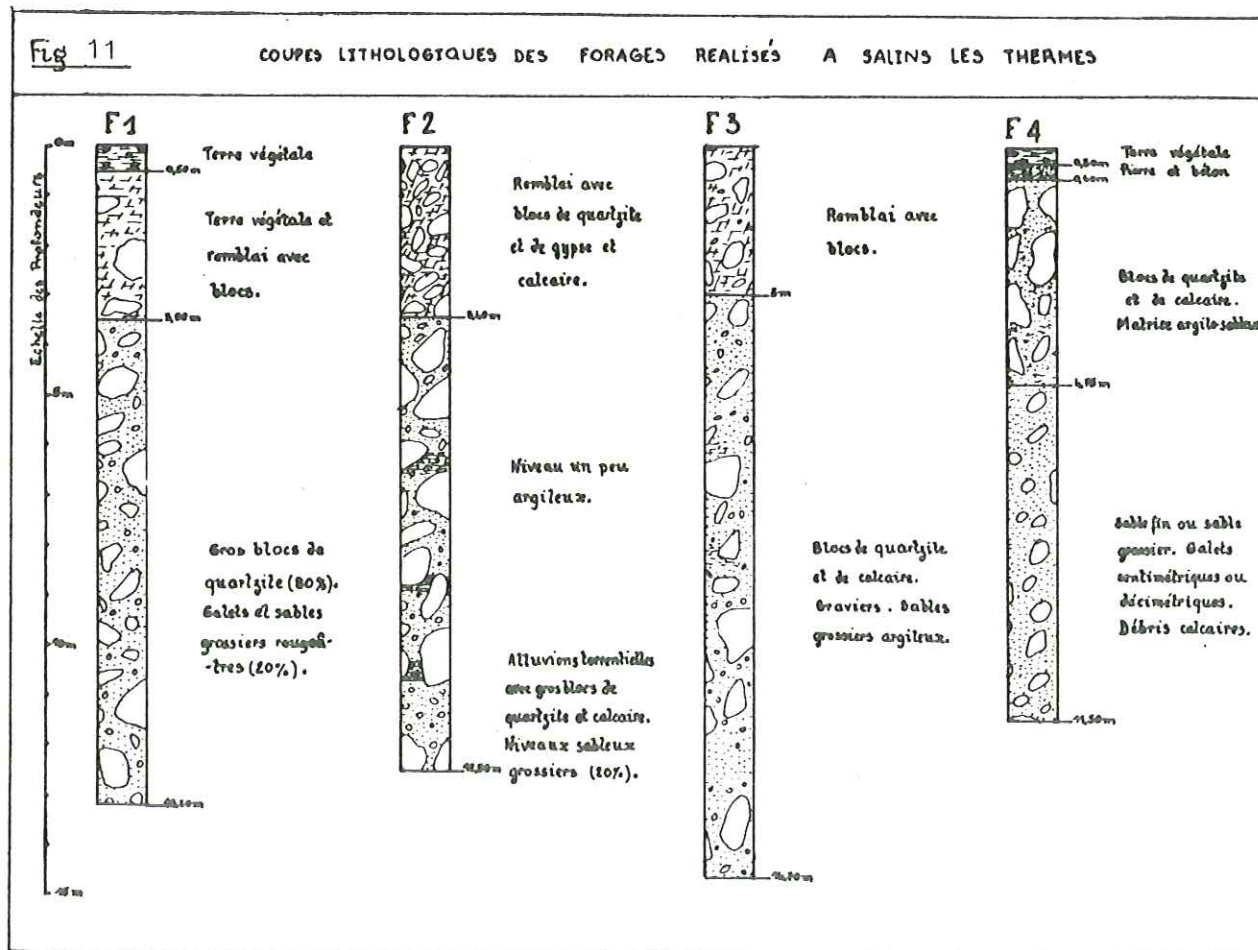
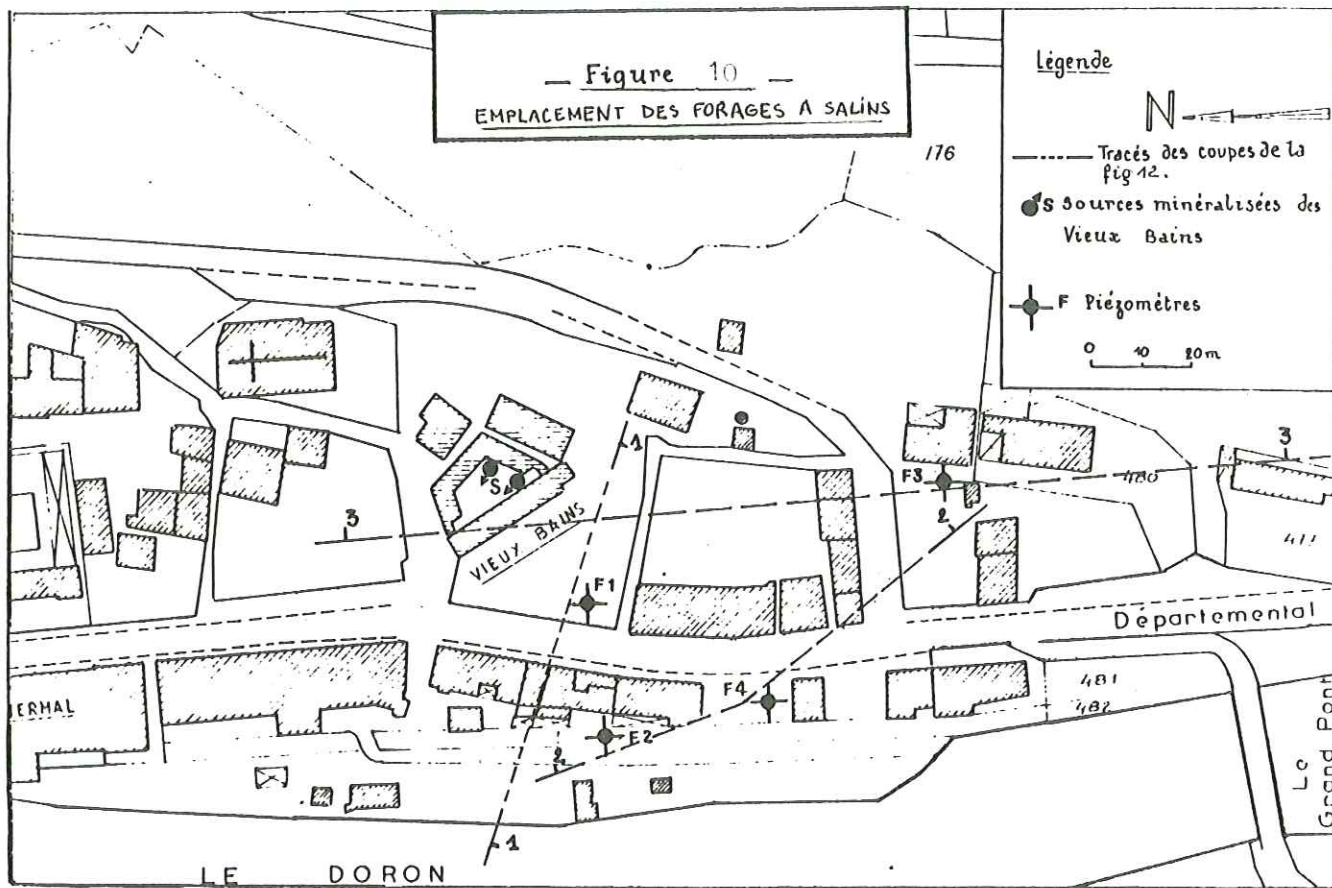
Il n'existe pas de limite nette entre les alluvions et les formations latérales. Ces dernières viennent s'imbriquer, de façon plus ou moins complexe, au sein des alluvions, (cf. coupe transversale, figure 9) selon le schéma classique de M. Gignoux pour les vallées alpines.

## V-2. Etude du Quaternaire au niveau de la station thermale de Salins-les-Thermes (Tarentaise)

### V-2.1. La prospection géophysique

En novembre 1977, une étude géophysique a été faite à Salins-les-Thermes, ayant pour but d'étudier la composition et l'épaisseur des formations quaternaires.

La station thermale de Salins-les-Thermes ne se trouve pas dans la vallée de l'Isère, mais au Sud de celle-ci, en rive droite de son affluent le Doron.





La prospection géophysique a été menée de la façon suivante :

- . 3 sondages électriques ont été réalisés selon le dispositif Schlumberger (AB = 50 m, 110 m, 180m) avec une différence de potentiel de 650 volts, sous une intensité de 500 mA.  
La profondeur d'investigation se situe aux alentours de 20 à 30 m.
- . un sondage a été exécuté sur 20 m selon la méthode sismique réfraction, mais les ondes parasites importantes dues à la circulation intense de la route nationale n'ont pas permis d'effectuer d'autres sondages sismiques.

Résultats obtenus :

Les résultats obtenus sur les 4 sondages sont reportés dans le tableau :

Sondage	Epaisseur (m)	Résistivité réelle ( cm)	Nature des terrains
S 1	0,0m à 1,3m	235 - 250	terre végétale et graviers
	1,3 à 19 m	105	graviers argileux humides
	plus de 19m	20-40	argile (moraine ?)
S 2	0,0m à 5,5m	150	remblai (graviers, blocs, argile)
	5,5 à 11 m	450 - 850	graviers, blocs
	11 à 39 m	110	graviers argileux humides
	plus de 39m	250 - 400	graviers , bed-rock ?
S 3	0,0 à 1,5 m	230	terre végétale et gravier
	1,5 à 3,5 m ou 4,5m	480	graviers et blocs
	plus de 4,5m	90	graviers argileux humides
S 4	Epaisseur (m)	Vitesse sismique m/s	Nature des terrains
	0 à 1 m	320 m/s	terre végétale, graviers
	1 à 3,2 m	500 m/s	remblai
	plus de 3,2 m	1030 m/s	graviers et blocs humides.

V-2.2. Les forages

Plus récemment, 4 piézomètres ont été installés entre le Doron et les sources minéralisées afin de mieux connaître les relations éventuelles entre le Doron et ces sources.

L'emplacement de ces forages est noté sur la figure 10 et les relevés lithologiques des différents sondages réalisés sont indiqués sur la figure 11 .

### V-2.3. Interprétations

Avec les résultats obtenus par prospection géophysique et des relevés lithologiques des sondages, nous avons établi quelques coupes interprétatives de la vallée du Doron au niveau de Salins-les-Thermes.

Ces coupes (figures 12 a, b, c) ont été réalisées dans le but de donner une image simple du remplissage alluvial à cet endroit. Elles ne sont basées que sur des interprétations, et de ce fait, ne doivent être considérées que comme des schémas servant à comprendre les relations qui existent entre les différents matériaux quaternaires rencontrés.

En définitive, la composition lithologique du sous-sol au niveau de la station thermale de Salins-les-Thermes peut être résumée de la façon suivante :

- . un niveau de terre végétale (environ 0,50 m) peu épais et discontinu : ce niveau n'existe pas dans les relevés des forages F 2 et F 3.
- . un niveau d'épaisseur variable (au maximum 3 m) correspondant à des remblais et blocs de nature différente selon les endroits. Ces remblais sont inexistant dans le relevé du forage F 4.
- . sous les remblais, vient un niveau très épais de gros blocs de quartzite et calcaire au sein d'une matrice argilo-sableuse.

Les forages F 1, F 2 et F 3 n'ont pas atteint la limite inférieure de ce dernier niveau.

Le forage F 4, par contre, a traversé sur environ 4 m d'épaisseur, le niveau de blocs de quartzite et calcaire dans une matrice argilo-sableuse.

Ensuite, à partir de 5 m de profondeur environ, ces blocs ont fait place à un niveau de sable grossier ou fin et de galets. Ce forage F 4, qui descend à 11,50 m de profondeur, est alors resté dans ce dernier niveau sans atteindre sa limite inférieure.

En fait, nous pensons que si ce forage F 4 avait été poursuivi en profondeur, il aurait rencontré à nouveau, sous les sables, les blocs de quartzite et calcaire.

En effet, ce niveau de sable apparaît comme une grosse lentille intercalée dans les blocs de quartzite et calcaire.

Cette lentille, qui semble assez épaisse, n'existe pas dans les autres forages, sauf, peut-être dans le forage F 2 vers 10 - 12 m de profondeur (?)

D'autres lentilles sableuses, mais d'ampleur beaucoup plus réduite, peuvent être rencontrées dans les forages.

D'autre part, il existe dans le niveau de blocs de quartzite et calcaire, d'autres lentilles moins importantes et de nature argileuse. Ces dernières sont apparemment beaucoup plus nombreuses que les lentilles de sables.

Ainsi, à partir de ces considérations, nous avons établi 3 coupes interprétatives de la vallée du Doron : cf figures

Le terrain aquifère composé de blocs dans une matrice argilo-sableuse apparaît de façon continue dans tous les forages. Cependant, la présence de lentilles sableuses et surtout des nombreuses passées argileuses confère à cet ensemble un aspect discontinu.

En janvier 1965, 4 forages ont été exécutés par E.D.F. à la limite des communes de Salins-les-Thermes et Moutiers, dans le cadre de l'étude de la chute de Salins.



-fig<sup>12</sup> - COUPES INTERPRÉTATIVES SCHEMATISANT LE REMPLISSAGE  
ALLUVIAL DE LA VALLEE DU DORON AU NIVEAU DE SALINS

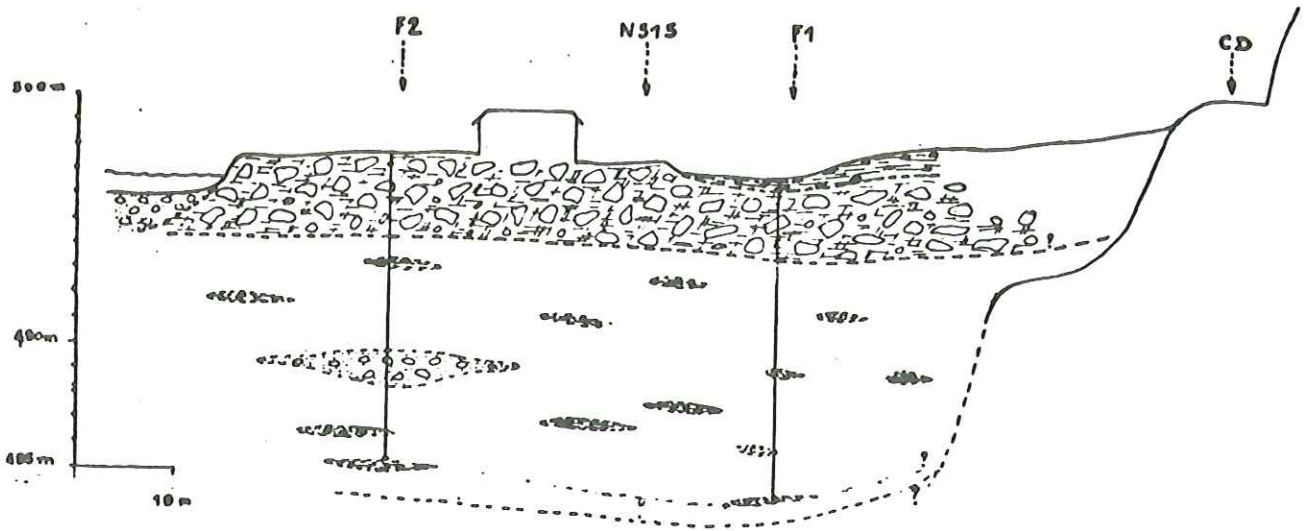


Fig 12 a - Coupe n° 1

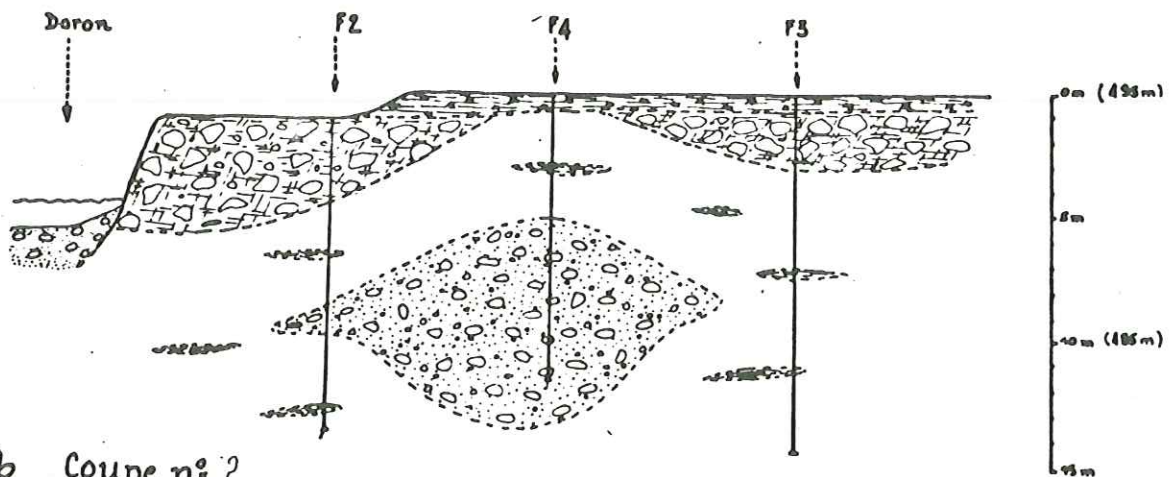


Fig 12 b - Coupe n° 2

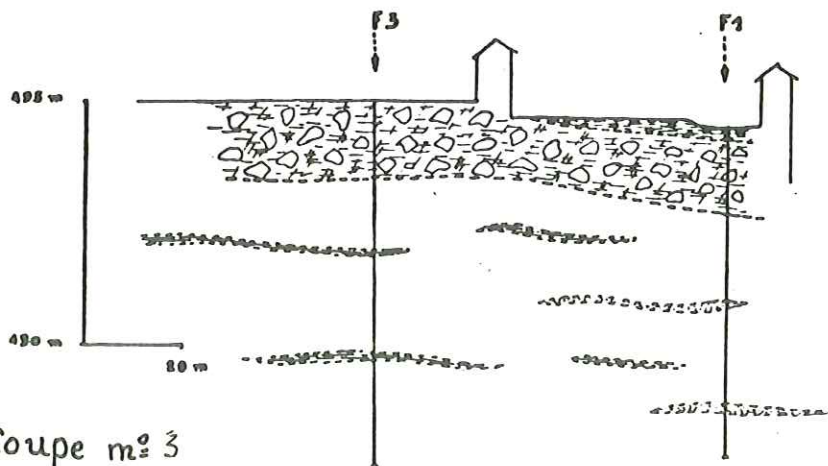

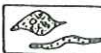

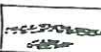
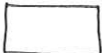


Fig 12 c - Coupe n° 3

- |   |   |  |                           |
|---|---|--|---------------------------|
|  | Terre végétale  |  | Sables fins ou grossiers. |
|  | Remblais avec blocs                                       |  | Niveaux argileux.         |
|  | Blocs de quartzite et calcaire<br>Matrice argilo-sableuse |  |                           |

Ces quatre sondages ont été effectués jusqu'à 50 m de profondeur ; ils révèlent tous les quatre la coupe géologique suivante :

- jusqu'à 16 à 25 m de profondeur selon les forages, un niveau constitué de blocs, galets, sables et niveaux argileux.
- à partir de 16 à 25 m, présence de gypse sur environ 5 m d'épaisseur
- enfin, sous les gypses, à partir de 30 m de profondeur, les 4 forages ont traversé de l'anhydrite. Le fond des sondages situé aux alentours de 50 m de profondeur n'a pas atteint la limite inférieure de ce dernier niveau.

Il semble donc que nous retrouvons ici le terrain aquifère constitué de blocs, galets, sables et argiles et que ce dernier apparaît jusqu'aux alentours des 16 à 25 m de profondeur selon les endroits.

Le substratum constitué par les gypses et anhydrite sous-jacents pourrait éventuellement servir d'aquifère ; mais ceci n'est qu'une supposition car nous n'avons aucune donnée précise à ce sujet.

Dans l'étude de l'essai de pompage réalisé à Salins (cf. chapitre IV ), nous aurons besoin, pour nos calculs, de l'épaisseur moyenne de l'aquifère. Ainsi, nous donnerons à cette dernière une valeur de 15 à 20 m = ce qui nous paraît plausible dans l'état actuel des connaissances.

### V-3. Etude du Quaternaire le long de la vallée du Doron de Bozel et à la station thermale de Brides-les-Bains

Entre Salins-les-Thermes et Brides-les-Bains, la vallée du Doron de Bozel assez étroite et sinueuse, présente des versants relativement pentus.

Ces versants (surtout en rive gauche du Doron) sont très instables du fait de leur composition essentiellement calcaire (Lias) et gypseuse (Trias).

Ainsi, tout le long de la vallée, le pied des versants est constitué d'un mélange assez complexe d'éboulis, paquets glissés de gypses, coulées boueuses, moraines, tufs, alluvions et terre végétale.

Au niveau de Brides-les-Bains, la vallée s'élargit, les versants sont beaucoup moins raides. Ceci vient du fait que juste à l'amont de Brides-les-Bains, la vallée est entaillée dans les schistes et grès houillers de la Zone Briançonnaise.

Le recouvrement quaternaire est encore important, mais surtout représenté par des dépôts morainiques sur les versants.

Un sondage a été effectué très récemment dans le fond de la vallée au niveau de la station thermale de Brides-les-Bains. Celui-ci a révélé la présence d'importantes épaisseurs de gypses intercalées dans des matériaux morainiques et alluviaux. Ceci s'explique par le fait que la station de Brides-les-Bains est située au sein de la "Zone des Gypses".



## SIXIEME PARTIE - COMPORTEMENT HYDROGEOLOGIQUE DES DIFFERENTS TERRAINS DU SUBSTRATUM

D'un point de vue général, les terrains constituant le substratum correspondent soit à des terrains cristallins, soit à des terrains sédimentaires.

### VI-1. Les terrains cristallins

Ils appartiennent d'une part à la chaîne de Belledonne en Tarentaise, et d'autre part au massif du Grand Chatelard en Maurienne.

En Tarentaise, nous les trouvons au niveau de la station thermale de La Léchère sous forme de micaschistes appartenant soit à la série des micaschistes de Feissons/Isère d'Yves Siméon (1979), soit au complexe blastomylonitique d'Yves Gros (1974).

En Maurienne, la station thermale de l'Echaillon est implantée en bordure du massif du Grand Chatelard, vers l'extrémité SE de ce dernier. Une étude récente de ce massif faite par D. Gasquet (1979) révèle que le granite de ce dernier, recoupé par de nombreux filons, apparaît intrusif dans une série encaissante métamorphique composée de schistes (dans sa partie occidentale), de gneiss et migmatites (dans sa partie orientale).

Le faciès dominant du massif du Grand Chatelard est représenté par un faciès granitique de teinte grise contenant sur ses bordures, des enclaves de la série encaissante.

L'ensemble filonien recoupant le massif est constitué par des filons de granite hololeucocrate riches en ferromagnésiens au contact des gneiss encaissants, et des filons de granite à grenat.

Du point de vue tectonique, le massif du Chatelard a été affecté par deux styles différents :

- un style de tectonique souple d'âge hercynien qui se marque par deux phases de plissements.
- un style de tectonique cassante d'âge alpin qui se traduit par une fracturation de directions variées. Pendant le cycle alpin, c'est une phase d'écaillage de socle qui a le plus affecté le massif du Grand Chatelard.

Le chevauchement du cristallin sur le sédimentaire a une direction N 20° Est et un pendage de 25° SE. Les formations triasiques très plastiques situées le long des contacts ont été bréchifiées et sont imprégnées d'oxydes de fer.

### VI-2. Les terrains sédimentaires

Ils sont essentiellement représentés par les niveaux du Houiller du Trias et du Lias. Pétrographiquement, le Houiller est de nature gréseuses, le Trias est formé par des quartzites, gypses et anhydrite, dolomies et calcaires dolomitiques ; le Lias est représenté par des calcaires marneux (Lias inférieur et moyen) ou schisteux (Lias supérieur).

Les évaporites du Trias constituent l'élément essentiel des terrains sédimentaires. Leur grande solubilité explique leur rôle très important dans le circuit hydrothermal d'une part et dans le chimisme des eaux thermominérales d'autre part.

Il est important de noter que le Trias gypseux affleure très largement et plus particulièrement au niveau des stations thermales de Salins-les-Thermes et Brides-les-Bains en Tarentaise.



En effet, on le trouve d'une part le long des chevauchements dont il souligne le tracé, et d'autre part en énormes paquets injectés et remaniés le long des versants des vallées des Dorons Belleville et de Bozel.

Du point de vue tectonique, nous avons vu (cf. figure 8) que tous ces terrains sédimentaires se présentent en lames isoclinales pentées vers l'Est, et ayant une direction proche de N 30°.

Toutes ces lames de terrains divers sont affectées par des systèmes de fracturations présentant des directions différentes.

### VI-3. Comportement hydrogéologique des terrains

Les sources thermales étudiées émergent soit au niveau des chevauchements des zones internes les unes sur les autres : c'est le cas des sources de Brides-les-Bains, Salins-les-Thermes et de La Coche ; soit au niveau du contact cristallin-sédimentaire : c'est le cas des sources des stations thermales de La Léchère en Tarentaise et de l'Echaillon en Maurienne.

Le comportement hydrogéologique des terrains est différent selon la perméabilité des roches qui les constituent.

Les roches poreuses en petit telles que les sédimentaires triasiques (gypses et dolomies) peuvent être à l'origine de circulations lentes ; la vitesse de filtration des eaux qui les traversent est faible. Les eaux "imprègent" toute la roche et celle dernière étant soluble, elle permet aux eaux thermales d'acquérir par dissolution une minéralisation très élevée. Ici, la perméabilité des roches est liée à leur dissolution par les eaux thermales. Dans certains cas, la présence de cheneaux dans ces roches solubles augmente considérablement leur perméabilité et permet aux eaux de circuler beaucoup plus rapidement.

Les roches perméables en grand permettent des circulations d'eaux plus importantes. Ce sont les roches cristallines et les calcaires (Trias ou Lias) qui, grâce aux grandes fractures qui les affectent, sont le siège d'importantes circulations d'eaux. Dans ce cas, la perméabilité est liée à la présence d'une fracturation intense de la roche, et la vitesse de circulation des eaux est fonction du volume et de la hauteur des massifs qu'elles traversent.

Que ce soit dans le cas des roches poreuses en petit ou dans le cas des roches perméables en grand, la perméabilité des terrains dépend aussi de la mylonitisation plus ou moins poussée des roches. Dans les régions affectées par une mylonitisation intense, la roche est écrasée à l'extrême et en général, ces zones sont très peu perméables. (communication orale de R. Barbier).

Dans chaque secteur d'étude, la présence simultanée des grands chevauchements de direction N 30 Est d'une part, et des fracturations de directions variées d'autre part, nous amène à envisager deux hypothèses quant à l'origine des sources thermominérales.

- Hypothèse 1 . on pourrait penser que l'origine des eaux thermales étudiées est uniquement liée aux chevauchements. Les eaux chaudes remonteraient vers la surface grâce aux chevauchements en dissolvant les gypses rencontrés le long de ceux-ci. Les émergences des sources seraient alors situées dans les vallées car ces dernières constitueraient ainsi des points de moindre charge.
- Hypothèse 2 . Cependant, l'alignement plus ou moins parfait des stations thermales de Tarentaise dans le prolongement de la vallée de l'Isère ( $\approx$  N 160°) introduit la deuxième hypothèse. En effet, l'origine des eaux thermales pourrait être liée non pas aux chevauchements, mais à un système de fracturations profondes de direction voisine de N 160°.



Les eaux chaudes remonteraient vers la surface au niveau des croisements de ces grandes fractures profondes avec les chevauchements.

Dans cette nouvelle hypothèse, les tracés des vallées de l'Isère et des Dorons correspondraient peut-être à la présence de fractures profondes.

En définitive, après leur trajet souterrain en grande profondeur, les eaux remonteraient vers la surface :

- soit grâce à la dissolution des gypses le long des chevauchements,
- soit grâce à des fractures profondes affectant le cristallin d'une part, et les assises du Houiller, du Trias et du Lias d'autre part.

L'examen des photos aériennes n'apportant que peu de précisions à ce sujet, nous avons procédé à une étude de la fracturation afin de faire ressortir les différentes directions de fracturations, et éventuellement, la prédominance d'un système de fractures sur un autre. Nous verrons dans la suite de ce travail ce que nous avons pu tirer de cette analyse.

Remarque : Pour clarifier la suite de cet exposé, nous parlerons dorénavant soit de l'hypothèse des chevauchements (hypothèse 1), soit de l'hypothèse des grands accidents de vallées (hypothèse 2).

## SEPTIEME PARTIE - ETUDE DE LA FRACTURATION

### VII-1. En Tarentaise

Dans le but de faire ressortir les principales directions de fracturations, nous avons effectué un relevé systématique des fractures affectant les différentes formations houillères (grès), triasiques (calcaires dolomitiques ou quartzites) et liasiques (calcaires marneux ou schisteux), entre Salins-les-Thermes et Brides-les-Bains.

Cette étude statistique nous a permis, à partir d'un certain nombre de mesures (environ 800) d'établir, selon les secteurs, des diagrammes en roses de la répartition de la fracturation.

Ces diagrammes sont reportés sur la figure 13. Nous voyons d'après ces derniers, que les principales directions qui ressortent sont les suivantes : N 20 à N 40° ; N 110 à N 120° ; N 130 à N 140° ; N 170° .

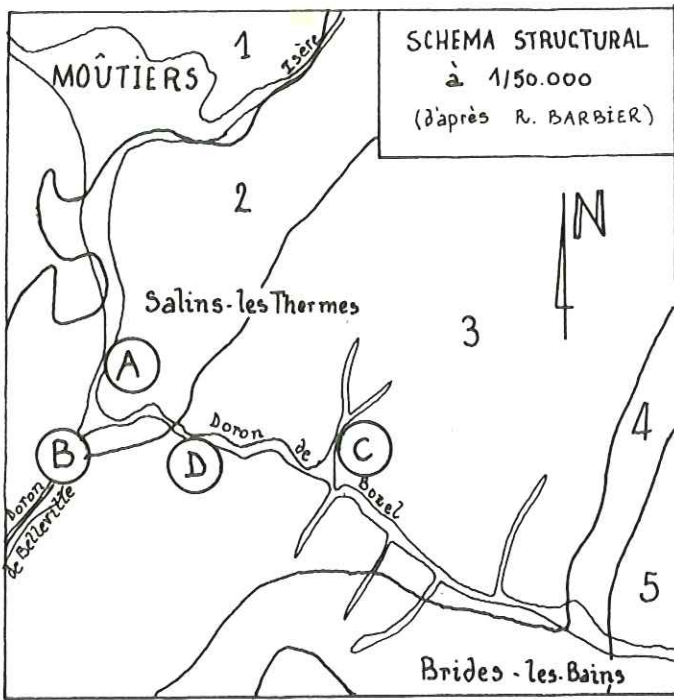
#### VII-1.1. Interprétations

D'un point de vue général, la direction moyenne de la schistosité est d'environ N30° ; mais celle-ci "tourne" selon les secteurs étudiés.

Par exemple, près de La Léchère, la direction de la schistosité est environ de N 25° alors qu'ailleurs, elle peut atteindre des valeurs assez supérieures à N 30° (communication orale de J.P. Gratier).

Ainsi, il nous faudrait connaître cette direction de la schistosité pour chaque secteur d'étude afin de caractériser toutes les familles de failles rencontrées.

N'ayant à notre disposition que la direction moyenne de la schistosité qui est N 30°, nous pouvons cependant essayer d'interpréter les différentes directions de fracturations que nous avons relevées à la suite de cette étude.



SCHEMA STRUCTURAL  
à 1/50.000  
(d'après R. BARBIER)

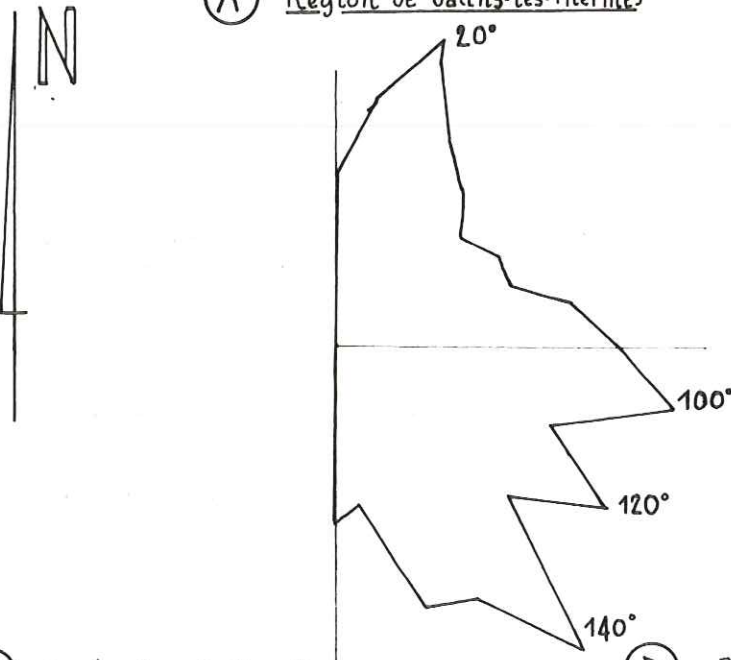
Figure 13 : ETUDE DE LA FRACTURATION

Légende du schéma structural

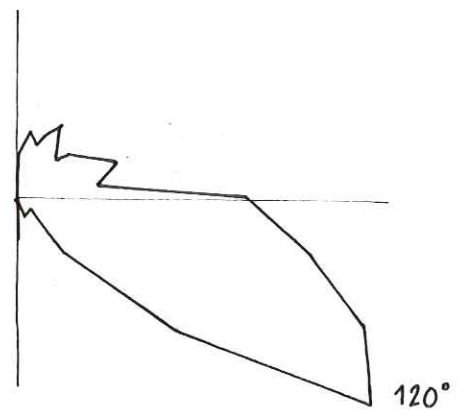
- 1 Zone des Brèches de Tarentaise
- 2 Unité de Salins
- 3 Nappe du Pas du Roc
- 4 Zone des Gypses
- 5 Zone Briançonnaise

DIAGRAMMES EN ROSES MONTRANT LES DIRECTIONS PRINCIPALES DE FRACTURATION

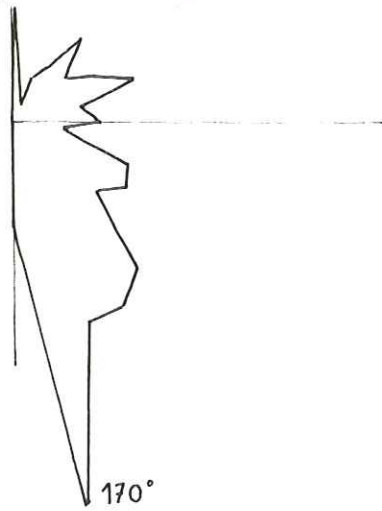
(A) Région de Salins-les-Thermes



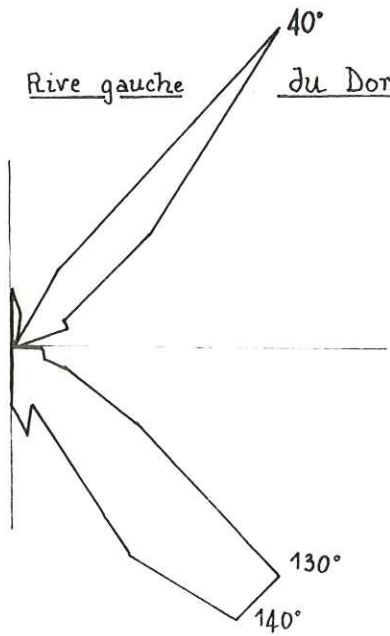
(C) Rive droite du Doron de Bozel



(B) Vallée des Belleville



(D) Rive gauche du Doron de Bozel





Nous replacerons tout d'abord, sur canevas de Wulf, les différents types de failles qui peuvent accompagner une direction de schistosité N 30° (cf. figure ) :

- aux environs de N 120°, des failles transverses, notées Tr sur le canevas de Wulf, correspondant à des failles perpendiculaires à la schistosité.
- dans une direction proche de N 30°, c'est à dire dans la direction de la schistosité, des failles d'extension notées Fx sur le canevas.

Les quatre diagrammes en roses que nous avons établi dans notre secteur d'étude peuvent maintenant être expliqués de la façon suivante :

. Les directions de fracturations allant de N 20° à N 40° voire N 60° correspondent d'une part à la schistosité qui, comme nous l'avons déjà dit n'est pas fixe mais varie aux alentours de N 30° ; et d'autre part, à des failles d'extension Fx.

. Les directions de fracturations allant de N 100° à N 170° correspondent à des failles transverses, perpendiculaires à la direction de la schistosité et traduisent des discontinuités du comportement des matériaux lors des poussées qui ont engendré la schistosité ou le rejur d'accidents plus anciens.

#### VII-1.2. Exemples

Nous donnerons deux exemples de report de fracturation sur canevas de Wulf : le 1er exemple est tiré du secteur C ; le 2ème du secteur D (cf figure ).

1er exemple : dans le secteur C, au niveau du lieudit "Les Frasses", nous avons pu relever quelques mesures de schistosité à N 15° (cf figure ). Le report sur canevas de Wulf des mesures effectuées sur le terrain fait nettement ressortir les différents types de failles : les failles transverses Tr, perpendiculaires à la schistosité, ayant une direction voisine de N 120° et les failles d'extension, de même direction que la schistosité.

2ème exemple : dans le secteur D, nous avons relevé des mesures de schistosité à N 50°. Les pôles des plans de failles accompagnant cette schistosité sont notés sur le canevas de Wulf de la figure . Cette figure est du même type que la figure de l'exemple précédent, mais cette fois ci, les directions ont changé.

En effet, les failles transverses montrent des directions proches de N 140°, et les failles d'extension (Fx) des directions voisines de N 50°.

#### VII-1.3. Remarques:

En examinant d'une part la figure des diagrammes en roses des différents secteurs étudiés et d'autre part le schéma structural à 1/50 000 qui les accompagne, nous voyons qu'il existe une "évolution" des directions de fracturations du SW en allant vers le NE.

En effet, en prenant successivement les diagrammes B, A, D et C, les directions principales de fracturations sont les suivantes :

B = N 170° et N 70°

A = N 20° et N 120°

D = N 140° à 130° et N 40°

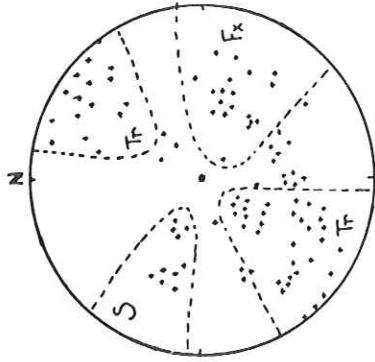
C = N 30° et N 120°

Il est donc possible qu'au niveau de la vallée du Doron de Bozel, en allant du SW vers le NE, la direction de la schistosité "tourne" de N 70° à N 20°. Ceci entraîne de ce fait, une variation de la direction des failles transverses qui passent de N 170° au SW à N 120° au NE.

Figure 15

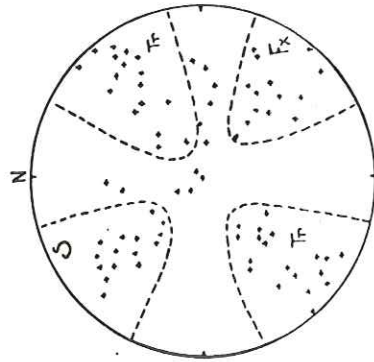
Report de la facturation sur caneras de Wulff (hémisphère inférieure)

1° Exemple : tiré du secteur C



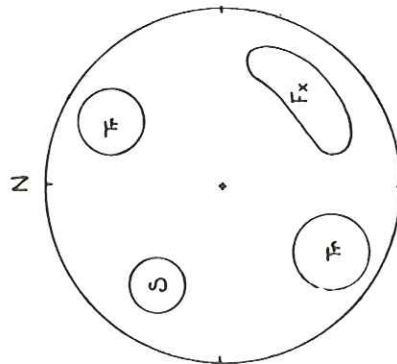
S: schistosité N 15°  
 Fx: failles d'extension N 15°  
 Fy: failles transverses N 120°

2° Exemple : tiré du secteur D



S: schistosité N 50°  
 Fx: failles d'extension N 50°  
 Fy: failles transverses N 140°

Figure 14 Représentation sur caneras de Wulff (hémisphère inférieure), des ruages de points caractérisant les différentes familles de failles.



S: Schistosité (fixée à N 30°)  
 Fx: failles d'extension  
 Fy: failles transverses



Les directions de fracturations N 140° décrites par MM Barbier et Antoine (1978) au Nord de Moutiers correspondent à des failles transverses.

### VII-2. En Maurienne

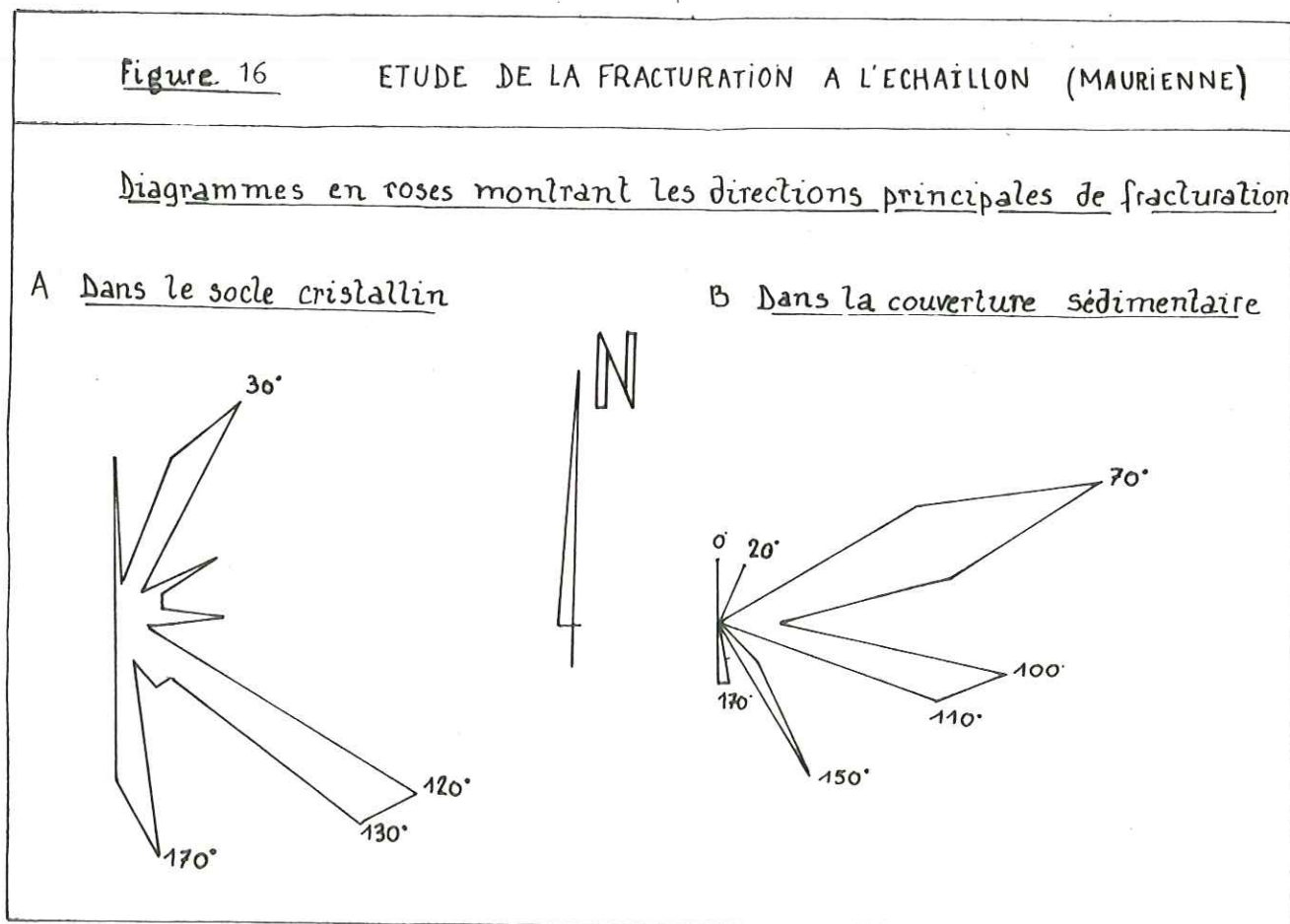
De même qu'en Tarentaise, nous avons effectué un relevé systématique des directions de fracturations au niveau de la station thermale de l'Echaillon près de St Jean de Maurienne.

La station de l'Echaillon étant située au contact du massif cristallin du Chatelard avec les formations sédimentaires, nous avons étudié séparément les affleurements cristallins (granite du Grand Chatelard et sa série métamorphique encaissante) et les affleurements de roches sédimentaires (formations liasiques calcaires).

Les résultats obtenus sont indiqués sur la figure 16. Ces deux diagrammes en roses montrent que les directions principales de fracturations sont différentes dans le socle et dans la couverture.

Dans le socle, les directions qui ressortent sont les suivantes : N 30°, N 120° 130° et N 170°.

Dans la couverture : N 70°, N 100 à N 110°, N 150° et N 170°.



### VII-3. Conclusions

L'étude statistique de la fracturation nous a permis de faire ressortir trois grandes directions principales de fractures à savoir N 30° E, N 130° à N 140° E et N 170° E ; ces dernières étant les mêmes en Tarentaise et en Maurienne.

Ces trois directions interviennent de façon équivalente : il n'existe pas de prédominance d'un système de fracturation sur un autre.

L'étude de la fracturation de la région de l'Echaillon en Maurienne nous a permis de faire une distinction nette entre le socle et la couverture : les directions principales de fracturations ne sont pas les mêmes dans les terrains cristallins et dans les terrains sédimentaires.

Ceci est normal, car du fait de leurs compétences mécaniques très différentes, leurs comportements tectoniques ne peuvent être que différents.

Avec les données que nous avons à notre disposition, nous ne pouvons pas préciser dans quelle mesure les fractures participent au cheminement souterrain des eaux thermominérales : il aurait peut-être fallu plus de mesures de stries et de sens de déplacement pour tirer des conclusions intéressantes à ce sujet. Malheureusement, dans les affleurements, les mesures de stries sont impossibles du fait de la rareté voire même de l'absence fréquente de ces dernières.

Cette étude ne nous permet donc pas de trancher entre l'hypothèse des chevauchements et celle des grands accidents de vallées.

Notons toutefois que des études structurales récentes (Yves Siméon 1979) effectuées dans les terrains cristallins le long de la vallée de l'Isère n'ont pas révélé de grand accident au niveau de cette vallée. Les différentes séries cristallographiques se poursuivent sans discontinuité d'un versant à l'autre de la vallée de l'Isère.

Malgré les différences des directions de fracture entre socle et couverture, il n'en reste pas moins que de grandes directions de fracture apparaissent et traduisent à toutes les échelles les effets du comportement cassant des matériaux des diverses formations et leur confère une perméabilité que l'on pourrait retrouver aussi bien à l'échelle des massifs qu'à l'échelle de l'affleurement.



## PREMIERE PARTIE - PRESENTATION DES SOURCES ETUDIEES

### I-1. La station thermale de La Léchère

Cette station est implantée en rive gauche de l'Isère à environ 440 m d'altitude, près du contact de la bordure orientale du massif cristallin externe de Belledonne avec sa couverture sédimentaire.

L'eau thermale est apparue en 1869 date à laquelle des effondrements, dus à la dissolution des gypses triasiques en profondeur, ont provoqué l'apparition de deux étangs d'eau tiède sur les deux rives de l'Isère. Plus tard, en 1888, des puits ont été forés en rive gauche de l'Isère et ont permis de trouver des eaux atteignant une température de 53°C.

Actuellement, il existe 4 points de pompage à la station qui sont appelés : Source Radiana 1, Source Radiana 2, Source Radiana 3 et Source Radiana 4.

Les prélèvements ont été effectués sur les "Sources" Radiana 1 3 et 4.

Toutes les "sources" sont utilisées en pleine saison, c'est-à-dire, du mois d'avril au mois de novembre. Par contre, de décembre à mars inclus, seule la source Radiana 3 est sollicitée et, de ce fait, pendant cette période, nous n'avons pu étudier que cette source en continu dans le temps.

Chaque mois, un prélèvement de l'Isère a été effectué afin de comparer les variations physico-chimiques des eaux froides superficielles avec celles des eaux chaudes de la station.

### I-2. L'eau de La Coche

Au niveau d'Aigueblanche, en rive gauche de l'Isère est située l'usine de Ste Hélène, souterraine par rapport au niveau de la retenue d'eau du barrage des Gorges d'Hannibal.

Cette usine fait partie de l'aménagement hydroélectrique mixte (pompage - gravitaire) de La Coche. La retenue d'eau des Echelles d'Hannibal constitue le bassin inférieur et la retenue de La Coche, située à 1360m d'altitude, le bassin supérieur.

Cet aménagement comprend 28 km de galeries qui dérivent les eaux d'affluents en rive gauche du Doron de Bozel ou de l'Isère vers la retenue de La Coche.

Ensuite, ces eaux, grâce à une galerie en charge de 1184 m de longueur et une conduite forcée de 1800 m de long sont amenées dans l'usine souterraine de Ste Hélène où elles sont turbinées.

Depuis la mise en service de cette usine souterraine, des venues d'eaux chaudes (environ 17°C) sont apparues à divers endroits de l'usine : dans plusieurs galeries, (galeries des cables par exemple), dans la salle des pompes (ici, l'eau a traversé le carrelage en le soulevant sur une longueur d'environ 2m).

Cette eau dépose des boues rouges très semblables aux boues rouges des sources thermominérales de la station de Salins-les-Thermes située à moins de 5 km plus en amont.





CHAPITRE II

Le débit de ces venues d'eau devenant de plus en plus important, des forages horizontaux atteignant environ 20 m de longueur ont été effectués afin de décompresser le rocher et éviter cet "envahissement" par ces eaux chaudes.

Il nous a paru intéressant de prélever ces eaux chaudes afin de les comparer aux autres sources thermominérales étudiées.

Dans un premier temps, nous avons prélevé l'eau à plusieurs endroits puis ayant constaté que toutes ces eaux étaient identiques, nous avons alors prélevé l'eau chaude toujours au même endroit, dans la galerie faisant suite à la "sous-entrée centrale".

D'autre part, nous comparerons aussi l'analyse des boues rouges déposées par ces eaux avec celle des boues rouges déposées par les eaux thermales des stations de Salins-les-Thermes et de Brides-les-Bains situées plus à l'Est.

Du point de vue géologique, nous rappelons que l'usine souterraine de Ste Hélène est implantée dans le massif de calcaires liasiques de la rive gauche de l'Isère au niveau d'Aigueblanche.

### I-3. La station thermale de Salins-les-Thermes

Dans cette station, nous avons étudié parallèlement plusieurs types d'eaux : des eaux chaudes minéralisées, des eaux froides minéralisées et des eaux de la nappe alluviale du Doron.

Tous les points de prélèvements sont situés en rive droite du Doron.

Les quatre sources principales minéralisées qui comprennent deux sources chaudes et deux sources froides sont captées par des galeries traversant soit des terrains meubles, soit la roche en place.

Leurs émergences se trouvent dans l'établissement thermal des Vieux Bains, à environ 80 m de distance à l'Est du Doron et 4 à 5 m au dessous du niveau moyen de ce dernier.

"Le contact terrains meubles - roche en place se fait selon une direction d'environ N 40° parallèle à la direction des grands chevauchements des zones internes". Moret L. (1950).

Les terrains meubles sont constitués par des éboulis de pente, alluvions du Doron et formations morainiques comprenant une matrice argileuse assez importante.

La roche en place est représentée par des calcaires dolomitiques très fissurés du Trias du faisceau de Salins qui forment l'abrupt rocheux situé immédiatement à l'Est des sources minéralisées des Vieux Bains.

#### I-3.1. Les sources chaudes minéralisées

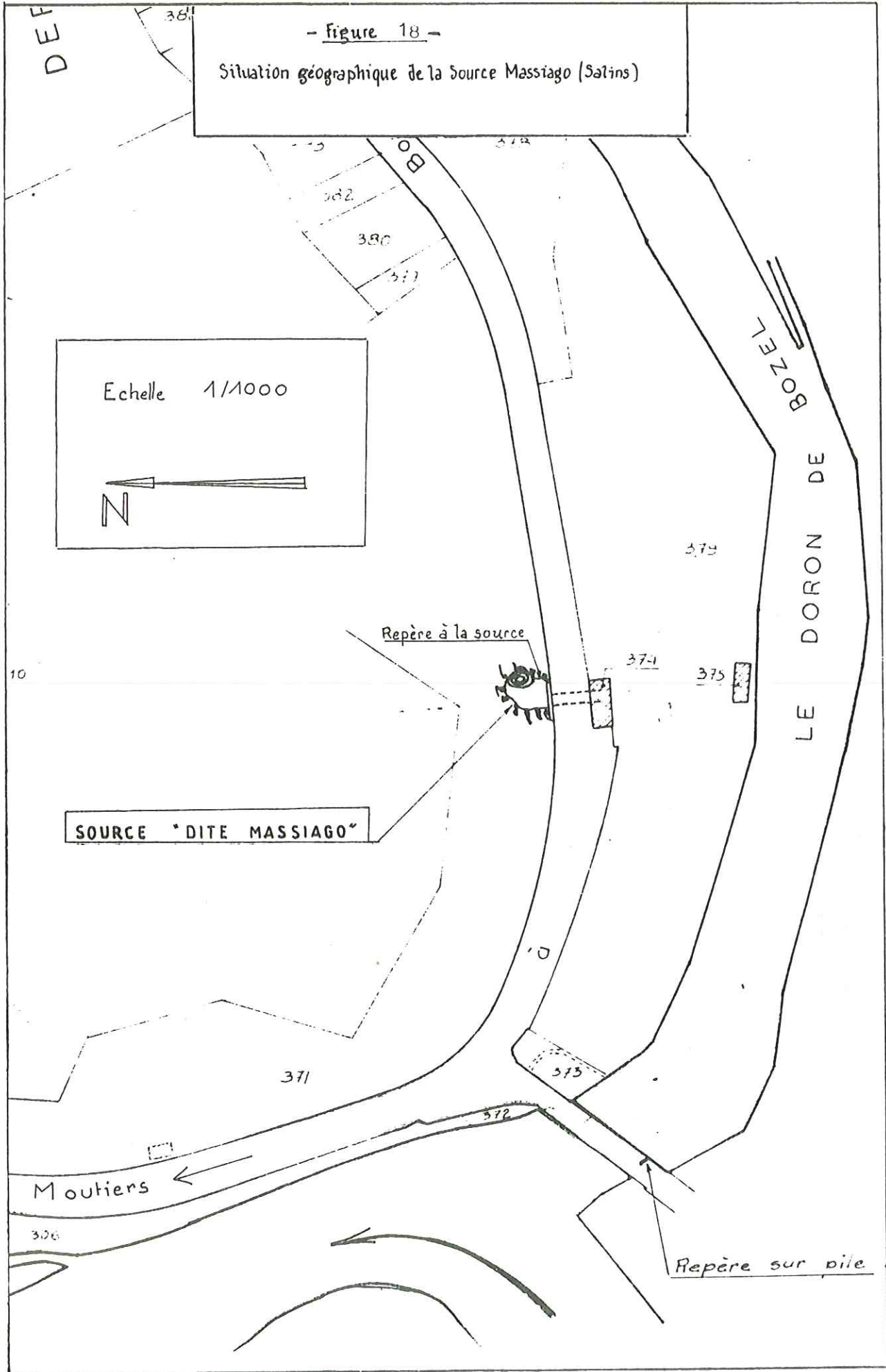
Trois sources chaudes minéralisées sont présentes à Salins. Deux d'entre elles sont situées à Salins même dans l'établissement thermal des Vieux Bains : ce sont la Grande Source Chaude et la Petite Source Chaude.

La troisième est une "source sauvage" qui se présente sous la forme d'un trop plein à la sortie amont de Salins, en rive droite du Doron de Bozel. Cette dernière source est appelée : source Massiogo.

#### \* Les sources chaudes minéralisées des Vieux Bains

- La Grande Source Chaude : elle est captée dans les calcaires dolomitiques du Trias et émerge à la cote 486,59m (cf. figure 17 ).





Une grande galerie d'environ 30 m de long permet l'accès à la salle de captage de cette source. L'émergence est surmontée d'une verrière comprenant une fenêtre qu'il faut soulever pour prélever directement l'eau au griffon.

L'eau thermale, dont le niveau se situe à environ 1m50 au dessous de cette fenêtre, arrive verticalement avec de gros bouillonnements dus à la présence abondante de gaz, qui provoquent des effets secondaires tels que irritation des yeux et asphyxie.

- La petite Source Chaude : son émergence se situe à une vingtaine de mètres au Nord de celle de la Grande Source Chaude (cf. figure 17). L'accès à l'émergence se fait par une petite galerie d'environ 6 m de long, au bout de laquelle se trouve un trappon étanche permettant d'atteindre la surface de l'eau. Les dégagements gazeux sont moins importants que ceux de la Grande Source Chaude, mais restent toutefois nettement visibles et ressentis. Au-dessus du captage, une chambre de protection étanche en béton a été réalisée afin de protéger cette source d'une éventuelle pollution.

Les deux sources chaudes minéralisées des Vieux Bains déposent à leur arrivée en surface des boues rouges très fines qui feront l'objet d'une étude particulière.

- La source Massiago : comme nous l'avons déjà dit, c'est une source "sauvage" située à la sortie sud de Salins-les-Thermes, en amont de la confluence du Doron de Bozel et du Doron de Belleville, en rive droite du Doron de Bozel (cf. figure 18).

Elle apparaît sous forme d'une petite mare : sorte de trop plein situé en contrebas de la route départementale D 515, dans le même abrupt rocheux que précédemment, constitué par les calcaires dolomitiques du Trias. Lorsque le niveau de l'eau atteint une certaine cote, un petit caniveau en béton permet à l'eau de s'écouler sous la D 515, en direction du Doron. Des dégagements gazeux sont visibles à la surface de l'eau, mais sont beaucoup moins importants qu'aux sources chaudes des Vieux Bains. L'eau dépose des boues rougeâtres, et à la surface, une croûte ferrugineuse de couleur verdâtre se forme.

### I-3.2. Les sources froides minéralisées

Elles sont au nombre de deux et se trouvent dans l'établissement thermal des Vieux Bains de Salins. Ce sont : la Source Froide et la Source Froide du caniveau.

- La source Froide : son émergence est la plus méridionale de toutes les sources minéralisées des Vieux Bains. Elle est située au fond d'une galerie d'environ 50 m de long dans les calcaires dolomitiques du Trias (cf. figure 17). Le niveau de l'eau est à +5,50m au dessus du niveau des sources chaudes minéralisées.
- La source Froide du Caniveau : ce n'est pas une "source" proprement dit car elle correspond à la canalisation des eaux qui arrivent dans la galerie d'accès à la source Froide précédemment citée.

### I-3.3. Les eaux froides de la nappe alluviale du Doron

Parallèlement à l'étude des eaux minéralisées, les eaux de la nappe alluviale du Doron ont été prélevées et analysées afin de préciser les relations chimiques qui existent entre le Doron et les sources minéralisées.

Les prélèvements ont été effectués dans les 4 piézomètres implantés entre le Doron et les sources des Vieux Bains (cf. figure 19).



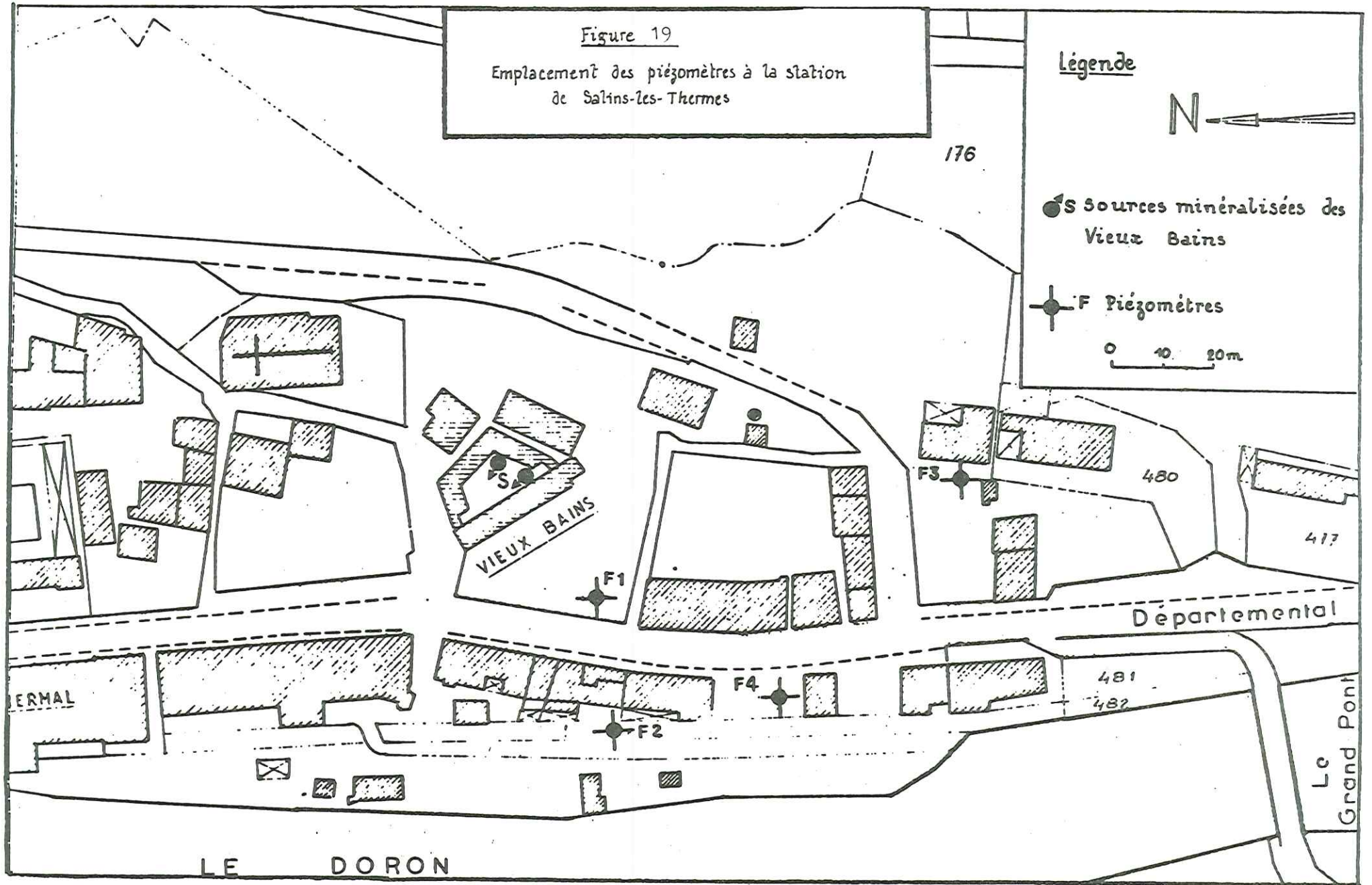




Figure 19  
Emplacement des piézomètres à la station  
de Salins-les-Thermes

**Légende**

N 

 S Sources minéralisées des  
Vieux Bains

 F Piézomètres



- F 1 : forage implanté dans l'angle ouest du petit jardin situé devant l'établissement thermal des Vieux Bains. Caractéristiques du forage : diamètre intérieur = 98,8 mm ; tubage plein jusqu'à 7,20 m de profondeur puis tubage crépiné de 7,20 m à 13,20 m de profondeur.
- F 2 : forage le plus proche du Doron. Diamètre intérieur = 98,8 mm. Tubage plein jusqu'à 6m de profondeur, puis tubage crépiné de 6 à 12,50m (fond du forage)
- F 3 : ce piézomètre est implanté dans l'angle sud du parking situé au niveau de l'intersection de la route départementale D 515 avec la route qui mène à Champoulet.  
Ce forage est le plus méridional de tous. Ses caractéristiques sont les suivantes : 98,8 mm de diamètre intérieur ; tubage plein jusqu'à 8,70 m de profondeur puis tubage crépiné de 8,70 à 14,70 m : fond du forage.
- F 4 : ce quatrième et dernier forage se trouve au Sud du forage F 2, dans le petit jardin situé en bordure ouest de la départementale D 515.  
Son diamètre intérieur est le même que celui des autres forages ; il est constitué d'un tubage plein jusqu'à 5,50m de profondeur, puis d'un tubage crépiné jusqu'à 11,50m : fond du forage.

Nous avons donc prélevé l'eau de la nappe alluviale du Doron dans chaque piézomètre à l'aide d'une petite pompe à main car le niveau statique de la nappe se situe selon les piézomètres entre 4 et 8 m de profondeur.

Nous avons d'autre part prélevé et analysé l'eau du Doron. Nous verrons dans un chapitre suivant quelles conclusions nous avons pu tirer de cette étude.

#### I-3.4. Utilisation thérapeutique des eaux à Salins-les-Thermes

Actuellement, trois sources minéralisées sont utilisées : les deux sources chaudes des Vieux Bains et la source Froide minéralisée.

. Une partie des eaux chaudes est utilisée pour le remplissage de la piscine ; l'autre partie à l'établissement thermal sous forme de bains divers.

. Les eaux de la source Froide sont réservées aux besoins de l'établissement thermal, mis à part la boisson.

. Les boues des eaux chaudes sont recueillies par décantation dans des piscines et utilisées à l'établissement thermal.

#### I-4. La station thermale de Brides-les-Bains

Comme pour Salins-les-Thermes, nous avons étudié plusieurs types d'eaux : les sources chaudes minéralisées, les sources froides environnantes et les eaux du Doron à Brides.

##### I-4.1. Les sources chaudes minéralisées (cf. figure 20 )

D'après L. Moret "...on connaissait autrefois les sources de Brides-les-Bains sous les noms d'Eaux-de-la-Perrière et d'Eaux-les-Bains. C'est à la suite de la débâcle d'un lac formé dans le bassin de Champagny au printemps de 1809, que les alluvions qui encombraient le lit du Doron furent entraînées et laissèrent apparaître les émergences thermales. A ce moment, on put observer que l'eau chaude giclait à travers les feuilletés des schistes magnésiens associés aux gypses du Trias qui affleurent surtout sur la rive gauche du Doron". (L. Moret : Sources thermales alpines et grands travaux de barrages 15 mai 1950 p90).

- La source Hybord : c'est l'émergence la plus importante et la seule utilisée.



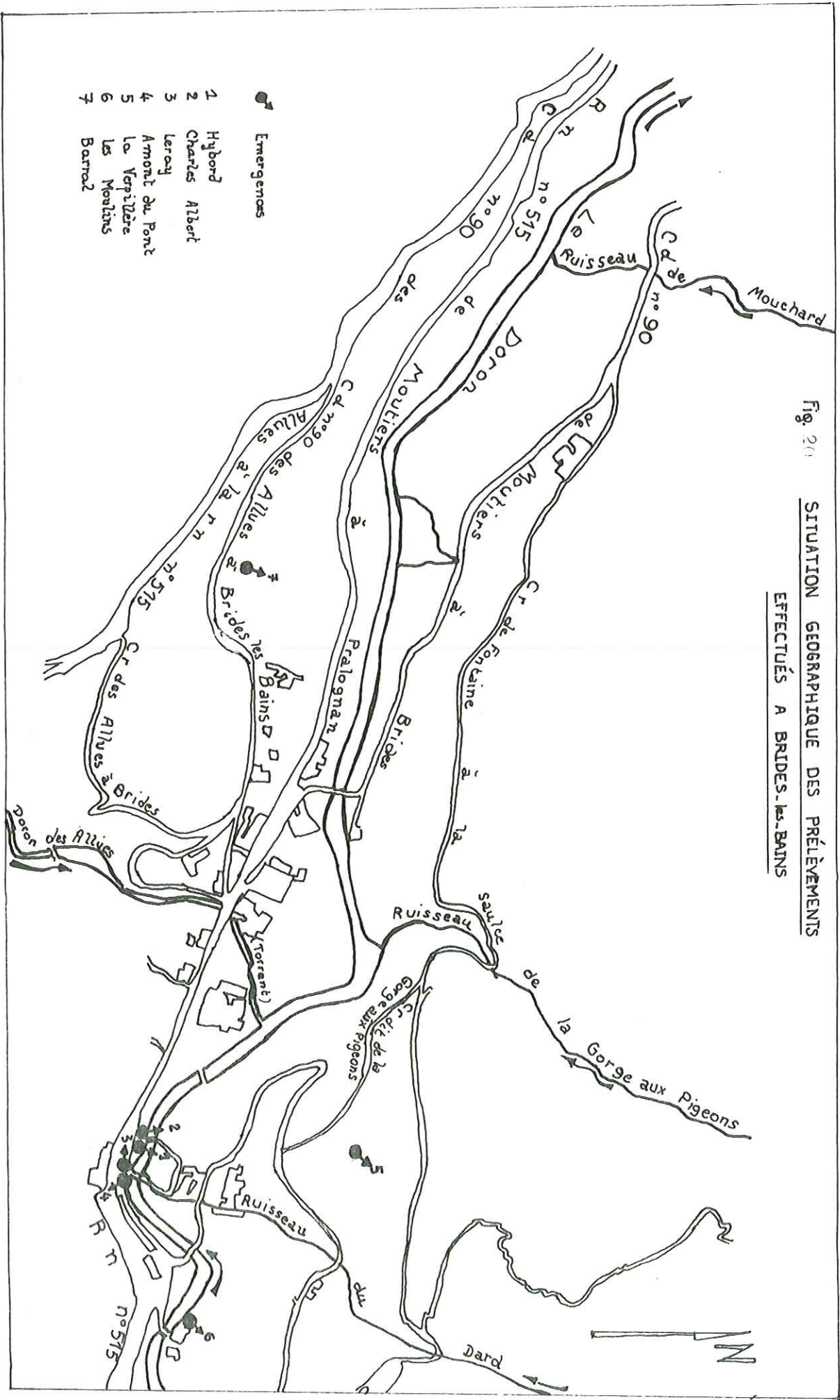


Fig. 20

SITUATION GEOGRAPHIQUE DES PRÉLÈVEMENTS  
EFFECTUÉS A BRIDES-LES-BAINS

Les travaux de protection de cette source ne permettent plus l'observation des émergences naturelles des sources chaudes.

Dans son rapport du 19 juillet 1966 R. Michel écrit : "le griffon principal sourd de fissures (plans de schistosité) affectant une direction N 60° Est dans les schistes quartziteux du Trias. Le captage est solidement assis sur la roche en place".

Le captage de la source Hybord est situé en rive gauche du Doron de Bozel et le niveau de l'eau est à la cote 580,65 m, la température moyenne de l'eau est de 37°C, son débit moyen est de 3 l/s .

- La source Charles Albert : nous avons prélevé cette source au niveau du regard situé juste devant la buvette de l'établissement thermal. Le niveau de l'eau est aussi à la cote 580,65 m.

La température moyenne de l'eau est de 35°, son débit moyen est de l'ordre de 1,5 l/s .

Les deux sources chaudes précédentes déposent quelques boues rouges mais en quantités moins importantes qu'à Salins.

De même, des dégagements gazeux existent, mais sont beaucoup plus faibles que ceux des sources chaudes des Vieux Bains de Salins.

- La source Amont du Pont : émerge en rive gauche du Doron de Bozel par une buse située à la cote 582,12 m à l'amont du Pont Rouge (cf figure 20 ). Sa température moyenne est de 20°C et son débit de 5 l/s .  
Nous avons classé cette source avec les sources thermo-minérales car nous verrons qu'elle présente des caractéristiques physicochimiques particulières.

#### I-4.2. Les eaux froides environnantes

Mise à part l'eau du Doron, plusieurs sources froides environnantes situées sur les deux rives du Doron, ont été analysées chaque mois.

##### + Les eaux froides prélevées en rive droite du Doron :

\* la source dite de "La Verpillère" : elle émerge dans des dépôts glaciaires plus ou moins remaniés par des éboulis à une altitude de 650 m environ, sous le lieudit La Thieza.

\* la source des "Moulins" : prélevée au lieudit Les Moulins, en bordure du Doron vers 600 m d'altitude. Elle est située dans des dépôts glaciaires comme la source de La Verpillère ; mais ici, ces derniers sont en quantités beaucoup plus importantes qu'à la source de La Verpillère.

##### + Les eaux froides prélevées en rive gauche du Doron :

\* la source Leray : son griffon se trouve près du Pont Rouge à la cote 586,83 m entre la source Hybord à l'aval et la source Amont du Pont à l'amont. La source Leray est captée dans le talus de la RN515 formé par des alluvions glaciaires.

\* la source Barral : elle est située à 610 m d'altitude environ, derrière le bâtiment sanitaire du camping municipal de Brides-les-Bains. Elle sort au pied d'un immense paquet glissé de gypses.

#### I-4.3. Utilisation thérapeutique des eaux de Brides-les-Bains

Actuellement, deux sources sont utilisées à des fins thérapeutiques : la source Hybord et la source froide Leray.



### I-5. La station thermale de l'Echaillon

Elle se situe en Maurienne, sur la rive droite de l'Arc (cf. figure 2) Les sources de l'Echaillon sont captées au contact du massif du Chatelard et des terrains sédimentaires de la Zone Dauphinoise. L'eau de l'Echaillon émerge à  $\approx 40^{\circ}\text{C}$  ; elle présente des dégagements gazeux, et dépose des sédiments très chargés en sels de fer.

Nous avons étudié cette source du point de vue physico-chimique afin de la comparer aux autres sources thermominérales étudiées.

## DEUXIEME PARTIE - ETUDE DES PARAMETRES PHYSIQUES DES EAUX

### II-1. La température

Elle peut être acquise de différentes façons par les eaux thermominérales.

#### II-1.1. Le gradient géothermique local

L'accroissement de la température en profondeur est en moyenne de un degré par 35 mètres, mais il varie selon les régions.

Ce gradient augmente considérablement dans les zones volcaniques où il peut atteindre une valeur de  $1^{\circ}\text{C}$  pour 15 mètres, et même moins.

Dans notre secteur d'étude, sous le Mont Bellacha situé dans le massif cristallin externe de Belledonne à l'Ouest de la station thermale de La Léchère, le gradient géothermique calculé à partir des observations faites dans la galerie Isère-Arc est de  $1^{\circ}\text{C}$  pour 55 mètres, ce qui est assez faible.

Le gradient géothermique peut être à l'origine des températures observées dans les eaux thermominérales si l'on considère que ces eaux s'infiltrèrent très lentement à de grandes profondeurs puis remontent à la surface par une voie d'ascension rapide, ce qui leur permet de conserver la température qu'elles ont acquise en profondeur.

Nous verrons plus loin, que le gradient géothermique local ne suffit pas pour expliquer à lui seul les températures maximales atteintes en profondeur que l'on a estimées à partir des géothermomètres.

#### II-1.2. Le volcanisme

Les activités volcaniques récentes sont à l'origine d'un gradient géothermique élevé et de l'expulsion de produits volatils à haute pression et haute température qui peuvent se mêler à l'eau et, de ce fait, jouer un rôle important dans le réchauffement de l'eau. Ce n'est pas le cas ici.

#### II-1.3. Les mouvements orogéniques

Dans les régions très affectées par la tectonique comme celle où sont implantées les sources thermominérales étudiées, le rejeu d'accidents anciens peut créer un dégagement de chaleur à l'origine d'anomalies géothermiques locales. Ces dernières se traduisent par un gradient local anormalement élevé lié soit au rejeu de chevauchements soit à celui de grands accidents de socle.

#### II-1.4. Les réactions chimiques

Les réactions exothermiques résultant de l'oxydation des pyrites ou de l'hydratation de l'anhydrite peuvent provoquer une élévation non négligeable de la température.

#### II-1.5. La présence d'éléments radioactifs

La température des eaux thermominérales peut être encore augmentée par la désintégration d'éléments radioactifs. Cette désintégration provoque un dégagement de chaleur non négligeable lorsque les éléments radioactifs se trouvent en quantité suffisante.

#### II-1.6. Abaissements de la température

Après avoir atteint une température maximale souvent très élevée en grande profondeur, les eaux thermominérales subissent, au cours de leur remontée vers la surface, des baisses de températures parfois importantes et dont les causes sont diverses.

a) L'abaissement de la température provient en partie du contact plus ou moins long de l'eau thermale avec les parois froides encaissantes. Ce contact dépend de la longueur et de l'ouverture des voies d'accès vers la surface, ainsi que du débit et de la vitesse d'ascension des eaux chaudes.

b) Pendant leur trajet ascendant, les eaux chaudes peuvent se mélanger à des eaux froides superficielles ou semi-superficielles. Ce phénomène de mélange se traduit à l'émergence par une baisse plus ou moins grande selon le pourcentage de mélange, de tous les paramètres physico-chimiques des eaux, et par une augmentation des rapports isotopiques indices d'une contamination par des eaux récentes et superficielles. Nous verrons plus loin que dans certains cas favorables il est possible de calculer le pourcentage de mélange des eaux chaudes profondes avec les eaux froides superficielles ou semi-superficielles.

L'étude dans le temps des variations de la minéralisation et de la température permet même de dire si ce mélange se fait avec des eaux très superficielles ou des eaux semi-superficielles.

En effet, plus l'amplitude des variations des paramètres physico-chimiques est grande, plus le pourcentage d'eaux très superficielles intervenant dans le mélange est important.

c) Au niveau de l'émergence, à l'arrivée de l'eau chaude à la surface, la détente adiabatique du  $\text{CO}_2$  qui peut être contenu dans l'eau thermale provoque un abaissement de la température. Ce phénomène bien connu dans les eaux thermominérales carbogazeuses peut être quantifié lorsqu'on connaît la teneur en  $\text{CO}_2$  des eaux.

En effet, la déperdition calorifique due à la présence de  $\text{CO}_2$  peut être mise en évidence par un diagramme sur lequel on reporte en abscisses les teneurs en  $\text{CO}_2$  des eaux et en ordonnées les différences observées entre les températures calculées par le géothermomètre silice et les températures des eaux aux émergences.

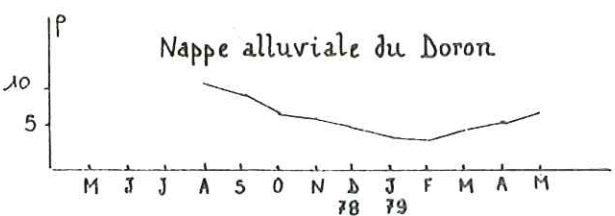
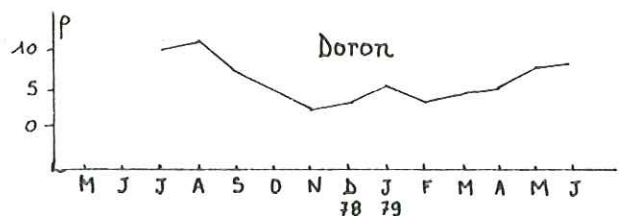
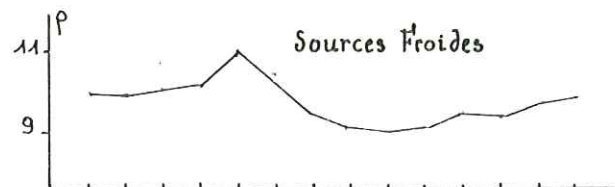
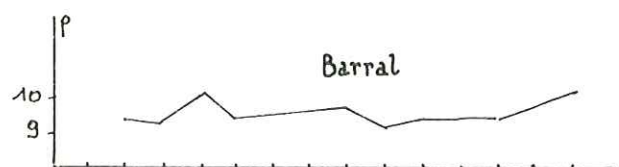
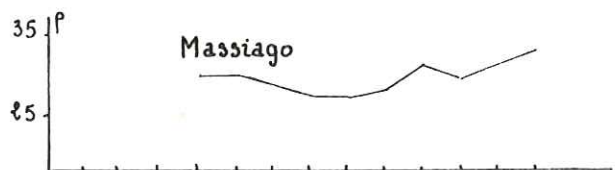
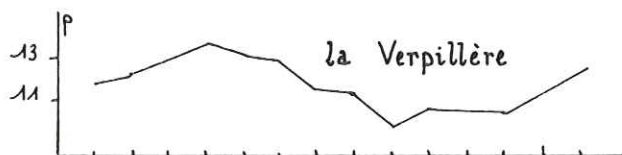
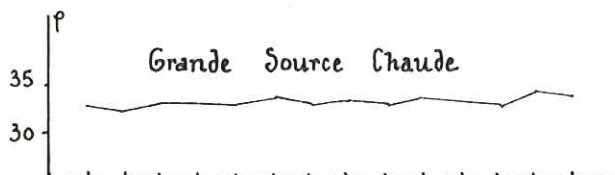
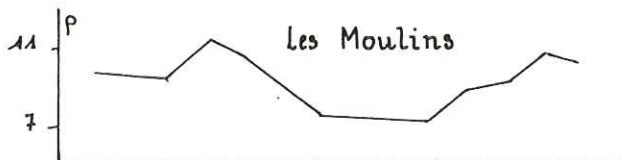
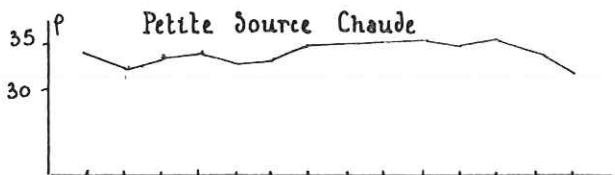
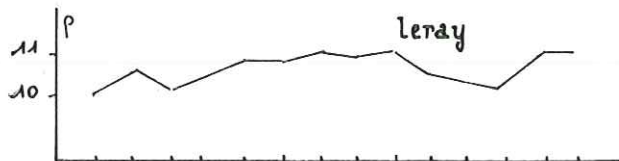
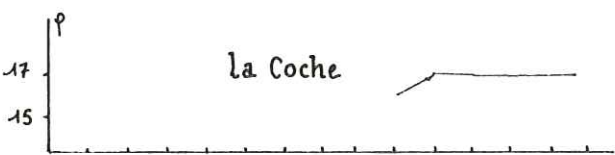
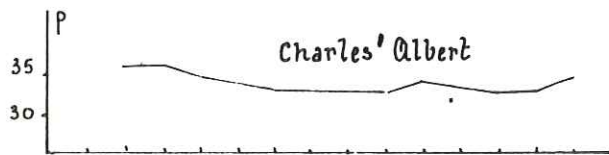
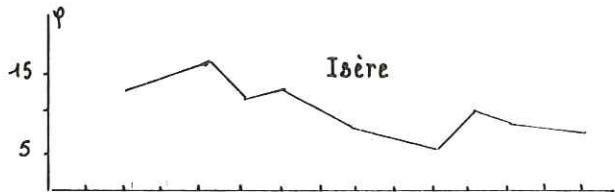
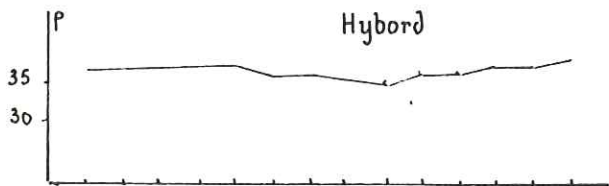
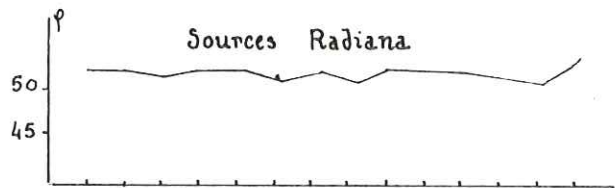
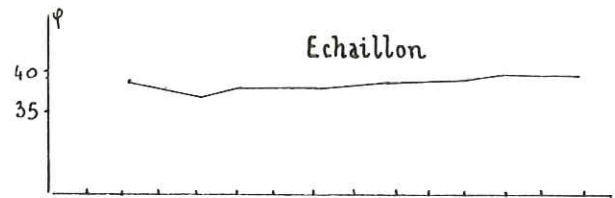
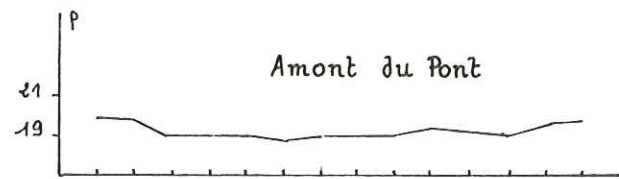
En Iran, par exemple, un tel diagramme montre que l'abaissement de température des eaux thermominérales est en moyenne de  $11^\circ\text{C}$  pour 100 mg/l de  $\text{CO}_2$  contenu dans l'eau à l'émergence.

#### II-1.7. Températures des eaux étudiées

La température des eaux thermominérales étudiées s'est révélée très constante dans le temps, et indépendante des variations saisonnières de la température atmosphérique.



Diagrammes température-temps  
des eaux étudiées



Les températures moyennes des eaux thermominérales étudiées sont les suivantes :

Station	Source	Température moyenne
Brides-les-Bains	Hybord	36,5 °C
	Charles Albert	34 °C
	Amont du Pont	19,5 °C
Salins-les-Thermes	Grande Source Chaude	33 °C
	Petite Source Chaude	34,5 °C
	Source Massiago	30 °C
La Coche	La Coche	17 °C
La Léchère	Radiana 1	53 °C
	Radiana 3	50 °C
	Radiana 4	49,5 °C
Echaillon (Maurienne)	Echaillon	40 °C

Les variations des températures des eaux minéralisées étudiées sont visualisées sur la figure 21.

Les eaux froides minéralisées des Vieux Bains de Salins-les-Thermes ont révélé des variations de température assez importantes témoignant d'un mélange avec des eaux froides superficielles (cf. figure 21).

La Source Massiago de la station thermale de Salins-les-Thermes montre aussi des variations importantes de température. Cependant, ces dernières ne sont pas dues à des mélanges avec des eaux froides superficielles, mais aux variations de la température atmosphérique. En effet, cette source non captée se présente encore à l'état "sauvage" sous forme d'une petite mare et, de ce fait, sa température est directement influencée par la température atmosphérique.

La température des sources froides environnantes de Brides-les-Bains et de la nappe alluviale du Doron (eaux prélevées dans les piézomètres F1, F2, F3, F4 de Salins-les-Thermes) montre des variations identiques à celles du Doron (cf. figure 21) et aux variations de la température atmosphérique.

La baisse de la température du Doron d'une part et de l'Isère d'autre part s'observe pendant les mois d'hiver (novembre-décembre) et au printemps pendant la fonte des neiges. La baisse de température du printemps est accompagnée d'une augmentation du débit.

## II-2. Les débits

### II-2.1. Les débits des sources minéralisées

Nous avons rassemblé sur la figure 22 les variations de débit des sources des stations thermales de Brides-les-Bains et Salins-les-Thermes observées sur plusieurs années.

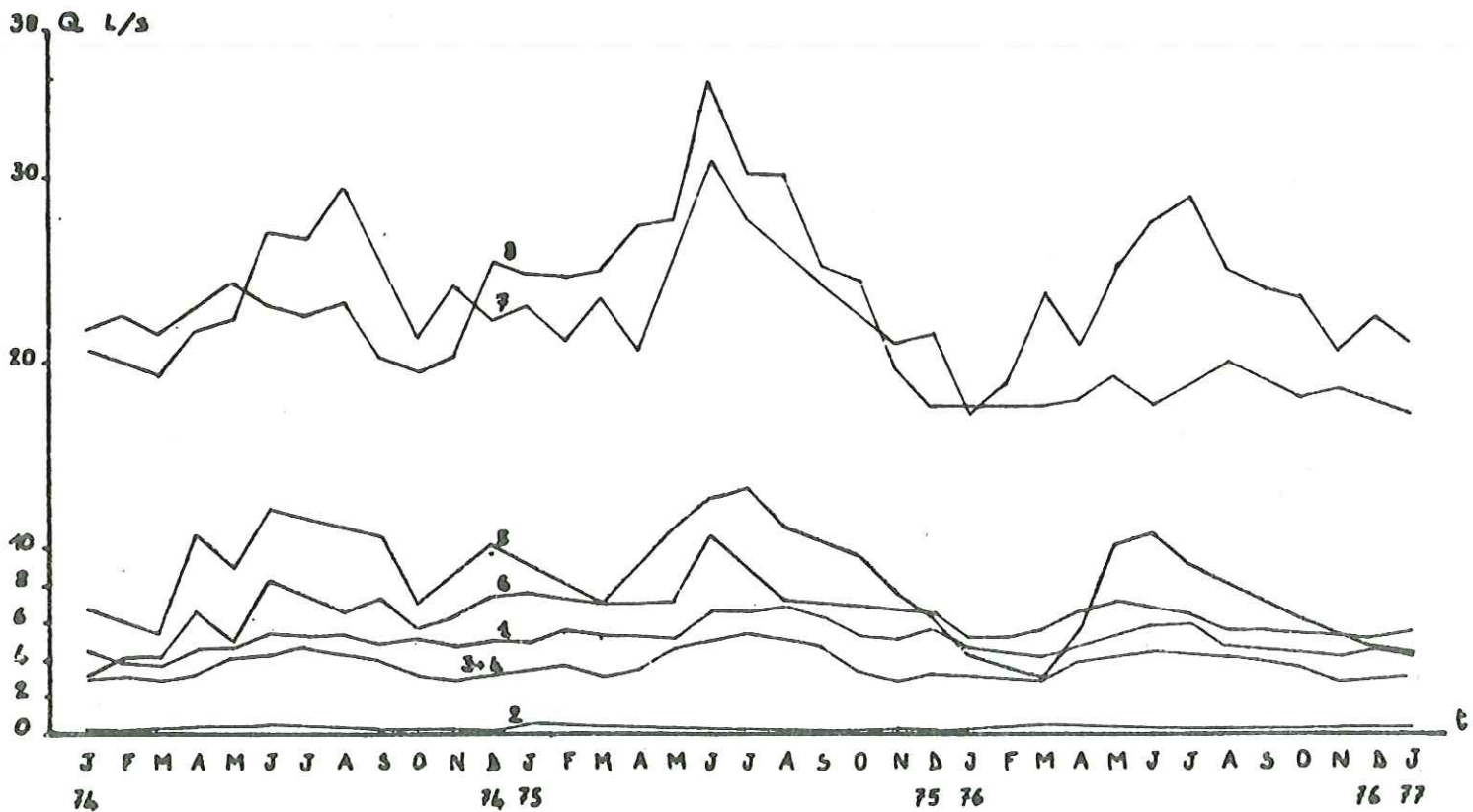
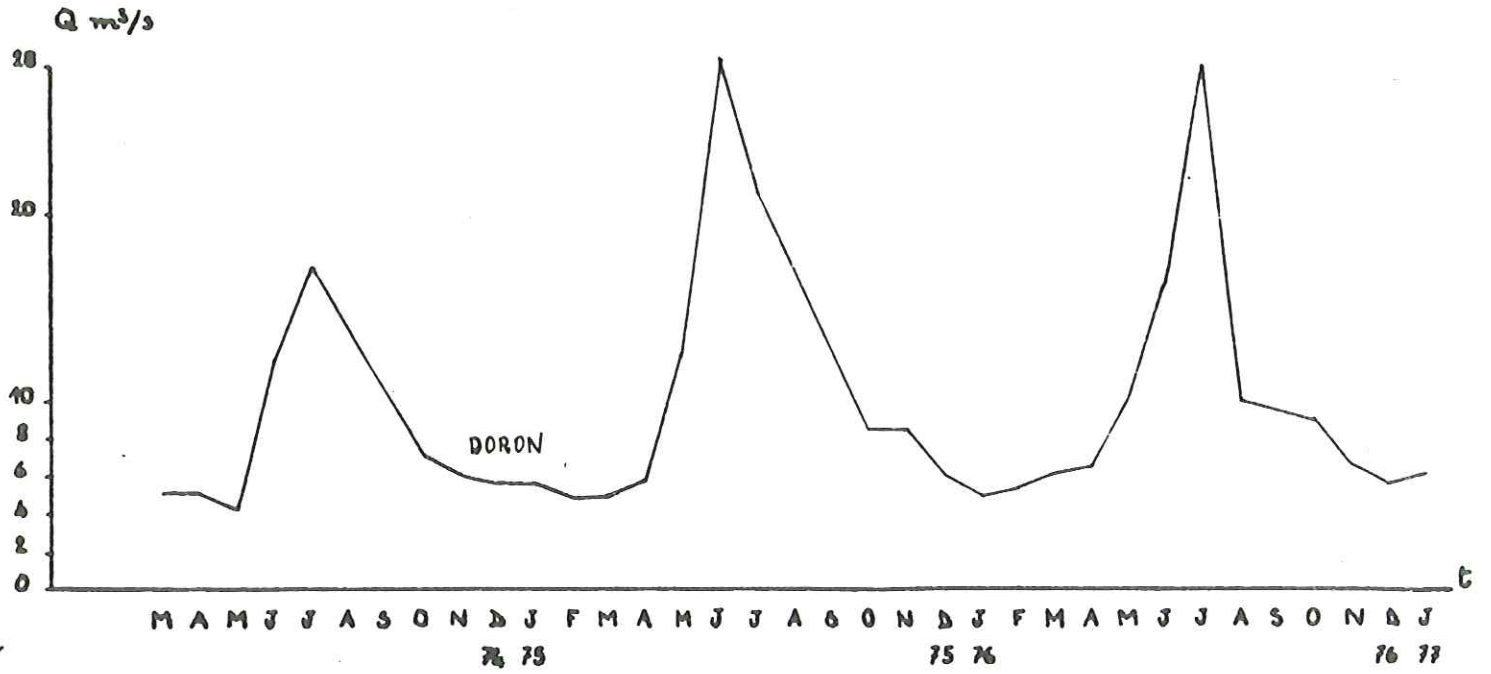
Les sources thermales de Brides-les-Bains : Hybord, Charles Albert, Amont du Pont, ont des débits dont les moyennes sont respectivement de 31/s, 1,51/s et 5 à 61/s.

La Grande Source Chaude et la Petite Source Chaude de Salins-les-Thermes ont des débits très différents : de 20 à 361/s pour la Grande Source Chaude, et de 4 à 101/s pour la Petite Source Chaude.



— Figure 22 —

VARIATION DES DEBITS EN FONCTION DU TEMPS



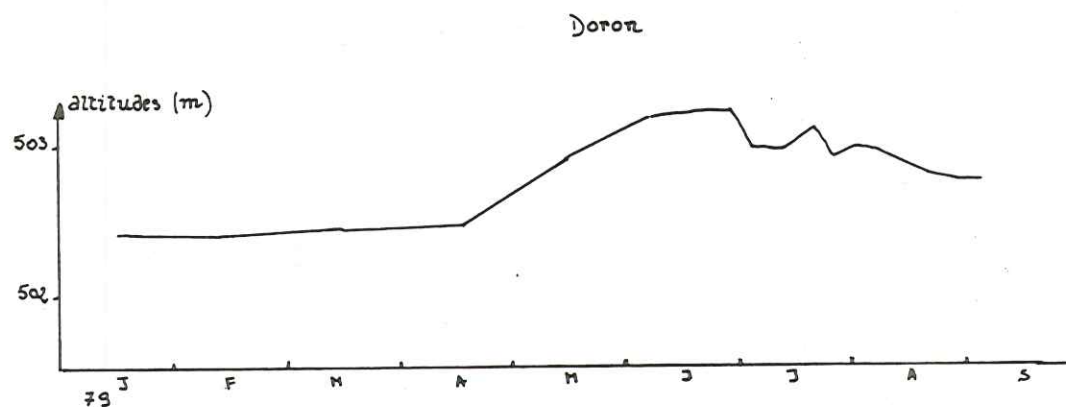
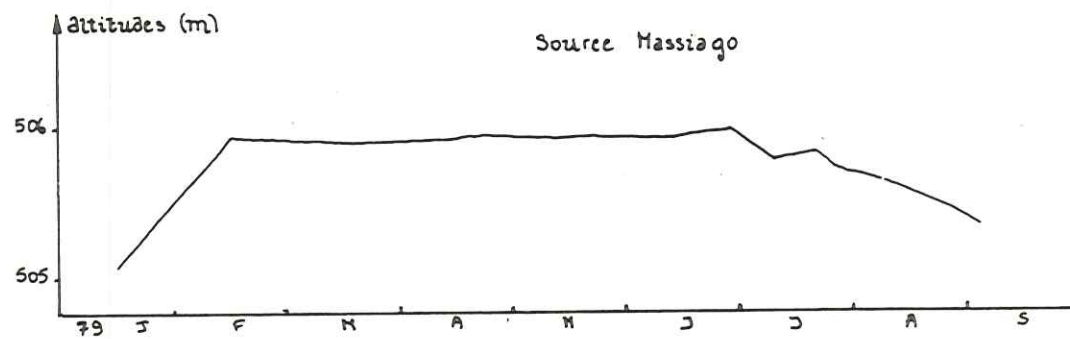
- BRIDES
- 1 Amont du Pont
  - 2 Leray
  - 3 Charles Albert
  - 4 Hybord

- SALINS
- 5 Source froide
  - 6 Petite Source Chaude
  - 7 Source Caniveau
  - 8 Grande Source Chaude

— DORON

FIGURES 23-24 VARIATIONS DU NIVEAU DE LA SOURCE MASSIAGO ET DU DORON

	Source Massiago	Doron
Janvier	505,04 m	502,44 m
Février	505,93 m	502,44 m
Mars	505,89 m	502,46 m
Avril	505,91 m	502,46 m
Mai	505,91 m	502,92 m
7/6	505,91 m	503,19 m
12/6	505,92 m	503,2 m
28/6	505,96 m	503,2 m
3/7	505,87 m	502,96 m
11/7	505,78 m	502,94 m
20/7	505,8 m	503,08 m
25/7	505,69 m	502,96 m
1/8	505,67 m	502,97 m
8/8	505,62 m	502,93 m
21/8	505,48 m	502,79 m
28/8	505,42 m	502,76 m
3/9	505,35 m	502,76 m
4/9	505,4 m	502,72 m





Les sources froides minéralisées se distinguent aussi par leur débit : la Source Froide du Caniveau a un débit beaucoup plus important que la Source Froide : de 18 à 30 l/sec pour la source du Caniveau et de 3 à 13 l/sec pour la Source Froide.

La Source Massiagio se présente, comme nous l'avons déjà dit sous forme d'une petite mare, et de ce fait, nous avons suivi régulièrement la cote du niveau de l'eau de cette source en la mesurant par rapport à un repère fixe connu. La figure 23 montre les variations de ce niveau parallèlement à celui du Doron

Les mesures ont été effectuées mois par mois jusqu'en Mai puis chaque semaine à partir du mois de Juin par M. R. Chedal.

Un repère fixe était situé à 506,16 m d'altitude à l'émergence même de la Source Massiagio.

Le deuxième repère fixe était situé en bordure du Doron sur une pile du pont de la Rajat juste à l'aval de la Source Massiagio à 503,36 m d'altitude.

La figure 24 montre que l'augmentation du niveau du Doron du mois d'avril à la fin juin n'a pas eu d'influence sur le niveau de la Source Massiagio qui, lui, n'a pas varié.

De même, l'augmentation du niveau de la Source Massiagio du mois de janvier au mois de février, ne suit pas une augmentation du niveau du Doron puisque ce dernier est resté stable de janvier à avril.

Le graphique de la figure 22 ne fait pas mention des sources de la station thermale de La Léchère car dans cette dernière, l'eau thermale est sollicitée par pompage.

L'eau de La Coche ne figure pas non plus sur ce graphique. Cette eau apparaît de manière diffuse en différents points dans l'usine souterraine de Ste Hélène et de ce fait, il est impossible d'en connaître le débit.

Notons toutefois que l'eau de La Coche ne remonte pas jusqu'en surface. La zone d'émergences diffuses est limitée à l'usine de Ste Hélène implantée dans le massif liasique de la rive gauche du barrage des Gorges d'Hannibal.

L'usine de Ste Hélène étant souterraine par rapport à la cote supérieure de la retenue, l'eau thermominérale de La Coche apparaît donc à une cote de m sous le niveau de la retenue du barrage.

Il faut signaler qu'avant le remplissage de la retenue, il existait en rive droite de l'Isère près de la gare d'Aigueblanche une source tiède qui déposait des boues rouges. Cette source a disparu depuis 1954, date de la mise en eau du barrage des Gorges d'Hannibal.

## II-2.2. Débits du Doron et des Sources Froides

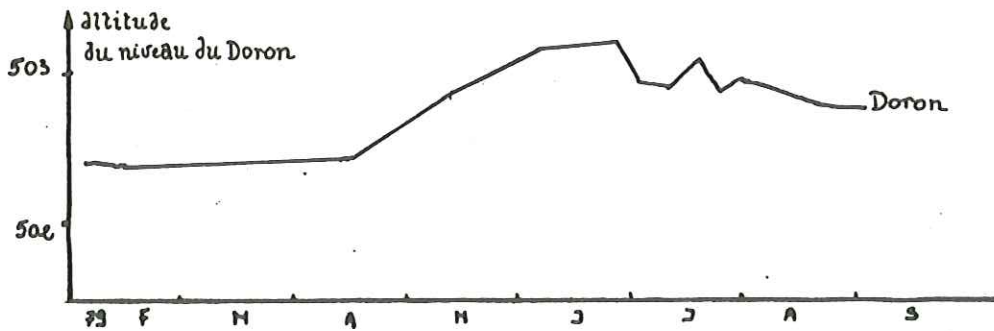
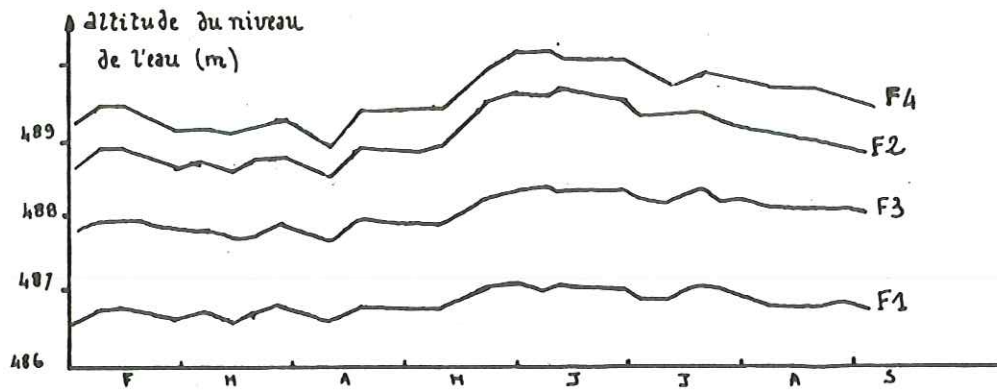
- Le débit du Doron varie de 30 m<sup>3</sup>/s au printemps pendant la fonte des neiges à 4 m<sup>3</sup>/s en hiver. Ces variations sont notées sur la figure .

- Les sources froides de Brides-les-Bains :

\* La source Leray a un débit inférieur à 1 l/s et remarquablement constant (cf. figure 22 ).

Le coefficient de variabilité très faible du débit de cette source indique l'existence de réserves ne subissant que de façon extrêmement atténuée les variations de la pluviosité.

FIGURE 25  
 VARIATION DU NIVEAU DE LA NAPPE ALLUVIALE ET DU DORON  
 A  
 SALINS-les-THERMES





La source Leray émerge, comme nous l'avons déjà dit en amont des sources chaudes de Brides, au pied des formations morainiques du versant des Chavonnes. La régularité du débit, ainsi que la composition chimique de la source Leray que nous étudierons plus loin confirment l'hypothèse que R. Michel avait énoncé sur l'origine de cette source : "... on doit penser qu'il s'agit d'une source d'affleurement de la nappe aquifère plus ou moins diffuse et discontinue qui est contenue dans la formation morainique des pentes de Chavonnes." (Rapport hydrogéologique sur les sources froides des environs de Brides-les-Bains - Savoie 19.11.1959).

- \* Les autres sources froides environnantes . Nous n'avons pas mesuré les débits des sources de La Verpillère, Les Moulins et Barral. Cependant, nous avons noté que ces sources présentent des variations de débits en concordance avec les variations saisonnières de la pluviosité et de la niviosité. Aussi les maximums des débits de ces sources s'observent d'une part pendant la fonte des neiges vers les mois de mars-avril et d'autre part pendant la saison pluvieuse de l'automne (septembre-octobre). Pendant la période de sécheresse de l'été et la période de stockage de l'eau sous forme de neige et de glace de l'hiver, les débits de ces sources sont à leur minimums .
- \* La nappe alluviale du Doron : le niveau de la nappe alluviale du Doron a été régulièrement suivi par des mesures hebdomadaires effectuées par M. R. Chedal dans les 4 piézomètres implantés à Salins-les-Thermes. Les variations du niveau de la nappe sont notées sur la figure 25 . Cette figure montre que les variations du niveau de la nappe alluviale du Doron sont identiques dans tous les piézomètres. Ces mesures piézométriques montrent d'autre part qu'à Salins-les-Thermes, le Doron alimente sa nappe alluviale. Les variations du niveau de la nappe suivent celles du niveau du Doron indiquées sur la figure 24 . La figure 25 semble indiquer que les variations de la nappe sont plus importantes près du Doron, dans les piézomètres F 4 et F 2 que dans les piézomètres F 1 et F 3 .

### II-3. Les résistivités

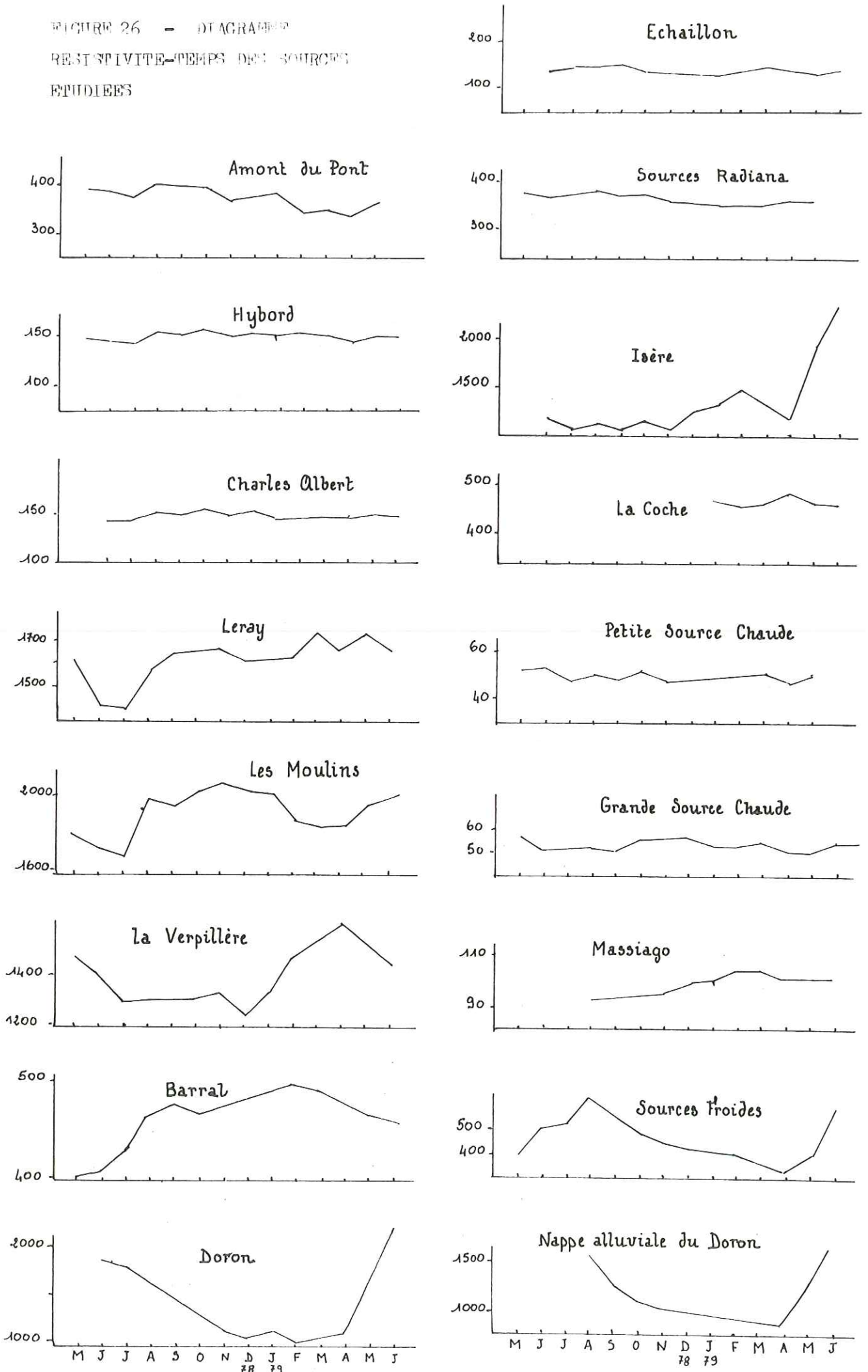
#### II-3.1. Résistivités des sources minéralisées

Les résistivités des sources minéralisées étant extrêmement faibles (en général inférieures à 100  $\Omega$ .cm) nous n'avons pas pu les mesurer sur place avec précision. De ce fait, nous avons régulièrement effectué les mesures de résistivité au laboratoire de l'Institut Dolomieu, le jour même des prélèvements.

Les résistivités de toutes les sources thermominérales sont faibles et constantes dans le temps comme le montre la figure 26 .

- \* A Brides-les-Bains : les sources Hybord et Charles Albert ont des résistivités identiques voisines de 150  $\Omega$ .cm.  
La Source Amont du Pont de minéralisation totale plus basse, présente une résistivité plus élevée mais encore faible, de l'ordre de 380  $\Omega$ .cm.
- \* A Salins-les-Thermes : la Grande Source Chaude et la Petite Source Chaude montrent les résistivités les plus faibles de l'ordre de 50  $\Omega$ .cm.  
La Source Massiagio a une résistivité légèrement supérieure, aux environs de 95  $\Omega$ .cm.  
La résistivité des sources froides minéralisées des Vieux Bains atteint 560  $\Omega$ .cm.
- \* A La Léchère , les sources Radiana ont une résistivité voisine de 350  $\Omega$ .cm.

FIGURE 26 - DIAGRAMMES  
RESISTIVITE-TEMPS DES SOURCES  
ETUDIEES





- \* A l'usine souterraine de Ste Hélène, l'eau de la Coche présente une résistivité proche de 460  $\Omega$ .cm.
- \* En Maurienne, la source de l'Echaillon montre une résistivité d'environ 133  $\Omega$ .cm.

### II-3.2. Résistivités des eaux froides superficielles

#### a) les sources froides aux environs de Brides-les-Bains

Les sources Leray, les Moulins et La Verpillère ont des résistivités relativement élevées, dont les moyennes sont respectivement de 1610  $\Omega$ .cm, 1950 et 1400  $\Omega$ .cm.

La source de la Verpillère présente une résistivité légèrement moins élevée que les deux autres du fait de la participation plus grande des formations de versant remaniées à la minéralisation de cette source.

La source Barral présente une résistivité faible dont la moyenne se situe aux environs de 465  $\Omega$ .cm. Cette valeur très basse vient de la situation géologique de l'émergence de la source Barral : l'énorme paquet glissé de gypses qui la surplombe est à l'origine de la forte minéralisation de cette source.

Les variations des résistivités de ces eaux sont notées sur la figure 26 .

- b) Les eaux du Doron ont une résistivité moyenne de 1400  $\Omega$ .cm. Cette dernière varie beaucoup dans le temps : son coefficient de variation est de 30% de part et d'autre de la teneur moyenne (cf, figure 26).
- c) Les eaux de la nappe alluviale du Doron montrent une résistivité moyenne moins élevée que celle du Doron. Cette valeur plus basse de l'ordre de 1170  $\Omega$ .cm est due à l'écoulement et au renouvellement beaucoup plus lents des eaux de la nappe. Le passage des eaux à travers des formations perméables est à l'origine d'une augmentation de la minéralisation des eaux de la nappe et, par conséquent, d'une diminution de la résistivité.
- d) Les eaux de l'Isère : ont une résistivité moyenne assez voisine de celle du Doron, de l'ordre de 1320  $\Omega$ .cm. Le coefficient de variabilité de cette résistivité est supérieur à 50%. Ces fluctuations traduisent l'importance des apports saisonniers dans l'alimentation de l'Isère.

### II-4. Relations résistivités-débits

La résistivité des eaux superficielles du Doron et de l'Isère varie en fonction de leur débit.

Au printemps, l'apport d'eau de fonte des neiges se traduit par une augmentation du débit et de la résistivité.

Les épisodes pluvieux se marquent aussi par une augmentation simultanée du débit et de la résistivité.

Par contre, les périodes de sécheresse de l'été et de stockage de l'eau sous forme de neige et de glace pendant l'hiver, sont mises en évidence par une diminution considérable des débits accompagnée d'une baisse de la résistivité.

La résistivité des eaux thermominérales ne varie que très faiblement dans le temps contrairement à leurs débits et de façon tout à fait aléatoire .

Cette constance de la résistivité nous permet déjà de penser que l'influence des eaux de surface sur les eaux thermominérales étudiées est minime.

Nous verrons plus loin que les analyses chimiques et isotopiques confirment cette hypothèse.

La résistivité des eaux froides minéralisées des Vieux Bains de Salin-les-Thermes montre des variations plus importantes que celle des eaux chaudes. Les variations suivent les variations du débit de ces sources.

### II-5. Mesure du pH

La mesure du pH permet de noter l'état acide ou basique d'une eau. Cette mesure doit être effectuée à l'émergence même, surtout dans le cas de sources thermominérales riches en gaz.

N'ayant pas d'appareillage pour mesurer avec une grande précision le pH sur le terrain, nous avons effectué ces mesures au laboratoire de l'Institut Dolomieu, le jour même des prélèvements.

Le tableau 27 donne les valeurs moyennes du pH des eaux étudiées.

Nous voyons que les sources minéralisées présentent des valeurs de pH, soit très proches de la neutralité, soit légèrement acides.

Par contre, les eaux superficielles se situent dans le domaine des eaux basiques, avec des valeurs de pH proches de 8.

#### Valeurs moyennes du pH des eaux étudiées

Brides les Bains	{	Amont du Pont	7,3
		Hybord	6,9
		Charles Albert	6,9
		Leray	7,6
		La Verpillère	7,5
		Les Moulins	7,6
		Barral	7,7
Salins les Thermes	{	Doron	8,1
		nappe alluviale du Doron à Salins	7,6
		Grande Source Chaude	6,4
		Petite Source Chaude	6,4
		Source Froide	7,3
		Source Froide du Caniveau	7,3
		Source Massiago	6,5
La Léchère	{	Radiana 1,3,4	7,2
		Isère	7,8
La Coche		La Coche	7
Maurienne		L'Echaillon	7,1

Tableau - 27



### TROISIEME PARTIE - HYDROCHIMIE DESCRIPTIVE DES SOURCES

De mai 1978 à juin 1979, toutes les eaux étudiées ont fait l'objet d'analyses régulières dans le but de comparer les comportements chimiques des différentes sources entre elles.

Dans un premier temps nous donnerons un aperçu du faciès chimique des eaux en regroupant ces dernières sur des diagrammes triangulaires de Piper (1944). Ensuite, nous ferons une étude détaillée de chaque type d'eau.

#### III-1. Présentation du faciès chimique des eaux

##### III-1.1. Station de Brides-les-Bains

###### a) les eaux chaudes

Les eaux thermales représentées par les sources Hybord, Charles Albert et Amont du Pont se situent à la limite des domaines des eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes et des eaux chlorurées sodiques et potassiques (figure 28). La source Amont du Pont bien que proche des deux premières est nettement située dans le domaine des eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes.

###### b) Les eaux froides

\* Le Doron : le point représentatif du faciès chimique du Doron est situé dans le domaine des eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes près du pôle hyper-sulfaté calcique.

\* Les eaux de la rive droite du Doron : ce sont les sources des Moulins et de La Verpillère qui émergent comme nous l'avons déjà dit dans des éboulis et formations morainiques.

Le diagramme de Piper de la figure 28 montre que les sources de La Verpillère et des Moulins sont situées dans le domaine des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes. Cependant, la source de La Verpillère, plus chargée en chlorures et sulfates se trouve à la limite du domaine des eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes.

Par contre, la source des Moulins, plus chargée en bicarbonates et magnésium et beaucoup plus pauvre en sulfates et chlorures, se trouve à la limite du domaine des eaux bicarbonatées calciques.

\* Les eaux de la rive gauche du Doron : il s'agit de la source Leray située au pied du versant morainique des Chavonnes et de la source Barral qui émerge au contact d'un paquet glissé de gypses avec la moraine. Sur le diagramme Piper de la figure 28 le point représentatif de la source Leray se trouve près de celui de la source des Moulins dans le domaine des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes.

La source Barral présente un faciès chimique très différent. Sa richesse en calcium et sulfate la place, dans le diagramme triangulaire de Piper, dans le domaine des eaux hypersulfatées calciques (cf. figure 28).

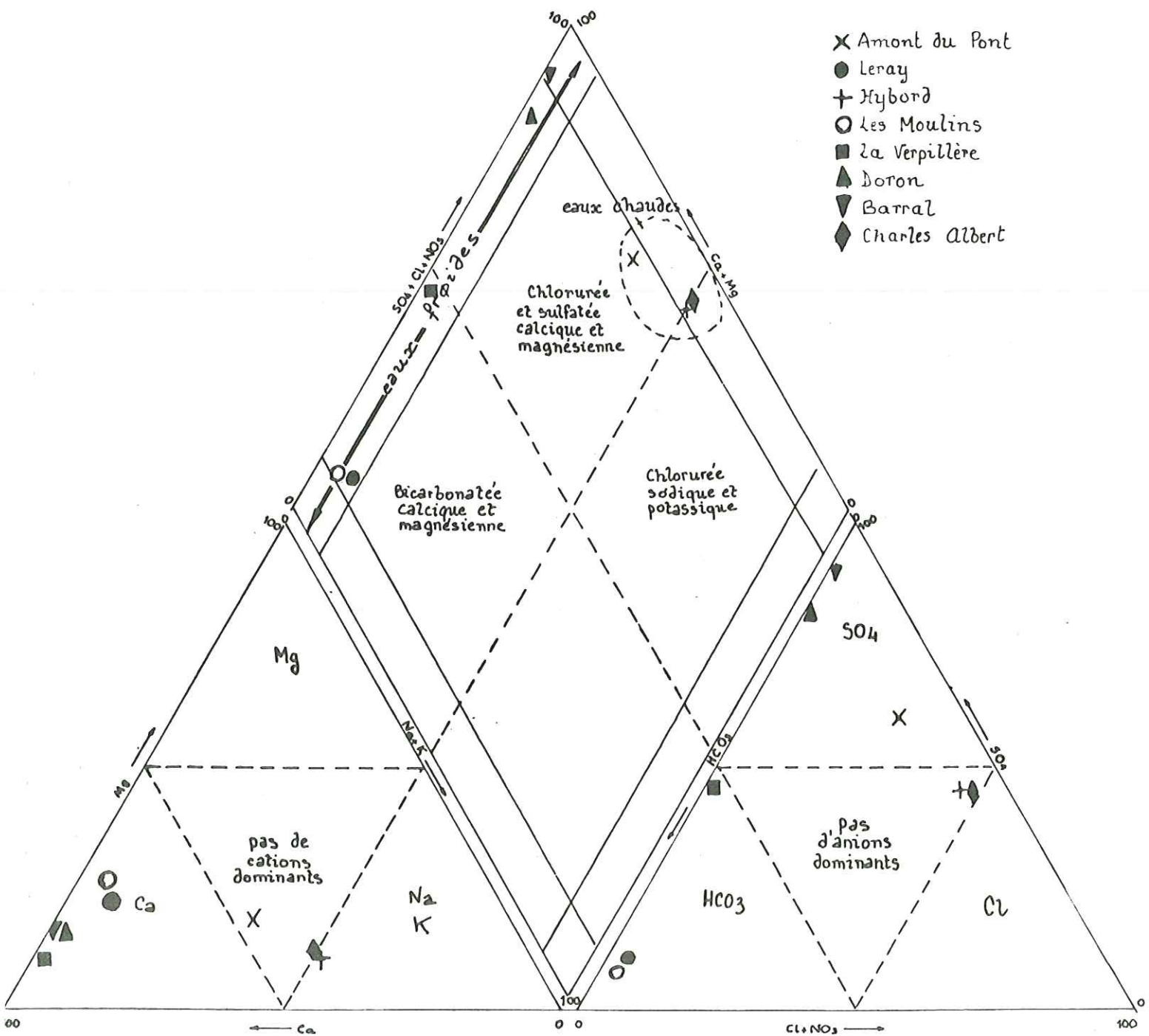
###### c) Conclusion

En résumé on distingue deux tendances :

- la première formée par les eaux froides qui évoluent des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes aux eaux hypersulfatées.
  - la seconde, formée par les eaux chaudes et caractérisées par un net enrichissement en alcalins (Na et K) et en chlorures.
- Les eaux chaudes s'individualisent donc nettement.

FIGURE 28

REPRESENTATION DES SOURCES DE BRIDES-les-BAINS  
SUR DIAGRAMME PIPER





### III-1.2. Station de Salins-les-Thermes

#### a) Les eaux thermominérales

Le diagramme de Piper de ces trois sources chaudes (figure 29) montre que ces eaux sont très proches les unes des autres, dans le domaine des eaux chlorurées sodiques et potassiques. La source Massiagio est moins minéralisée que les deux autres.

#### b) Les eaux froides minéralisées

Ce sont les sources "Source Froide" et "Source Froide du Caniveau" qui émergent au voisinage immédiat des sources thermominérales.

Les points représentatifs de ces eaux froides se situent dans le domaine des eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes (cf. figure 29). Ils occupent une position intermédiaire entre les eaux chaudes minéralisées et les eaux froides superficielles.

#### c) Les eaux froides superficielles

Les eaux du Doron ainsi que les eaux des piézomètres ont des caractéristiques chimiques très voisines. Elles sont toutes dans le domaine des eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes, près du pôle des eaux hypersulfatées calciques.

#### d) Conclusion

Selon la figure 29, les eaux de Salins-les-Thermes se répartissent de la façon suivante :

. Dans le triangle des cations, les eaux s'étalent entre les pôles calcium et (sodium + potassium). Les eaux superficielles sont très proches du pôle calcium, alors que les eaux chaudes minéralisées se situent près du pôle (sodium + potassium). Les eaux froides minéralisées ne présentent pas de cations dominants.

. Dans le triangle des anions, les points se répartissent entre les pôles  $(Cl^- + NO_3^-)$  et  $SO_4^{--}$ . Les eaux superficielles se placent vers le pôle  $SO_4^{--}$  et les eaux chaudes minéralisées vers le pôle Cl. Les eaux froides minéralisées, en position intermédiaire, ne présentent pas d'anions dominants.

### III-1.3. Les eaux de l'usine de Ste Hélène

Ce sont les eaux de La Coche dont le point représentatif se situe dans le diagramme de Piper de la figure 30 dans le domaine des eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes, près du pôle hypersulfaté calcique.

FIGURE 29

REPRESENTATION DES SOURCES DE SALINS-les-THERMIQUES

SUR DIAGRAMME PIPER

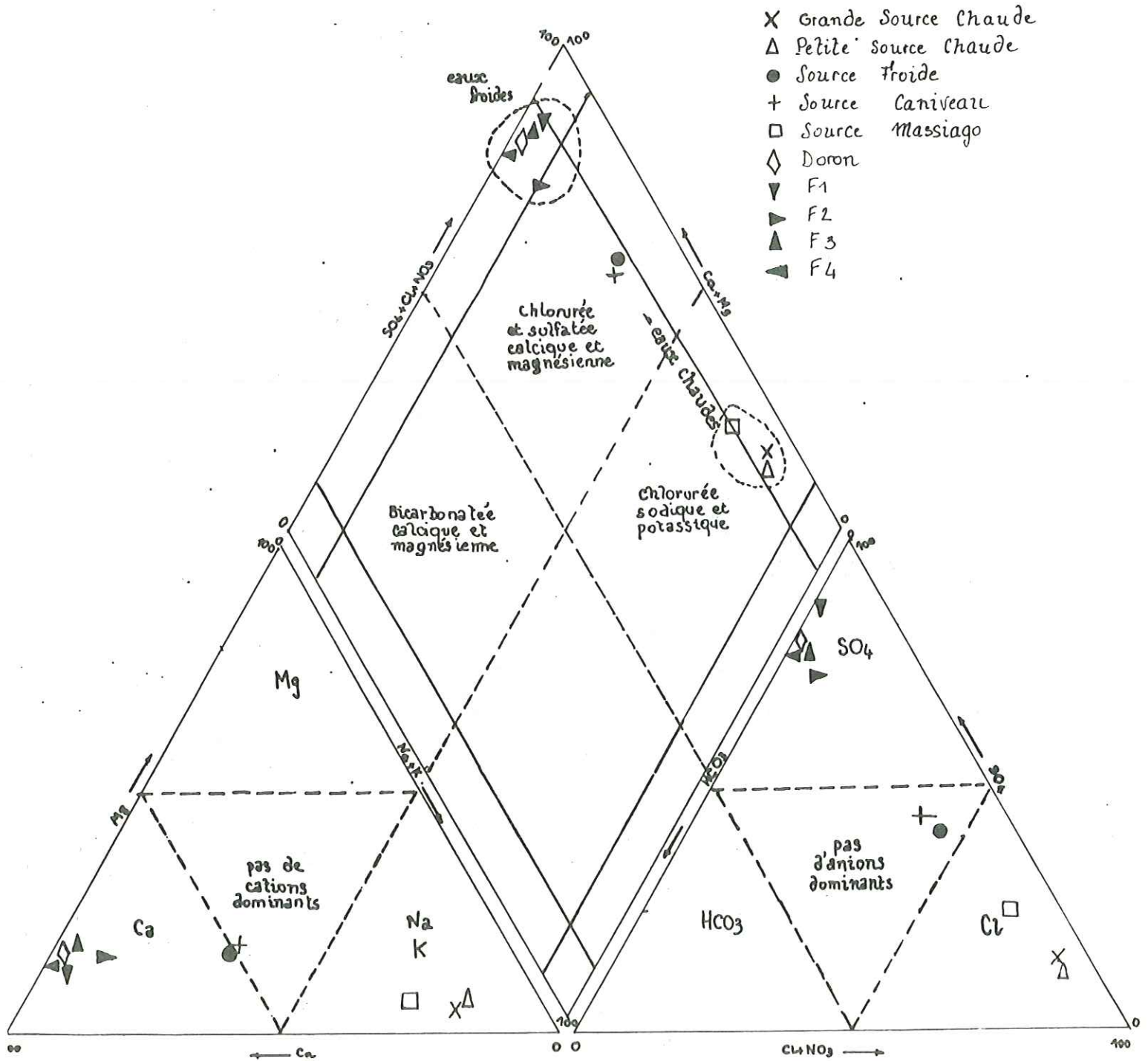
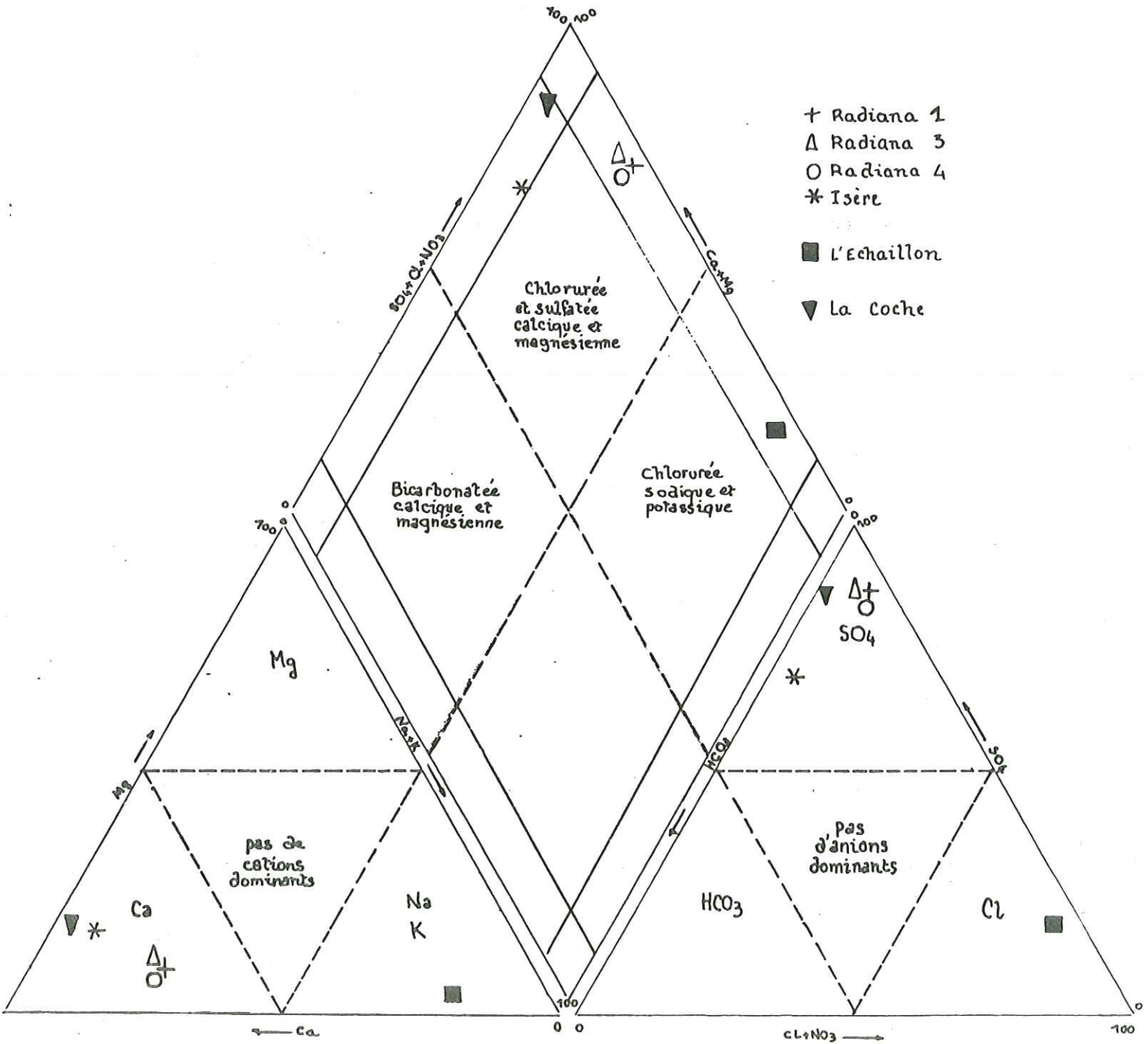




FIGURE 30

REPRESENTATION SUR DIAGRAMME PIPER DES SOURCES DE : L'ECHAILLON (Maurienne)  
LA LECHERE et LA COCHE (Tarentaise)







### III-1.4. Les eaux des stations thermales de La Léchère (Tarentaise) et l'Echaillon (Maurienne)

#### a) Les eaux de La Léchère (Tarentaise) (fig 30)

\* les eaux thermominérales : les points représentatifs des sources Radiana 1, 3 et 4 sont presque confondus ; ils se trouvent dans le domaine des eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes. Le cation dominant est le calcium et l'anion dominant les sulfates.

\* les eaux superficielles de l'Isère se placent dans le même domaine que les eaux des sources Radiana. Cependant, elles sont plus riches en calcium et bicarbonates, et plus pauvres en sulfates, sodium et potassium.

#### b) Les eaux de l'Echaillon (Maurienne) (fig 30)

Elles se situent dans le domaine des eaux chlorurées sodiques et potassiques, près du pôle hyper-chloruré sodique. Les triangles caractéristiques des anions et des cations montrent que les cations dominants sont Na et K et l'anion dominant le Cl.

### III-1.5. Conclusion

Si nous reportons les points représentatifs de toutes les eaux thermominérales étudiées dans un diagramme Piper, nous voyons qu'ils se répartissent entre les pôles hyperchloruré calcique et hyperchloruré sodique. Cette répartition fait ressortir les différences des teneurs en Ca, et Cl des eaux thermominérales (cf. figure 31 ).

### III-2. Etude des éléments majeurs des sources

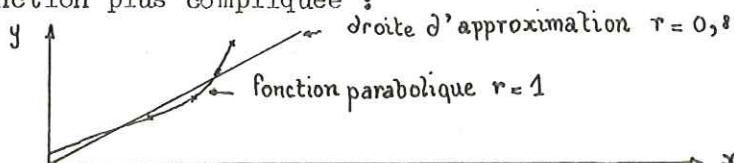
Au cours de cette étude, nous examinerons successivement les sources des stations thermales indépendamment les unes des autres, et pour chaque station, nous adopterons la démarche suivante :

- La composition chimique moyenne des sources sera donnée avec la valeur des écart-types traduisant la variation de chaque élément dans le temps.
  - Les maximums et minimums observés lors des analyses chimiques seront matérialisés sur un diagramme Schoeller Berkaloff. Nous obtiendrons ainsi deux profils délimitant le domaine de variation du chimisme de la source au cours du temps.
  - Nous donnerons ensuite, la formule caractéristique des eaux qui permet de classer les ions selon leur importance.
  - Nous représenterons l'évolution dans le temps des paramètres chimiques sur des diagrammes concentrations-temps.
  - La matrice de corrélation de chaque type d'eau permettra de faire une approche à l'étude de l'origine des éléments en solution.
  - Les matrices de corrélations font apparaître les coefficients de corrélation qui relient les éléments pris deux à deux.
- Lorsqu'un coefficient de corrélation en valeur absolue est voisin de 1, cela montre qu'entre les 2 variables, il existe une relation linéaire très bien définie. En revanche, si le coefficient est voisin de 0, il n'y a pas de relation linéaire.
- Il n'existe pas de relations linéaires entre variables lorsque :

- soit les deux variables sont invariantes (du fait d'écart-types analytiques très faibles), ce que nous observons dans un certain nombre de cas.
- soit une seule des 2 variables est variante
- soit la variation est autre que linéaire.

Ce dernier cas est très rare car seules une fonction aléatoire et une fonction circulaire se traduisent par un coefficient de corrélation nul.

En général, une droite est presque toujours une approximation, parfois trop simpliste certes d'une fonction plus compliquée :



- Enfin, une synthèse des observations effectuées sur la chimie des éléments majeurs sera faite pour chaque station thermale.

Notre étude ayant été surtout axée sur les stations thermales de Salins-les-Thermes et Brides-les-Bains, nous commencerons par décrire ces dernières, puis nous étudierons les stations thermales de La Léchère (Tarentaise), de l'Echaillon (Maurienne) et enfin, la source La Coche de l'usine de Ste Hélène (Tarentaise).

Remarque : dans le but de clarifier la présentation de cette étude, toutes les méthodes d'analyses effectuées sur le terrain et au laboratoire de l'Institut Dolomieu sont décrites dans l'annexe 1. Les résultats des analyses chimiques mensuelles des sources sont de même reportés dans cette annexe.

### III-2.1. La station thermale de Brides-les-Bains

#### A - La source Hybord

La composition chimique moyenne de cette source est la suivante :

	MOYENNE (mg/l)	ECART-TYPE
Ca	632.67	13.6
Mg	109.8	6.8
Na	922.07	13.6
K	81.03	2.27
Cl	1281.28	28.7
SO <sub>4</sub>	1714.1	11.65
HCO <sub>3</sub>	406.08	5.36
SiO <sub>2</sub>	35.5	0.8
Res	152.07	5.38
T	36.4	0.9

Le coefficient de variation de chaque élément est faible car le chimisme de cette source est stable dans le temps.

Les teneurs en chlorures et sulfates sont assez élevées, d'environ 2 g/l, ainsi que celles en calcium et sodium.

#### Diagramme de Schoeller - Berkaloff.

Ce diagramme est composé d'échelles logarithmiques verticales sur lesquelles sont reportées les concentrations des principaux ions. Les échelles sont décalées les unes par rapport aux autres de telle façon que sur le tracé d'une horizontale reliant toutes les droites, les concentrations en milliéquivalents sont égales.

Ainsi, sur un diagramme de Schoeller Berkaloff, la composition chimique d'une eau est matérialisée par une droite brisée qui fait ressortir les cations et les anions dominants.

La faible variabilité du chimisme de la source Hybord se traduit sur le diagramme de Schoeller de la figure 32, par un domaine très étroit limité par les droites des maximums et minimums des analyses effectuées.



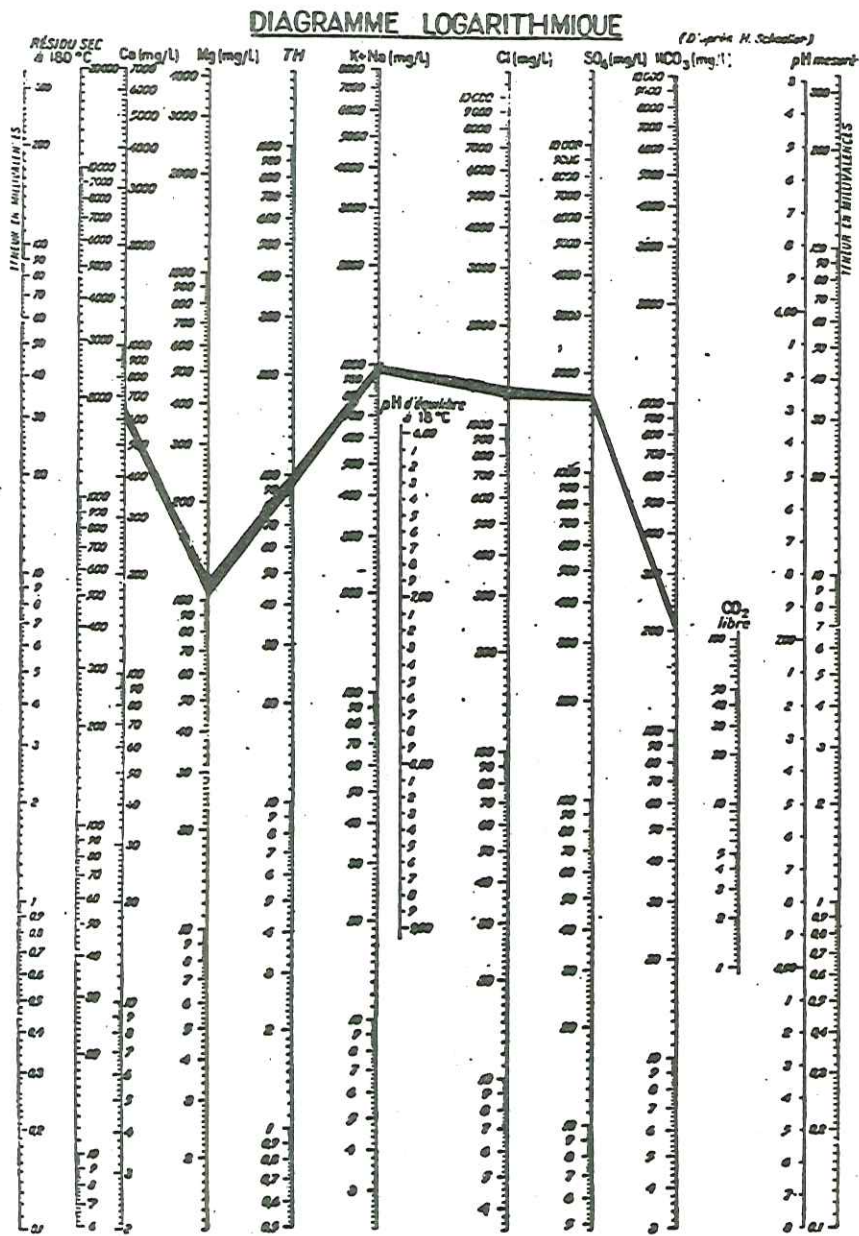


Fig. 32 - Source Hybord - Variation du chimisme sur diagramme Schoeller

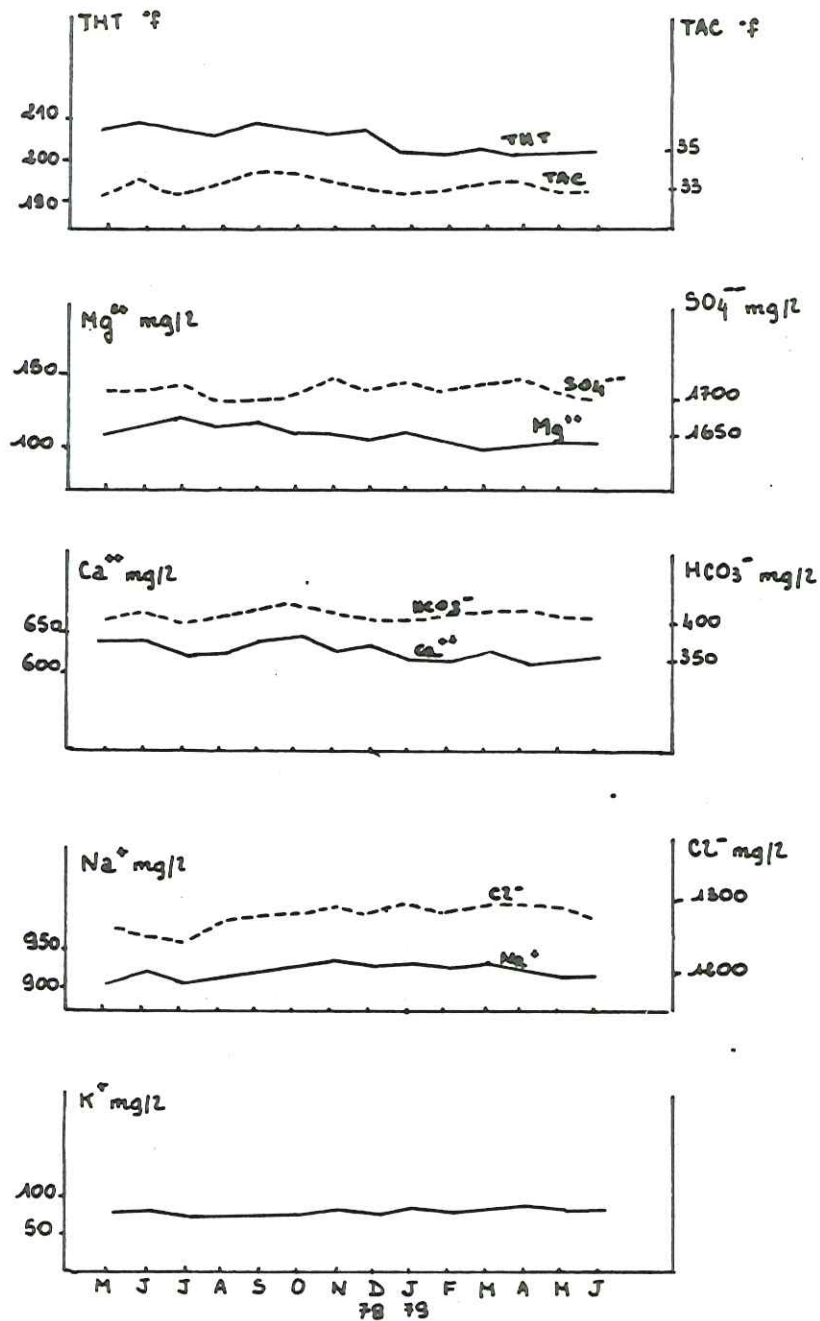


Fig. 33 - Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques de la Source Hybord

La formule caractéristique de la source Hybord est la suivante :

pour les cations  $rNa > rCa > rmg > rK$   
 pour les anions  $rCl > rSO_4 > rHCO_3$

Les notations rNa, r ... correspondent aux concentrations des éléments exprimés en milliéquivalents, c'est-à-dire, au nombre d'ions par litre d'échantillon.

#### Evolution dans le temps des éléments majeurs.

La figure 33 donne l'évolution dans le temps des 10 principaux paramètres chimiques caractéristiques de la Source Hybord.

Tous ces diagrammes traduisent une fois de plus la constance du chimisme de cette source. On vérifie par ailleurs que le chimisme de la Source Hybord est indépendant de son débit.

#### Matrice de corrélation

Ca	*Mg	*Na	*K	*Cl	*SO <sub>4</sub>	*HCO <sub>3</sub>	*SiO <sub>2</sub>	*Res	*T	*
+1.00	+0.09	+0.19	-0.14	-0.11	-0.32	+0.37	-0.32	+0.20	+0.03	Ca
	+1.00	+0.06	-0.32	-0.57	-0.16	+0.14	+0.09	-0.01	+0.17	Mg
		+1.00	+0.36	+0.26	+0.34	+0.45	+0.48	+0.14	-0.51	Na
			+1.00	+0.09	+0.67	-0.01	-0.14	-0.62	-0.01	K
				+1.00	+0.05	+0.31	+0.41	+0.62	-0.42	Cl
					+1.00	-0.09	+0.30	-0.51	-0.43	SO <sub>4</sub>
						+1.00	+0.21	+0.32	+0.12	HCO <sub>3</sub>
							+1.00	+0.43	-0.68	SiO <sub>2</sub>
								+1.00	-0.36	Res
									+1.00	T

Les coefficients de corrélations de tous les éléments pris deux à deux présentent des valeurs absolues remarquablement faibles. Ceci est dû à ce que seules les valeurs présentant des fluctuations sont prises en compte pour le calcul de corrélation alors qu'en fait le chimisme de la source Hybord est très constant.

Ainsi, l'étude des corrélations linéaires effectuées à partir des analyses chimiques mensuelles, n'est pas adaptée pour fournir des renseignements sur l'origine des ions.

Nous verrons plus loin que l'étude de l'origine des ions des sources thermo-minérales sera possible grâce à la matrice de corrélation calculée à partir des compositions moyennes de l'ensemble des sources thermominérales.

#### B - La Source Charles Albert

Toutes les caractéristiques chimiques de cette source sont pratiquement identiques à celles de la source Hybord. Ceci indique que ces deux sources dont les griffons sont très proches l'un de l'autre, proviennent de la même venue hydrothermale.

Composition chimique moyenne de cette source :

	MOYENNE (mg/L)	ECART-TYPE
Ca	630.17	14.01
Mg	102.6	10.02
Na	916.53	6.27
K	77.76	3.3
Cl	1267.4	30.9
SO <sub>4</sub>	1698.38	11.4
HCO <sub>3</sub>	411.49	4.98
SiO <sub>2</sub>	35.6	0.8
Res	149.8	5.69
T	34.06	1.3



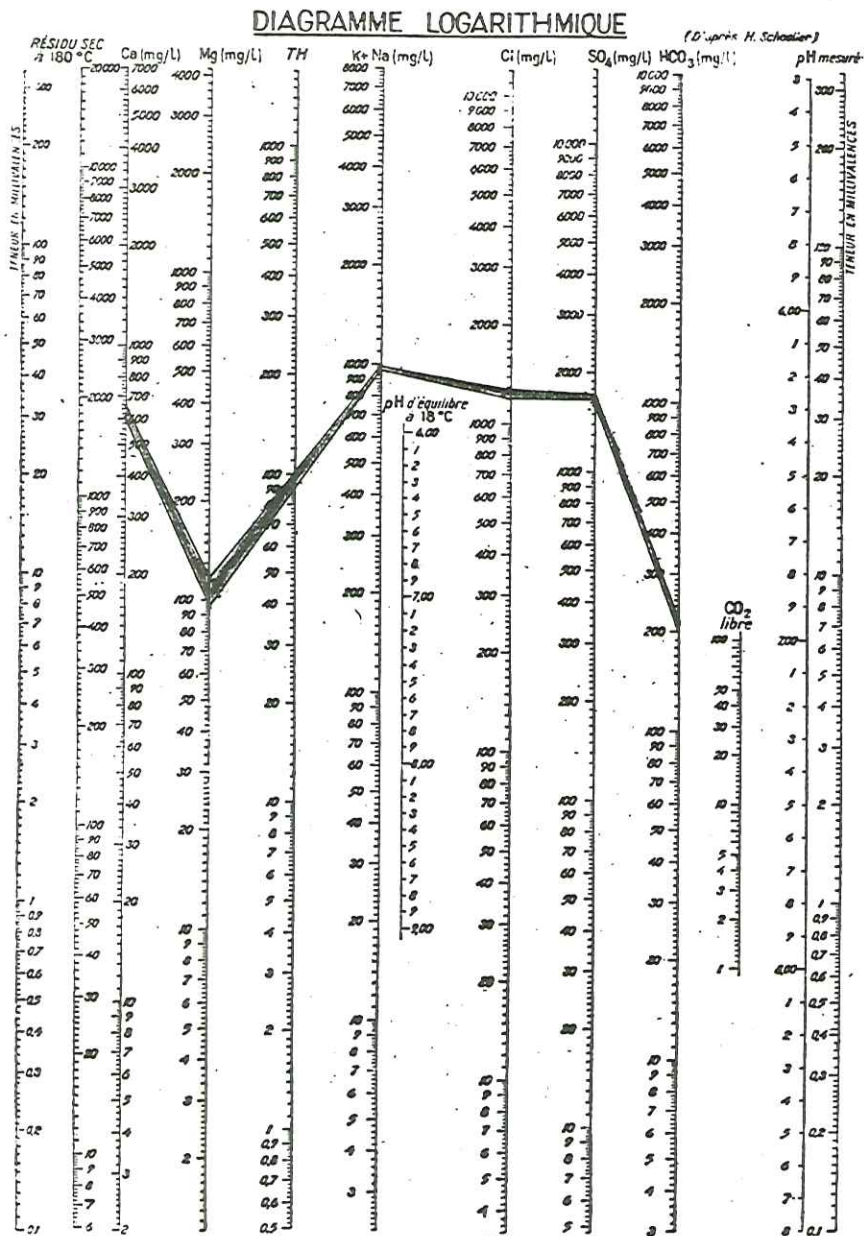


Fig. 34 - Source Charles Albert - Variation du chimisme sur diagramme Schoeller

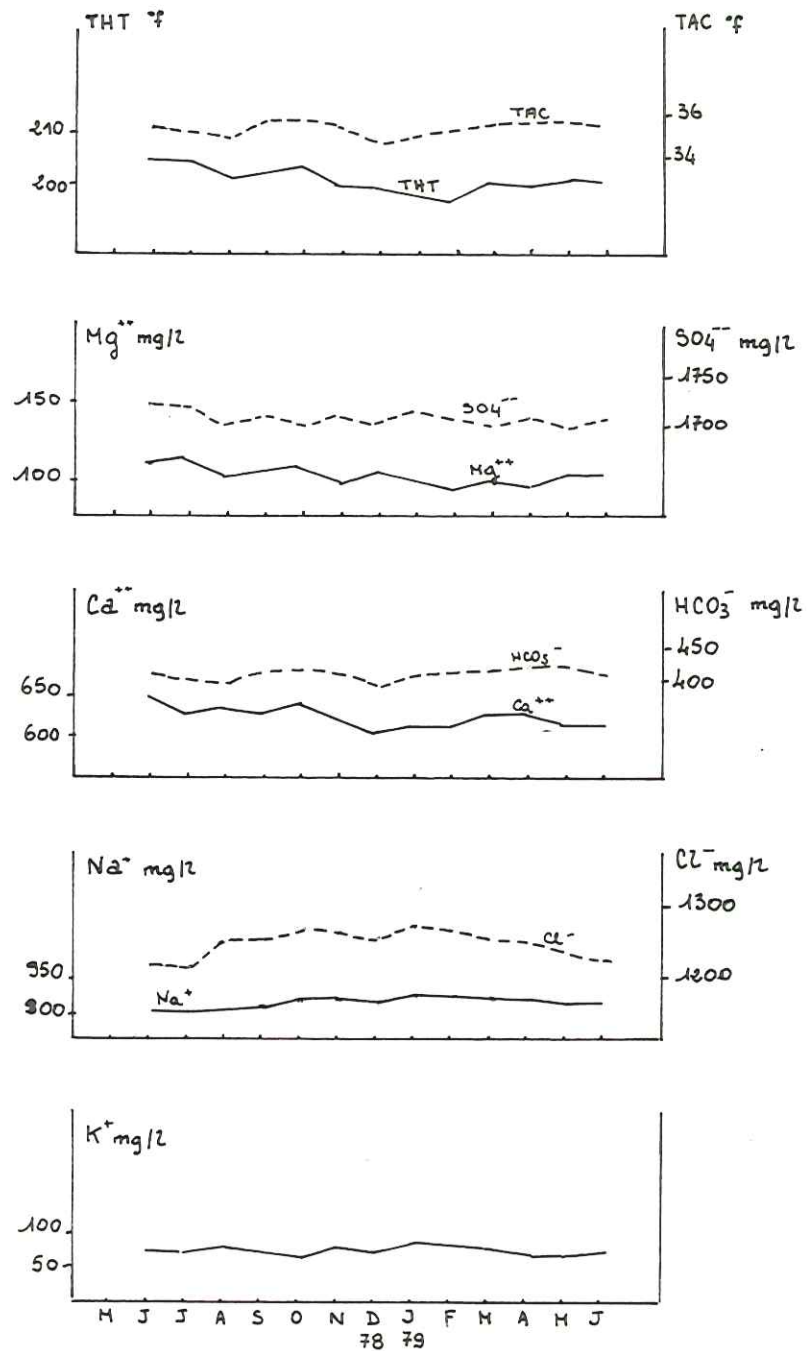


Fig. 35 Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques de la Source Charles Albert

Ce tableau est pratiquement le même que celui établi pour la source Hybord.

Les écarts-types réduits montrent la régularité du chimisme de la source Charles-Albert.

#### Diagramme de Schoeller Berkaloff

Les maximums et minimums des analyses chimiques de la source Charles Albert sont reportés sur la figure 34. Le domaine représentant la variation annuelle du chimisme de cette source est très étroit.

De ce diagramme, il ressort la formule caractéristique suivante :

$$\begin{array}{l} r_{Na} > r_{Ca} > r_{Mg} > r_K \\ \text{et} \quad r_{Cl} > r_{SO_4} > r_{HCO_3} \end{array}$$

cette formule est la même que celle de la source précédente.

L'évolution des paramètres chimiques de la source Charles Albert est notée sur les diagrammes de la figure 35.

#### Matrice de corrélation

Ca	*Mg	*Na	*K	*Cl	*SO <sub>4</sub>	*HCO <sub>3</sub>	*SiO <sub>2</sub>	*Res	*T	*
+1.00	+0.28	-0.48	-0.27	-0.42	+0.43	+0.26	-0.30	-0.35	+0.39	Ca
	+1.00	-0.62	-0.57	-0.70	-0.04	-0.02	-0.36	-0.14	+0.32	Mg
		+1.00	+0.29	+0.87	-0.10	+0.22	+0.58	+0.25	-0.58	Na
			+1.00	+0.19	+0.51	-0.32	+0.51	-0.41	+0.23	K
				+1.00	-0.34	+0.13	+0.44	+0.57	-0.79	Cl
					+1.00	+0.28	+0.22	-0.85	+0.57	SO <sub>4</sub>
						+1.00	-0.26	-0.07	-0.15	HCO <sub>3</sub>
							+1.00	-0.15	-0.29	SiO <sub>2</sub>
								+1.00	-0.66	Res
									+1.00	T

A la différence de la source Hybord, la matrice de corrélation de la source Charles Albert fait ressortir quelques coefficients de corrélation plus significatifs.

Par exemple, l'ion Cl<sup>-</sup> montre une bonne corrélation avec l'ion Na<sup>+</sup> (+0,87) ce qui signifie que le chlorure de sodium est à l'origine des ions Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup>.

Les variations chimiques, lorsqu'elles sont très faibles peuvent être oblitérées par les écarts analytiques. De ce fait, d'éventuelles corrélations se trouveront partiellement voire totalement dégradées si les écarts analytiques (en principe ou le plus fréquemment aléatoires gaussiens) sont du même ordre de grandeur et à plus forte raison supérieurs à l'écart-type mesuré sur la collection de données.

Ce phénomène est sensible dans toutes les corrélations des données mensuelles des autres sources thermominérales.

#### C - La source Amont du Pont

La température de cette source est relativement peu élevée (20°) mais très régulière dans le temps.

Sa minéralisation est assez importante et constante.

Pour ces deux raisons, nous plaçons la source Amont du Pont dans le groupe des sources thermominérales.



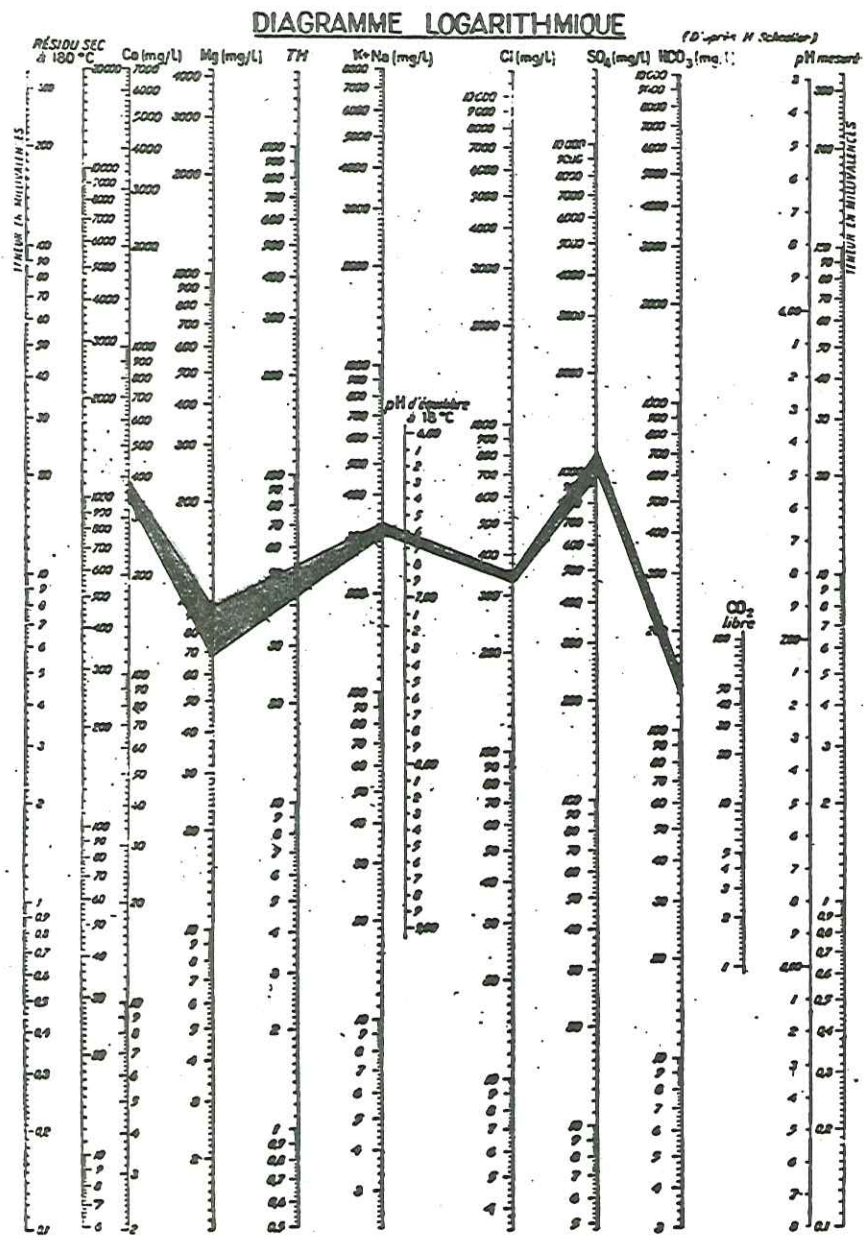


Fig. 36 - Source Amont du Pont - Variation du chimisme sur diagramme Schoeller

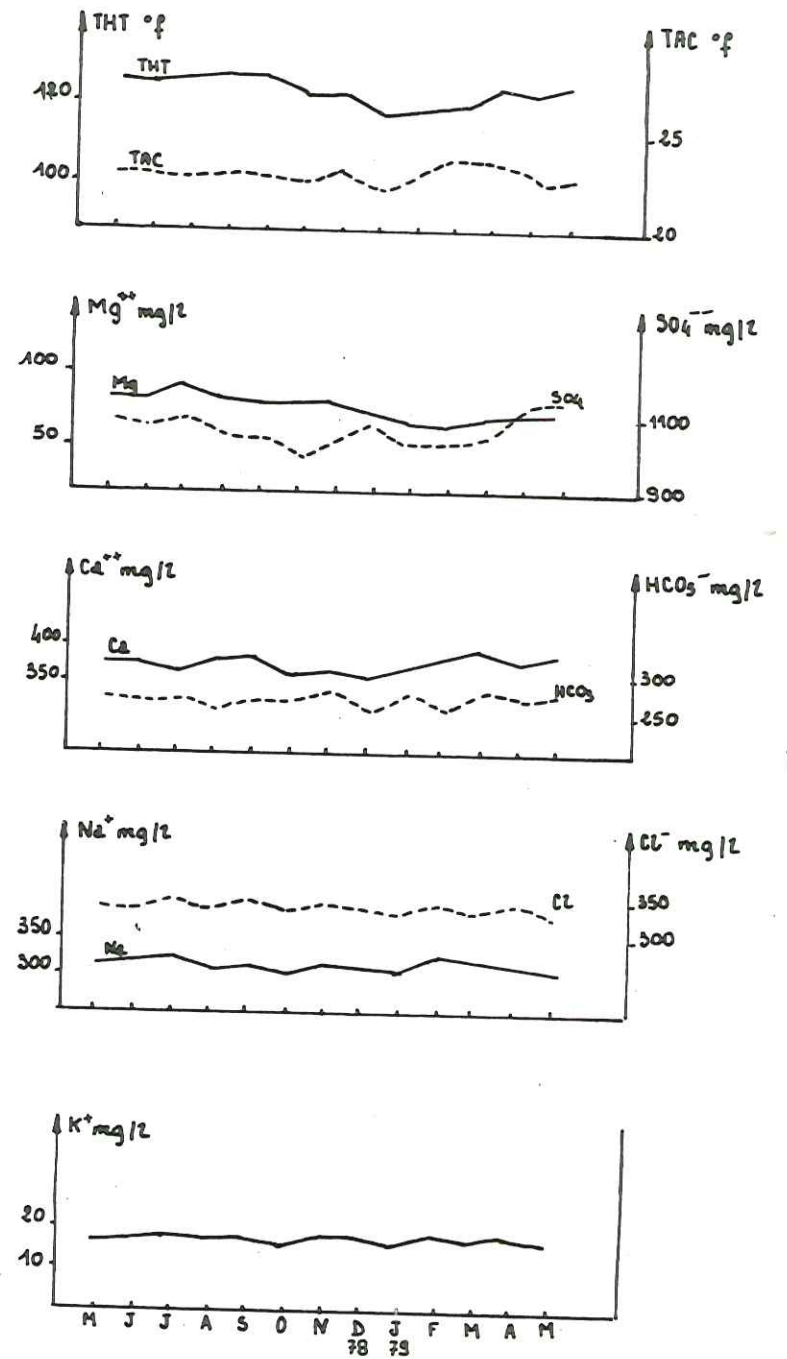


Fig. 37 Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques de la Source Amont du Pont

La composition chimique moyenne de cette source est la suivante :

	MOYENNE (mg/l)	ECART-TYPE
Ca	371.47	11.48
Mg	80.8	7.6
Na	310.15	8.49
K	17.8	0.69
Cl	342.74	6.48
SO <sub>4</sub>	1066.9	63.60
HCO <sub>3</sub>	277.59	12.3
SiO <sub>2</sub>	14.03	0.87
Res	378.0	24.1
T	19.1	0.4

Les écarts types montrent que le chimisme de cette source, bien qu'étant constant, varie plus que celui des 2 autres sources thermominérales de Brides-les-Bains.

En fait, cette source est plus froide que les précédentes, et ne dépose pas de boue rouge comme elles. Sa résistivité, plus élevée, reste encore faible de l'ordre de 380  $\Omega$ cm.

Les différences observées entre cette source et les deux précédentes suggèrent une différence d'origine entre les sources Hybord et Charles Albert d'une part, et la source Amont du Pont d'autre part.

#### Diagramme de Schoeller-B :

Sur le diagramme de Schoeller-B de la figure 36, les 2 droites brisées correspondant aux maximums et minimums des analyses chimiques délimitent un domaine assez étroit qui montre une stabilité du chimisme comparable aux cas précédents. Cependant, en comparant ce diagramme logarithmique avec ceux des sources Hybord et Charles Albert, nous voyons que les concentrations sont proportionnellement plus faibles :

. les teneurs en Ca<sup>+</sup>, Mg<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> de la source Amont du Pont correspondent à une diminution de 30 à 35% des teneurs en Ca<sup>+</sup>, Mg<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> des sources Hybord et Charles Albert.

. Par contre, les teneurs en ions Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> de la source Amont du Pont correspondent à une diminution de 70% environ des teneurs en ions Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> des sources Hybord et Charles Albert.

Ces remarques sont intéressantes et s'évèreront utiles dans l'étude de l'origine de ces sources thermominérales (chapitre VI).

Le diagramme montre que ce sont les teneurs en ions Mg qui présentent les plus grandes variations.

La formule caractéristique de la source Amont du Pont est :

$$\begin{aligned} rCa > rNa > rMg > rK \\ rSO_4 > rCl > rHCO_3 \end{aligned}$$

Par rapport aux formules caractéristiques des 2 autres sources thermominérales de Brides les Bains, les ions Ca<sup>+</sup> et SO<sub>4</sub><sup>-</sup> prédominent sur les ions Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> alors que dans les sources Hybord et Charles Albert, ce sont les ions Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> qui prédominent sur les ions Ca<sup>+</sup> et SO<sub>4</sub><sup>-</sup>.



Evolution des paramètres dans le temps

La figure 37 représente l'évolution dans le temps des principaux paramètres chimiques de la source Amont du Pont. Comme le diagramme de Schoeller, cette figure fait à nouveau ressortir la faible variabilité du chimisme de la source Amont du Pont.

Matrice de corrélation

Ca	*Mg	*Na	*K	*Cl	*SO4	*HCO3	*SiO2	*Res	*T	*
+1.00	-0.26	+0.12	+0.08	-0.21	+0.09	+0.51	-0.70	-0.04	+0.30	Ca
	+1.00	-0.05	-0.10	+0.56	+0.35	-0.40	+0.25	+0.31	+0.06	Mg
		+1.00	+0.57	+0.54	-0.08	+0.52	+0.05	-0.66	-0.04	Na
			+1.00	+0.61	+0.29	+0.26	-0.14	-0.79	-0.29	K
				+1.00	+0.18	-0.07	+0.25	-0.29	-0.26	Cl
					+1.00	-0.22	-0.42	-0.10	+0.41	SO4
						+1.00	-0.10	-0.59	+0.00	HCO3
							+1.00	+0.11	-0.45	SiO2
								+1.00	+0.20	Res
									+1.00	T

Dans cette matrice, il n'existe pas de coefficients de corrélation positifs très nets. L'interprétation de la corrélation entre K et Cl (0,61) reste problématique du fait des différences de gammes qui existent entre ces deux éléments. En raison des teneurs constantes, on n'observe aucune corrélation entre Na et Cl.

D - La source Leray

C'est une source froide dont la composition chimique moyenne est la suivante :

	MOYENNE (mg/l)	ECART-TYPE
Ca	99.19	2.9
Mg	17.77	3.07
Na	9.65	1.37
K	9.8	1.27
Cl	9.85	2.76
SO4	34.78	3.59
HCO3	347.6	18.45
SiO2	8.02	1.1
Res	1609.5	93.1
T	10.5	0.4

Les écarts-types montrent que les variations du chimisme sont plus importantes que celles des sources thermominérales. C'est le magnésium qui présente la plus forte variation (l'écart type représente 17% de la teneur moyenne). Ceci est dû en partie à la faible teneur en Mg d'où influence plus marquée de l'écart analytique.

Le calcium et les bicarbonates correspondent aux teneurs les plus fortes avec environ 100 mg/l de calcium et 350 mg/l de bicarbonates.

Diagramme de Schoeller-Berkaloff

Le diagramme Schoeller-Berkaloff de la figure 38 montre que le domaine de variation du chimisme de cette source est assez important.

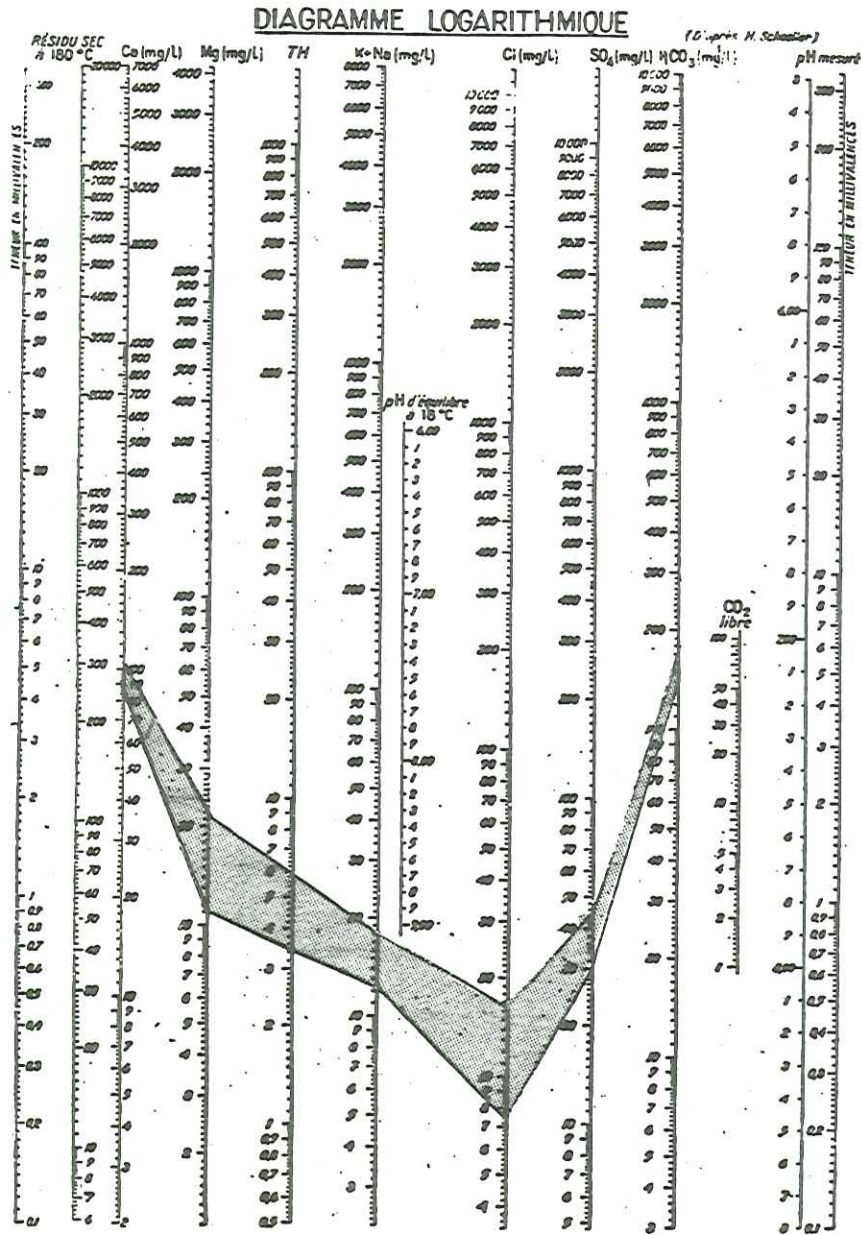


Fig. 38 - Source Leray - Variation du chimisme sur diagramme Schoeller

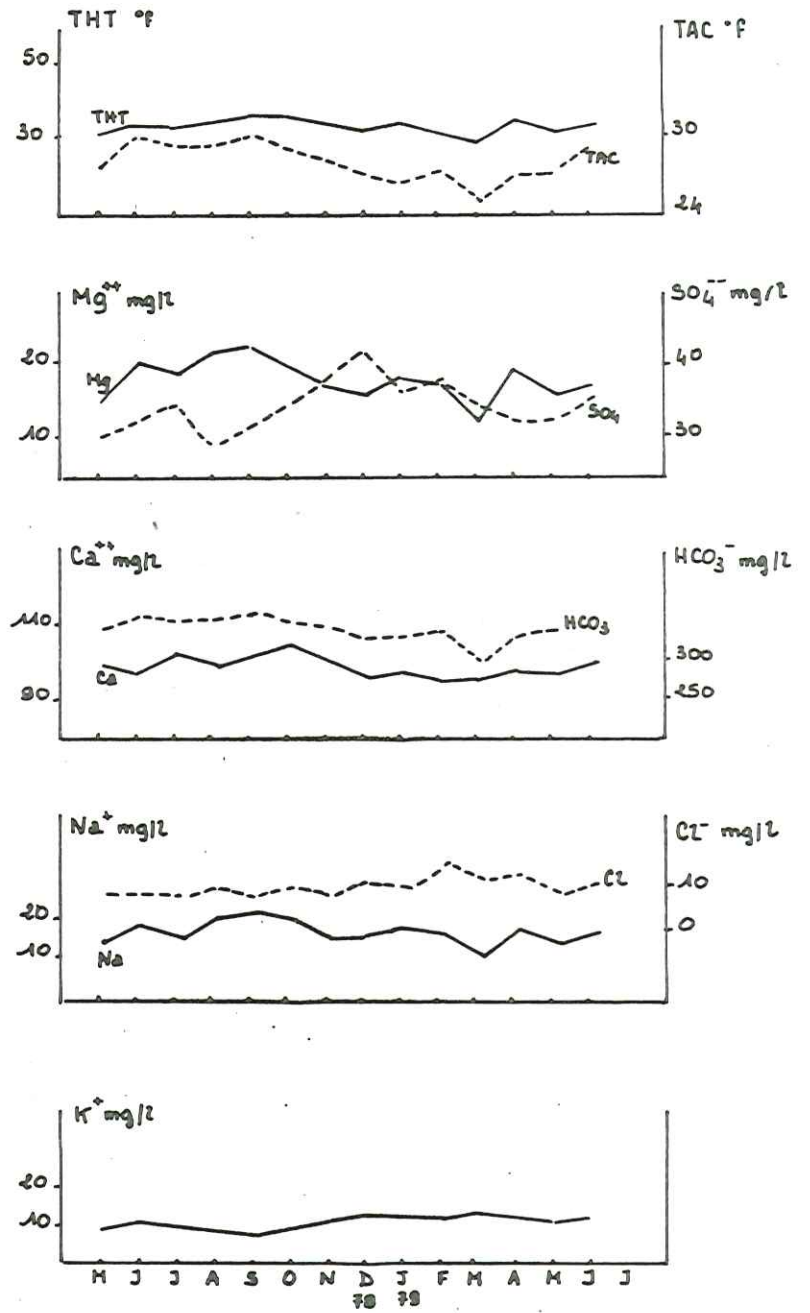
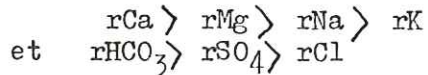


Fig. 39 Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques de la source Leray



La formule caractéristique de la source Leray est :



#### Evolution des paramètres dans le temps

Les éléments étudiés ne présentent pas au cours du temps de maximum et des minimums.

Les variations des teneurs semblent être réglées par les recharges de la nappe aquifère contenue dans les formations morainiques du versant des Chavonnes au pied duquel apparait la Source Leray.

#### Matrice de corrélation

Ca	*Mg	*Na	*K	*Cl	*SO4	*HCO3	*SiO2	*Res	*T	*
+1.00	+0.40	-0.79	-0.68	-0.61	+0.30	+0.58	+0.19	-0.11	+0.04	Ca
	+1.00	-0.47	-0.57	-0.20	-0.32	+0.76	+0.21	-0.32	+0.15	Mg
		+1.00	+0.84	+0.54	+0.72	-0.53	+0.16	+0.12	+0.23	Na
			+1.00	+0.61	+0.66	-0.64	+0.18	+0.19	+0.22	K
				+1.00	+0.33	-0.51	-0.26	+0.34	-0.06	Cl
					+1.00	-0.21	+0.43	+0.07	+0.52	SO4
						+1.00	+0.27	-0.54	+0.18	HCO3
							+1.00	-0.32	+0.45	SiO2
								+1.00	+0.30	Res
									+1.00	T

Une dissolution conjointe de chlorure de sodium et chlorure de potassium semble être à l'origine des teneurs en ions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ . Les bicarbonates sont assez bien corrélés avec le calcium et magnésium. Ceci suggère donc des variations dans les conditions de lessivage de niveaux sédimentaires vrai - semblablement triasiques.

#### E - La Source des Moulins

Cette source froide émerge en rive droite du Doron au lieu-dit Les Moulins.

Sa composition chimique moyenne annuelle est la suivante :

	MOYENNE (mg/l)	ECART-TYPE
Ca	84.1	2.99
Mg	16.1	3.6
Na	7.4	0.88
K	2.9	0.48
Cl	4.4	1.8
SO4	18.07	1.47
HCO3	313.77	15.02
SiO2	8.24	1.1
Res	1946.2	127.07
T	9.47	1.26

Les variations sont importantes surtout en ce qui concerne les chlorures.

Le cation dominant est le calcium et l'anion dominant est représenté par les bicarbonates.

DIAGRAMME LOGARITHMIQUE

(D'après H. Schoeller)

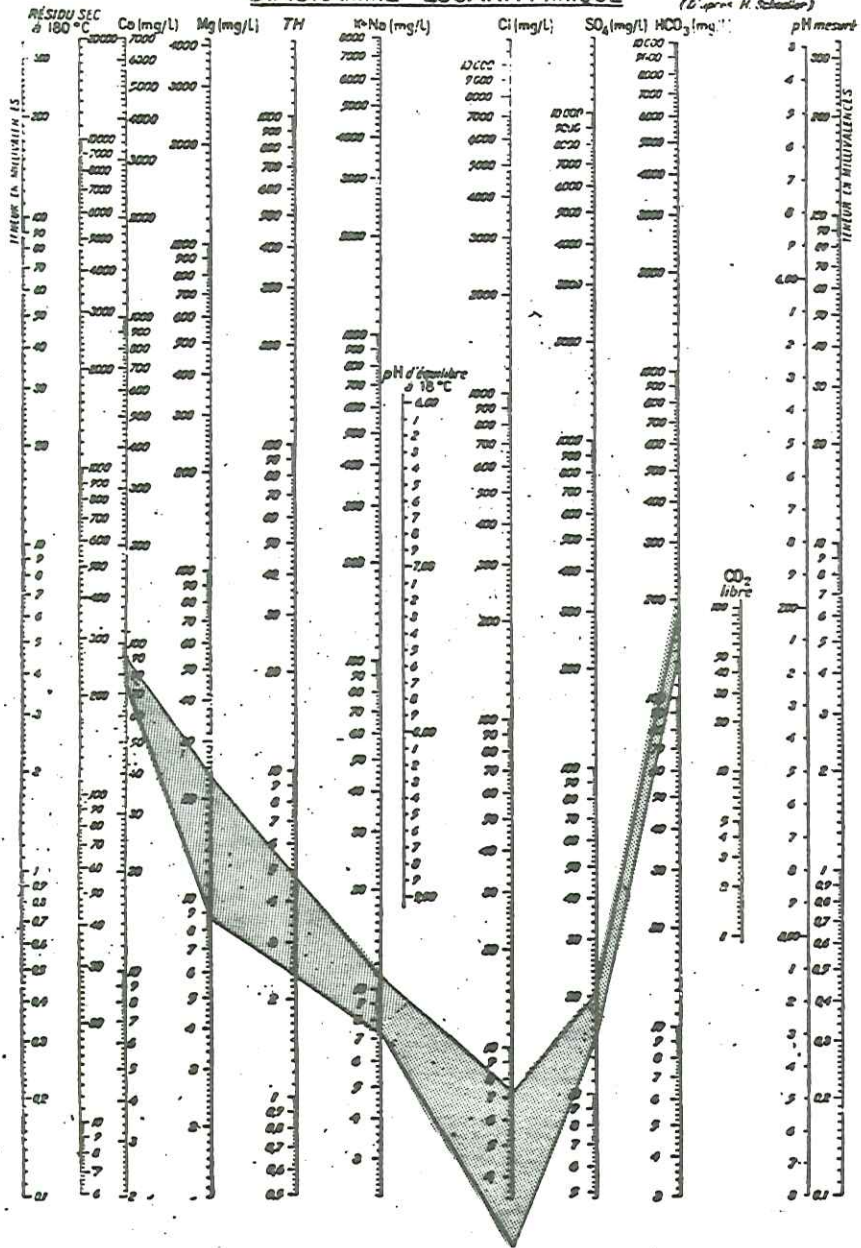


Fig.40 - Source Les Moulins - Variation du chimisme sur diagramme Schoeller

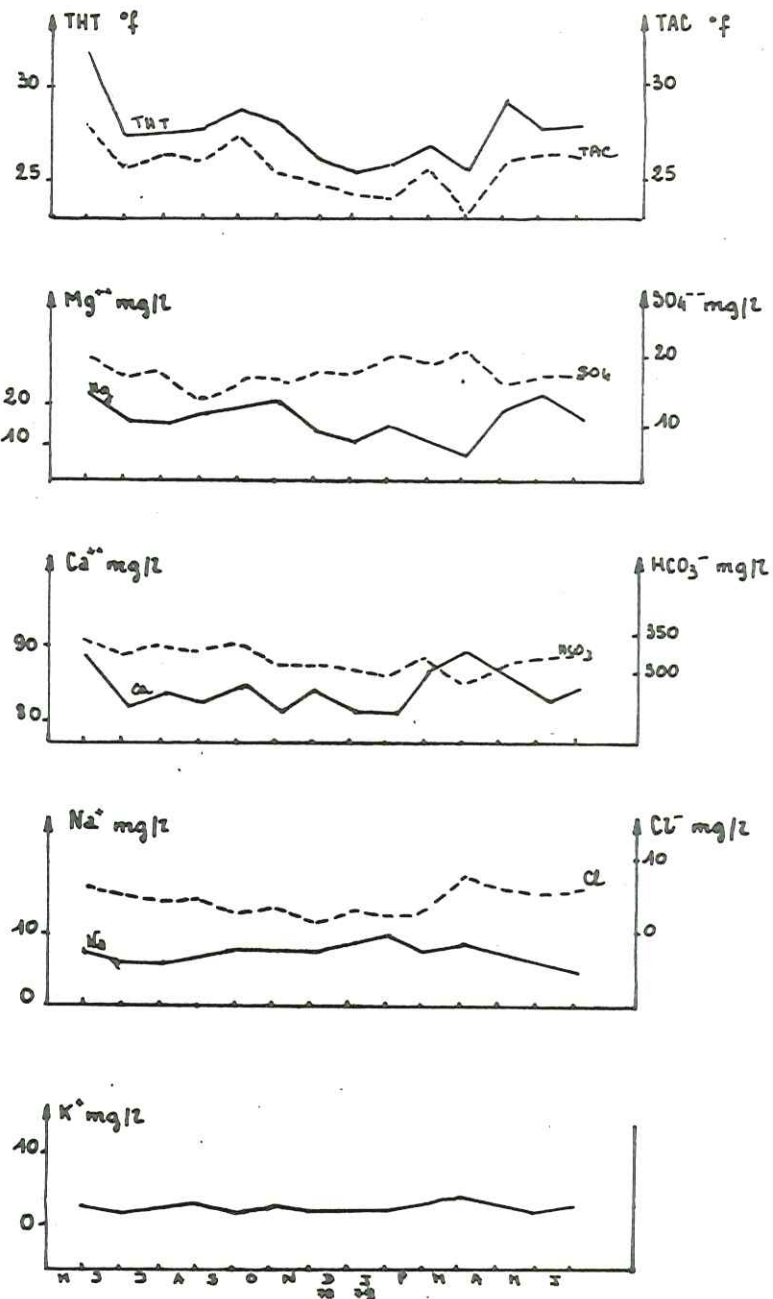


Fig. 41 Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques de la source Les Moulins



Diagramme Schoeller-Berkaloff

La représentation graphique du chimisme de cette source sur un diagramme Schoeller (cf. figure 40) est identique à celle de la source Leray, avec cependant des teneurs plus faibles en sodium, chlorures et sulfates.

Ainsi, la formule caractéristique de la source Les Moulins est la même que celle de la source Leray à savoir :

$$\text{et} \quad \begin{array}{l} r_{Ca} > r_{Mg} > r_{Na} > r_K \\ r_{HCO_3} > r_{SO_4} > r_{Cl} \end{array}$$

Evolution des paramètres dans le temps

L'évolution dans le temps des principaux paramètres chimiques est notée sur la figure 41.

Le THP et le TAC montrent un maximum en mai-juin et un minimum en décembre janvier.

Le minimum observé pour les chlorures se situe au mois de novembre et le maximum vers le mois de mai.

Cette source présente un minimum pour les sulfates en août et un maximum en décembre.

Matrice de corrélation

Ca	*Mg	*Na	*K	*Cl	*SO <sub>4</sub>	*HCO <sub>3</sub>	*SiO <sub>2</sub>	*Res	*T	*
+1.00	-0.00	-0.12	+0.68	+0.54	+0.32	+0.14	-0.49	-0.26	+0.01	Ca
	+1.00	-0.62	-0.24	+0.15	-0.36	+0.85	+0.21	-0.07	+0.60	Mg
		+1.00	-0.24	+0.51	+0.47	-0.71	+0.23	+0.33	-0.72	Na
			+1.00	+0.80	+0.18	-0.15	-0.65	-0.29	+0.12	K
				+1.00	+0.08	+0.13	-0.53	-0.49	+0.53	Cl
					+1.00	-0.39	+0.15	-0.12	-0.53	SO <sub>4</sub>
						+1.00	+0.13	-0.24	+0.62	HCO <sub>3</sub>
							+1.00	-0.12	-0.33	SiO <sub>2</sub>
								+1.00	-0.18	Res
									+1.00	T

La matrice de corrélation montre que, comme précédemment, l'ion Cl<sup>-</sup> est bien corrélé avec les ions Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup>. Les bicarbonates présentent une bonne corrélation avec le magnésium.

Ainsi les dolomies triasiques sont susceptibles d'être à l'origine des ions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et Mg<sup>+</sup>.

F - La Source dite de "La Verpillère"

Composition chimique moyenne de cette source :

	MOYENNE (mg/l)	ECART-TYPE
Ca	135.71	22.18
Mg	16.4	5.66
Na	5.5	1.1
K	1.8	0.47
Cl	4.5	1.08
SO <sub>4</sub>	170.7	22.09
HCO <sub>3</sub>	274.3	14.56
SiO <sub>2</sub>	10.9	1.18
Res	1403.57	122.08
T	11.4	1.2

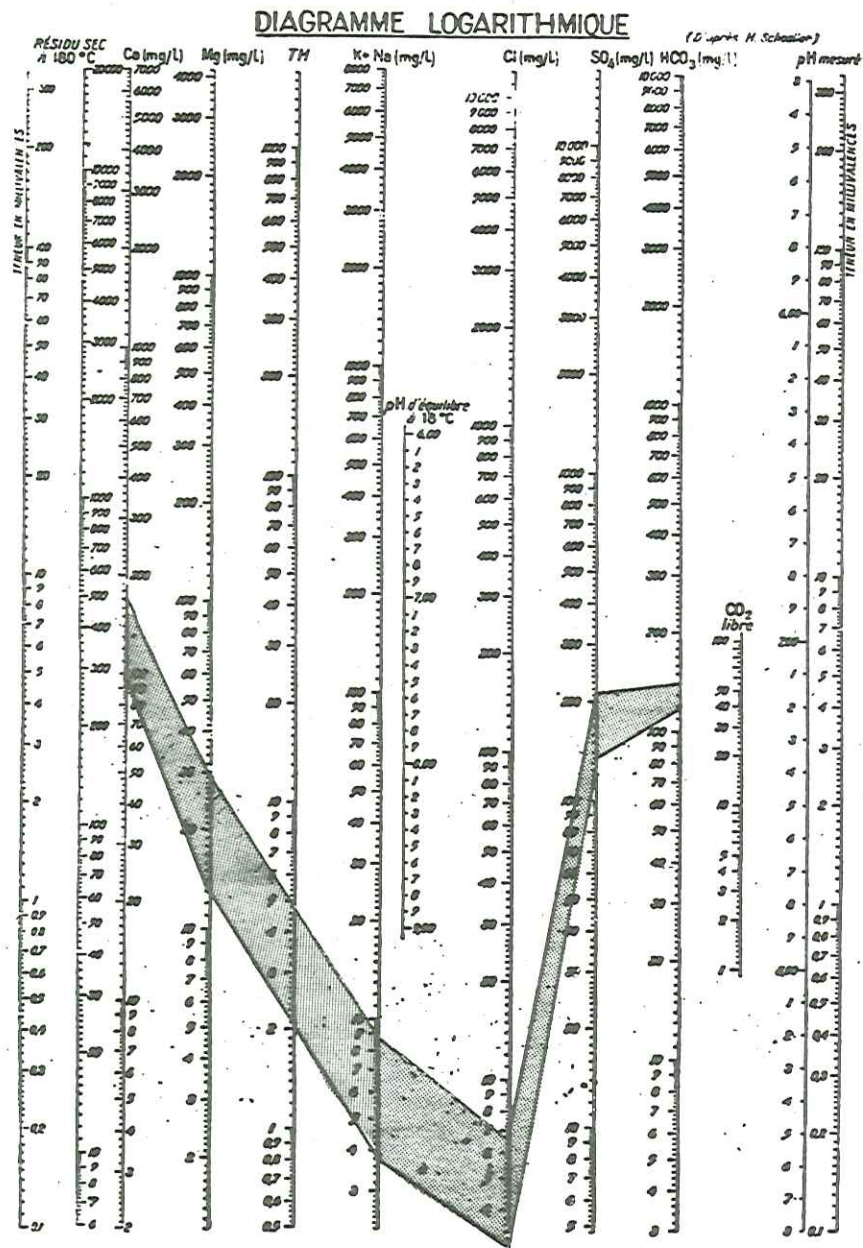


Fig. 42 - Source La Verpillière - Variation du chimisme sur diagramme Schoeller

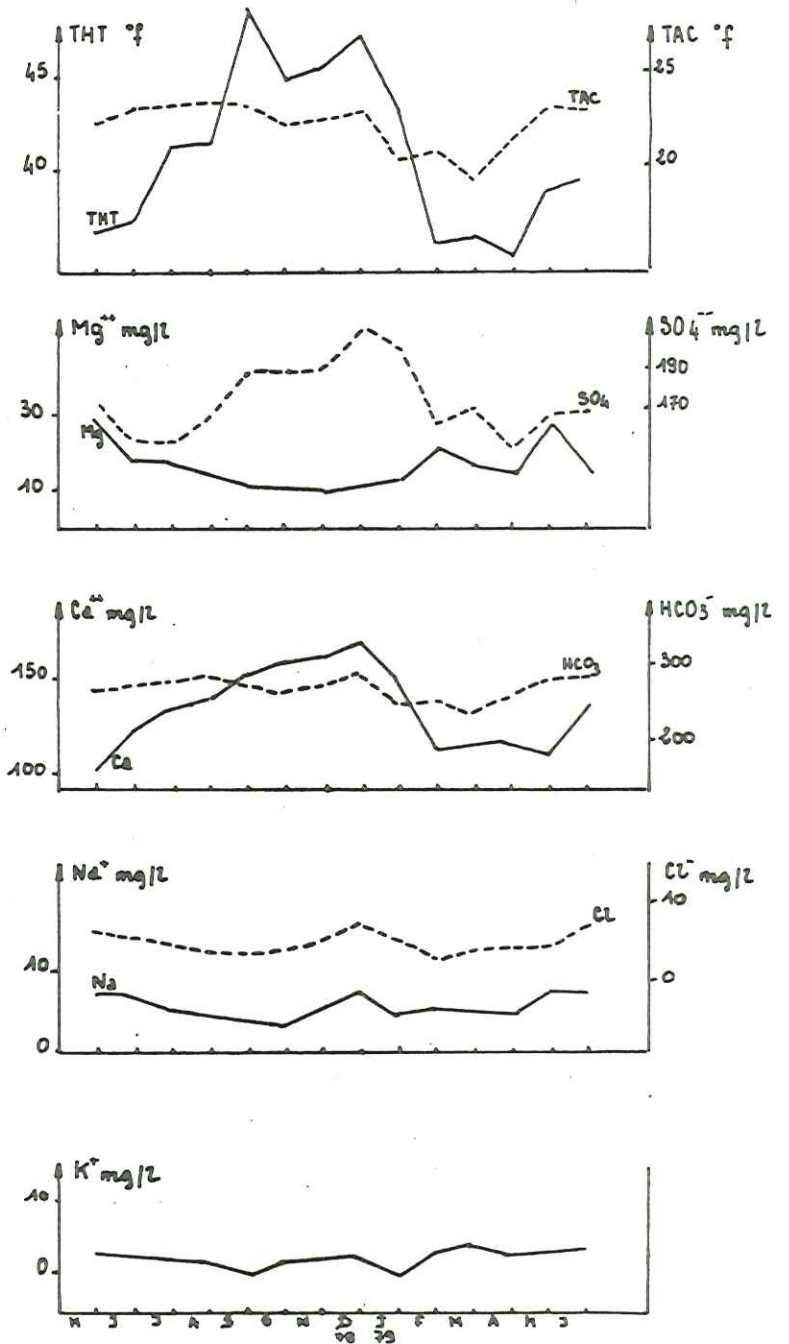


Fig. 43 Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques de la source La Verpillière



Les teneurs en calcium et sulfates sont beaucoup plus élevées que celles des sources Leray et Les Moulins. Par contre, la teneur en bicarbonates est plus faible.

#### Diagramme Schoeller

Le domaine dessiné par les deux droites brisées des minima et maxima est un peu différent de celui des sources Leray et Les Moulins (cf figure 42).

Cette modification provient de la teneur en sulfates qui est ici beaucoup plus élevée.

Le diagramme de Schoeller montre que les variations des teneurs en calcium et sulfates sont plus importantes.

Malgré ces différences, la formule caractéristique de La Verpillère est la même que celle des deux sources précédentes.

$$\begin{array}{l} rCa > rMg > rNa > rK \\ \text{et} \quad rHCO_3 > rSO_4 > rCl \end{array}$$

#### Evolution des paramètres dans le temps

Cette évolution est matérialisée sur la figure 43. Le calcium et les sulfates montrent un maximum en décembre et un minimum en mai.

Les chlorures, le sodium et éventuellement le potassium présentent deux minima : l'un en septembre, l'autre en février, et deux maxima : un en décembre et l'autre en juin.

Les bicarbonates ont des teneurs maximales en août et minimales en janvier.

Le THT et le TAC montrent un maximum en septembre et un minimum vers le mois de mars.

Les grandes fluctuations des maxima des teneurs montrent la répercussion rapide du régime des précipitations. Les maxima des teneurs s'observent après les périodes sèches et les minima des teneurs apparaissent en contre coup des périodes à fortes précipitations (ou périodes de fontes des neiges).

#### Matrice de corrélation

La matrice de corrélation de la source La Verpillère est la suivante :

Ca	*Mg	*Na	*K	*Cl	*SO <sub>4</sub>	*HCO <sub>3</sub>	*SiO <sub>2</sub>	*Res	*T	*
+1.00	-0.81	-0.60	-0.83	+0.00	+0.77	+0.26	+0.85	-0.81	+0.28	Ca
	+1.00	+0.67	+0.63	+0.12	-0.44	+0.02	-0.51	+0.54	-0.10	Mg
		+1.00	+0.68	+0.70	-0.27	+0.16	-0.38	+0.41	-0.17	Na
			+1.00	+0.25	-0.69	-0.22	-0.75	+0.64	-0.19	K
				+1.00	+0.32	+0.12	+0.09	-0.02	-0.16	Cl
					+1.00	+0.08	+0.68	-0.60	+0.03	SO <sub>4</sub>
						+1.00	+0.39	-0.42	+0.81	HCO <sub>3</sub>
							+1.00	-0.80	+0.34	SiO <sub>2</sub>
								+1.00	-0.49	Res
									+1.00	T

Elle montre que les associations minérales qui peuvent être à l'origine des ions sont NaCl et CaSO<sub>4</sub>.

Les ions Ca et SO<sub>4</sub> d'une part et Na et Cl d'autre part sont bien corrélés positivement ce qui traduit des lessivages de gypses et de sel.

Mg et SO<sub>4</sub> ne sont pas corrélés : les eaux de la Verpillère ne lessivent donc pas de dolomies.

D'autre part, les ions Ca et HCO<sub>3</sub> ne sont pas corrélés. Ceci exprime un lessivage soit sur un parcours long de terrains homogènes constitués uniquement de gypse et chlorure de sodium soit sur un parcours bref de CaCO<sub>3</sub>, les dolomies n'ayant pas le temps d'être dissous. Cette deuxième explication est plus probable.

Ainsi, cette source ressemble aux deux sources précédemment décrites. Cependant, la source La Verpillère émerge dans des moraines remaniées dans des éboulis calcaires et gypseux ce qui explique ses teneurs plus fortes en sulfates et calcium.

#### G - La Source Barral

Nous rappelons que cette source émerge en rive gauche du Doron au contact d'un énorme paquet glissé de gypses avec la moraine.

Composition chimique moyenne de cette source :

	MOYENNE (mg/l)	ECART-TYPE
Ca	556.45	19.86
Mg	77.06	9.85
Na	4.1	0.6
K	1.6	0.17
Cl	4.46	0.48
SO <sub>4</sub>	1412.7	51.97
HCO <sub>3</sub>	187.20	6.06
SiO <sub>2</sub>	6.4	0.4
Res	465.6	24.79
T	9.58	0.36

Les teneurs en calcium, magnésium et sulfates sont beaucoup plus élevées que dans les autres sources froides environnantes. Du fait de cette augmentation de la minéralisation, la résistivité est très faible : de l'ordre de 465 Ω cm.

Le cation dominant est le calcium et l'anion dominant correspond aux sulfates.

#### Diagramme Schoeller-Berkaloff

Le diagramme Schoeller de la figure 44 montre que les variations des teneurs sont comparables à celles des autres sources froides étudiées, sauf peut-être pour les chlorures qui présentent des valeurs extrêmes plus rapprochées.

La formule caractéristique de la source Barral se déduit de ce diagramme :

$$rCa > rMg > rNa > rK$$

$$\text{et } rSO_4 > rHCO_3 > rCl$$

#### Evolution des paramètres dans le temps (figure 45)

Le calcium et les sulfates montrent des minimums en février et des maximums en juin.

Les concentrations en bicarbonates sont minimales en hiver et maximales en septembre.

Le THP est maximal en juin et minimal en décembre.



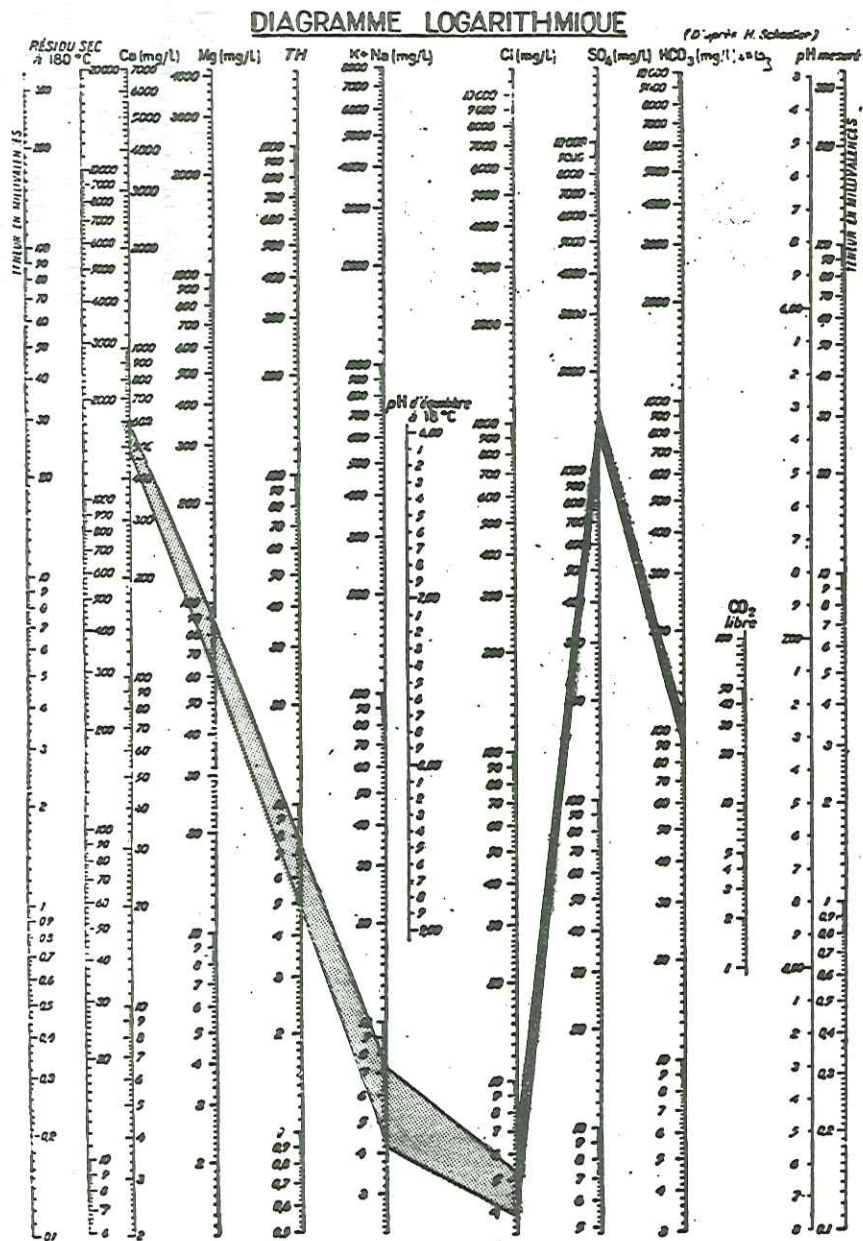


Fig. 44 - Source Barral - Variation du chimisme sur diagramme Schoeller

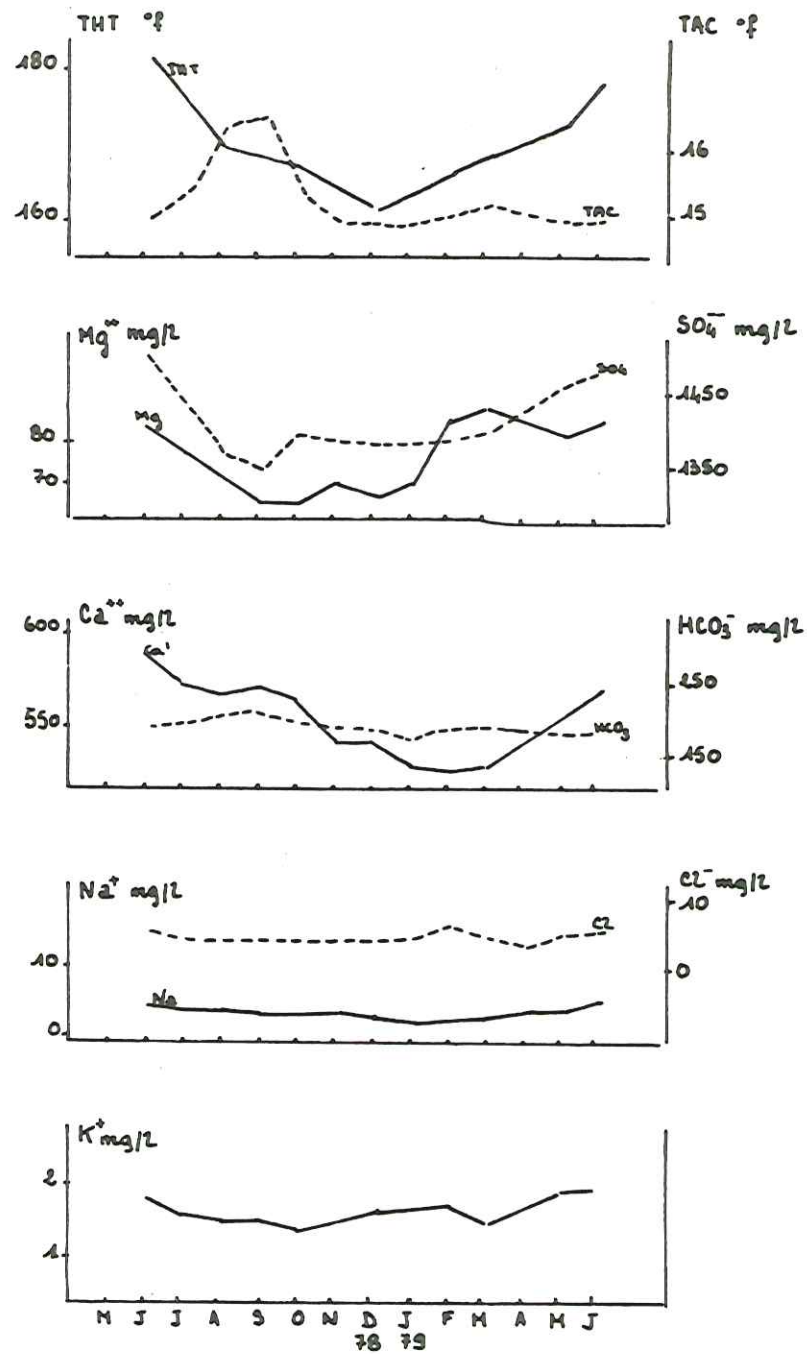


Fig. 45 Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques de la source Barral

Matrice de corrélation

La matrice de corrélation de cette source est la suivante :

Ca	*Mg	*Na	*K	*Cl	*SO4	*HCO3	*SiO2	*Res	*T	*
+1.00	-0.12	+0.95	+0.21	+0.20	+0.56	+0.32	+0.06	-0.85	+0.37	Ca
	+1.00	-0.11	+0.56	+0.90	+0.61	-0.48	-0.69	-0.13	-0.45	Mg
		+1.00	+0.14	+0.19	+0.53	+0.33	+0.05	-0.78	+0.38	Na
			+1.00	+0.58	+0.70	-0.53	-0.20	-0.29	+0.23	K
				+1.00	+0.69	-0.25	-0.78	-0.39	-0.46	Cl
					+1.00	-0.49	-0.29	-0.74	+0.06	SO4
						+1.00	+0.08	+0.05	+0.06	HCO3
							+1.00	+0.11	+0.83	SiO2
								+1.00	-0.13	Res
									+1.00	T

Les sulfates présentent des coefficients de corrélations non négligeables avec les ions  $Ca^+$ ,  $Mg^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  et  $Cl^-$ . Ceci vient peut-être du fait que les gypses très solubles se trouvent ici en grandes quantités.

H - Le Doron de Bozel à Brides-les-Bains

La composition chimique du Doron à Brides étant pratiquement identique à celle du Doron à Salins-les-Thermes (station située à 6 km en aval de Brides les Bains), nous n'avons calculé qu'une seule matrice de corrélation pour les deux prélèvements. La description chimique qui suit servira donc pour le Doron aux deux stations thermales de Brides-les-Bains et Salins-les-Thermes.

L'analyse chimique moyenne du Doron est la suivante :

	MOYENNE (mg/l)	ECART-TYPE
Ca	161.53	50.6538
Mg	24.69	10.4356
Na	7.15	3.0315
K	1.58	0.6322
Cl	5.47	2.3413
SO4	382.9	122.1485
HCO3	110.31	36.5641
SiO2	5.9	1.1873
Res	1383.9	391.5394
T	6.04	3.0867

Les écarts-types montrent que les variations des concentrations sont très importantes. L'élément le plus stable, la silice, varie de 21% de part et d'autre de sa valeur moyenne, et l'élément le plus instable, la température, varie de 51%.

Tous les autres éléments montrent des variations qui vont de 30 à 40%.

Diagramme de Schoeller-Berkaloff

Le diagramme de Schoeller de la figure 46 reflète les variations importantes du chimisme. En effet, le domaine compris entre les deux droites brisées des minima et maxima est très vaste.

La formule caractéristique du Doron est :

$$r_{Ca} > r_{Mg} > r_{Na} > r_{K} \quad \text{et} \quad r_{SO_4} > r_{HCO_3} > r_{Cl}$$



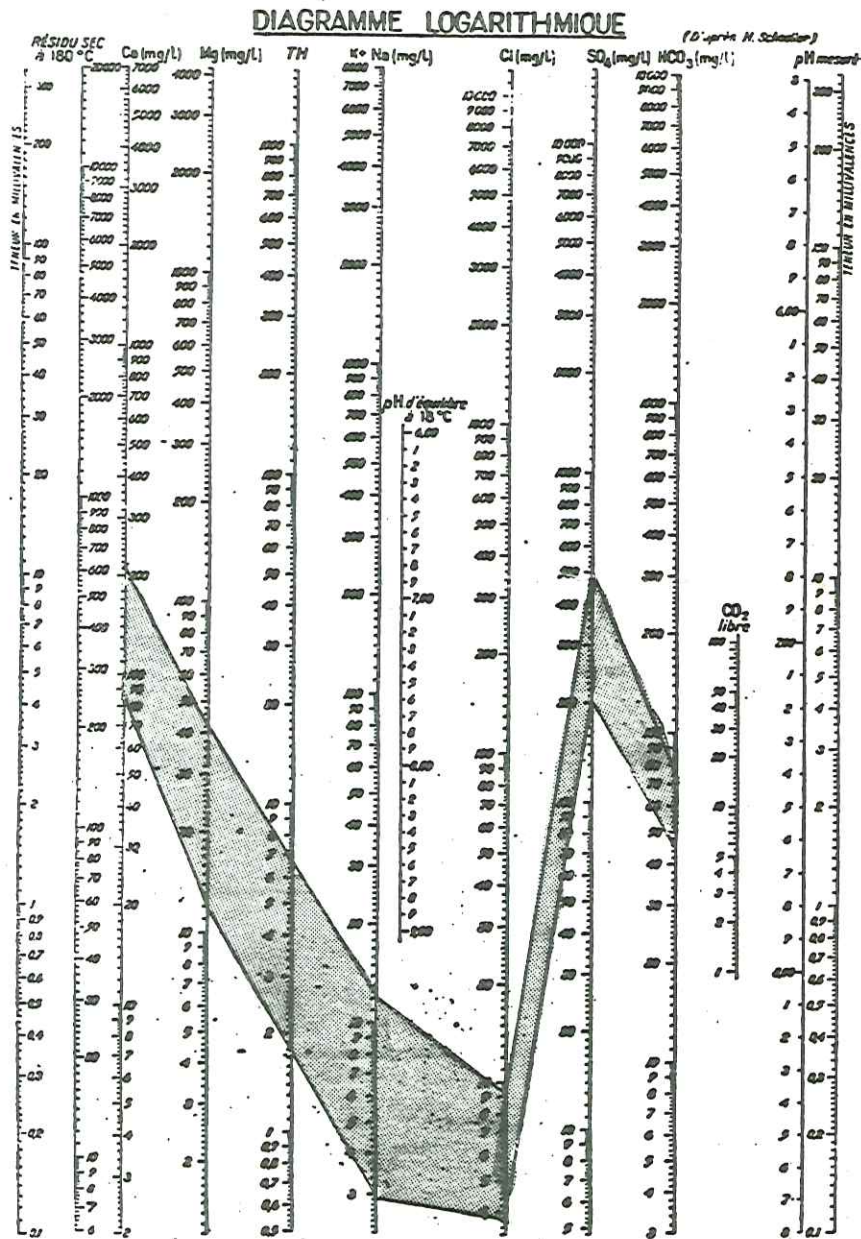


Fig.46 - Doron - Variation du chimisme sur diagramme Schoeller

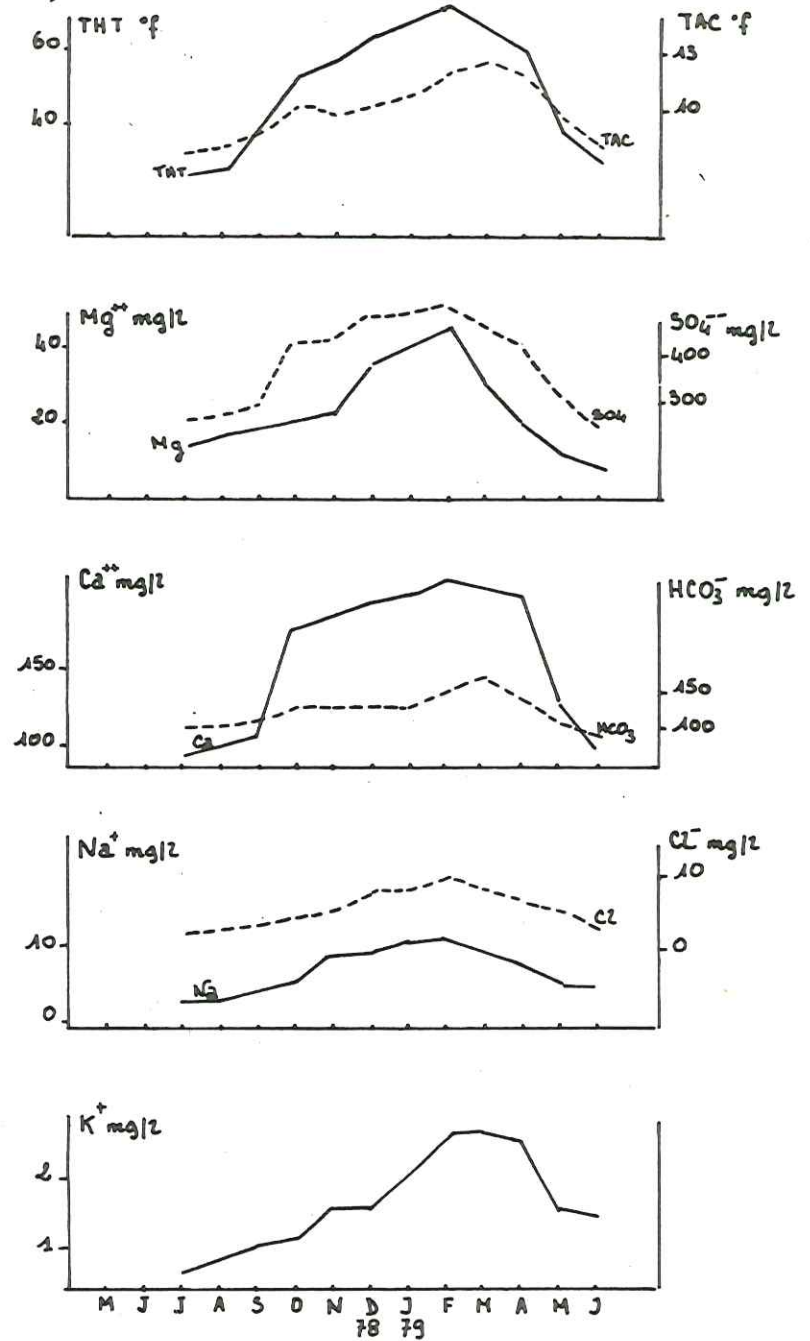


Fig. 47 Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques du Doron

### Evolution dans le temps des paramètres chimiques

Tous les éléments présentent des concentrations minimales en juin et maximales en janvier-février (cf. figure 47).

### Matrice de corrélation

La matrice de corrélation du Doron est la suivante :

Ca	*Mg	*Na	*K	*Cl	*SO <sub>4</sub>	*HCO <sub>3</sub>	*SiO <sub>2</sub>	*Res	*T	*
+1.00	+0.88	+0.93	+0.78	+0.91	+0.98	+0.24	-0.89	-0.85	-0.92	Ca
	+1.00	+0.89	+0.77	+0.89	+0.94	+0.24	-0.73	-0.83	-0.73	Mg
		+1.00	+0.85	+0.92	+0.94	+0.24	-0.85	-0.72	-0.89	Na
			+1.00	+0.89	+0.75	+0.53	-0.56	-0.57	-0.66	K
				+1.00	+0.91	+0.27	-0.71	-0.76	-0.78	Cl
					+1.00	+0.21	-0.87	-0.88	-0.88	SO <sub>4</sub>
						+1.00	-0.05	-0.22	-0.13	HCO <sub>3</sub>
							+1.00	+0.69	+0.97	SiO <sub>2</sub>
								+1.00	+0.68	Res
									+1.00	T

La plupart des coefficients qui apparaissent dans cette matrice sont élevés.

Nous pouvons cependant retenir les associations suivantes :

CaCl<sub>2</sub>, MgCl, KCl, NaCl, CaSO<sub>4</sub>.

Il faut remarquer qu'il ne ressort pas de corrélation significative reliant le calcium aux bicarbonates : ceci est peut-être du à la corrélation très forte qui relie le calcium aux sulfates.

### I - Synthèse sur la présentation chimique des sources de Brides-les-Bains

#### a) Les sources thermominérales

- Les sources Hybord et Charles Albert correspondent à la même venue hydrothermale. Leurs caractéristiques chimiques sont les mêmes ; elles déposent toutes les deux des boues rouges, mais en quantités peu importantes.

Leur minéralisation totale, très élevée ( $\approx 3,5\text{g/l}$ ) est stable au cours de l'année.

Leurs formules caractéristiques sont les mêmes, à savoir :

$$r_{\text{Na}} > r_{\text{Ca}} > r_{\text{Mg}} > r_{\text{K}} \quad \text{et} \quad r_{\text{Cl}} > r_{\text{SO}_4} > r_{\text{HCO}_3}$$

Leur température est voisine et proche de 36°C.

Leurs pH d'environ 6,8 montrent leur caractère acide.

Le débit de la source Hybord ( $\approx 3\text{ l/s}$ ) est plus fort que celui de la source Charles Albert ( $\approx 1\text{ l/s}$ ).

Les associations minérales qui sont à l'origine des ions observés dans leurs compositions chimiques sont : CaSO<sub>4</sub>, NaCl, Ca(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, KCl. Il existe cependant une prédominance des gypses et du chlorure de sodium sur les dolomies et le chlorure de potassium. Le chlorure de sodium intervient avec le plus fort pourcentage dans la minéralisation.

- La source Amont du Pont présente une composition chimique un peu différente des deux autres.



Par rapport aux sources Hybord et Charles Albert, les concentrations sont proportionnellement plus faibles de 30% pour les éléments  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , et de 70% pour les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ . La minéralisation totale est supérieure à 2,5 g/l.

La température, remarquablement constante est de 20°C et la résistivité atteint 350  $\Omega$ .cm.

Le pH moyen est de 7,3 c'est à dire légèrement basique.

Le débit, d'environ 4 l/s, est plus fort que celui des autres sources thermominérales de Brides-les-Bains, mais il présente les mêmes variations.

La formule caractéristique de la source Amont du Pont est différente de celle des sources Hybord et Charles Albert. En effet, ici, ce sont les ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{SO}_4^{--}$  qui prédominent sur les autres :

$$r\text{Ca} > r\text{Na} > r\text{Cl} > r\text{K} \quad \text{et} \quad r\text{SO}_4 > r\text{Cl} > r\text{HCO}_3$$

La minéralisation provient des mêmes associations minérales que les sources Hybord et Charles Albert avec cependant une participation plus grande des gypses que du chlorure de sodium ainsi que des calcaires et dolomies.

La source Amont du Pont ne dépose pas de boues rouges.

En définitive, les trois sources thermominérales de Brides les Bains sont voisines les unes des autres. Leur minéralisation totale élevée ne présente pratiquement pas de variations dans le temps et reste indépendante des variations du débit.

#### b) Les eaux froides superficielles

Malgré quelques différences, le chimisme des sources froides étudiées est assez voisin.

Sur diagramme Schoeller-Berkaloff, les profils se ressemblent nettement.

Les formules caractéristiques sont de deux sortes :

. soit le couple des ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{HCO}_3^-$  prédomine, sur les autres. Nous obtenons alors la formule suivante :

$$r\text{Ca} > r\text{Mg} > r\text{Na} > r\text{K} \quad \text{et} \quad r\text{HCO}_3 > r\text{SO}_4 > r\text{Cl}$$

C'est le cas des sources Leray, Les Moulins, La Verpillère. En plus, on observe à la source La Verpillère une participation plus importante des ions  $\text{SO}_4^{--}$  ( les concentrations en bicarbonates et sulfates sont presque identiques).

. soit l'ion  $\text{SO}_4^{--}$  prédomine sur l'ion  $\text{HCO}_3^-$  ce qui modifie légèrement la formule caractéristique au niveau des anions : on a alors,  $r\text{SO}_4 > r\text{HCO}_3 > r\text{Cl}$

C'est le cas de la source Barral et de l'eau du Doron.

Dans la source Barral, les rapports relatifs entre les éléments sont plus importants ; la formule devient :

$$\begin{aligned} r\text{Ca} > r\text{Mg} \gg r\text{Na} > r\text{K} \\ \text{et} \quad r\text{SO}_4 \gg r\text{HCO}_3 > r\text{Cl} \end{aligned}$$

Les différences de chimisme qui existent d'une source à l'autre proviennent de l'environnement géologique des griffons.

. les sources Leray, et Les Moulins, émergent de formations essentiellement morainiques.

. la source La Verpillère, un peu plus chargée en calcium et sulfates émerge dans des moraines remaniées avec des formations latérales de versants : éboulis, gypses.

# DIAGRAMME LOGARITHMIQUE

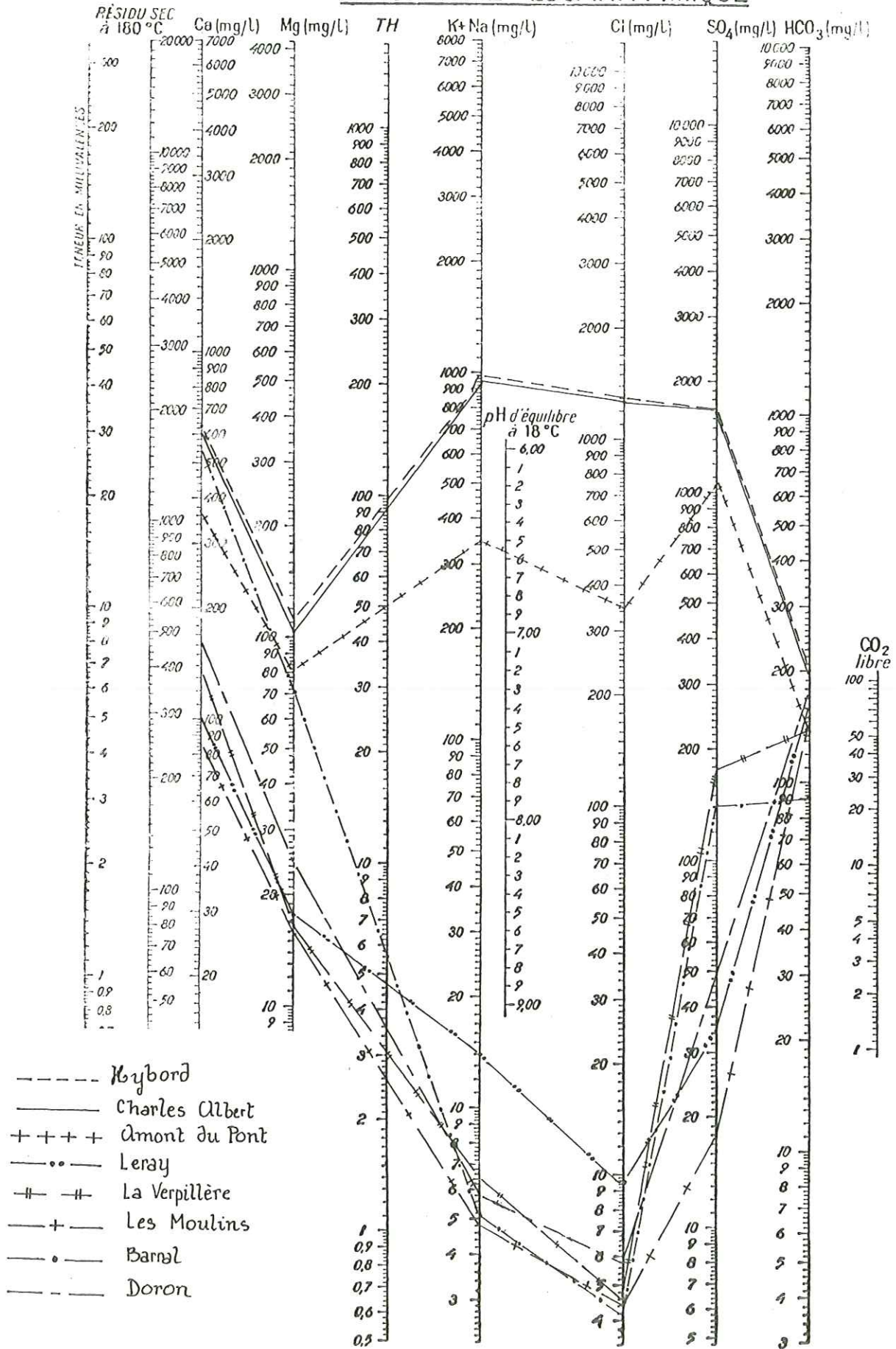


Fig. 48 - REPRESENTATION DES SOURCES DE BRIDES-LES-BAINS SUR DIAGRAMME SCHOELLER



La source Barral sort au contact de la moraine avec un paquet glissé de gypses, ce qui explique sa forte teneur en calcium et sulfates.

Comme pour les sources thermominérales, les principales associations minérales à l'origine de la minéralisation sont :  $\text{Ca SO}_4$ ,  $\text{Na Cl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{Mg SO}_4$ ,  $\text{CaCO}_3$ , c'est à dire les gypses et dolomies du Trias, les calcaires du Lias.

La forte teneur du Doron en sulfates met en évidence la très grande importance des gypses dans la constitution de son bassin versant.

#### J - Conséquences et conclusions sur Brides

Le diagramme (Schoeller) de la figure 48 rassemble toutes les sources de Brides-les-Bains étudiées.

Les profils chimiques ont été établis à partir des teneurs annuelles des eaux.

Cette figure fait nettement ressortir la différence du chimisme entre les sources thermominérales et les eaux froides superficielles.

La position intermédiaire de la source Amont du Pont entre les eaux chaudes profondes et les eaux froides superficielles traduit la participation plus importante des eaux froides superficielles dans le chimisme de cette source.

#### III-2.2. La station thermale de Salins-les-Thermes

Dans cette station, nous étudierons successivement les sources thermominérales représentées par la Grande Source Chaude, la Petite Source Chaude et la Source Massiago ; puis les sources froides minéralisées qui sont la Source Froide et la Source du Caniveau. Enfin, nous verrons les eaux de la nappe alluviale du Doron.

##### A - La Petite Source Chaude

La composition chimique moyenne de cette source est la suivante :

	MOYENNE (mg/l)	ECART-TYPE
Ca	754.7	168.3
Mg	157.65	15.59
Na	4844.07	139.18
K	97.25	7.67
Cl	7796.78	297.9
SO <sub>4</sub>	1780.7	77.8
HCO <sub>3</sub>	861.4	58.6
SiO <sub>2</sub>	40.9	0.95
Res	50.35	3.6
T	34.45	2.04

La minéralisation totale de cette source est très élevée, de l'ordre de 15g/l.

Les éléments qui présentent les plus fortes concentrations sont les ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$ .

La teneur en silice dissoute est élevée ; de l'ordre de 41 mg/l.

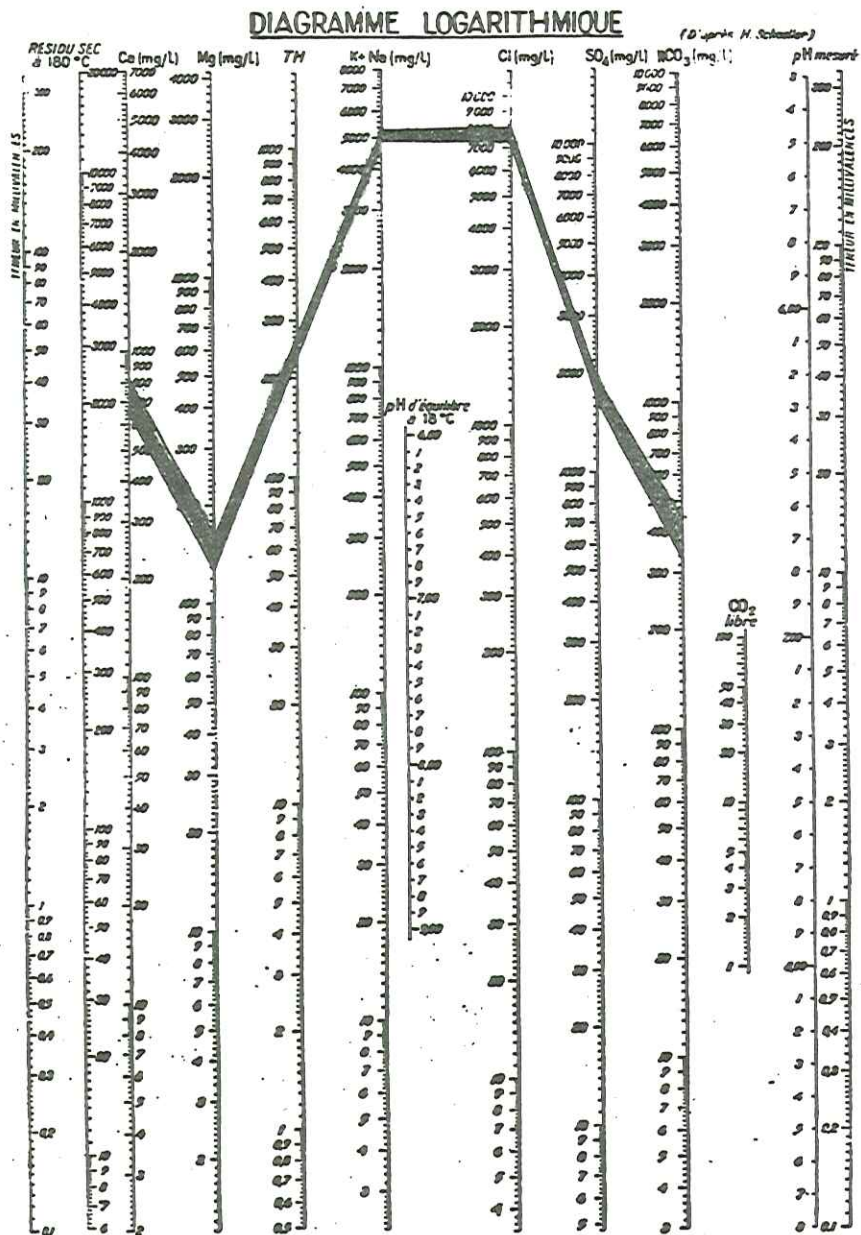


Fig. 49 - Petite Source Chaude - Variation du chimisme sur diagramme Schoeller

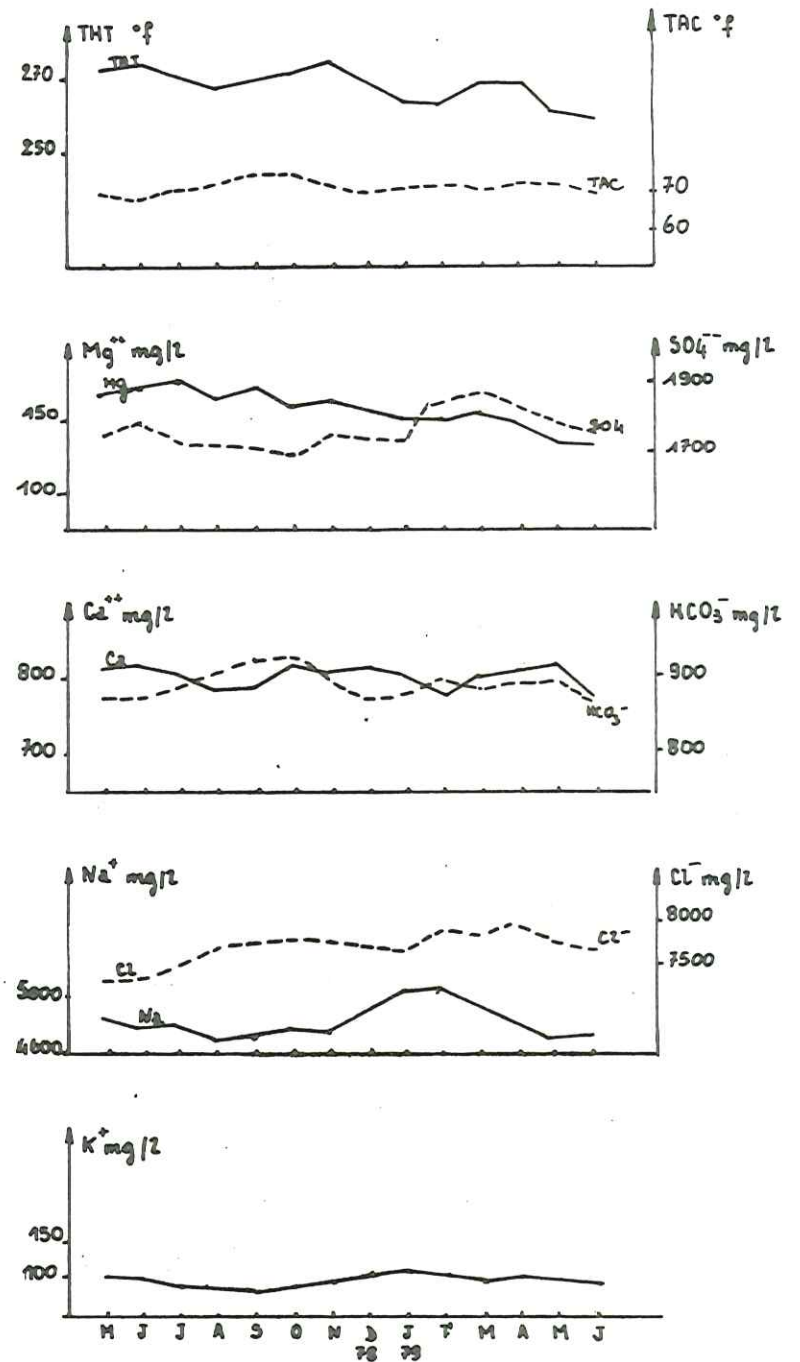


Fig. 50 Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques de la Petite Source Chaude



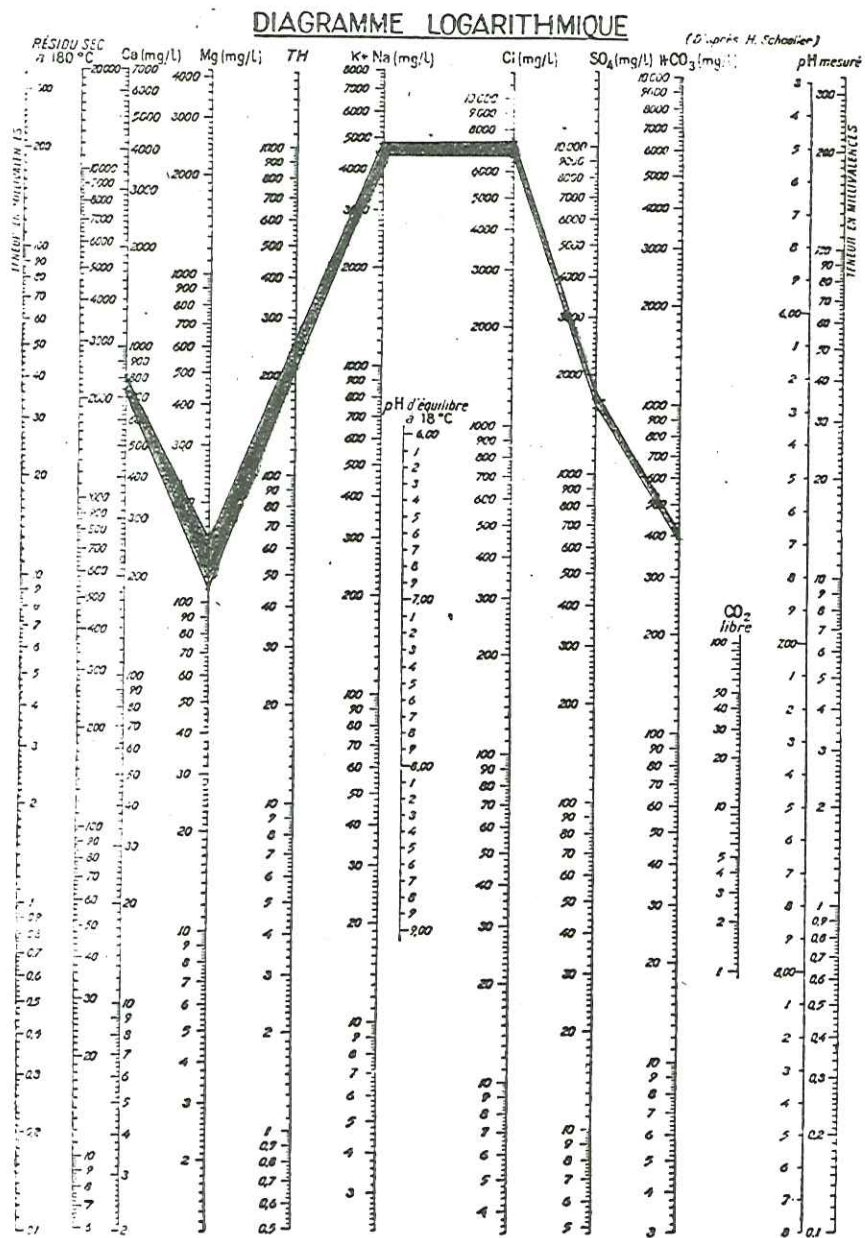


Fig. 51 - Grande Source Chaude - Variation du chimisme sur diagramme Schoeller

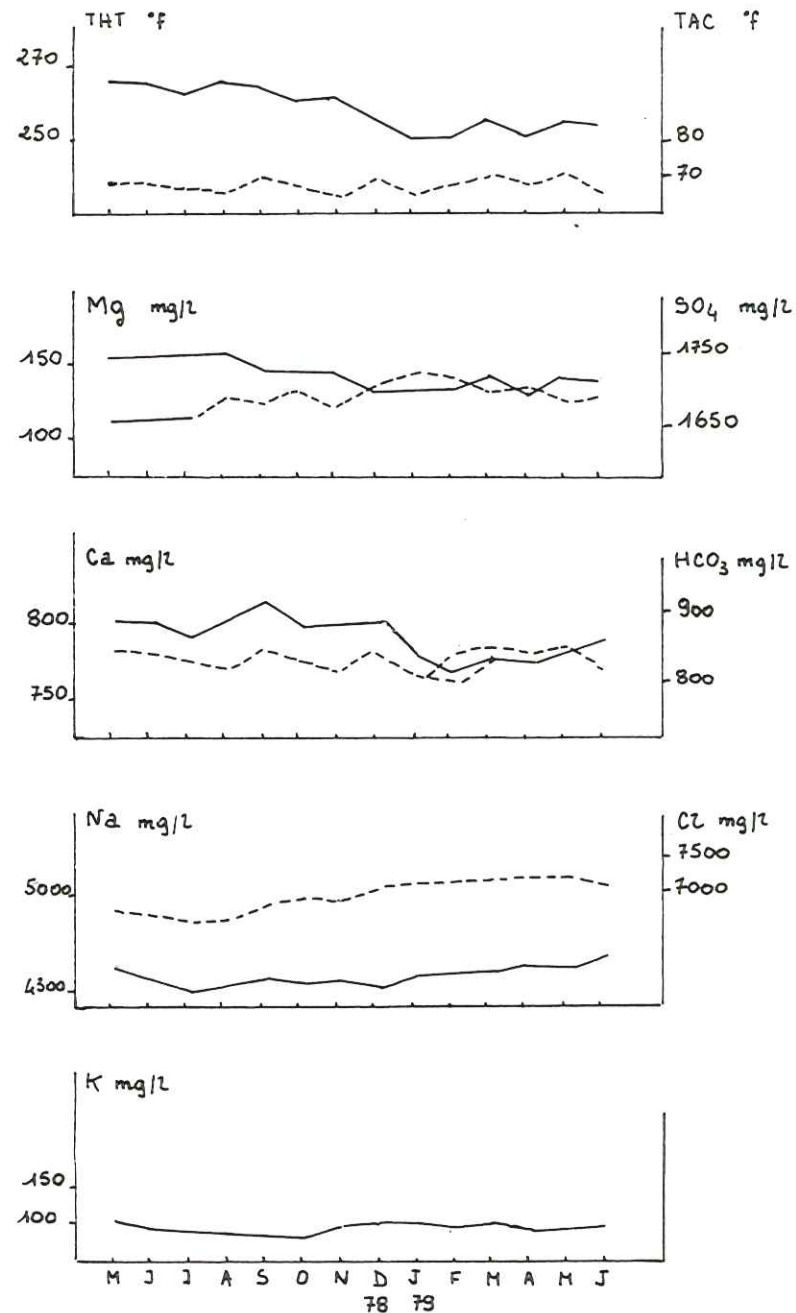


Fig. 52 Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques de la Grande Source Chaude

### Diagramme Schoeller-Berkaloff

Le diagramme Schoeller de la figure 49 montre que le domaine compris entre les deux profils des maxima et minima est très étroit compte tenu des concentrations très élevées de cette source.

La formule caractéristique est :

$$rNa > rCa > rMg > rK \quad \text{et} \quad rCl > rSO_4 > rHCO_3$$

### Evolution dans le temps des principaux paramètres

L'évolution dans le temps des principaux paramètres est matérialisée sur la figure 50. Nous voyons que les éléments chimiques ne varient pas de façon significative au cours de l'année.

Mis à part K et Na dont la corrélation est égale à 0.80, la matrice de corrélation ne montre pas de coefficients de corrélation dont la valeur absolue soit supérieure à 0.5. Ceci est du, comme pour les sources chaudes de Brides les Bains, à la grande stabilité du chimisme de cette source.

### B - La Grande Source Chaude

Cette source émerge très près de la précédente, dans les calcaires dolomitiques du Trias.

Sa minéralisation <sup>est</sup> très voisine de celle de la Petite Source.

La moyenne en silice dissoute est de 39 mg/l. Sa minéralisation totale étant très élevée (environ 15g/l, la résistivité est très faible, de l'ordre de 55  $\Omega$  cm).

Le diagramme Schoeller de la Grande Source Chaude est représenté sur la figure 51. On voit qu'il est identique à celui de la Petite Source Chaude, ainsi que la formule caractéristique qui s'en déduit :  $rNa > rCa > rMg > rK$  et  $rCl > rSO_4 > rHCO_3$ .

### Evolution des éléments dans le temps

Les variations des principaux paramètres chimiques sont notées sur la figure 52.

Comme pour la Petite Source Chaude, aucun coefficient de corrélation significatif ne ressort de la matrice de corrélation de la Grande Source Chaude.

### C - La Source Massiago

Nous rappelons que cette source émerge à la sortie amont de Salins les Thermes dans les calcaires dolomitiques triasiques.

La composition chimique moyenne de cette source est voisine de celle des deux sources précédentes :

	MOYENNE (mg/l)	ECART-TYPE
Ca	620.87	10.26
Mg	120.05	3.05
Na	2150.	106.01
K	40.25	7.6
Cl	2100.0	234.56
SO4	1473.0	23.59
HCO3	734.46	41.8
SiO2	29.2	0.7
Res	96.0	14.7
T	291.7	2.1



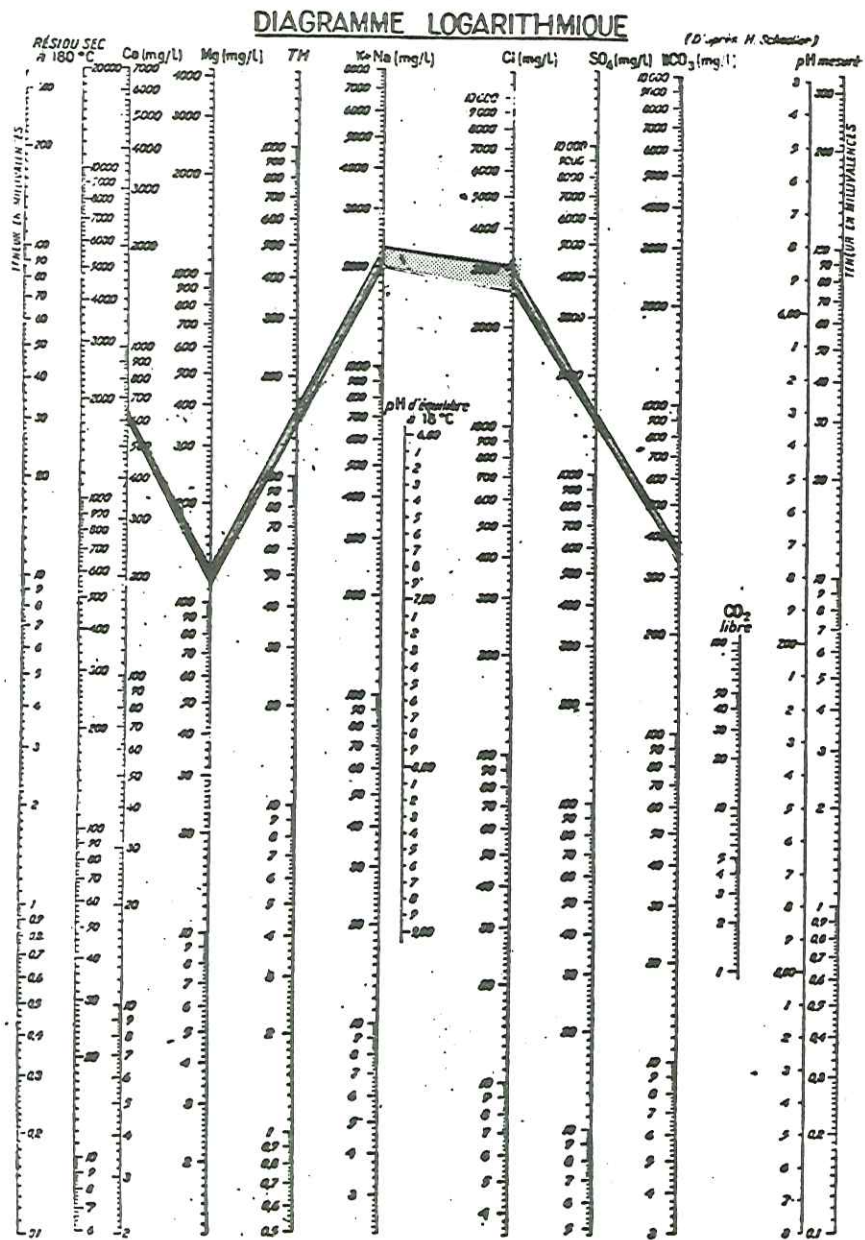


Fig. 53 - Massiagio - Variation du chimisme sur diagramme Schoeller

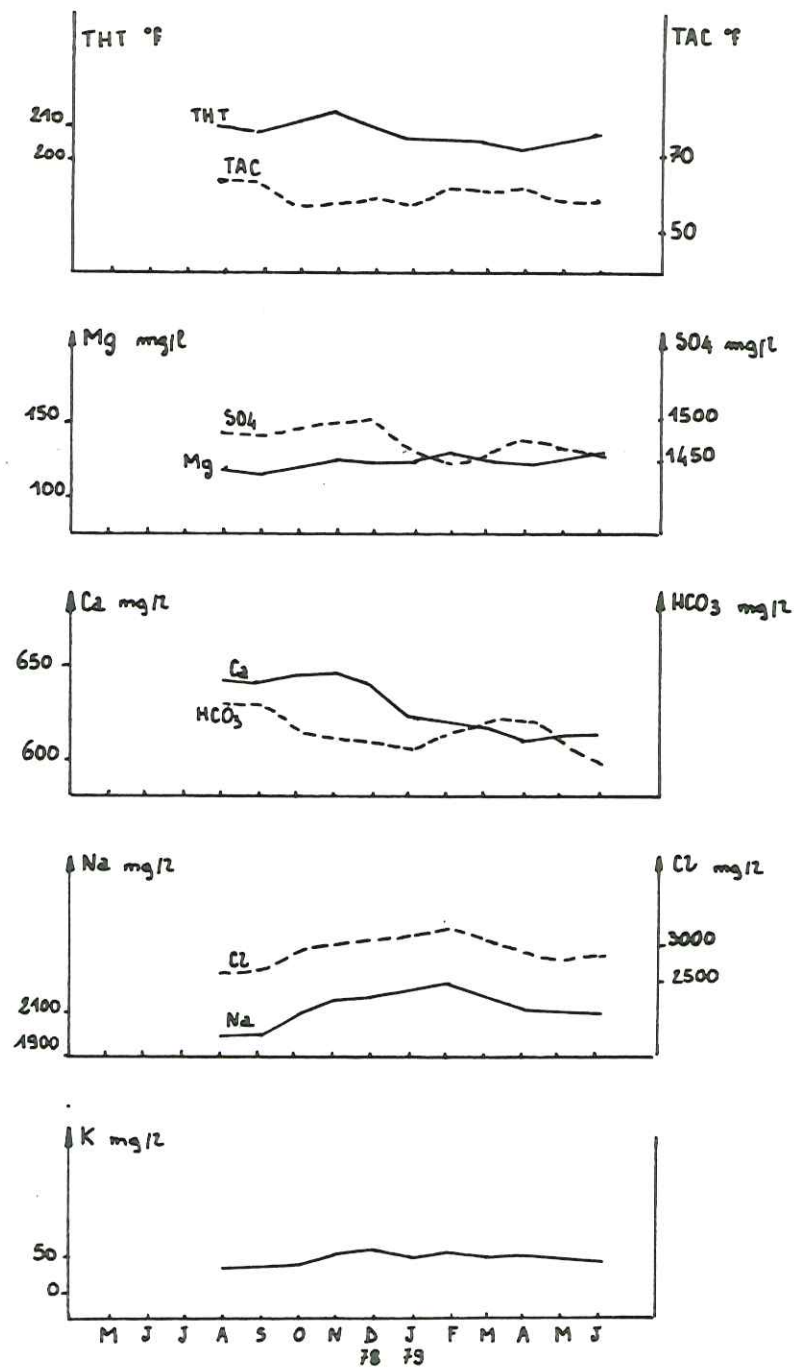


Fig. 54 Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques de la source Massiagio

Les concentrations en  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_2$  représentent environ 80% des concentrations des autres sources thermominérales décrites ci-dessus. Par contre les teneurs en  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Cl}^-$  ne représentent que 45% des teneurs en  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Cl}^-$  de la Petite Source Chaude et de la Grande Source Chaude.

#### Diagramme de Schoeller-Berkaloff

La représentation graphique de la source Massiago sur diagramme de Schoeller-B. apparaît sur la figure 53. Les deux profils correspondant aux minima et maxima des concentrations délimitent un domaine étroit témoignant des faibles fluctuations du chimisme.

Bien que la minéralisation totale de cette source soit plus faible que celle des deux précédentes, la formule caractéristique est la même, à savoir :

$$r_{\text{Na}} > r_{\text{Ca}} > r_{\text{Mg}} > r_{\text{K}} \quad \text{et} \quad r_{\text{Cl}} > r_{\text{SO}_4} > r_{\text{HCO}_3}$$

#### Evolution dans le temps des principaux paramètres.

La figure 54 montre l'évolution dans le temps des principaux paramètres. Nous voyons que tous les éléments ne présentent pas de fluctuations inter-prétables.

#### Matrice de corrélation

La matrice de corrélation de la Source Massiago est la suivante :

Ca	*Mg	*Na	*K	*Cl	*SO4	*HCO3	*SiO2	*Res	*T	*
+1.00	-0.00	-0.32	-0.30	-0.41	+0.69	-0.16	-0.72	-0.54	-0.67	Ca
	+1.00	+0.72	+0.56	+0.65	-0.18	-0.55	-0.33	+0.03	-0.19	Mg
		+1.00	+0.67	+0.98	-0.50	-0.61	-0.15	+0.11	-0.23	Na
			+1.00	+0.69	-0.02	-0.31	-0.06	-0.24	-0.15	K
				+1.00	-0.51	-0.50	-0.03	+0.18	-0.15	Cl
					+1.00	+0.02	-0.46	-0.67	-0.42	SO4
						+1.00	+0.59	+0.15	+0.49	HCO3
							+1.00	+0.52	+0.92	SiO2
								+1.00	+0.61	Res
									+1.00	T

Les coefficients de corrélation les plus significatifs relient d'une part l'ion  $\text{Na}^+$  à l'ion  $\text{Cl}^-$  et d'autre part la température T à la teneur en silice dissoute ( $\text{SiO}_2$ ).

#### D - Les sources froides minéralisées

Elles présentent une minéralisation totale relativement élevée d'environ 1,5g/l mais se différencient cependant assez nettement des eaux chaudes minéralisées.

Ces sources dites Source Froide et Source du Caniveau sont très voisines l'une de l'autre. Pour cette raison, nous les traiterons ensemble.

Leur composition chimique moyenne est la suivante :

	MOYENNE (mg/l)	ECART-TYPE
Ca	232.97	44.9
Mg	41.67	8.65
Na	156.85	23.15
K	6.1	1.28
Cl	343.9	50.4
SO4	460.35	70.96
HCO3	191.95	13.5
SiO2	9.15	1.04
Res	559.1	104.27
T	92.35	0.66



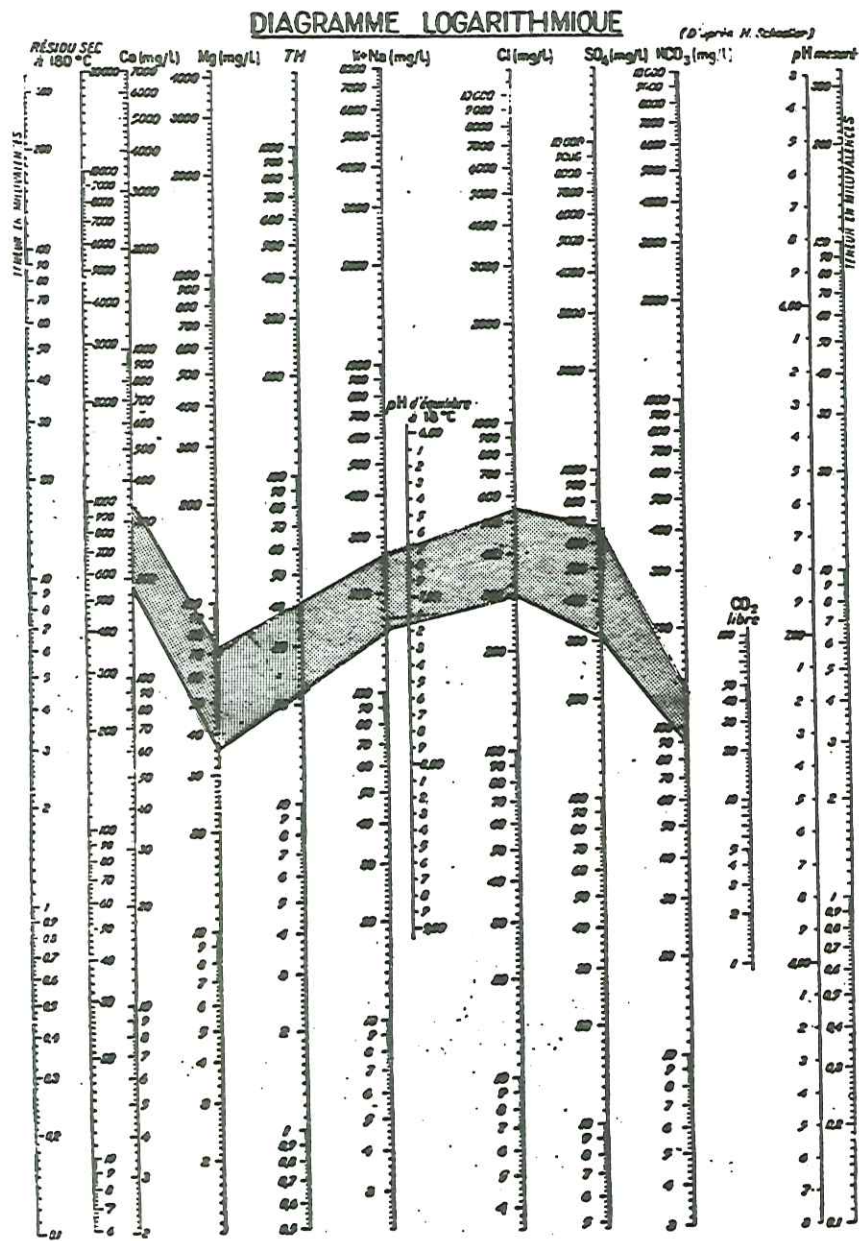


Fig. 55 - Sources Froides - Variation du chimisme sur diagramme Schoeller

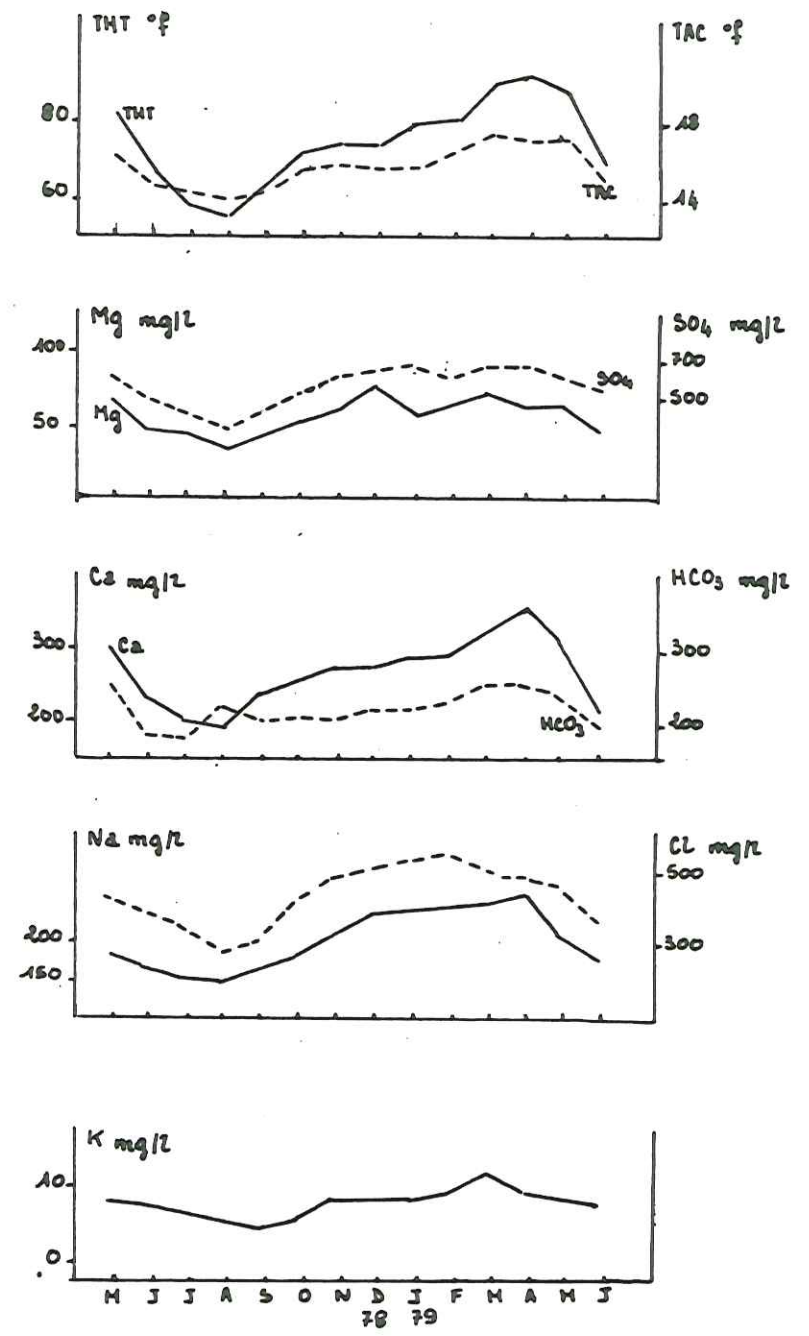


Fig. 56 Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques des Sources Froides

Le cation dominant est le calcium avec 230 mg/l et l'anion dominant est l'ion  $\text{SO}_4^{--}$  avec 460 mg/l.

Par rapport à la composition chimique des sources thermominérales des Vieux Bains, les sources froides minéralisées présentent :

- environ 5% des teneurs en  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Cl}^-$  des sources chaudes.
- environ 25% des teneurs en  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SiO}_2$  des sources chaudes.

#### Diagramme Schoeller-Berkaloff

Le diagramme Schoeller de la figure 55 montre que le domaine de variations du chimisme des sources froides minéralisées est assez grand.

La formule caractéristique qui découle de ce graphique est la suivante :  
 $r_{\text{Ca}} > r_{\text{Na}} > r_{\text{Mg}} > r_{\text{K}}$  et  $r_{\text{Cl}} > r_{\text{SO}_4} > r_{\text{HCO}_3}$

#### Evolution des paramètres dans le temps

La figure 56 montre l'évolution des paramètres chimiques dans le temps. Nous voyons que toutes les teneurs évoluent de la même façon : les concentrations maximales apparaissent pendant les mois de février-mars et les concentrations minimales pendant les mois d'août ou septembre.

#### Matrice de corrélation

La matrice de corrélation des eaux froides minéralisées calculée à partir des 12 analyses mensuelles est la suivante :

Ca	*Mg	*Na	*K	*Cl	*SO <sub>4</sub>	*HCO <sub>3</sub>	*SiO <sub>2</sub>	*Res	*T	*
+1.00	-0.00	+0.63	+0.80	+0.87	+0.76	+0.88	-0.06	-0.80	-0.41	Ca
	+1.00	+0.45	+0.31	+0.33	+0.51	+0.38	+0.20	-0.40	+0.25	Mg
		+1.00	+0.69	+0.84	+0.84	+0.69	+0.50	-0.84	+0.08	Na
			+1.00	+0.91	+0.82	+0.83	-0.18	-0.88	-0.60	K
				+1.00	+0.93	+0.91	+0.02	-0.95	-0.34	Cl
					+1.00	+0.83	+0.08	-0.95	-0.19	SO <sub>4</sub>
						+1.00	-0.05	-0.86	-0.31	HCO <sub>3</sub>
							+1.00	-0.06	+0.74	SiO <sub>2</sub>
								+1.00	+0.33	Res
									+1.00	T

A la différence des cas précédents on constate un grand nombre de coefficients de corrélation qui montre une relation linéaire significative.

Ils révèlent que les associations minérales à l'origine des ions observés sont  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaCO}_3$  ; c'est à dire que les eaux se minéralisent dans un environnement calcaire et gypseux. La mise en solution est peut-être favorisée par un temps de résidence assez long des eaux au contact des roches carbonatées.

#### E - Les eaux de la nappe alluviale et du Doron

La composition chimique de la nappe alluviale du Doron a été régulièrement suivie par des prélèvements dans les quatre piézomètres F1, F2, F3 et F4 implantés à Salins-les-Thermes entre le Doron et les sources minéralisées des Vieux Bains (cf. figure 19).

La composition chimique moyenne est à peu près similaire dans les 4 piézomètres. De ce fait, nous ne présenterons ici qu'une seule analyse chimique moyenne et une seule matrice de corrélation pour les 4 points de prélèvements.



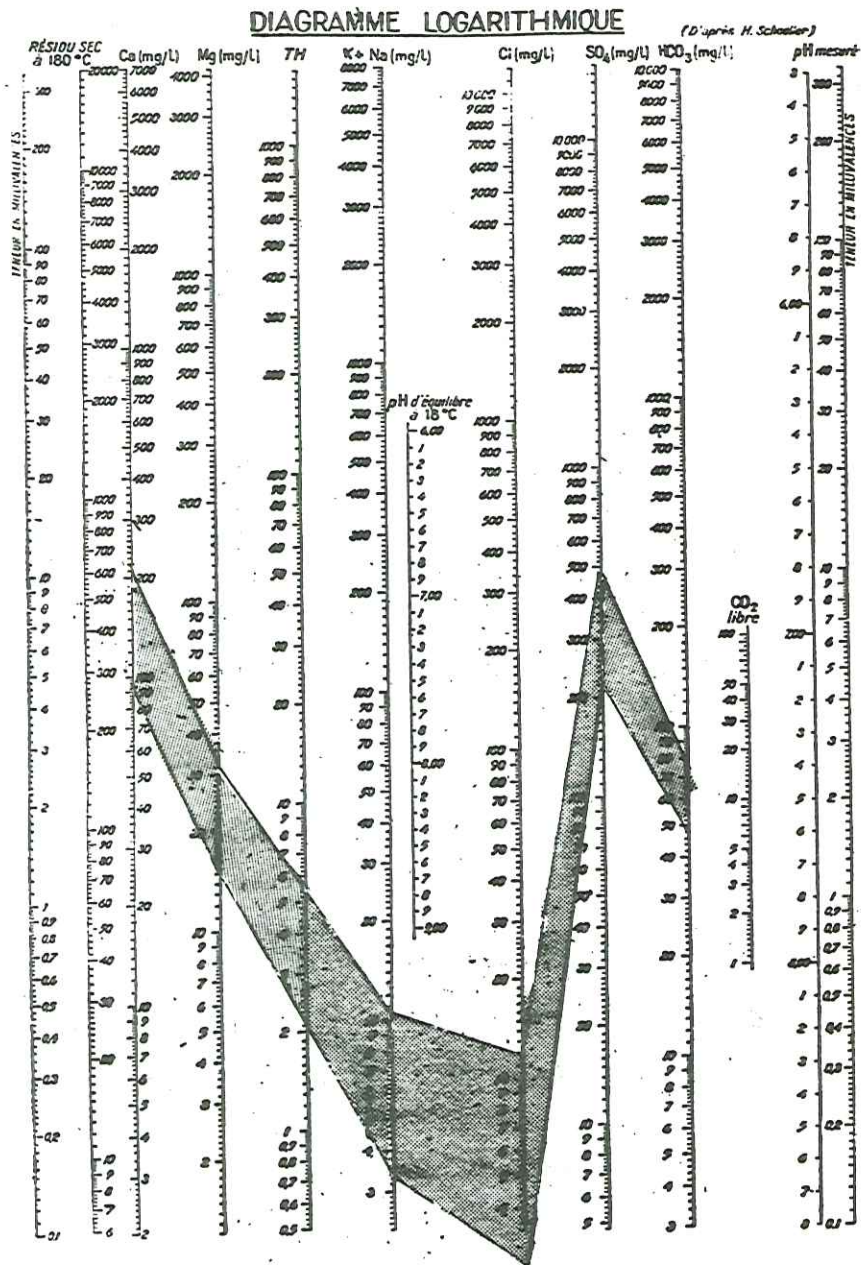


Fig. 57 - Nappe alluviale du Doron - Variation du chimisme sur diagramme Schoeller

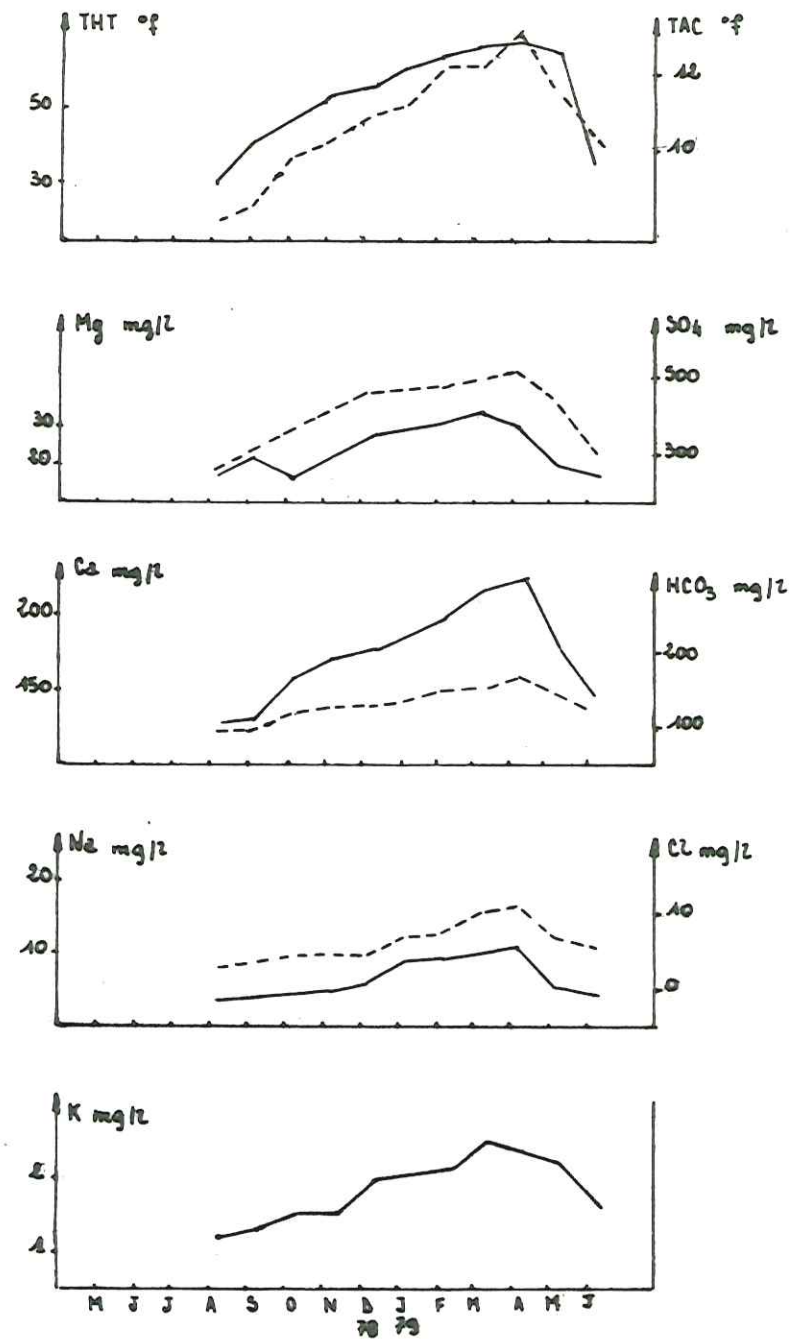


Fig. 58 Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques de la Nappe Alluviale du Doron

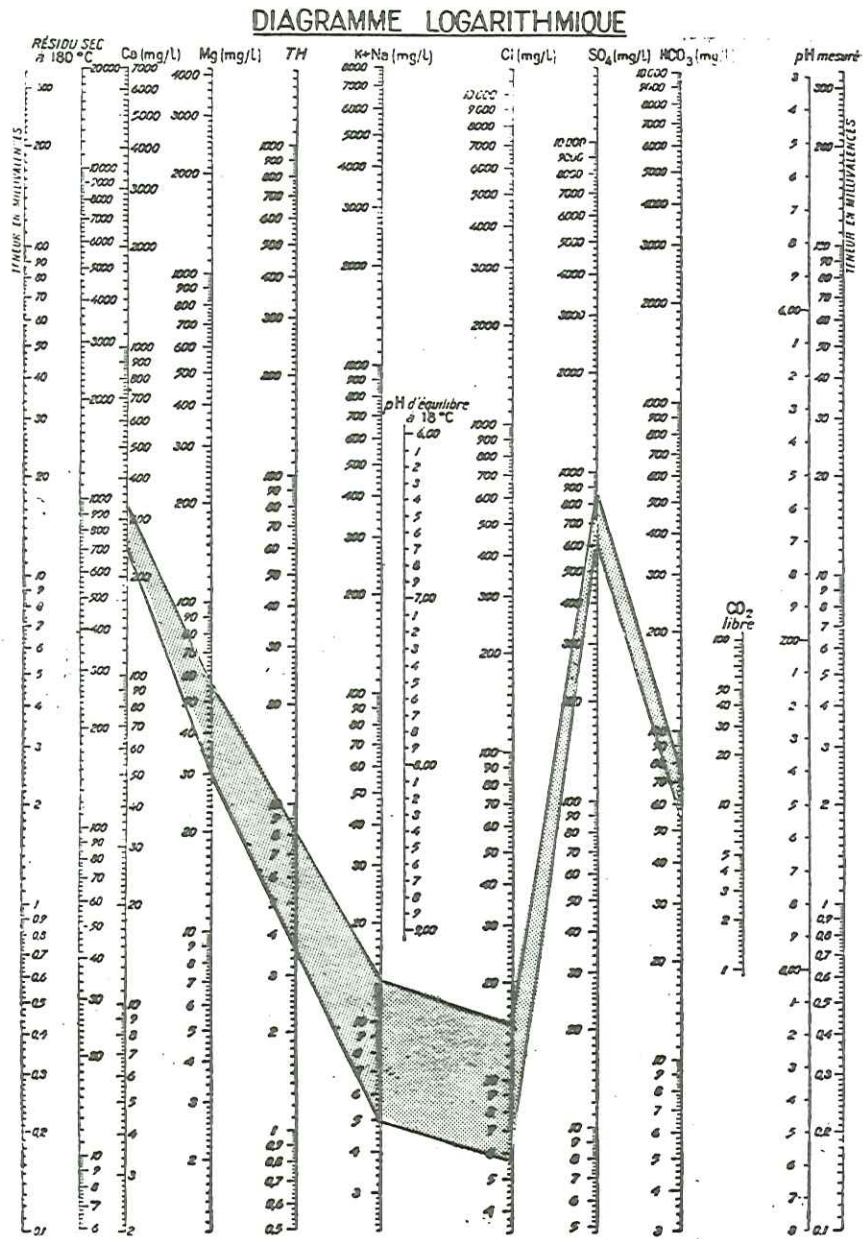


Fig. 60 - Piézomètre F 1 - Variation du chimisme sur diagramme Schoeller

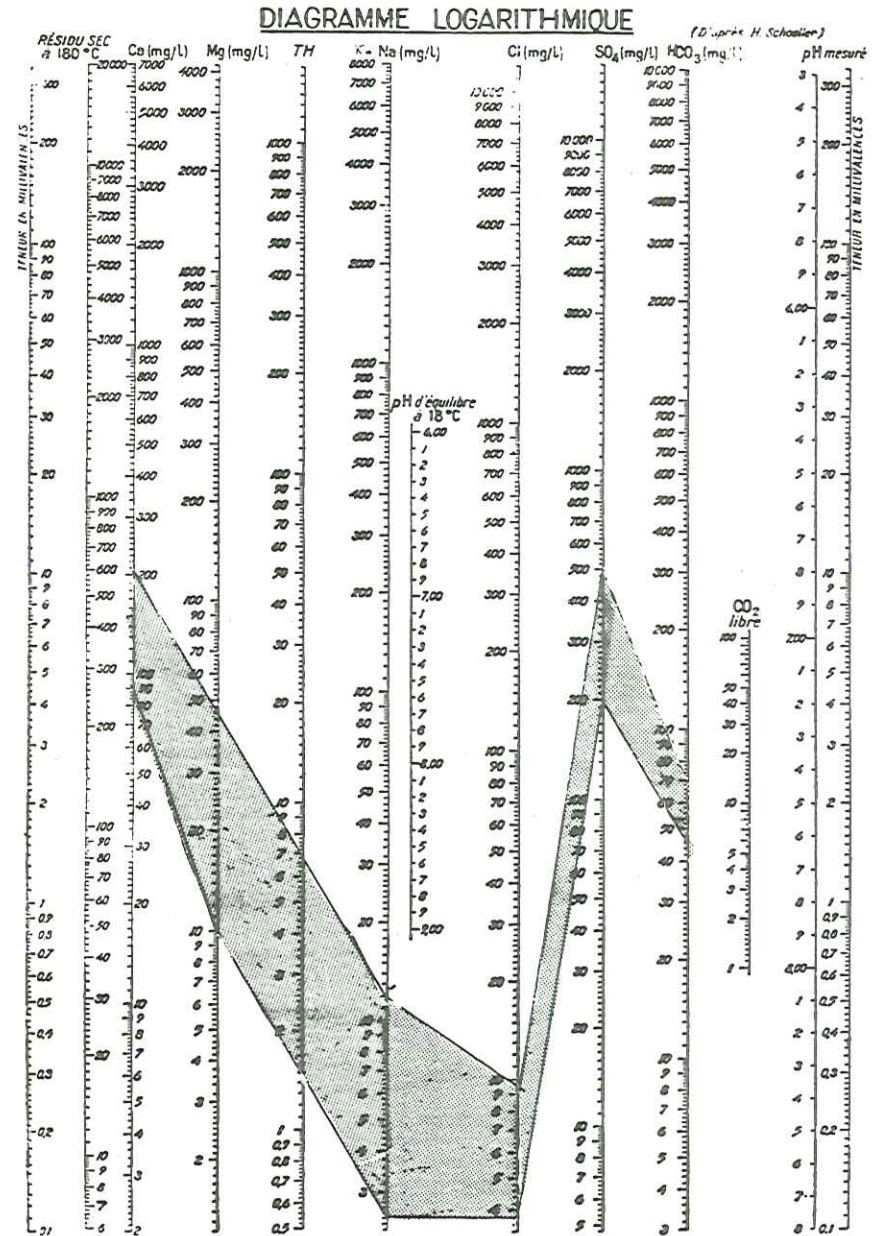


Fig. 59 - Doron - Variation du chimisme sur diagramme Schoeller



Les compositions chimiques moyennes de la nappe alluviale d'une part, et du Doron d'autre part sont les suivantes :

Nappe alluviale du Doron

	MOYENNE (mg/l)	ECART-TYPE
Ca	170.45	42.65
Mg	24.7	6.3
Na	5.9	2.67
K	1.8	0.4
Cl	6.29	2.9
SO <sub>4</sub>	394.5	94.67
HCO <sub>3</sub>	130.9	21.4
SiO <sub>2</sub>	5.52	0.6
Res	1169.60	268.4
T	7.2	2.2

Doron

	MOYENNE (mg/l)	ECART-TYPE
Ca	161.5	50.65
Mg	24.69	10.4
Na	7.15	3.0
K	1.58	0.6
Cl	5.47	2.3
SO <sub>4</sub>	382.9	122.1
HCO <sub>3</sub>	110.3	36.56
SiO <sub>2</sub>	5.8	1.18
Res	1383.9	391.5
T	6.04	3.08

Ces deux tableaux montrent que les compositions chimiques de la nappe alluviale et du Doron sont très voisines.

Les coefficients de variabilité sont cependant plus forts pour le Doron que pour la nappe.

Que ce soit dans la nappe alluviale ou dans le Doron, les ions les plus abondants sont le calcium et les sulfates.

La minéralisation totale de la nappe alluviale est assez élevée, de l'ordre de 600 mg/l.

Diagramme de Schoeller-Berkaloff

La comparaison des eaux de la nappe alluviale et du Doron sur diagramme de Schoeller (figure 57) fait ressortir des variations de composition chimique à l'intérieur de la nappe.

Les analyses chimiques des eaux prélevées dans les piézomètres F4 et F2 étant identiques, nous les avons confondues sur le même diagramme (figure 57).

Le profil du Doron (figure 59) est identique à celui établi pour les piézomètres F4 et F2 (figure 57).

En revanche, le profil établi pour le piézomètre F1, (figure 60) plus proche des émergences des sources minéralisées des Vieux Bains, présente des différences sensibles.

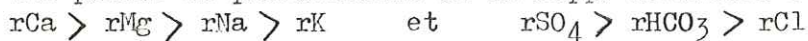
La teneur en bicarbonates de la nappe est la même que celle du Doron, mais les teneurs en ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{SO}_4^{--}$  sont deux fois plus importantes, montrant une teneur en sulfates de calcium dissous et des concentrations en ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  légèrement supérieures à celles du Doron.

Le diagramme de Schoeller de la nappe alluviale prélevée dans le piézomètre F3 est encore différent des autres : la concentration en bicarbonates est toujours la même ( $\approx 70$  mg/l). Cependant, les concentrations en sulfates et calcium sont en moyenne un peu plus fortes que celles du Doron et des piézomètres F2 et F4, et les teneurs en ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  sont à peu près 5 fois plus élevées que celles du Doron ; on observe, en effet, environ 30 mg/l de  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  pour la nappe dans F2 contre 6 mg/l dans le Doron et au maximum 15 dans F1.

#### En résumé :

- les eaux de la nappe alluviale prélevée dans les piézomètres F2 et F4 les plus proches du Doron, ont une composition chimique identique à ce dernier.
- l'eau de la nappe alluviale prélevée dans le piézomètre F3 (occupant la position la plus méridionale) et dans le piézomètre F1 (le plus proche des sources minéralisées) est influencée par les formations triasiques. Les compositions chimiques semblent traduire des roches triasiques d'une nature plus gypseuse aux alentours de F1 et plus salifère au voisinage de F3.

Malgré ces différences, la formule caractéristique reste la même pour tous les points de prélèvements de la nappe alluviale et du Doron :



#### Evolution des paramètres dans le temps

La figure 58 comparée à la figure 47 p. 82 traduit un parallélisme remarquable mais avec un décalage d'un mois entre les maximums et minimums du Doron et ceux de la nappe alluviale.

Les concentrations maximales observées dans les analyses du Doron apparaissent en hiver pendant les mois de février-mars et les concentrations minimales en été vers le mois de juillet. Les eaux de la nappe alluviale prélevées dans les piézomètres présentent des teneurs maximales en mars-avril et minimales en août.

#### Matrice de corrélation

Les matrices de corrélation de la nappe alluviale et du Doron sont les suivantes :

#### Nappe alluviale

Ca	*Mg	*Na	*K	*Cl	*SO <sub>4</sub>	*HCO <sub>3</sub>	*SiO <sub>2</sub>	*Res	*T	*
+1.00	+0.85	+0.85	+0.88	+0.85	+0.99	+0.93	-0.79	-0.85	-0.96	Ca
	+1.00	+0.96	+0.83	+0.84	+0.88	+0.78	-0.78	-0.79	-0.85	Mg
		+1.00	+0.87	+0.90	+0.87	+0.81	-0.72	-0.74	-0.84	Na
			+1.00	+0.92	+0.91	+0.94	-0.58	-0.62	-0.86	K
				+1.00	+0.87	+0.90	-0.52	-0.61	-0.81	Cl
					+1.00	+0.95	-0.76	-0.83	-0.95	SO <sub>4</sub>
						+1.00	-0.60	-0.65	-0.88	HCO <sub>3</sub>
							+1.00	+0.83	+0.88	SiO <sub>2</sub>
								+1.00	+0.82	Res
									+1.00	T



# DIAGRAMME LOGARITHMIQUE

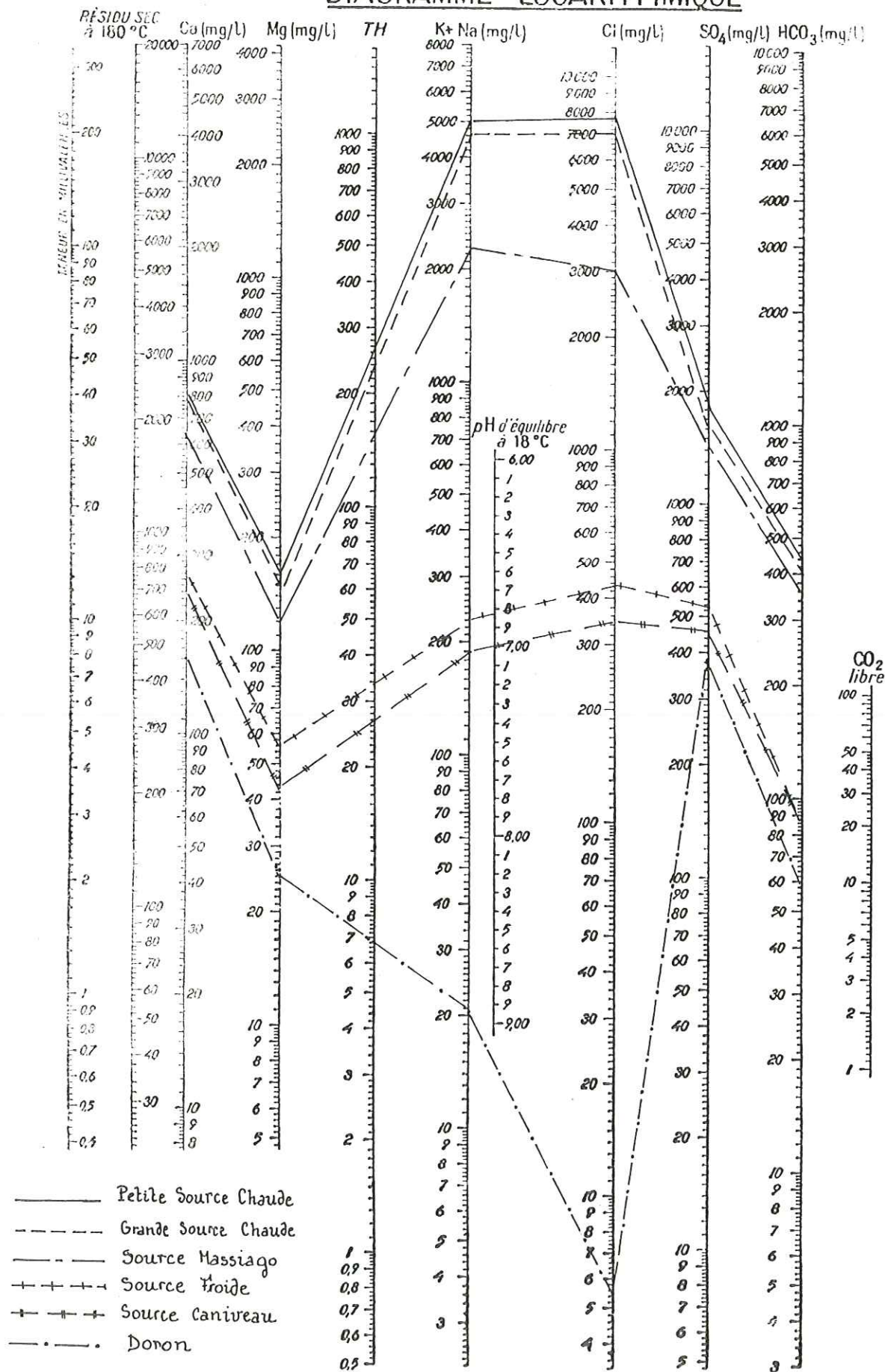


Fig. 61 REPRESENTATION DES SOURCES DE SALINS-LES-THERMES  
SUR DIAGRAMME SCHOELLER

Doron

Ca	*Mg	*Na	*K	*Cl	*SO4	*HCO3	*SiO2	*Res	*T	*
+1.00	+0.88	+0.93	+0.78	+0.91	+0.90	+0.24	-0.89	-0.85	-0.92	Ca
	+1.00	+0.89	+0.77	+0.89	+0.94	+0.24	-0.73	-0.83	-0.73	Mg
		+1.00	+0.85	+0.92	+0.94	+0.24	-0.85	-0.72	-0.89	Na
			+1.00	+0.89	+0.75	+0.53	-0.56	-0.57	-0.66	K
				+1.00	+0.91	+0.27	-0.71	-0.76	-0.78	Cl
					+1.00	+0.21	-0.87	-0.83	-0.88	SO4
						+1.00	-0.05	-0.22	-0.13	HCO3
							+1.00	+0.69	+0.97	SiO2
								+1.00	+0.68	Res
									+1.00	T

Dans la matrice de la nappe alluviale, il apparaît une bonne corrélation entre les ions  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{Ca}^{++}$  ainsi que les ions  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{Mg}^{++}$ .

Dans les deux matrices, la température est corrélée avec la teneur en silice dissoute.

#### F - Conclusion sur la chimie des eaux de Salins

A Salins, les familles d'eaux que nous avons individualisées présentent leurs particularités propres :

- \* les eaux thermominérales ont une minéralisation totale très élevée : environ 15 g/l pour les eaux chaudes des Vieux Bains et 8g/l pour les eaux de la source Massiago. Compte tenu de cette minéralisation, leurs résistivités sont très faibles :  $< 100 \Omega \text{cm}$ . Leur pH a une valeur moyenne de 6,4 et leur température est voisine de 35°C (30°C pour la source Massiago). Leur composition chimique est constante et indépendante du débit.
- \* les eaux froides minéralisées apparaissent comme un mélange d'eaux chaudes très minéralisées avec des eaux plus superficielles mais différentes de celles du Doron. Leur minéralisation totale est de l'ordre de 1,5 g/l ; leur pH est d'environ 7,3. Leur composition chimique varie au cours de l'année.
- \* les eaux de la nappe alluviale et du Doron présentent de grandes variations physico chimiques dans le temps. Leur pH est supérieur à 7,6. La nappe alluviale présente des variations chimiques dues à une hétérogénéité des formations triasiques plus gypseuses au voisinage de F1 ou plus riches en chlorure de sodium au voisinage de F3.

Le diagramme de Schoeller-B. de la figure 61 fait ressortir ces trois familles d'eaux.

### III-2.3. La Station thermale de La Léchère (Tarentaise)

Rappelons que cette station est implantée à l'Ouest des précédentes, au contact du socle cristallin de la chaîne de Belledonne avec les assises sédimentaires de la Zone Dauphinoise.

#### A - Les eaux thermominérales

Les eaux thermominérales de La Léchère forment une nappe d'eau très chaude ( $t^\circ \simeq 50^\circ$ ) qui est sollicitée par pompage. Il existe quatre points de pompage appelés Radiana 1, Radiana 2, Radiana 3 et Radiana 4 assez proches les uns des autres.





Durant notre étude, nous avons pu prélever et analyser l'eau des captages Radiana 1, 3 et 4.

Ces trois points de prélèvement présentent des caractéristiques chimiques très voisines et, de ce fait, nous les étudierons ensemble.

La composition chimique moyenne de l'eau thermominérale de La Léchère est la suivante :

	MOYENNE (mg/l)	ECART-TYPE
Ca	547.89	11.6
Mg	48.35	5.3
Na	227.8	2.57
K	19.9	1.5
Cl	122.0	4.8
SO <sub>4</sub>	1589.0	23.78
HCO <sub>3</sub>	95.6	3.2
SiO <sub>2</sub>	50.99	1.7
Res	351.1	6.3
T	52.09	0.9

Les coefficients de variation montrent que les teneurs sont très stables. Le plus fort coefficient est attribué au magnésium et atteint 11%. Tous les autres coefficients sont inférieurs à 5%.

Les ions prédominants dans l'analyse chimique sont Ca<sup>++</sup> et SO<sub>4</sub><sup>==</sup>. La minéralisation totale est élevée, proche de 2,5 g/l.

Les eaux de La Léchère présentent les plus fortes teneurs en silice dissoute et les plus fortes températures de toutes les sources thermominérales étudiées. La concentration en SiO<sub>2</sub> de ces eaux est voisine de 50 mg/l et la température est proche de 52°C.

La figure 62 montre la représentation graphique sur diagramme kSchoeller-B des eaux thermominérales de La Léchère.

La faible dispersion des teneurs de part et d'autre de l'analyse chimique moyenne des eaux se traduit sur ce diagramme par un domaine de variation très étroit.

Les profils établis pour les eaux thermominérales de La Léchère sont différents des profils caractéristiques des sources thermominérales de Brides-les-Bains et Salins-les-Thermes.

En effet, nous voyons ici que ce sont les ions Ca<sup>++</sup> et SO<sub>4</sub><sup>==</sup> qui prédominent sur les ions Na<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> alors que nous avons le contraire pour les sources de Brides-les-Bains et Salins-les-Thermes.

Ainsi, la formule chimique caractéristique des eaux thermominérales de La Léchère est la suivante :



L'évolution des éléments dans le temps est indiquée sur la figure 63. Nous voyons que les paramètres chimiques ne présentent pas de maximums et minimums distincts.

La matrice de corrélation des eaux thermominérales de La Léchère est la suivante :



Ca	*Mg	*Na	*K	*Cl	*SO4	*HCO3	*SiO2	*Res	*T	*
+1.00	-0.17	-0.03	+0.17	+0.13	+0.17	+0.09	-0.09	+0.06	-0.06	Ca
	+1.00	-0.45	-0.23	-0.72	-0.46	-0.60	+0.31	-0.43	+0.26	Mg
		+1.00	+0.48	+0.66	+0.87	+0.36	-0.39	+0.32	-0.12	Na
			+1.00	+0.74	+0.64	+0.29	-0.57	-0.34	-0.60	K
				+1.00	+0.76	+0.60	-0.70	+0.26	-0.60	Cl
					+1.00	+0.17	-0.45	+0.16	-0.18	SO4
						+1.00	-0.58	+0.57	-0.51	HCO3
							+1.00	-0.33	+0.87	SiO2
								+1.00	-0.04	Res
									+1.00	T

Comme pour les autres sources thermominérales, nous voyons que cette matrice ne possède pas de corrélations linéaires très fortes et, là encore, la stabilité chimique de l'eau en est la cause.

### B - Les eaux superficielles de l'Isère

La composition chimique moyenne de l'Isère est donnée dans le tableau suivant :

	MOYENNE (mg/l)	ECART-TYPE
Ca	143.27	26.76
Mg	19.8	6.2
Na	14.46	1.77
K	2.05	0.5
Cl	10.6	3.79
SO4	291.5	65.96
HCO3	167.9	23.9
SiO2	7.4	1.2
Res	1317.15	374.2
T	10°3	3.5

Cette analyse montre que les eaux de l'Isère sont bicarbonatées et sulfatées calcoïques.

Les valeurs élevées des écarts-types témoignent de la grande variation des concentrations.

La teneur en silice dissoute est faible : < 10 mg/l. La résistivité n'est pas très élevée : 13  $\Omega$ .cm en moyenne.

### Diagramme de Schoeller-Berkaloff

Le diagramme (Schoeller) caractéristique de l'Isère se trouve en figure 64. Le domaine de variations compris entre les profils des maximums et minimums est vaste.

Le profil chimique de l'Isère est proche de celui du Doron : les paramètres chimiques qui ressortent sont le calcium et les sulfates.

La formule caractéristique de l'Isère est :

$$rCa > rMg > rNa > rK \quad \text{et} \quad rSO_4 > rHCO_3 > rCl$$

Elle révèle encore la prédominance des ions  $Ca^{++}$  et  $SO_4^{--}$  sur les ions  $Mg^{++}$  et  $HCO_3^-$  et les ions  $Na^+$  et  $Cl^-$ .

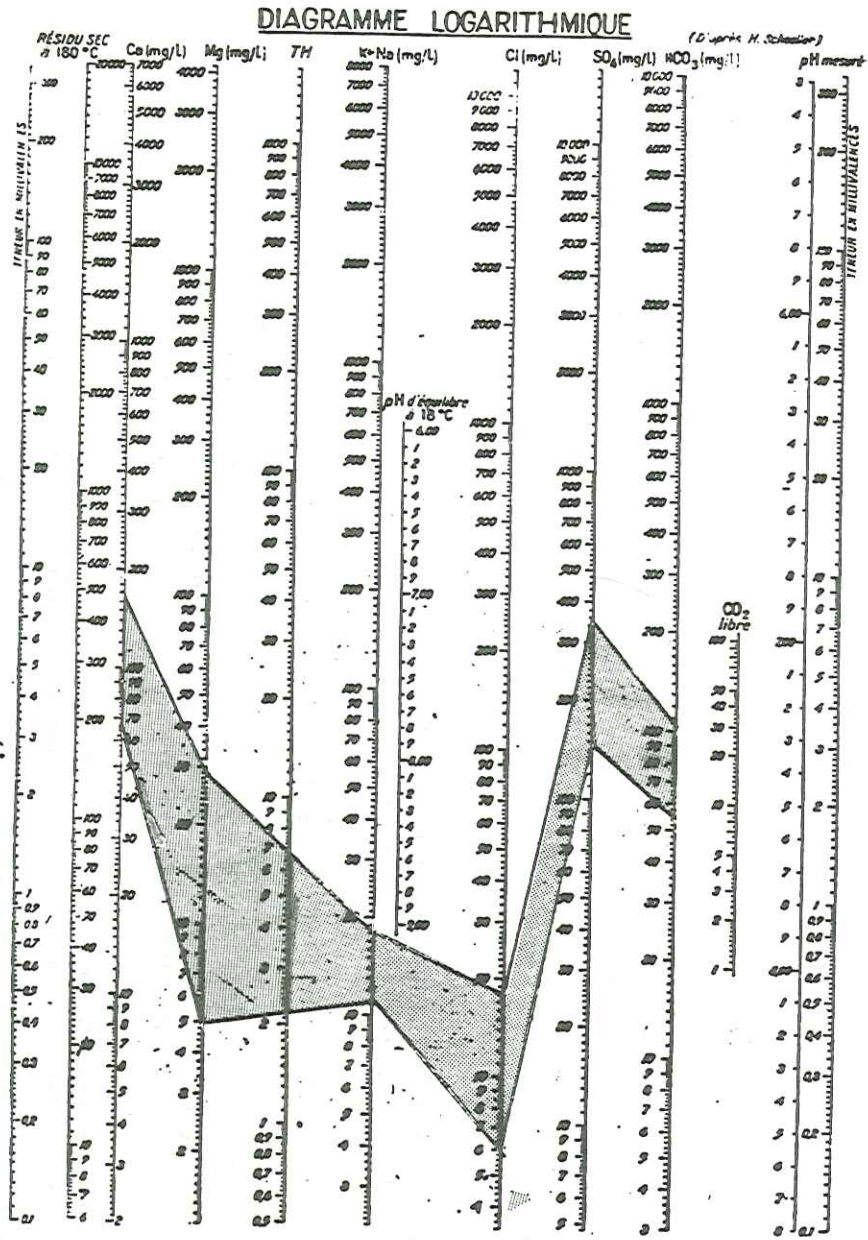


Fig. 64 - Isère - Variation du chimisme sur diagramme Schoeller

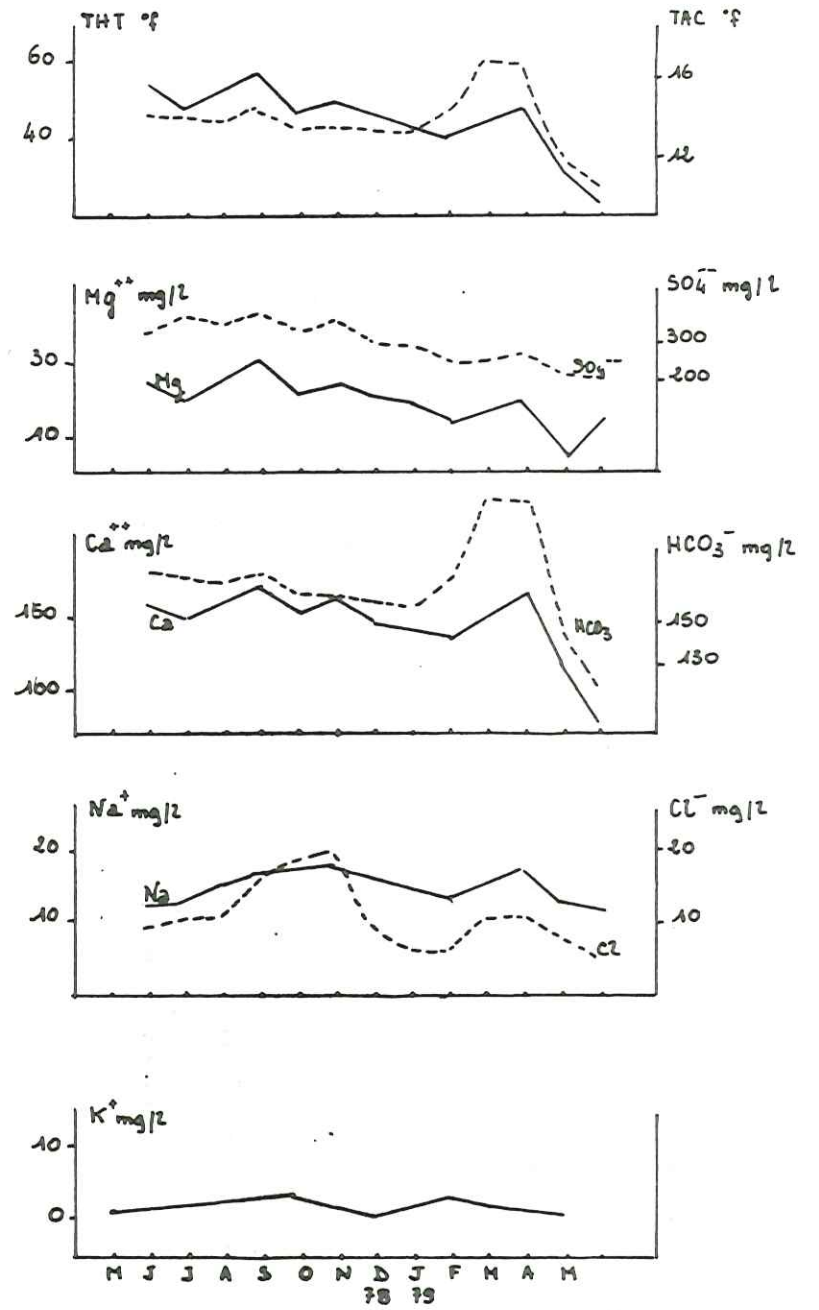


Fig. 65 Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques de l'Isère



### Evolution dans le temps des principaux paramètres

La figure 65 montre l'évolution dans le temps des principaux paramètres chimiques de l'eau de l'Isère prélevée au niveau de la station thermale de La Léchère.

Tous les paramètres présentent une évolution sensiblement identique. On peut alors observer une augmentation des teneurs en été suivie d'une diminution en automne, puis une nouvelle augmentation pendant l'hiver jusque vers le mois de février et à nouveau une diminution au printemps d'avril à juin.

Ainsi, les pluies d'automne et la fonte des neiges (avril-mai) correspondent aux concentrations minimales.

Par contre, la période chaude et sèche de l'été (juin-juillet) et la période de stockage de l'eau sous forme de neige et glace pendant l'hiver font ressortir les teneurs maximales.

La relation apparente entre les précipitations et les concentrations ressort plus nettement dans l'évolution des ions  $Ca^{++}$  et  $SO_4^{--}$ .

De juin à novembre 1978, les variations en calcium et sulfates sont brutales : ceci est dû au lessivage des gypses pendant les précipitations.

La figure 65 traduit donc l'importance des apports saisonniers dans l'alimentation de l'Isère.

### Matrice de corrélation

La matrice de corrélation de l'Isère est la suivante :

Ca	*Mg	*Na	*K	*Cl	*SO <sub>4</sub>	*HCO <sub>3</sub>	*SiO <sub>2</sub>	*Res	*T	*
+1.00	+0.66	+0.58	+0.51	+0.56	+0.84	+0.75	+0.46	-0.95	+0.48	Ca
	+1.00	+0.39	+0.10	+0.58	+0.81	+0.26	+0.52	-0.69	+0.60	Mg
		+1.00	+0.86	+0.74	+0.48	+0.49	+0.02	-0.60	-0.01	Na
			+1.00	+0.65	+0.28	+0.62	-0.00	-0.48	-0.04	K
				+1.00	+0.67	+0.27	+0.41	-0.57	+0.40	Cl
					+1.00	+0.35	+0.60	-0.86	+0.64	SO <sub>4</sub>
						+1.00	+0.16	-0.72	+0.14	HCO <sub>3</sub>
							+1.00	-0.42	+0.93	SiO <sub>2</sub>
								+1.00	-0.44	Res
									+1.00	T

L'examen de cette matrice montre que les ions observés proviennent essentiellement des formations triasiques et liasiques de la région.

Il faut aussi tenir compte des phénomènes de pollution qui interviennent dans la composition chimique de l'Isère. Des composés sodiques et potassiques provenant de produits ménagers peuvent participer de façon non négligeable à la composition chimique des eaux. La bonne corrélation entre Na et K prouve la présence de cette pollution dans l'Isère.

### C - Conclusion à l'étude des eaux de La Léchère

Les eaux thermominérales de La Léchère sont des eaux sulfatées calciques. De toutes les eaux thermominérales de Tarentaise que nous avons étudiées, ce sont elles qui possèdent les plus fortes teneurs en silice dissoute ( $\approx 50$  mg/l) et les plus fortes températures ( $\approx 50^\circ$ ).

La minéralisation de ces eaux est très stable dans le temps, ce qui prouve que les eaux superficielles de la nappe alluviale de l'Isère n'interviennent pas (ou de façon imperceptible) dans la composition chimique des eaux thermominérales. La minéralisation totale est de l'ordre de 2,7 g/l.

Les eaux de l'Isère sont bicarbonatées et sulfatées calciques et magnésiennes.

Les variations importantes de la résistivité au cours du temps prouvent l'influence des apports saisonniers sur la chimie de l'Isère. L'augmentation de la minéralisation est souvent marquée par un apport en ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{SO}_4^{--}$ . Ce phénomène est dû aux lessivages plus intenses des gypses par les eaux de ruissellement.

### III-2.4. La station thermale de l'Echaillon en Maurienne

Nous rappelons que les eaux de l'Echaillon sortent au contact du massif cristallin du Chatelard avec les formations sédimentaires.

Composition chimique moyenne des eaux de l'Echaillon :

	MOYENNE (mg/l)	ECART-TYPE
Ca	333.05	16.4
Mg	45.7	4.65
Na	1799.27	21.85
K	57.97	7.57
Cl	2803.7	127.86
SO <sub>4</sub>	886.36	17.47
HCO <sub>3</sub>	313.7	12.8
SiO <sub>2</sub>	45.7	0.55
Res	132.9	3.08
T	392.5	1.0

Ce sont les ions  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{K}^+$  qui présentent les plus grandes variations avec des coefficients de variabilité respectivement de 10 et 12%.

Tous les autres paramètres varient dans des pourcentages inférieurs à 5%.

Les ions prédominants sont  $\text{Na}^+$  avec une valeur moyenne de 1800 mg/l et  $\text{Cl}^-$  avec un moyenne de 2804 mg/l.

La teneur en silice dissoute est voisine de celle des eaux thermominérales de La Léchère ; elle atteint 45 mg/l. La minéralisation totale est élevée ; de 6,3 g/l environ.

#### Diagramme de Schoeller-Berkaloff

Le diagramme de Schoeller caractéristique des eaux de l'Echaillon est représenté en figure 66. Les profils des maximums et minimums délimitent un domaine de variations très étroit.

La formule caractéristique des eaux de l'Echaillon est :  
 $r_{\text{Na}} > r_{\text{Ca}} > r_{\text{Mg}} > r_{\text{K}}$  et  $r_{\text{Cl}} > r_{\text{SO}_4} > r_{\text{HCO}_3}$

#### Evolution dans le temps des principaux paramètres

L'évolution dans le temps des principaux paramètres chimiques est notée sur la figure 67.

#### Matrice de corrélation

La matrice de corrélation est la suivante :



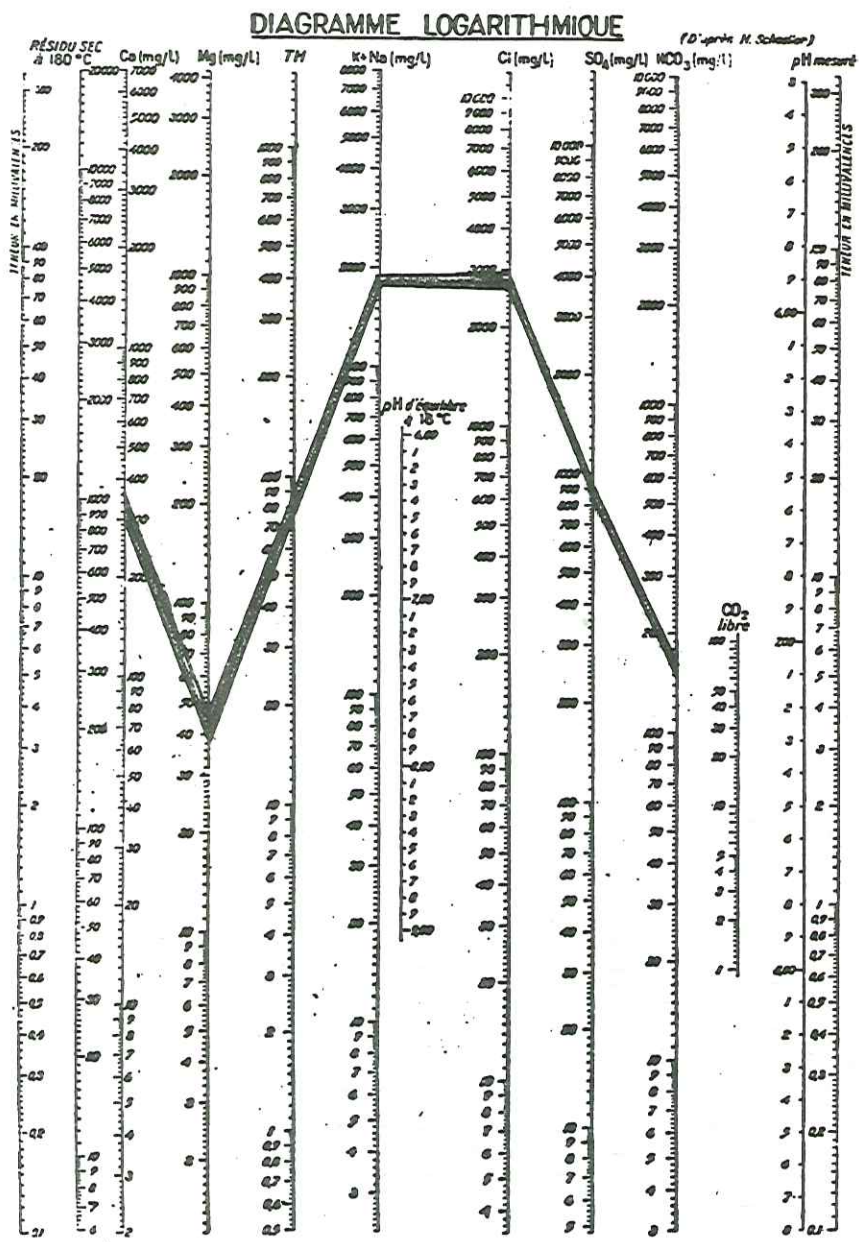


Fig.66 - Echaillon - Variation du chimisme sur diagramme Schoeller

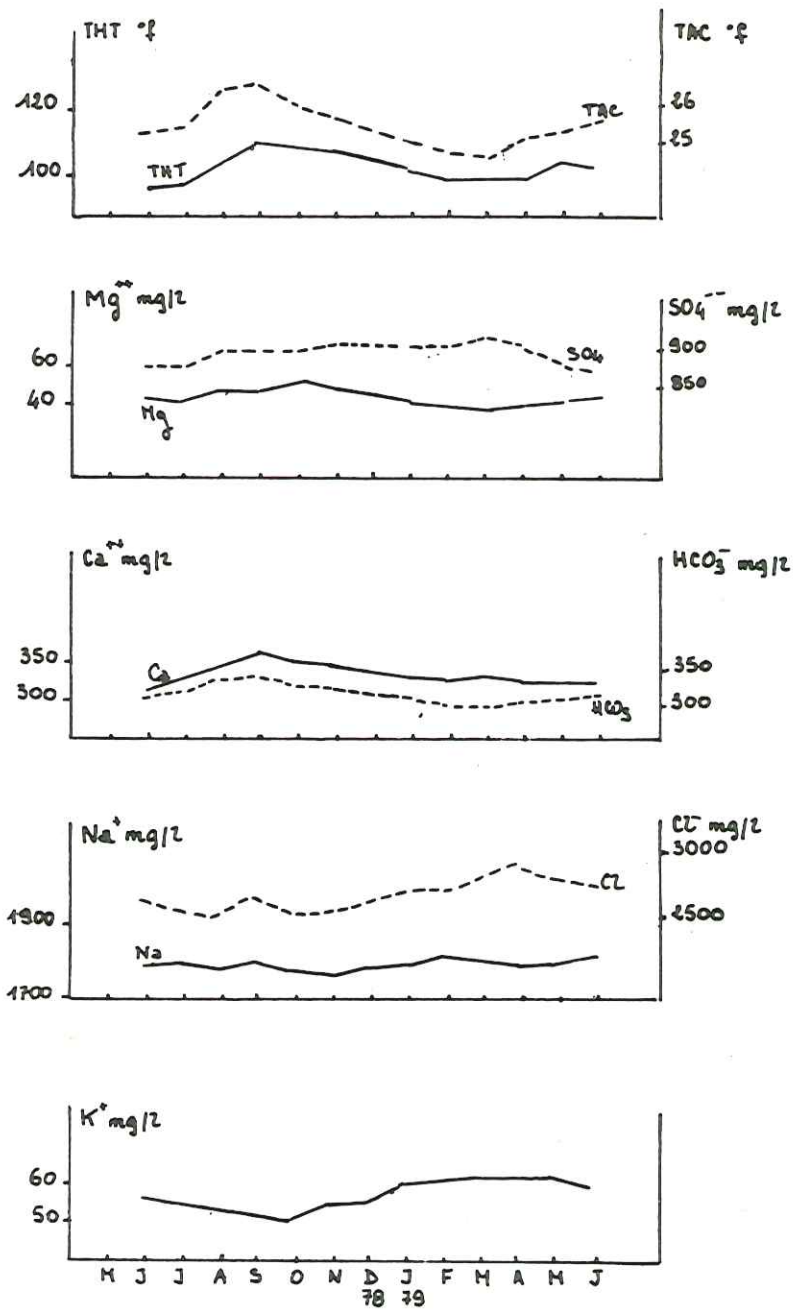


Fig. 67 Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques de l'Echaillon

Ca	*Mg	*Na	*K	*Cl	*SO4	*HCO3	*SiO2	*Res	*T	*
+1.00	+0.58	-0.51	-0.64	-0.40	+0.47	+0.70	-0.10	+0.21	-0.47	Ca
	+1.00	-0.61	-0.80	-0.66	-0.16	+0.80	-0.57	-0.19	-0.52	Mg
		+1.00	+0.42	+0.70	-0.23	-0.55	+0.59	+0.37	+0.38	Na
			+1.00	+0.67	+0.11	-0.89	+0.20	-0.35	+0.65	K
				+1.00	+0.08	-0.70	+0.58	+0.08	+0.77	Cl
					+1.00	-0.13	+0.09	+0.14	-0.01	SO4
						+1.00	-0.28	+0.18	-0.73	HCO3
							+1.00	+0.67	+0.33	SiO2
								+1.00	-0.26	Res
									+1.00	T

Les corrélations significatives qui ressortent de cette matrice sont les suivantes :  $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++} - \text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+ - \text{Cl}^-$ .

L'origine des ions est donc encore déterminée à l'Echailon par les mêmes associations minérales où les gypses, les dolomies et le chlorure de sodium du Trias, ainsi que les calcaires du Lias jouent un grand rôle. Le problème de la présence de NaCl dans les formations du Trias reste cependant posé. En effet, des analyses par diffraction X de prélèvements de gypses effectués en Tarentaise dans le Faisceau de Salins d'une part, et dans le Faisceau de la Grande Moenda d'autre part, ne nous ont jamais révélé la présence de NaCl. Ainsi, en surface, les gypses du Trias ne sont pas associés à du chlorure de sodium. Ceci nous incite à penser que le sel à l'origine des fortes teneurs en NaCl des eaux thermominérales se trouve en profondeur le long des surfaces de chevauchements.

Cependant, il est étonnant de constater que les eaux minéralisées ne sont pas toutes chargées NaCl. Il serait donc intéressant de compléter l'étude de la localisation du sel dans les différentes assises du Trias.

### III-2.5. Les eaux de La Coche - Usine de Ste Hélène (Tarentaise)

Composition chimique moyenne de cette eau :

	MOYENNE (mg/l)	ECART-TYPE
Ca	567.1	10.35
Mg	79.4	6.4
Na	24.95	2.7
K	3.16	0.4
Cl	5.06	1.19
SO4	1484.16	73.2
HCO3	269.6	8.7
SiO2	14.08	0.9
Res	460.16	8.75
T	16.7	0.6

La composition chimique des eaux de La Coche est caractérisée par une forte teneur en ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{SO}_4^{--}$  et de très faibles concentrations en  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Cl}^-$ .

La minéralisation totale est de l'ordre de 2,5 g/l.

La teneur en silice dissoute est faible, de l'ordre de 15 mg/l. Les coefficients de variation montrent que les fluctuations observées sont modérées. Les plus fortes variations affectent les teneurs en ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Mg}^{++}$ .



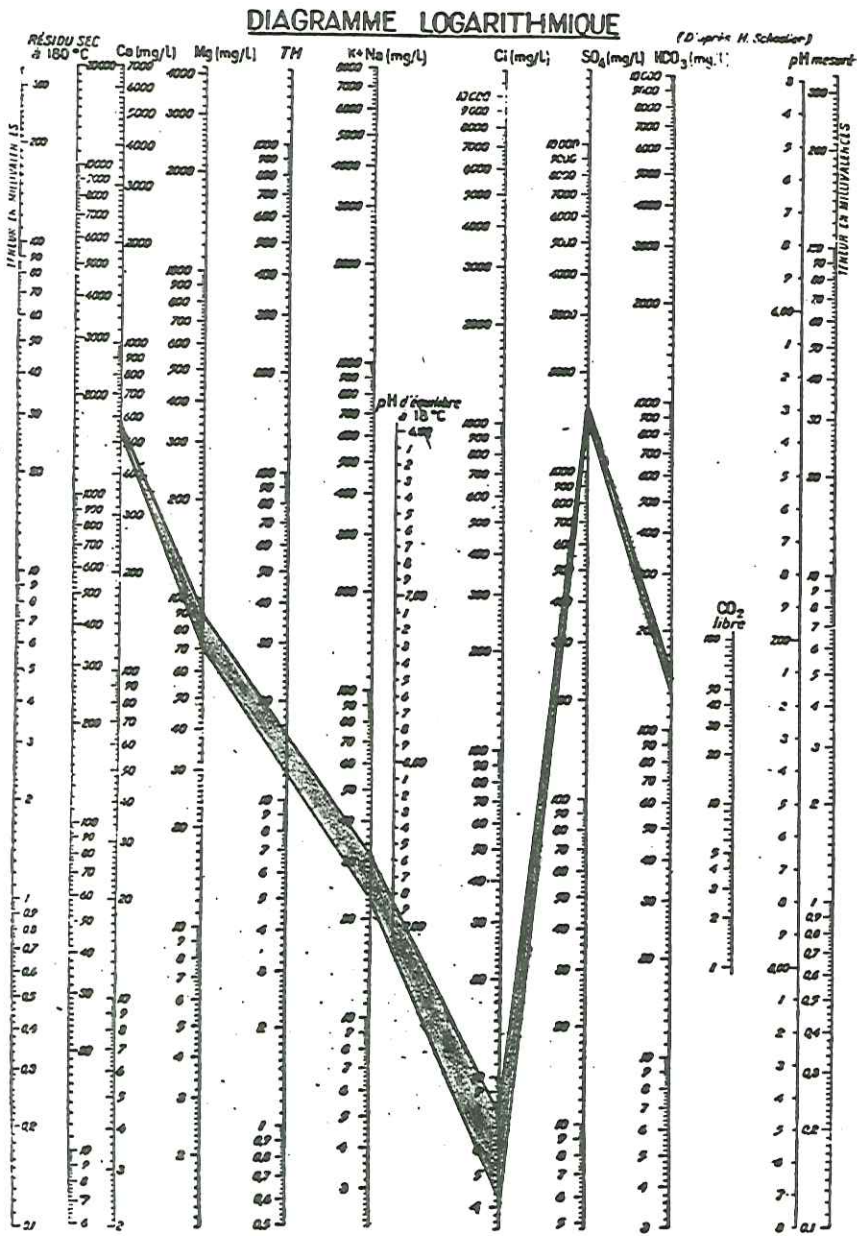


Fig. 68 - La Coche - Variation du chimisme sur diagramme Schoeller

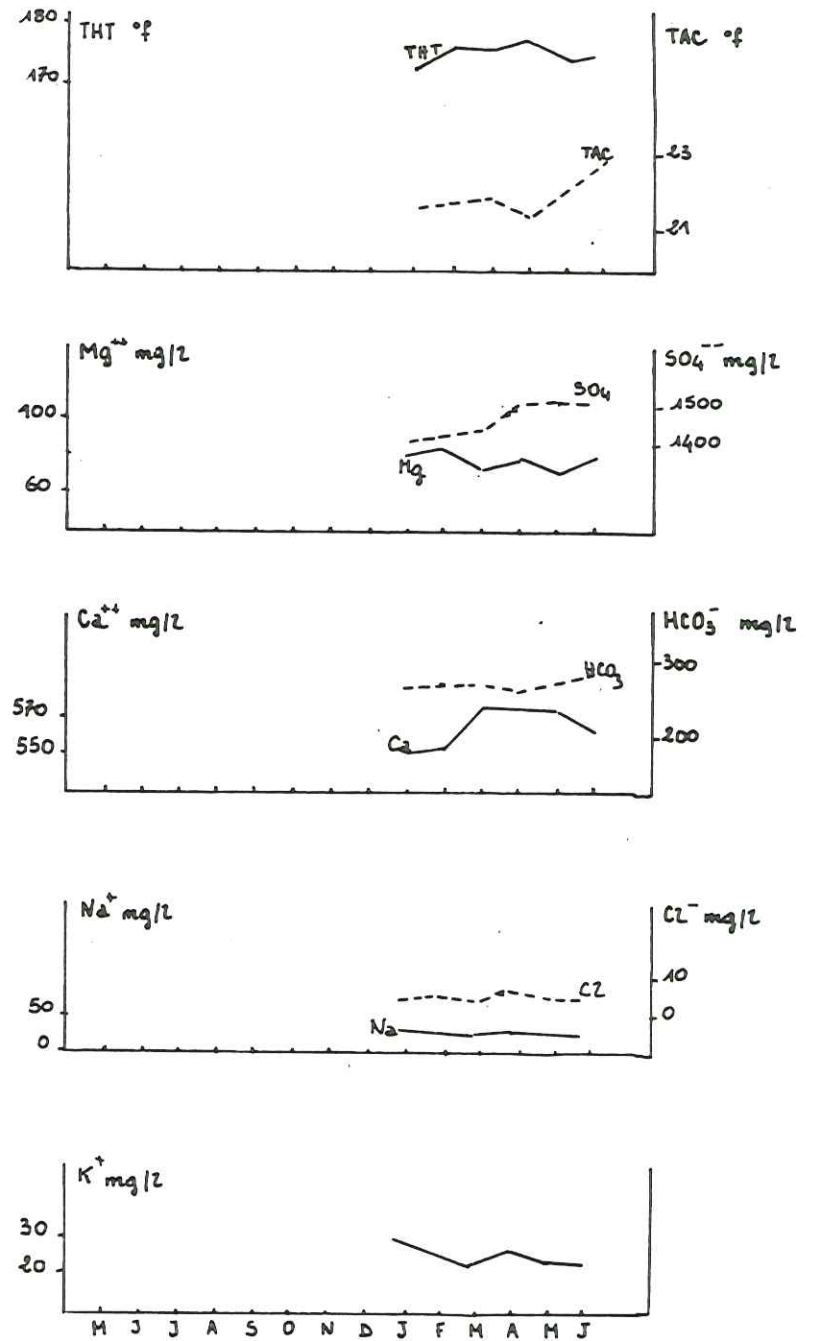


Fig. 69 Evolution dans le temps des principaux paramètres chimiques de La Coche

### Diagramme Schoeller

La représentation graphique des eaux de La Coche se trouve en figure 68 . Les profils chimiques font ressortir nettement la prédominance des ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{SO}_4^{--}$  sur les autres.

L'ion  $\text{Cl}^-$  présente les plus faibles teneurs.

La formule caractéristique qui se déduit de ce diagramme est :  
 $r\text{Ca} > r\text{Mg} > r\text{Na} > r\text{K}$  et  $r\text{SO}_4 > r\text{HCO}_3 > r\text{Cl}$

### Evolution dans le temps des principaux paramètres

L'évolution des éléments dans le temps est matérialisée sur la figure 69 . Nous n'interpréterons pas ces variations car les prélèvements de l'eau de La Coche n'ont pas été effectués sur tout un cycle hydrologique.

### Matrice de corrélation

La matrice de corrélation des eaux de La Coche est :

Ca	*Mg	*Na	*K	*Cl	*SO <sub>4</sub>	*HCO <sub>3</sub>	*SiO <sub>2</sub>	*Res	*T	*
+1.00	-0.72	-0.65	-0.52	+0.39	+0.60	-0.01	+0.32	+0.19	+0.66	Ca
	+1.00	+0.25	-0.17	+0.12	-0.47	-0.03	-0.14	-0.04	-0.05	Mg
		+1.00	+0.71	-0.13	-0.64	-0.60	-0.61	+0.32	-0.89	Na
			+1.00	-0.55	-0.26	+0.00	-0.30	-0.00	-0.92	K
				+1.00	+0.36	-0.39	+0.25	+0.83	+0.44	Cl
					+1.00	+0.44	+0.90	+0.22	+0.56	SO <sub>4</sub>
						+1.00	+0.52	-0.55	+0.28	HCO <sub>3</sub>
							+1.00	+0.01	+0.58	SiO <sub>2</sub>
								+1.00	-0.09	Res
									+1.00	T

Nous voyons que la seule association minérale qui ressort de cette matrice relie  $\text{Ca}^{++}$  à  $\text{SO}_4^{--}$  et indique que ces ions proviennent des gypses.

### III-2.6. Conclusion à l'étude des éléments majeurs des sources

Cette étude nous a montré que les associations minérales impliquées dans la minéralisation des sources sont assez constantes dans la région étudiée et correspondent à la présence des calcaires du Lias et surtout des carbonates et des évaporites du Trias.

Il est d'autre part remarquable que la composition chimique de la majorité des eaux thermominérales étudiées est stable dans le temps. Ceci prouve que lors de leur remontée vers la surface, les eaux minéralisées ne se mélangent pas (ou dans des proportions imperceptibles) avec des eaux froides superficielles.

Le diagramme de Schoeller-B. (figure 70) rassemble les profils chimiques de toutes les sources thermominérales étudiées.

Chaque station thermale s'individualise sur ce diagramme par une composition chimique caractéristique.

Ainsi, les eaux de la station de Salins-les-Thermes sont les plus minéralisées alors que ce sont les eaux de La Coche qui présentent les teneurs les plus faibles. Les eaux de Brides-les-Bains se rapprochent de celles de Salins-les-Thermes mais sont plus pauvres en Na, Cl, HCO<sub>3</sub>.

Le profil des eaux de l'Echaillon est proche de celui de la Source Massiago à Salins, mais présente des teneurs beaucoup plus faibles en calcium magnésium et bicarbonates. Les eaux de La Léchère occupent une place intermédiaire entre les eaux les plus minéralisées et les eaux les moins minéralisées.



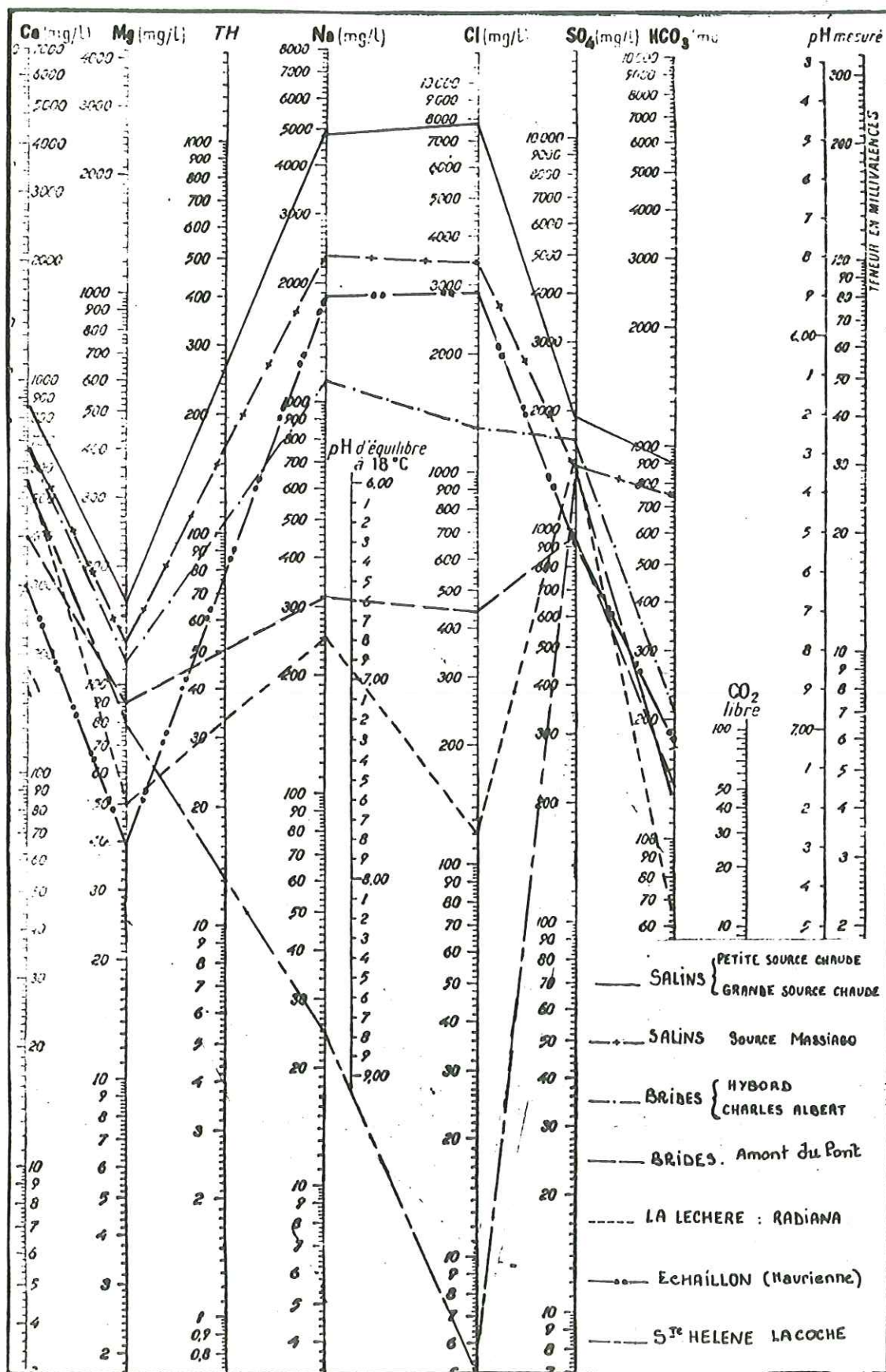


Figure 70 - REPORT DE TOUTES LES EAUX THERMALES ETUDIEES SUR  
 DIAGRAMME DE SCHOELLER-BERKALOFF -

Les matrices de corrélation des sources thermominérales, à quelques exceptions près, ne font pas ressortir de relations linéaires significatives entre les éléments.

Ceci s'explique par le fait que la plupart des éléments restent constants alors que d'autres montrent des fluctuations de telle sorte que seules les données fluctuantes ressortent dans les corrélations.

#### QUATRIEME PARTIE - ETUDE DES ELEMENTS MINEURS

L'étude des éléments en traces est d'un grand intérêt pour débrouiller l'histoire des eaux thermominérales.

Nous avons donc cherché à caractériser chaque type d'eau à partir des teneurs en halogénures ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ), du Bore, des alcalins (Li, Na, K, Rb) des alcalino-terreux (Ca, Sr) et d'autres éléments traces : Fe, Mn, Si, Ag.

La majorité des analyses ont été effectuées au laboratoire de chimie analytique de la faculté de Pharmacie de Grenoble sous la direction de J. Rochat.

Les teneurs en Ag, Si, Li, ont été dosées au laboratoire de chimie de l'Institut Dolomieu.

##### IV-1. Dosages par spectrophotométrie de flamme

Les éléments traces qui ont été recherchés par cette méthode sont les suivants : Li, Na, K, Rb, Sr, Fe, Mn, Si, Ag, Cu, As, Al.

Les teneurs en cuivre et aluminium se sont révélées inférieures à la limite de détection de l'appareil (0,2 ppm pour le cuivre et 1,5 ppm pour l'aluminium.)

La teneur en arsenic s'est révélée mesurable dans les eaux thermominérales des stations de La Léchère, l'Echaillon, Salins-les-Thermes et Brides-les-Bains, mais inférieures à la limite de détection de nos appareils dans les eaux de La Coche -Usine de Ste Hélène. Mais, des contraintes techniques ne nous ont pas permis de préciser quantitativement les concentrations de cet élément dans les eaux thermominérales étudiées.

##### IV-2. Dosages par électrodes spécifiques

Les bromures et les iodures ont été dosés par cette méthode. La mesure est effectuée sur 10cc d'échantillon auxquels on ajoute 10cc de solution tampon de nitrate de sodium. Ensuite, ce mélange est mis en contact avec deux électrodes : une électrode spécifique de l'élément recherché (iodures ou bromures) et une électrode de référence au calomel. Durant tout le dosage, le mélange échantillon-solution tampon est homogénéisé, grâce à un agitateur magnétique. La différence de potentiel qui s'établit entre les deux électrodes après stabilisation de l'appareil permet de calculer la teneur en éléments recherchés.

Ces dosages sont assez délicats car il est parfois difficile d'obtenir de bonnes conditions de reproductibilité des mesures. Ceci est en partie dû à ce que les temps de stabilisation de l'appareil sont assez longs, multipliant ainsi les risques de fluctuations expérimentales.

##### IV-3. Dosages par colorimétrie

La méthode colorimétrique au "spadns" nous a permis de doser le Bore dans les eaux étudiées.

Les conditions de dosage sont données dans le rapport de stage de M.D. Jodeau (D.E.P.S. d'hydrologie 1975).

La limite de détection pour cette méthode est de l'ordre de 0,10 mg/l de Bore dans l'échantillon initial (prélèvement d'eau).



ELEMENTS EN TRACES - TENEURS EN MILLIEQUIVALENTS PAR LITRE															
SOURCE	F	Cl	Br $\times 10^{-5}$	I $\times 10^{-3}$	B	Li $\times 10^{-2}$	Na	K	Rb $\times 10^{-4}$	Ca	Sr $\times 10^{-2}$	Fe $\times 10^{-2}$	Mn $\times 10^{-3}$	Si total	Ag $\times 10^{-5}$
Amont du Pont	7	9.67	3.6	1.7	0.23	5	13.5	0.46	4.7	18.6	28	1.2	traces	1.07	traces
Hybord	I80	36.1	19.5	1	0.65	54	40	2.07	22	31.4	39	9.6	7.6	2.5	16
Charles Albert	I80	35.8	19.5	1.6	0.59	52	40	2	21	31.4	37	10	7.6	2.6	18
Petite Source Chaude	80	200.5	100	1.2	0.59	52.7	194.5	2.45	39	39.4	45	8	9	2.3	45
Grande Source Chaude	90	219	100	2.3	0.54	55	210	2.48	39	40.4	43	8	9	2.49	49
Source Massiogo	60	84.3	52	3.1	0.49	27	94	1.28	18	31.4	34	4.4	9	1.92	24
Radiana 1	I70	3.4	11	2.9	0.4	13	9.9	0.51	16	27	28	traces	14	3.2	2.7
Radiana 3	I40	3.3	10	2.8	0.43	12	8.7	0.43	14	25.5	26	traces	11	3.1	1.9
Radiana 4	I40	3.2	10	2.6	0.43	12	8.6	0.46	13	25.5	26	traces	11	3	1.9
Echailon	2I0	78.9	35	4	0.51	35	78.3	1.48	58	16.5	16	traces	31	3	18

Tableau 71 - Tableau réunissant les teneurs en éléments en traces dans les eaux thermominérales

#### IV-4. Résultats obtenus

Le tableau 71 regroupe les teneurs en éléments en traces mesurées sur les eaux thermominérales et exprimées en milliéquivalents par litre.

Le comportement des éléments en traces les uns par rapport aux autres sera étudié à l'aide de l'analyse en composantes principales normées, effectuée sur l'analyse chimique totale (comprenant les concentrations en éléments majeurs et en éléments traces) des eaux (cf. p. 129). Mais ce tableau montre déjà que les eaux thermominérales des stations de La Léchère et de l'Echaillon situées au contact du cristallin avec le sédimentaire sont les plus pauvres en Fe et Sr mais les plus riches en Si et Mn.

Les eaux de l'Echaillon en Maurienne sont les plus riches en Rubidium et iodures.

Par contre, les eaux les plus riches en Lithium sont les eaux thermominérales des stations de Brides-les-Bains et Salins-les-Thermes.

Ainsi, le Manganèse et le Rubidium sont plus abondants dans les roches éruptives et presque inexistantes dans les roches carbonatées.

En revanche, les teneurs en Lithium des eaux sont plus fortes dans les eaux issues des roches triasiques que dans les eaux issues des roches éruptives.

#### Caractérisation des différentes eaux thermales sur diagrammes semilogarithmiques

Nous avons essayé de discriminer les eaux thermales à partir de leurs teneurs en éléments mineurs. Dans ce but, nous avons établi des diagrammes semi-logarithmiques composés de colonnes successives représentant les teneurs en éléments mineurs.

Les graphiques sont construits de telle sorte que les lignes horizontales traduisent les rapports molaires suivants :

$$\begin{array}{lll} \text{Cl/Br} = 10^2 & \text{Br/I} = 10^{+1} & \text{Ca/Sr} = 100 \\ \text{K/Li} = 1 & \text{K/Rb} = 100 & \text{Rb/Sr} = 10^{-2} \end{array}$$

Les figures 72 73 et 74 montrent les diagrammes ainsi obtenus.

Comme les profils chimiques des éléments majeurs sur diagrammes de Schoeller-Berkaloff, les profils chimiques des éléments mineurs sur diagrammes semi-logarithmiques diffèrent selon chaque station thermale.

La comparaison des eaux thermales étudiées avec celles du Trias Briançonnais, département des Hautes Alpes, nous montre que leurs compositions chimiques sont différentes. Les eaux thermales étudiées qui émergent dans les formations triasiques sont très riches en Cl, Na,  $\text{K SO}_4$ , Li alors que les eaux thermominérales du Trias Briançonnais sont pauvres en Na, Cl et Li (Poulain, 1977).

Cette faible minéralisation des eaux liées au Trias proviendrait, d'après Poulain, d'un lessivage intense des gypses avant leur déplacement au cours des phénomènes tectoniques.

Il serait intéressant d'approfondir les comparaisons des teneurs en éléments traces des différentes eaux thermales des Alpes occidentales car les teneurs en éléments mineurs révèlent mieux que les éléments majeurs la nature des roches traversées.



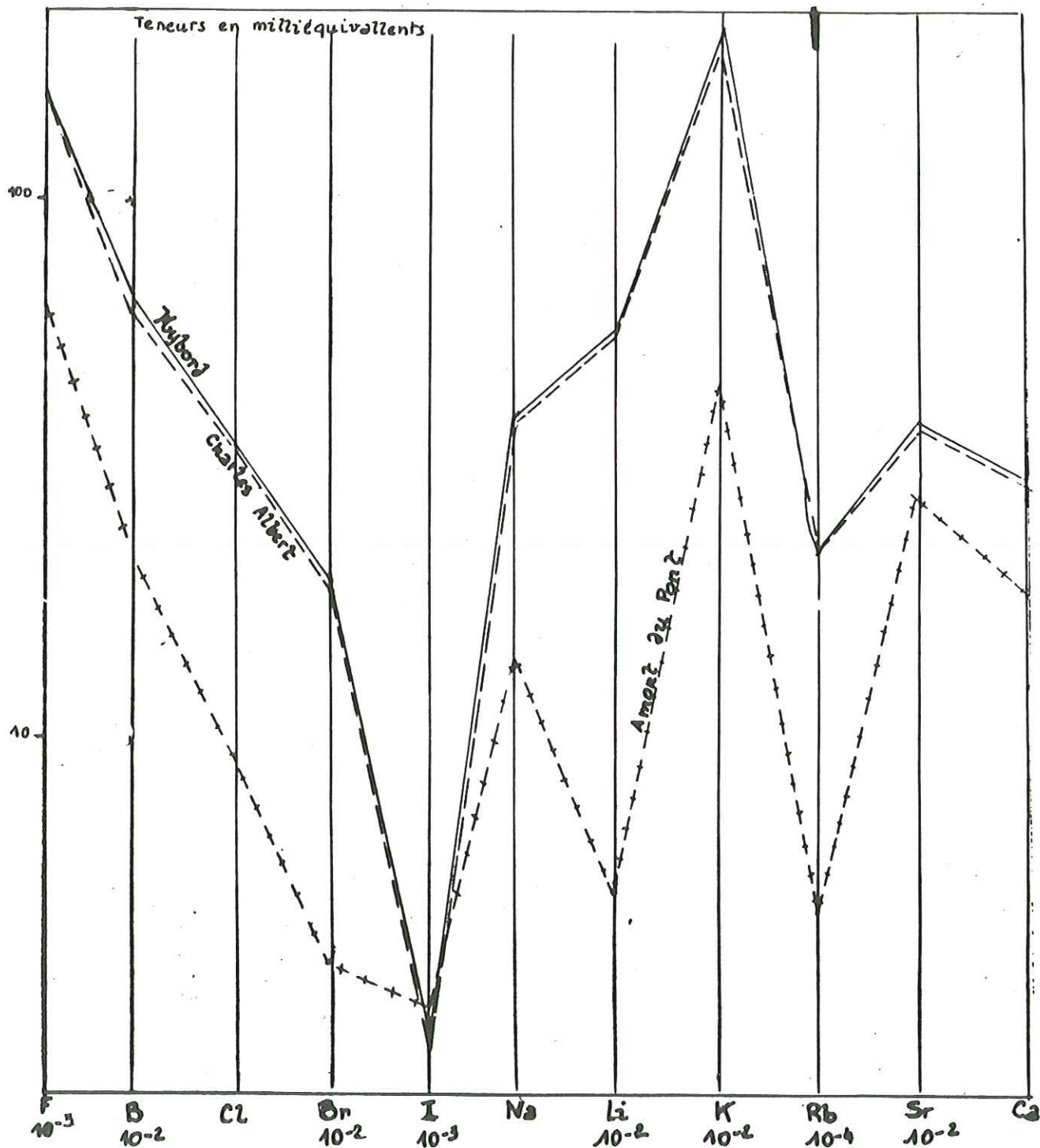
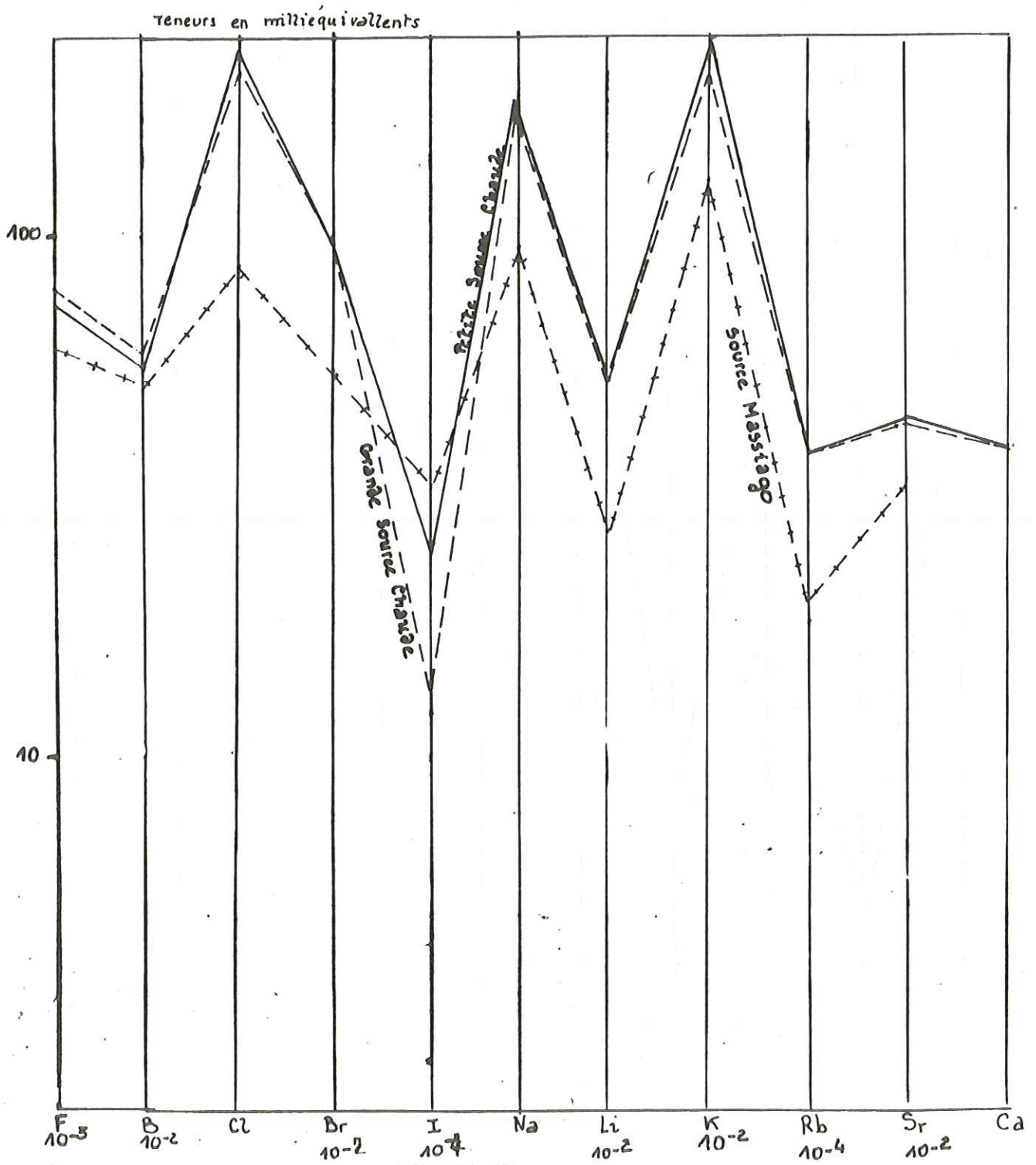


FIGURE 72

SOURCES THERMALES DE BRIDES-les-BAINS : Géochimie des éléments mineurs sur diagramme semi-logarithmique



SOURCES THERMALES DE SALINS-les-THERMES : Géochimie des éléments mineurs sur diagramme semi-logarithmique



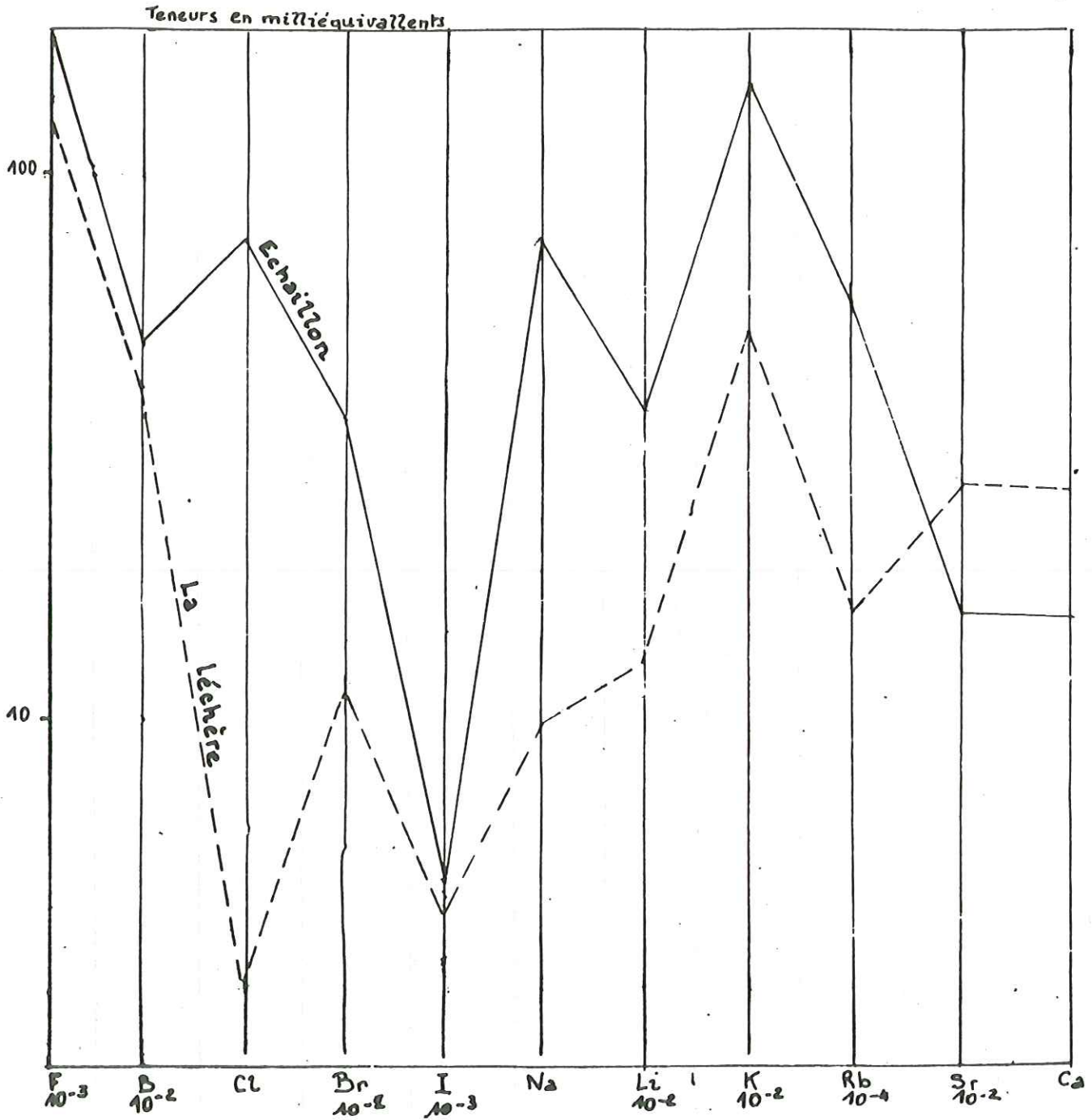


FIGURE 74

SOURCES THERMALES DE L'ECHAILLON, LA LECHERE

Géochimie des éléments mineurs sur diagramme semi-logarithmique

Les teneurs en fluorures mesurées par électrodes spécifiques sont les suivantes :

	mg/l	még/l
Echaillon	4	0.21
La Coche	0.14	0.007
Radiana 1	3.3	0.17
Radiana 3	2.7	0.14
Radiana 4	2.7	0.14
Grande Source Chaude	1.7	0.09
Petite Source Chaude	1.6	0.08
Massiago	1.20	0.06
Charles Albert	3.4	0.18
Hybord	3.4	0.18
Amont du Pont	1.35	0.07
Isère	0.06	0.003
Source Froide	0.19	0.01
Source Caniveau	0.19	0.01
Doron (Salins)	0.08	0.004
F1	0.08	0.004
F2	0.11	0.005
F3	0.11	0.005
F4	0.10	0.005
La Verpillère	0.16	0.008
Les Moulins	0.06	0.003
Leray	0.04	0.002
Barral	0.43	0.02
Doron (Brides)	0.10	0.005

Ce tableau montre que les eaux thermales les plus chargées en fluorures sont les eaux de l'Echaillon avec environ 4 mg/l, et les moins chargées sont les eaux de Salins-les-Thermes.

L'examen des diagrammes semi-logarithmiques des figures 72, 73 et 74 fait apparaître que toutes les eaux thermales étudiées sont caractérisées par un rapport F/B < 10.

D'autre part, les teneurs en chlorures sont toujours supérieures aux teneurs en fluorures mais dans des rapports différents selon les stations thermales :

- Cl/F < 10 pour les eaux thermales de La Léchère
- Cl/F > 10 pour les eaux thermales de Brides-les-Bains
- Cl/F  $\gg$  10 pour les eaux thermales de l'Echaillon (Maurienne)
- Cl/F  $\gg$  100 pour les eaux de Salins-les-Thermes

Les eaux thermales étudiées ont des teneurs beaucoup plus fortes en fluorures que les eaux du Trias briançonnais qui, elles, ne dépassent pas 0,3 mg/l de fluorures (Poulain, 1977).

Les teneurs en éléments mineurs des eaux thermales de Tarentaise en liaison avec le Trias diffèrent donc notablement de celles des eaux thermales du Trias briançonnais.

Les eaux froides superficielles présentent des teneurs en fluorures inférieures à 0,5 mg/l. La source froide la plus chargée (0,43 mg/l) est la source Barral de Brides-les-Bains qui, rappelons-le, émerge au contact d'un immense paquet glissé de gypses avec la moraine.

Les eaux de la nappe alluviale du Doron prélevées à Salins montrent des teneurs en fluorures identiques à celles du Doron. Il n'existe donc pas de diffusion des fluorures des sources minéralisées vers les eaux froides superficielles.

Ces observations montrent qu'il serait très intéressant d'orienter les recherches vers une étude plus générale des eaux issues du Trias.



CINQUIEME PARTIE - GEOCHIMIE STATISTIQUE DES SOURCES THERMOMINERALES DE TARENTEISEET DE MAURIENNEV-1. Etude de la matrice de corrélation

Une matrice de corrélation a été établie pour les différentes sources thermales à partir des moyennes annuelles en éléments majeurs, de la résistivité (Res) et de la température T :

Teneurs moyennes annuelles

	MOYENNE (mg/l)	ECART-TYPE
Ca	570.6	140.55
Mg	88.48	41.16
Na	1461.2	1726.3
K	48.45	35.3
Cl	2177.0	2818.16
SO4	1486.2	277.2
HCO3	403.6	283.8
SiO2	36.45	12.8
Res	234.4 <i>ohm</i>	152.56
T	35.7 °C	11.47

Matrice de corrélation

Ca	*Mg	*Na	*K	*Cl	*SO4	*HCO3	*SiO2	*Res	*T	
+1.00	+0.81	+0.66	+0.64	+0.65	+0.89	+0.72	+0.98	-0.53	-0.03	Ca
	+1.00	+0.80	+0.77	+0.79	+0.55	+0.94	-0.27	-0.72	-0.44	Mg
		+1.00	+0.81	+1.00	+0.31	+0.91	+0.14	-0.82	-0.10	Na
			+1.00	+0.81	+0.43	+0.79	+0.20	-0.93	-0.01	K
				+1.00	+0.31	+0.90	+0.14	-0.81	-0.11	Cl
					+1.00	+0.37	+0.19	-0.25	+0.17	SO4
						+1.00	-0.14	-0.83	-0.36	HCO3
							+1.00	-0.21	+0.96	SiO2
								+1.00	+0.01	Res
									+1.00	T

Les teneurs en nitrates (NO<sub>3</sub>) et phosphates (PO<sub>4</sub>) n'ont pas été reportées, car dans toutes les sources elles se situent à la limite du seuil de détection par nos procédés analytiques. Elles n'auraient donc pas apporté d'informations suffisamment précises.

Nous avons souligné, dans la matrice, tous les coefficients significatifs, c'est-à-dire supérieurs à 0,6.

Nous pouvons ainsi immédiatement voir quels sont les éléments qui se corrélaient le mieux entre eux.

Nous avons classé les principales corrélations (supérieures à 0,6) dans le tableau suivant :

Elément	Corrélations positives	corrélations négatives
Ca	SO <sub>4</sub> , Mg, HCO <sub>3</sub> , Na, Cl, K	
Mg	HCO <sub>3</sub> , Ca, Na, Cl, K	R
Na	Cl, HCO <sub>3</sub> , K, Ca	R
K	Na, Cl, HCO <sub>3</sub> , Mg, Ca	R
Cl	Na, K, Mg, HCO <sub>3</sub> , Ca	R
SO <sub>4</sub>	Ca	
HCO <sub>3</sub>	Mg, Na, Cl, K, Ca	R
SiO <sub>2</sub>	T	
Rés		K, HCO <sub>3</sub> , Na, Cl, Mg
T	SiO <sub>2</sub>	

Ainsi, les meilleures corrélations obtenues sont les suivantes .  
Ca - SO<sub>4</sub> , Na - Cl et K - Cl , Ca - Mg - HCO<sub>3</sub> , SiO<sub>2</sub> - T°

D'autre part, il faut remarquer que la résistivité (Res) présente de très bonnes corrélations négatives avec la plupart des éléments (K, HCO<sub>3</sub>, Na, Cl, Mg). Seuls les ions Ca<sup>++</sup> et SO<sub>4</sub><sup>---</sup> ne se corréllent que très médiocrement avec la résistivité.

#### Origine des éléments

Les sulfates et les carbonates sont couramment et classiquement décrits dans les faciès du Trias et du Lias des environs de ces sources. Les chlorures, eux, n'ont jamais été individualisées sous forme de gisements ou accumulations de type évaporitique . On peut, cependant, supposer que du fait de leur grande solubilité, ces éléments sont à l'origine de la minéralisation des eaux.

La silice, qui présente une très bonne corrélation avec la température, est en quantité plus importante dans les eaux des sources thermales de La Léchère et de l'Echaillon que dans celles des autres sources.

## V - 2. Analyse en composantes principales et représentations graphiques

### V-2.1. Présentation de l'analyse

Après avoir établi la matrice de corrélations des sources thermo-minérales étudiées, nous avons effectué, en collaboration avec G. Buffet, une analyse en composantes principales, à partir des moyennes annuelles des teneurs en éléments majeurs de ces sources thermales.

Cette analyse permet de déterminer les fonctions linéaires entre les variables (éléments majeurs, résistivité, température ...) qui discriminent au mieux l'ensemble des compositions chimiques et donc de mettre en évidence les groupements de variables qui sont prépondérants dans la différenciation de la population analysée. (cf J.C. Klován et al. - 1976).

L'analyse sur données centrées réduites a été préférée car elle a la propriété de permettre la comparaison des variables mesurées dans des unités différentes : teneurs, températures, résistivités ...etc. Ceci est possible car l'unité réelle prise en compte dans le calcul est l'écart type de la variable considérée.



Ainsi, dans notre cas précis, ayant introduit dix variables pour caractériser les eaux thermales (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Rés, T°), nous définissons dix facteurs F, ou combinaisons linéaires entre variables, ou directions de projections, ou nouvelles variables (ces termes étant synonymes) dont les propriétés sont les suivantes :

F1 : Les échantillons projetés selon cette première direction, sur un axe perpendiculaire, donnent des points dont la mesure algébrique, à partir du centre de gravité, présente la variance maximale. C'est donc la direction de projection qui discrimine au mieux le nuage des individus : elle permet de visualiser la plus grande proportion possible des différences de composition physico-chimique des sources.

F2 : correspond à la direction de projection qui, parmi les directions orthogonales à F1, présente la variance maximale.

F3 : correspond à la direction de projection à la fois orthogonale à F1 et à F2 qui, à son tour, présente la variance maximale.

F10 : cette dernière direction présente la variance minimale. Elle ne tient compte des variations chimiques que dans un très faible pourcentage. Dans les cas favorables, on espère que les facteurs d'ordre supérieur ne représentent que les écarts analytiques.

Nous pouvons dessiner l'histogramme des pourcentages de variations visualisés par chacun des facteurs :

Facteur F	Pourcentage de variations chimiques pris en compte sur l'axe considéré	Pourcentages cumulés
1	60 %	60 %
2	22 %	82 %
3	12 %	95 %
4	3 %	98 %
5	0,9 %	99 %
6	0,0 %	99 %
7	0,0 %	99 %
8	0,0 %	99 %
9	0,0 %	99 %
10	0,0 %	100 %

Seuls les trois premiers facteurs présentent un pourcentage de variance significatif. Donc à l'aide des trois premières directions de projections F1, F2 et F3, nous définissons une représentation graphique qui prend en compte 95 % des variations physico-chimiques mesurées sur les sources thermominérales.

Les axes associés aux deux directions les plus discriminantes (F1 et F2) définissent à eux seuls un plan où apparaîtront 82 % des variations physico-chimiques.

Pour les représentations graphiques, nous n'utiliserons donc que les facteurs F1, F2 et F3 qui donnent une très bonne image à trois dimensions des sources thermominérales qui étaient au départ représentées dans un espace à dix dimensions.

Les autres directions de projections : de F4 à F10 n'interviennent que dans des pourcentages extrêmement faibles et, de ce fait, seront négligées et supposées ne représenter que des écarts analytiques.

Selon chaque direction de projection, il est possible de représenter les dix variables. Celles-ci caractériseront en fait des individus (sources) pour lesquels toutes les variables seront égales à leur moyenne, sauf la variable considérée qui sera égale à la moyenne augmentée de son propre écart type.

La mesure de la projection de chaque vecteur image d'une variable sur un axe associé à une direction  $F_n$  représente aussi, du fait de la métrique particulière, le coefficient de corrélation avec l'axe factoriel  $n$ . Cette corrélation est plus ou moins significative selon les facteurs (cf. Klován et al 1976 - Methods in Geomathematics).

Ce coefficient de corrélation est toujours compris entre  $-1$  et  $+1$  puisqu'il représente, toujours du fait de la métrique particulière, le cosinus de l'angle formé par le vecteur "variable" et l'axe factoriel considéré.

Le tableau ci-dessous, rassemble les valeurs des coefficients pour chaque variable sur les facteurs F1, F2 et F3. On trouvera, pour chaque facteur, les variables les plus influentes sachant que : plus la valeur absolue du coefficient est proche de 1, plus la variable est influente dans ce facteur.

VARIABLE	Selon F 1   60% des variations sont représentées	Selon F 2   22% des variations sont représentées	Selon F 3   12% des variations sont représentées
la moins significative	R : - 0,35	Mg : - 0,2	Cl : - 0,23
	T : - 0,07	HCO <sub>3</sub> : - 0,15	Na : - 0,23
	SiO <sub>2</sub> : + 0,02	R : - 0,09	K : - 0,15
	SO <sub>4</sub> : + 0,22	Cl : + 0,02	SiO <sub>2</sub> : - 0,13
	Ca : + 0,34	Na : + 0,03	HCO <sub>3</sub> : - 0,09
	K : + 0,36	Ca : + 0,08	T : - 0,01
	Cl : + 0,37	K : + 0,10	Mg : + 0,14
	Na : + 0,37	SO <sub>4</sub> : + 0,19	R : + 0,31
	Mg : + 0,37	T : + 0,66	Ca : + 0,48
la plus significative	HCO <sub>3</sub> : + 0,39	SiO <sub>2</sub> : + 0,66	SO <sub>4</sub> : + 0,71

- selon l'axe 1 : la résistivité (R) est corrélée négativement avec la minéralisation (Ca, K, Cl, Na, Mg, HCO<sub>3</sub>).

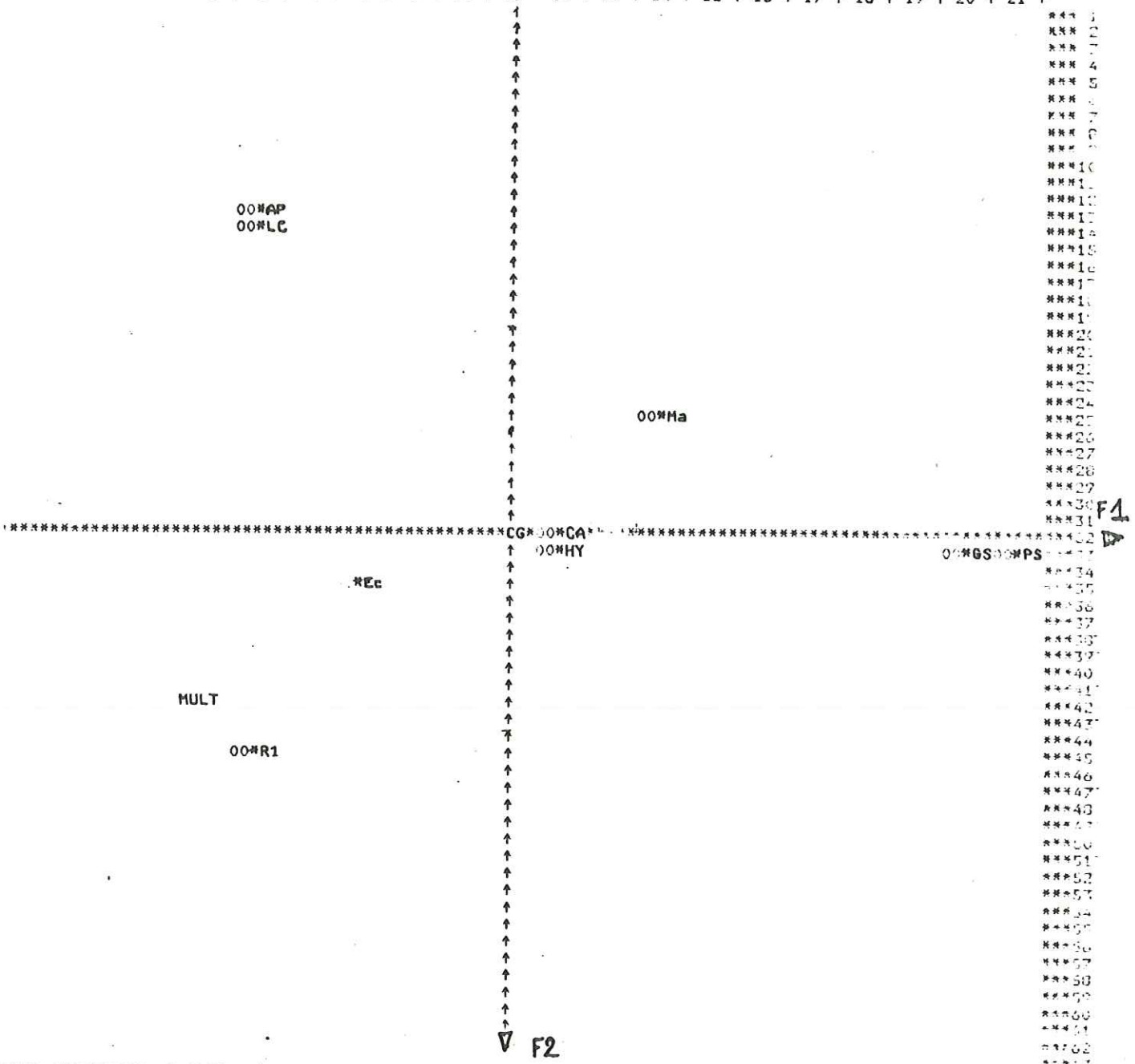
- selon l'axe 2 : la température (T) est corrélée positivement avec la teneur en silice dissoute ( SiO<sub>2</sub> )

- l'axe 3 amène une précision supplémentaire: il permet la différenciation des sources en fonction de leur teneur en sulfates (SO<sub>4</sub>). Il permet de visualiser la part de Ca liée aux sulfates alors que le facteur 1 ne traduit que celle liée aux carbonates.



Ecart-type(ou unite)=\*\*\*\*\*

1 ↑ 2 ↑ 3 ↑ 4 ↑ 5 ↑ 6 ↑ 7 ↑ 8 ↑ 9 ↑ 10 ↑ 11 ↑ 12 ↑ 13 ↑ 14 ↑ 15 ↑ 16 ↑ 17 ↑ 18 ↑ 19 ↑ 20 ↑ 21 ↑

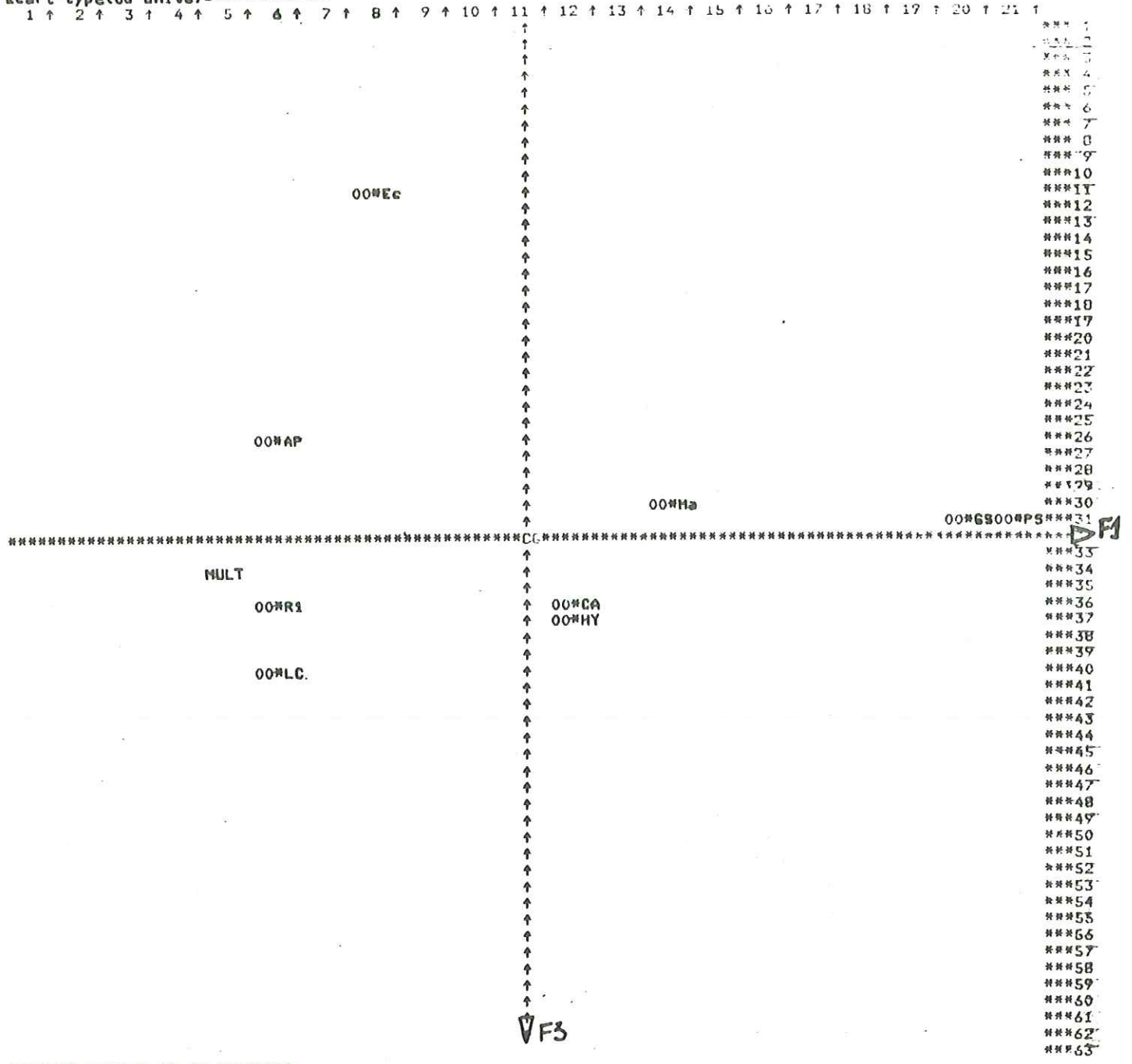


VALEURS MULTIPLES ET EXTREMES  
 LIGNE COL(=SCAR.) NOMS  
 42 5 00\*R4 00\*R3

- AP Amont du Pont
- Ma Massiago
- CA Charles ALbert
- GS Grande Source Chaude
- R1 Radiana 1
- LC La Coche
- Ec: Echailon
- Hy: Hybord
- PS: Petite Source Chaude
- MULT: R3 et R4 : Radiana 3 et 4

Fig. 75- ACPN des éléments majeurs - Représentation graphique dans le plan ( F1, F2 ).

Ecart-type(ou unite)=\*\*\*\*\*



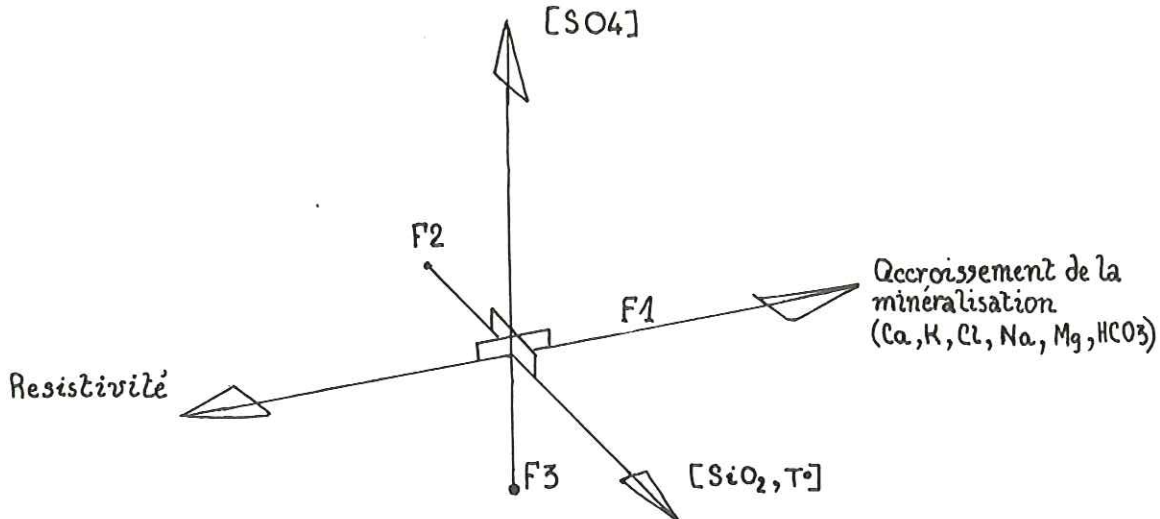
VALEURS MULTIPLES ET EXTREMES  
 LIGNE COL(=SCAR.) NQMS  
 34 5 00NR4 00NR3

AP\_Amont du Pont      LC\_La Coche  
 Ma\_Massiago          Ec\_Echaillon  
 CA\_Charles Albert    Hy\_Hybord  
 GS\_Grande Source Chaude    PS\_Petite Source Chaude  
 R1\_Radiana    MULT R3 et R4\_Radiana 3 et 4

Fig. 76 - ACPN des éléments majeurs - Représentation graphique dans le plan ( F1, F3 ).



Les trois directions de projections F1, F2 et F3 étant orthogonales entre elles, nous obtenons donc la disposition suivante :



Celle-ci schématise un trièdre de projection dans un espace à trois dimensions : simplification considérable de l'espace initial à dix dimensions.

Le programme d'analyse en composantes principales de l'Institut Dolomieu, écrit pour un micro-ordinateur Wang 2200 à 8 Koctet de mémoires, permet d'obtenir les représentations graphiques sur les axes factoriels pris 2 à 2.

Nous avons sélectionné les plans définis par les facteurs F1 et F2 et F1 et F3 représentant respectivement 82% et 72% de la variance totale du nuage de points. (cf. graphiques figures 75 et 76 ). En annexe, nous avons reporté la méthode de construction des graphiques par le calcul, afin de pouvoir rajouter un point supplémentaire éventuel.

#### V-2.2. Interprétation des graphiques obtenus

##### A - Dans le plan défini par les axes 1 et 2

Dans ce plan, 82% des variations chimiques sont visualisées : 60% sur l'axe associé à F1 et 22% sur l'axe associé à F2.

Nous rappelons que : selon l'axe 1, la minéralisation est corrélée négativement avec la résistivité.

Selon l'axe 2, la température est corrélée positivement avec la teneur en silice dissoute.

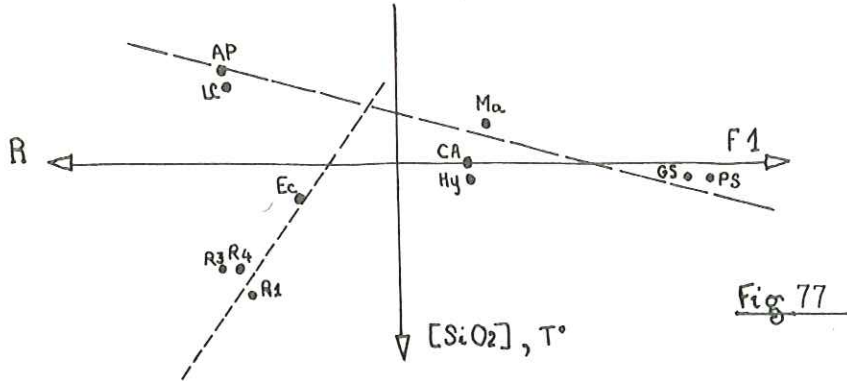
Dans ce plan (1,2), les sources des stations thermales de Brides les Bains et Salins les Thermes, ainsi que la source de La Coche (HY, CA, AP, GS, PS, Ma, LC) se dispersent selon une direction oblique par rapport aux axes 1 et 2 (cf. figure 75 ).

Toutes ces sources émergent au sein des terrains sédimentaires.

Par contre, les autres sources de La Léchère en Tarentaise et l'Echaillon en Maurienne (R1, R3, R4, Ec) se répartissent le long d'une direction qui révèle un accroissement de la résistivité en fonction de la température et de la teneur en silice dissoute (cf. figure 75 ).

Ces dernières sources jalonnent le contact cristallin sédimentaire.

Les deux directions précédemment décrites sont relativement orthogonales entre elles, ce qui peut signifier une relative indépendance de comportement géochimique entre ces deux familles : (cf, figure 77 )



— Dispersion des points représentatifs des sources internes au sédimentaire.

----- Dispersion des points représentatifs des sources jalonnant le contact cristallin sédimentaire.

Remarque : en ACPN, l'orthogonalité est une condition nécessaire mais non suffisante de l'indépendance.

#### Autre remarque concernant ce premier graphique

Les sources Amont du Pont (AP) de la station thermale de Brides les Bains et La Coche (LC) de l'Usine de Ste Hélène près d'Aigueblanche, en rive gauche de l'Isère, sont graphiquement très proches l'une de l'autre bien qu'étant géographiquement très éloignées.

Du fait de la grande représentativité de la projection (82%), nous en concluons une similitude géochimique entre ces deux sources.

#### B - Dans le plan défini par les axes 1 et 3

Dans ce plan (1,3), 72% des variations physico-chimiques des sources sont pris en compte : 60% selon F1 et 12% selon F3.

L'axe 3 est significatif de l'accroissement de la teneur en sulfates dans les sources thermominérales.

Cet axe ne représente que 12% des variations physico-chimiques. Il est essentiellement dû à la source de l'Echaillon (en Maurienne) bien plus pauvre en sulfates que les autres sources thermales.

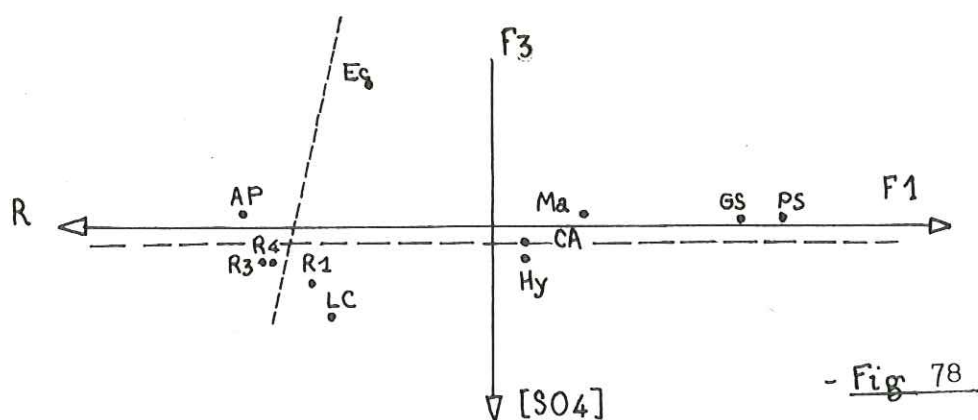
En effet, la moyenne annuelle de la teneur en sulfates de cette source est une valeur extrême : elle est inférieure de deux écarts-types à la moyenne annuelle de toutes les sources thermales étudiées.

Sur ce nouveau graphique (1, 3), les deux familles de sources précédemment individualisées se distinguent là encore l'une de l'autre.

Les sources issues des formations sédimentaires (La Coche, sources de Brides les Bains et Salins les Thermes) se répartissent selon une direction sub-parallèle à celle de l'axe 1.



Seules, les sources jalonnant le contact cristallin sédimentaire (sources de l'Echaillon en Maurienne et de La Léchère en Tarentaise) sont plus sensiblement dispersées selon une direction parallèle à l'axe 3 (cf. fig. 78 )



-----Dispersion des points représentatifs des sources situées au contact cristallin sédimentaire.

-----Dispersion des points représentatifs des sources internes au sédimentaire.

La distinction de comportement géochimique entre ces deux familles est donc fondamentale.

Notons aussi que, là encore, les sources Amont du Pont (AP) et La Coche (LC) apparaissent assez proches l'une de l'autre. La seconde étant sensiblement plus sulfatée que l'autre.

#### C - Dans le plan défini par les axes 2 et 3

Dans ce plan (2,3) 34% des variations physico-chimiques des sources sont pris en compte.

Il permettrait de visualiser, indépendamment des dispersions majeures, la nature anormalement pauvre en sulfate des sources de l'Echaillon et la nature plus siliceuse des sources de La Léchère.

#### V-3. Conclusion

L'analyse en composantes principales et les représentations graphiques qui en découlent se sont avérées très intéressantes dans notre étude des sources thermominérales de Tarentaise et de Maurienne.

En effet, tout en nous apportant un nouveau type de représentation graphique des eaux, cette analyse sur données centrées réduites nous a permis, malgré le nombre limité de sources thermales étudiées, de distinguer deux familles de sources à comportement géochimique différent :

- la première famille regroupe toutes les sources émergeant dans les formations sédimentaires : c'est-à-dire la source de La Coche et les sources des stations thermales de Brides-les-Bains et Salins-les-Thermes.

- la deuxième famille réunit les sources jalonnant le contact cristallin - sédimentaire : c'est-à-dire les sources des stations thermales de La Léchère en Tarentaise et de l'Echaillon en Maurienne.

Cependant, la question reste toujours posée de savoir si les deux stations de La Léchère et de l'Echaillon sont représentatives de toutes les sources de contact cristallin - sédimentaire.

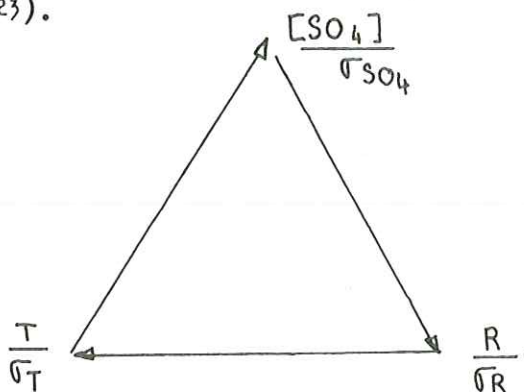
Pour répondre à cette question, il serait intéressant d'étendre l'analyse en composantes principales à de nouvelles sources thermominérales des Alpes occidentales.

Cette nouvelle étude serait d'un grand intérêt pour la recherche des corrélations qui existent d'une part entre les caractères physico-chimiques des sources (ou des stations) thermales et d'autre part entre les sources et leur situation géologique.

Notre étude montre que sur les trois facteurs qui prennent en compte 95% des variations physico-chimiques des sources, la résistivité est corrélée négativement à la minéralisation, la température est corrélée positivement avec la teneur en silice dissoute, et la teneur en sulfates a un comportement relativement indépendant.

Les trois variables : résistivité, température, teneur en sulfates, paraissent donc, en première approximation, les mieux appropriées pour donner une bonne caractérisation simple des sources thermominérales du secteur étudié.

Ainsi, parmi toutes les représentations graphiques triangulaires simples que l'on peut imaginer, le triangle formé par les variables résistivité, température, teneur en sulfates, est le plus intéressant de tous, car c'est celui qui se rapproche le plus du trièdre calculé par l'analyse en composantes principales (cf. figure p<sup>123</sup>).



Pour homogénéiser les unités, nous avons été conduits à réduire les données, c'est-à-dire à prendre l'écart-type de chaque variable comme unité de mesure.

Ainsi les coordonnées d'un point représentatif d'une source sont les suivantes :

$$\frac{T/\sigma_T}{\frac{SO_4}{\sigma_{SO_4}} + \frac{R}{\sigma_R} + \frac{T}{\sigma_T}} ; \frac{SO_4/\sigma_{SO_4}}{\frac{SO_4}{\sigma_{SO_4}} + \frac{R}{\sigma_R} + \frac{T}{\sigma_T}} ; \frac{R/\sigma_R}{\frac{SO_4}{\sigma_{SO_4}} + \frac{R}{\sigma_R} + \frac{T}{\sigma_T}}$$

Les points représentatifs des sources étudiées sont reportés sur le tableau 80 .

Sur la figure 79 le diagramme triangulaire simple fait à nouveau ressortir les deux directions différentes qui existent pour les deux familles de sources.

Pour toutes les raisons précédemment citées, et pour compléter l'analyse en composantes principales, nous utiliserons à nouveau cette analyse dans le chapitre consacré à l'étude des éléments traces dans les eaux thermominérales.



Fig. 79 Représentation des sources dans le diagramme  
R, T°, [SO<sub>4</sub>] .

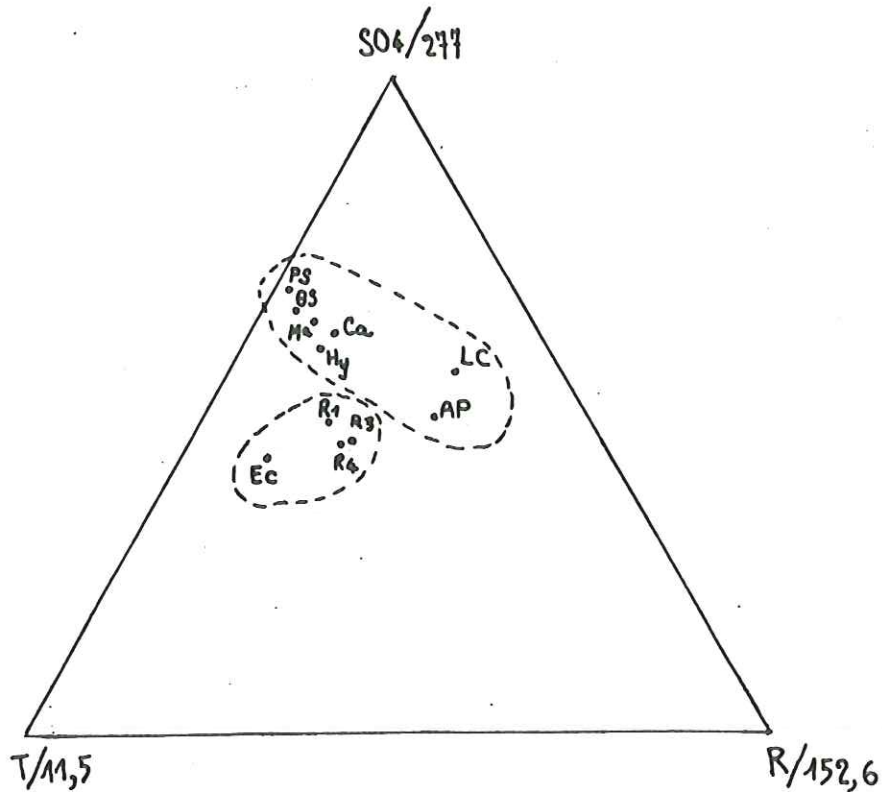


Tableau 80 Coordonnées des sources dans le diagramme  
R, T°, [SO<sub>4</sub>] .

Source	SO <sub>4</sub>	Res	Temp.
Amont du Pont .....	48.24	31.04	20.70
Hybord .....	59.77	9.62	30.59
Grande Source .....	65.27	3.87	30.85
Petite Source .....	65.86	3.36	30.77
Radiana 1 .....	45.62	18.30	36.06
Radiana 3 .....	44.26	20.11	35.61
Radiana 4 .....	44.61	20.55	34.83
Massiago .....	62.13	7.66	30.19
Charles Albert .....	60.80	9.75	29.43
Echailon .....	42.60	11.61	45.78
La Coche .....	54.51	30.69	14.78

Ca	*Mg	*Na	*K	*Cl	*SO4	*HCO3	*SiO2	*Res	*T	*Li	*Fe	*Mn	*Rb	*Sr	*Ag	*I	*B	
+1.00	+0.81	+0.66	+0.64	+0.65	+0.89	+0.72	+0.08	-0.53	-0.03	+0.74	+0.87	-0.43	+0.12	+0.93	+0.73	-0.46	+0.54	Ca
	+1.00	+0.80	+0.77	+0.79	+0.55	+0.94	-0.27	-0.72	-0.44	+0.77	+0.97	-0.40	+0.25	+0.91	+0.85	-0.44	+0.46	Mg
		+1.00	+0.81	+1.00	+0.31	+0.91	+0.14	-0.82	-0.10	+0.69	+0.76	+0.10	+0.69	+0.64	+0.97	+0.00	+0.54	Na
			+1.00	+0.81	+0.43	+0.79	+0.20	-0.93	-0.01	+0.96	+0.81	+0.10	+0.70	+0.69	+0.90	-0.15	+0.85	K
				+1.00	+0.31	+0.90	+0.14	-0.81	-0.11	+0.68	+0.75	+0.10	+0.69	+0.64	+0.96	-0.01	+0.52	Cl
					+1.00	+0.37	+0.19	-0.25	+0.17	+0.63	+0.66	-0.52	-0.13	+0.81	+0.41	-0.48	+0.47	SO4
						+1.00	-0.14	-0.83	-0.36	+0.71	+0.90	-0.14	+0.47	+0.76	+0.94	-0.17	+0.50	HCO3
							+1.00	-0.21	+0.96	+0.21	-0.17	+0.59	+0.49	-0.14	+0.14	+0.58	+0.54	SiO2
								+1.00	+0.01	-0.84	-0.75	-0.25	-0.75	-0.55	-0.91	-0.09	-0.81	Res
									+1.00	+0.04	-0.34	+0.48	+0.23	-0.25	-0.10	+0.57	+0.39	T
										+1.00	+0.85	-0.07	+0.50	+0.79	+0.81	-0.28	+0.88	Li
											+1.00	-0.35	+0.28	+0.91	+0.85	-0.45	+0.58	Fe
												+1.00	+0.75	-0.58	+0.08	+0.73	+0.26	Mn
													+1.00	+0.05	+0.68	+0.42	+0.63	Rb
														+1.00	+0.72	-0.61	+0.49	Sr
															+1.00	-0.05	+0.60	Ag
																+1.00	+0.04	I
																	+1.00	B

	MOYENNE (mg/l)	ECART-TYPE
Ca	570.60000	140.5597
Mg	88.48181	41.1656
Na	1461.21818	1726.3423
K	48.45454	35.3079
Cl	2177.00000	2818.1654
SO4	1486.24545	277.2264
HCO3	403.60909	283.8370
SiO2	36.45454	12.8395
Res	234.42727 $\mu\text{S/cm}$	152.5607
T	35.72727 $^{\circ}\text{C}$	11.4790
Li	1.91636	1.4803
Fe	0.90909	0.8166
Mn	0.29272	0.2031
Rb	0.19545	0.1433
Sr	14.11545	3.8403
Ag	0.01800	0.0188
I	0.27727	0.1252
B	1.66454	0.5118

Tableau . 81 - Matrice de corrélation des sources thermominérales (18 éléments)



SIXIEME PARTIE - ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES NORMEES EFFECTUEE SUR LES  
ELEMENTS MAJEURS ET LES ELEMENTS TRACES

VI-1. Introduction - But de l'ACPN

Nous avons procédé, comme avec les éléments majeurs, à une analyse en composantes principales normées, à partir des analyses chimiques complètes (éléments majeurs + éléments traces) des sources thermominérales. Compte tenu du nombre assez limité de dosages d'éléments en traces, cette analyse n'a pas la prétention d'être exhaustive.

Nous tenons cependant à la présenter comme un outil de travail intéressant qui pourrait être utilisé lors d'une étude beaucoup plus vaste ressemblant un très grand nombre de sources thermominérales des Alpes.

VI-2. Choix des variables

Les éléments majeurs pris en compte dans cette analyse en composantes principales normées sont les mêmes que ceux de l'analyse effectuée sur les éléments majeurs ; ils représentent là encore les moyennes annuelles des concentrations en ions des eaux thermominérales.

Les éléments traces, par contre, n'ont fait l'objet que d'une seule analyse par source. Seuls Li et Rb ont été dosés pendant plusieurs mois, mais, à chaque analyse, leurs concentrations sont restées identiques.

Les éléments traces qui ont été utilisés pour cette analyse en composantes principales normées sont les suivants : Li, Fe, Mn, Rb, Sr, Ag, I, B.

Le choix de ces derniers n'est pas arbitraire ; d'autres éléments traces ont été dosés mais se sont révélés à des concentrations inférieures à la limite de détection de l'appareil utilisé pour le dosage. Ceci est le cas du cuivre, du zinc et de l'aluminium.

D'autre part, l'arsenic s'est montré présent dans les eaux thermominérales. Cependant, la teneur de cet élément dans les eaux minéralisées s'est révélée anormalement élevée. Malheureusement, nous n'avons pas pu utiliser la méthode de Cribier pour doser cet élément car cette méthode longue nous posait encore quelques problèmes de manipulation.

VI-3. Etude de la matrice de corrélations

Le tableau 81 montre la matrice de corrélation des analyses chimiques complètes des 11 sources thermominérales : 18 éléments sont pris en compte et reliés 2 à 2 par des coefficients de corrélation.

Ces coefficients sont plus ou moins significatifs, et nous classerons les corrélations dans l'ordre suivant :

$r > 0,90$  : coefficients hautement significatifs  
 $0,80 > r > 0,90$  : coefficients significatifs

Le tableau 82 rassemble les corrélations selon leur importance.

Les bonnes corrélations qui lient les ions Ca, Mg, Sr ne sont pas surprenantes du fait de l'appartenance de ces ions à la même famille chimique des alcalino terreux. Il en va de même pour les alcalins.

Dans la matrice, on devrait s'attendre à trouver des coefficients hautement significatifs entre les ions Ca et Mg d'une part et les ions Ca - HCO<sub>3</sub> d'autre part.

Coefficient de corrélation $r > 0,90$	Coefficient de corrélation $0,80 < r < 0,90$
Na - Cl Ca - SO <sub>4</sub> Mg - HCO <sub>3</sub> Na - HCO <sub>3</sub> Cl - HCO <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub> - T° K - Li Mg - Fe HCO <sub>3</sub> - Fe Ca - Sr Mg - Sr Fe - Sr Ag - Na Ag - K Ag - Cl Ag - HCO <sub>3</sub>	Ca - Mg Fe - Ca Na - Mg Mg - Ag Na - K K - Cl K - Fe K - B SO <sub>4</sub> - Sr Li - Fe Li - Ag Li - B Fe - Ag

Tableau 82 - Corrélations significatives et  
hautement significatives



Cependant, on peut constater que le coefficient reliant les deux derniers ions n'est que de 0,72.

Ceci peut s'expliquer par le fait que le calcium est très bien corrélé avec l'ion  $\text{SO}_4$  : ainsi les teneurs en calcium semblent plus liées à des gypses qu'à des calcaires.

Certains ions montrent des corrélations significatives (ou hautement significatives) expliquables en partie par leur grande solubilité : par exemple : Fe Ca ; Fe Mg ; Fe  $\text{HCO}_3$  ; Cl Na ...

Le plus fort coefficient de corrélation relie les ions Na et Cl et se trouve égal à 1 suggérant que tous les ions Cl proviennent de la dissolution de NaCl. L'excès en Na provient de bicarbonate de sodium comme en témoigne le bon coefficient de corrélation qui relie  $\text{Na}^+$  à  $\text{HCO}_3^-$ .

Il est étonnant de voir que l'ion Ag est très bien corrélé avec l'ion Cl, (coefficient de 0,96) car AgCl est très peu soluble. Cependant, il faut noter que la teneur en argent des eaux thermominérales est toujours très faible (inférieure au ppm). Cette bonne corrélation peut être expliquée par une liaison antérieure (au niveau de la roche mise en solution) entre NaCl et AgCl.

Enfin, la corrélation des ions Sr et Fe est aussi hautement significative car le coefficient qui les relie est de 0,96.

Il n'existe pas d'affinité chimique directe entre ces deux ions et il serait peut-être intéressant d'analyser plus en détail cette observation.

#### VI-4. L'analyse en composantes principales normées

La démarche suivie étant exactement la même que celle de l'étude des éléments majeurs, nous donnerons directement les résultats.

L'analyse a été effectuée à partir d'une matrice de corrélations prenant en compte les 16 variables suivantes : Ca, Mg, Na, K, Cl,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ , Li, Fe, Mn, Rb, Sr, B, I, Ag.

La prise en compte de ces 16 variables nous a permis de définir 16 facteurs F (ou directions de projections) notés de F1 à F16 : F1 étant le facteur le plus discriminant et F16 le facteur le moins discriminant.

Les pourcentages de variations visualisés par chaque facteur, et donnés par l'analyse, nous ont permis de réduire cet espace à 16 dimensions à un espace à 3 dimensions donnant une représentation graphique qui prend en compte 92% des variations chimiques mesurées sur les sources thermominérales.

En effet, l'histogramme des pourcentages de variations est le suivant :

Facteur F	Pourcentage de variations pris en compte sur l'axe considéré	Pourcentages cumulés
1	59 %	59 %
2	23 %	83 %
3	9 %	92 %
4	4 %	96 %
5	1 %	98 %
6 à 16	1 %	99 %

Ainsi, comme pour les éléments majeurs seuls, nous négligerons les facteurs F4 à F16 et nous garderons les 3 directions de projections les plus discriminantes à savoir F1, F2 et F3.

tab. 83

Coefficients de corrélation des 16 variables selon les 3 directions les plus discriminantes: F1, F2, F3.

VARIABLE	Selon F1 59% des variations sont représentés	Selon F2 23% des variations sont représentés	Selon F3 9% des variations sont représentés
1	I - 0.100	Sr - 0.224	HCO <sub>3</sub> - 0.289
2	Mn - 0.056	SO <sub>4</sub> - 0.218	Cl - 0.231
3	SiO <sub>2</sub> - 0.023	Ca - 0.154	Na - 0.226
4	Rb + 0.158	Mg - 0.133	Mg - 0.194
5	SO <sub>4</sub> + 0.204	Fe - 0.119	Ag - 0.136
6	B + 0.230	HCO <sub>3</sub> + 0.008	Rb - 0.111
7	Ca + 0.281	Li + 0.040	Fe - 0.053
8	Cl + 0.283	Ag + 0.127	Mn - 0.022
9	Na + 0.285	K + 0.134	I - 0.019
10	Sr + 0.286	Cl + 0.143	K + 0.032
11	HCO <sub>3</sub> + 0.295	Na + 0.145	Sr + 0.084
12	Li + 0.296	B + 0.205	Li + 0.204
13	K + 0.296	SiO <sub>2</sub> + 0.354	Ca + 0.205
14	Mg + 0.300	I + 0.499	B + 0.365
15	Fe + 0.307	Rb + 0.425	SO <sub>4</sub> + 0.479
16	Ag + 0.307	Mn + 0.493	SiO <sub>2</sub> + 0.532



Les coefficients de corrélation des 16 variables selon les 3 directions de projections F1, F2 et F3 sont notés sur le tableau 83 .

Le tableau donné dans cette figure permet de différencier les 3 axes 1, 2 et 3 de la façon suivante :

- selon F1 : de nombreuses variables interviennent partiellement ; la majorité d'entre elles : Ca, Cl, Na, Sr, HCO<sub>3</sub>, Li, K, Mg, Fe et Ag présentent un coefficient de corrélation selon F1 compris entre 0,281 et 0,507.

Les variables Rb, SO<sub>4</sub>, B interviennent dans des pourcentages encore plus faibles.

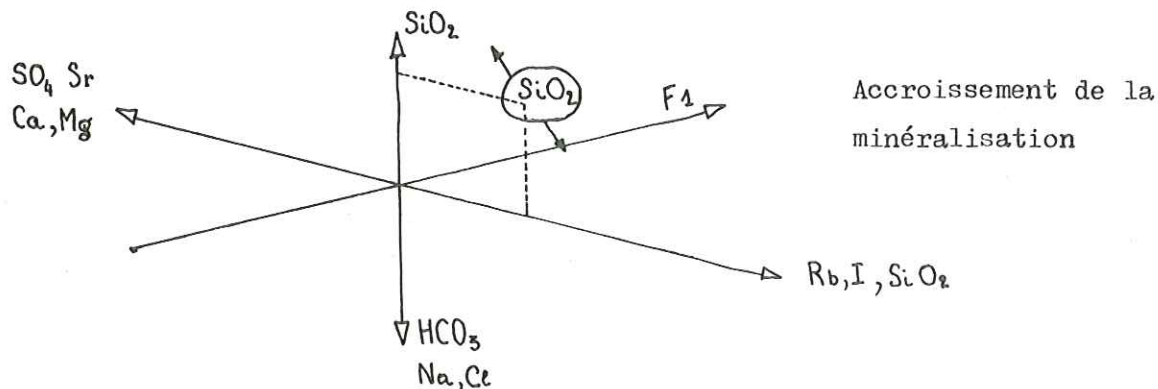
Seules les variables I, Mn, et SiO<sub>2</sub> présentent des coefficients négatifs mais proches de zéro ; ainsi, ces 3 dernières variables ne sont pas du tout significatives selon F1.

En définitive, l'axe F1 représente un enrichissement en minéralisation totale à savoir éléments majeurs + éléments traces à l'exception des variables I, Mn et SiO<sub>2</sub>.

- selon F2 : le groupement des variables Mn, Rb, I et SiO<sub>2</sub> se trouve opposé avec le groupement des variables Sr et SO<sub>4</sub> et accessoirement Ca et Mg.

- selon F3 : les variables SiO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub>, B (accessoirement Li et Ca) sont corrélées négativement avec la variable HCO<sub>3</sub> (et Na et Cl).

Schématiquement, l'espace factoriel principal tridimensionnel se représente par le trièdre de projection :



Nous voyons que la variable SiO<sub>2</sub> se partage selon les deux directions F2 et F3, cependant, elle est plus significative selon F3 que selon F2, où elle n'apparaît que secondairement.

#### Représentations graphiques :

Le programme nous permettant d'établir les représentations graphiques des sources selon les axes factoriels pris 2 à 2, nous avons sélectionné les représentations graphiques dans les plans (F1, F2) et (F1, F3) qui prennent en compte respectivement 83% et 67% des variations chimiques des sources étudiées. Les figures 84 et 85 montrent ces représentations graphiques.

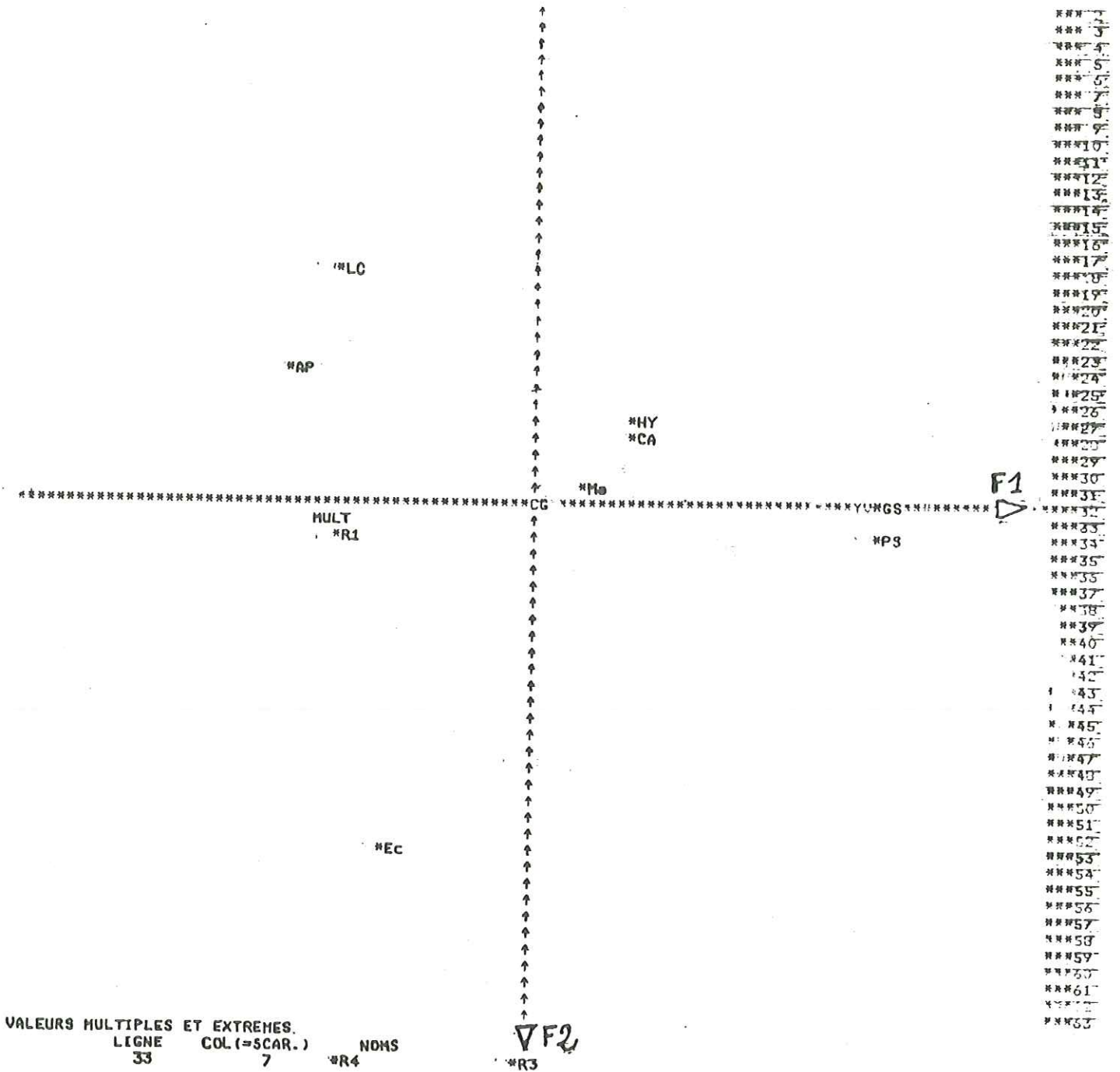
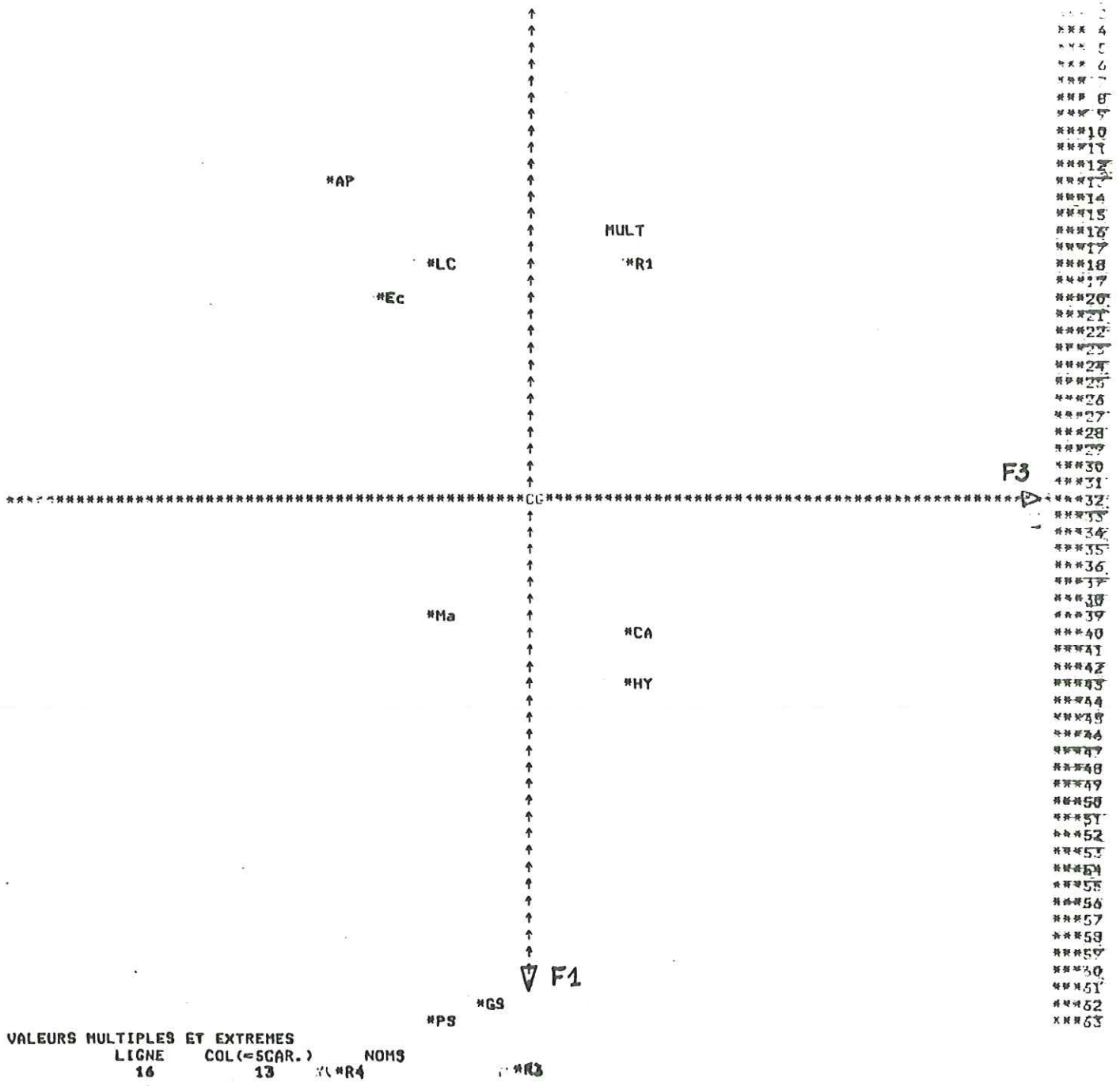


Fig.84 - ACPN des éléments majeurs et mineurs - Représentation graphique dans le plan ( F1, F2 ).





\*\*\* 4  
 \*\*\* 5  
 \*\*\* 6  
 \*\*\* 7  
 \*\*\* 8  
 \*\*\* 9  
 \*\*\*10  
 \*\*\*11  
 \*\*\*12  
 \*\*\*13  
 \*\*\*14  
 \*\*\*15  
 \*\*\*16  
 \*\*\*17  
 \*\*\*18  
 \*\*\*19  
 \*\*\*20  
 \*\*\*21  
 \*\*\*22  
 \*\*\*23  
 \*\*\*24  
 \*\*\*25  
 \*\*\*26  
 \*\*\*27  
 \*\*\*28  
 \*\*\*29  
 \*\*\*30  
 \*\*\*31  
 \*\*\*32  
 \*\*\*33  
 \*\*\*34  
 \*\*\*35  
 \*\*\*36  
 \*\*\*37  
 \*\*\*38  
 \*\*\*39  
 \*\*\*40  
 \*\*\*41  
 \*\*\*42  
 \*\*\*43  
 \*\*\*44  
 \*\*\*45  
 \*\*\*46  
 \*\*\*47  
 \*\*\*48  
 \*\*\*49  
 \*\*\*50  
 \*\*\*51  
 \*\*\*52  
 \*\*\*53  
 \*\*\*54  
 \*\*\*55  
 \*\*\*56  
 \*\*\*57  
 \*\*\*58  
 \*\*\*59  
 \*\*\*60  
 \*\*\*61  
 \*\*\*62  
 \*\*\*63

AP\_Amont du Pont    LC\_La Coche    Ec\_Echaillon  
 CA\_Charles Albert    Hy\_Hybord    Ma\_Massiago  
 GS\_Grande Source Chaude    PS\_Petite Source Chaude  
 R1\_Radiana1    MULT R3 et R4\_Radiana 3 et 4

Fig.85. - ACPN des éléments majeurs et mineurs - Représentation graphique dans le plan ( F1, F3 ).

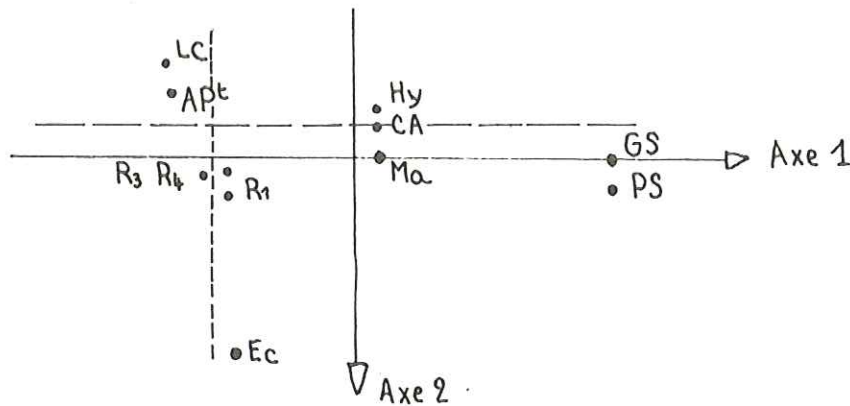
VI-5. Interprétations des résultatsA - Représentation graphique dans le plan (F1, F2)

Fig 86

Axe 1 : enrichissement de la minéralisation totale  
(éléments majeurs + éléments traces)

Axe 2 : Mn, Rb, I sont corrélés négativement avec les variables  $SO_4$ , Sr, Ca, Mg.

Sur ce graphique, les points : LC, Apt, Hy, CA, Ma, GS, PS qui sont représentatifs des sources : La Coche (Aigueblanche), Amont du Pont, Hybord, Charles Albert (Brides les Bains), Massiago, Grande Source Chaude, Petite Source Chaude (Salins les Thermes), semblent se disperser selon une direction plus ou moins parallèle à l'axe 1.

Par contre, les points R1, R3, R4 et Ec qui sont représentatifs des sources Radiana1, Radiana 3, Radiana 4 (La Léchère, Tarentaise), Echaillon (Maurienne), se répartissent plutôt selon une direction parallèle à l'axe 2.

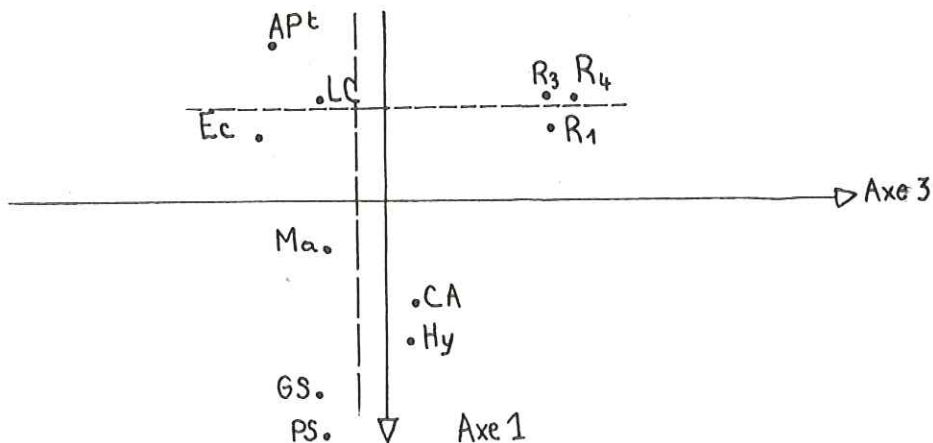
B - Représentation graphique dans le plan (F1, F3)

Fig 87

Axe 1 : Enrichissement de la minéralisation totale (éléments majeurs + éléments traces)

Axe 3 : Les variables  $SiO_2$ ,  $SO_4$ , B sont corrélées négativement avec les variables  $HCO_3$ , Cl, et Na.



Sur ce nouveau graphique, comme sur le précédent, les points LC, APt, CA, Hy, Ma, GS, PS représentatifs des sources La Coche (Aigueblanche), Amont du Pont, Charles Albert, Hybord (Brides les Bains), Massiago, Grande Source Chaude, Petite Source Chaude (Salins les Thermes) se répartissent selon une direction parallèle à l'axe 1. Par contre, les points Ec, R3 et R4 représentatifs des sources Echaillon (Maurienne), Radiana 1, Radiana 3 et Radiana 4 (La Léchère, Tarentaise) se dispersent selon une direction parallèle à l'axe 3.

### C - Représentation graphique dans l'espace tridimensionnel

Des deux graphiques précédents, nous avons tiré la figure 88 qui montre la représentation graphique des sources thermominérales dans l'espace factoriel principal tridimensionnel. Cette dernière constitue une bonne synthèse de l'étude géochimique nous avons effectuée.

Dans cette représentation graphique les sources sont symbolisées par une petite sphère, et pour mieux situer chaque sphère dans l'espace, les coordonnées de leurs centres sont matérialisées par des parallélépipèdes.

#### Commentaire de la figure 88 .

L'examen de cette représentation permet d'émettre plusieurs hypothèses qu'il faudrait confirmer par une étude statistique basée sur un plus grand nombre de sources, car sur seulement 11 données il est difficile de faire la part du hasard (phénomène aléatoire) de phénomènes liés par un facteur physique. Ces hypothèses sont les suivantes :

. Tout d'abord, la distinction entre les sources émergeant dans le sédimentaire et les sources jalonnant le contact cristallin-sédimentaire est ici bien matérialisée.

Les sources de Brides les Bains, Salins-les-Thermes et La Coche se dispersent selon l'axe correspondant à un accroissement de la minéralisation totale.

Les sources de La Léchère et de l'Echaillon se répartissent par contre selon l'axe correspondant à des teneurs en éléments traces.

Cette première hypothèse peut paraître tout à fait fortuite pour définir la tendance Léchère - Echaillon.

Cependant, il est étonnant de voir que tous les graphiques tirés d'une part de l'ACPN sur les éléments majeurs et d'autre part de l'ACPN sur les éléments majeurs et les éléments traces font ressortir cette différence de comportement qui semble s'établir entre les sources qui émergent au sein du sédimentaire, et les sources qui jalonnent le contact cristallin - sédimentaire.

#### Autres hypothèses

Sur le graphique, nous avons relié ensemble les sources de la station thermale de Brides les Bains d'une part et les sources de la station thermale de Salins les Thermes d'autre part.

Nous voyons que si nous nous déplaçons selon l'axe 1 vers un accroissement de la minéralisation totale, nous rencontrons successivement :

à Brides : la source Amont du Pont, puis les sources Hybord et Charles Albert.

à Salins : la source Massiago, puis les sources chaudes minéralisées des Vieux Bains.

Les sources Amont du Pont à Brides et Massiago à Salins se distinguent des autres et pour expliquer cette distinction, nous envisageons les hypothèses suivantes :

- à Brides, la source Amont du Pont présente les mêmes caractères chimiques que les sources Charles Albert et Hybord. On pourrait donc penser que ces trois sources ont la même origine profonde.

REPRESENTATION SYNTHÉTIQUE  
DANS L'ESPACE FACTORIEL TRIDIMENSIONNEL  
DES SOURCES THERMINÉRALES ETUDIÉES

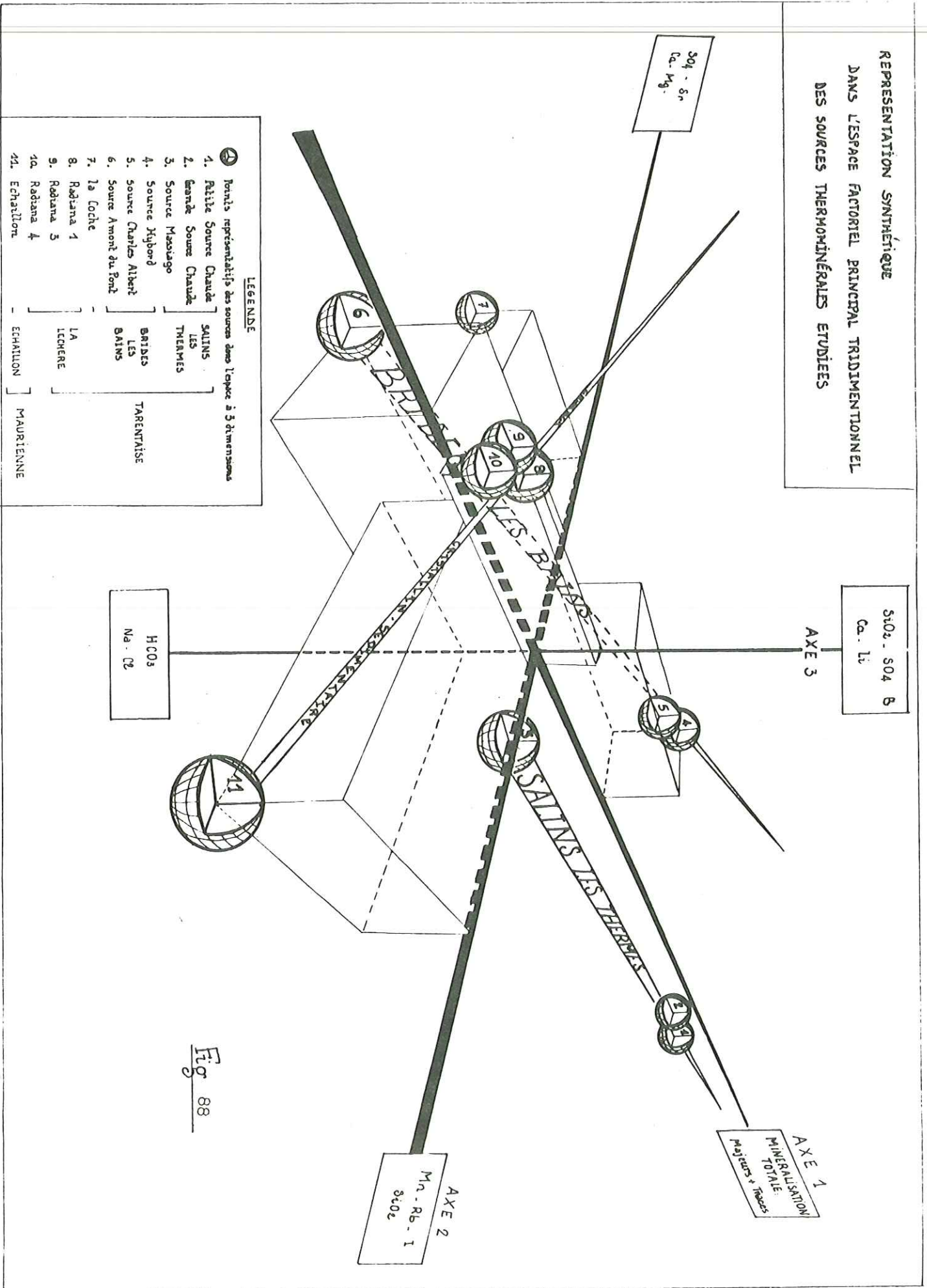


Fig 88



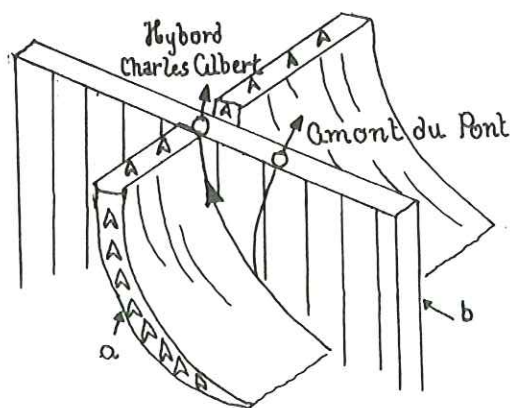
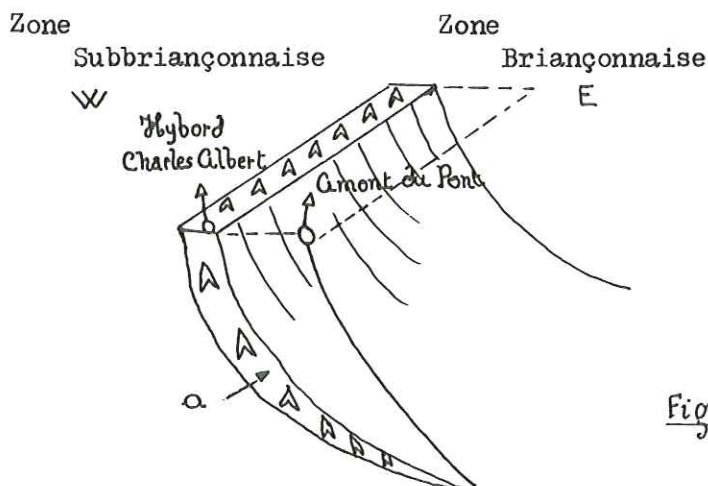
Cependant, lors de la remontée, une partie des eaux minéralisées "s'échapperait" et emprunterait une autre voie d'ascension pour venir former la source Amont du Pont.

Ainsi, la minéralisation moins élevée de la source Amont du Pont pourrait s'expliquer soit par une ascension plus rapide des eaux, soit par un mélange avec des eaux froides subsuperficielles ou superficielles.

Schématiquement, nous aurions :

Dans l'hypothèse des Chevauchements

Dans l'hypothèse des grands accidents de vallées



a : plan de chevauchement

b : système de fracturation de direction  $\approx N140^\circ$

- à Salins, la source Massiagio présente les mêmes caractéristiques physico-chimiques que les sources chaudes minéralisées des Vieux Bains, mais la minéralisation totale est moins élevée.

L'origine de cette source Massiagio pourrait donc s'expliquer de la même façon que la source Amont du Pont avec les mêmes schémas.

Cependant, dans le cas de la source Massiagio, la minéralisation moins élevée ne peut pas s'expliquer par un mélange avec des eaux plus froides subsuperficielles ou superficielles car la teneur en Tritium de cette eau est plus basse que celle des eaux chaudes minéralisées des Vieux Bains, et voisine de 13 U.T.

Ainsi, la minéralisation plus élevée des sources chaudes des Vieux Bains serait due à leur cheminement beaucoup plus long sur la surface de chevauchement.

VI-6. Conclusion à l'ACPN effectuée sur les éléments majeurs et les éléments traces

L'analyse en composantes principales normées nous a permis de présenter une représentation graphique des sources thermominérales étudiées dans l'espace factoriel tridimensionnel.

Avec seulement 11 points d'analyses, cette représentation nous incite à formuler des hypothèses qui, comme nous l'avons déjà dit, doivent être considérées comme des voies de recherches pour une nouvelle étude réunissant un plus grand nombre de sources thermominérales des Alpes.

Une telle étude permettrait d'une part d'analyser le comportement géochimique des sources les unes par rapport aux autres, et l'évolution géochimique des sources thermominérales dans l'espace : enrichissement de tel ou tel élément d'Ouest en Est ou du Nord au Sud ... ; et d'autre part, d'aboutir à une représentation graphique comme celle que nous avons réalisée dans la figure 88 et qui servirait de synthèse à l'étude géochimique des sources thermominérales.

SEPTIEME PARTIE - CONCLUSION A L'ETUDE HYDROCHIMIQUE ET GEOCHIMIQUE  
DES EAUX THERMOMINERALES

VII - 1. Etude hydrochimique

L'étude hydrochimique des eaux thermominérales de Tarentaise et de l'Echaillon en Maurienne nous a permis d'acquérir des résultats intéressants sur les relations des différentes sources entre elles.

Tout d'abord, nous avons vu que chaque station thermale se caractérise par une composition chimique particulière qui la distingue des autres.

Au sein de certaines stations thermales, nous avons pu mettre en évidence, grâce à la construction de diagrammes Schoeller, une parenté de plus en plus lâche des sources chaudes aux sources froides.

C'est au niveau de la station de Salins les Thermes que cette caractéristique est la plus évidente.

En effet, les sources froides minéralisées des Vieux Bains semblent provenir d'une dilution des eaux chaudes minéralisées avec des eaux froides superficielles. Sur diagramme Schoeller, le profil chimique des sources froides est en position intermédiaire entre celui des sources chaudes et celui du Doron.

Par rapport à la composition chimique des sources chaudes minéralisées, les sources froides représentent :

- . environ 25% des teneurs en  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_2$  des sources chaudes.
- . environ 5% des teneurs en  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  de ces sources chaudes.

D'autre part, la source Massiago de la sortie amont de Salins a une composition chimique très voisine de celle des sources chaudes avec : environ 80% des concentrations en  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et environ 45% des teneurs en  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  des sources chaudes minéralisées.

A la station de Brides les Bains, la source Amont du Pont correspond à une diminution de 30 à 35% des teneurs en  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et de 70% des teneurs en Na et Cl des deux autres sources chaudes minéralisées : Hybord et Charles Albert.

Ainsi, à la fin de l'étude hydrochimique des sources thermominérales on pourrait penser que dans ces deux stations, il existe une évolution depuis les eaux chaudes anciennes non mélangées avec des eaux froides superficielles jusqu'aux eaux froides superficielles représentées par les eaux récentes de la nappe alluviale du Doron.

Les sources de composition chimique intermédiaire entre les deux extrêmes (eaux très anciennes et eaux actuelles) correspondent à des mélanges plus ou moins importants des eaux profondes avec des eaux de plus en plus récentes, semisuperficielles et superficielles.



## VII - 2. Etude géochimique

Les études géochimiques réalisées sur les eaux minéralisées nous ont apporté des informations supplémentaires.

Les analyses statistiques ont fait ressortir deux familles de sources à comportement géochimique différent :

. la première famille réunit les sources émergeant dans les formations sédimentaires. (Eaux de Brides les Bains, Salins les Thermes, La Coche)

. la deuxième famille regroupe les sources jalonnant le contact cristallin - sédimentaire (eaux de La Léchère et de l'Echaillon)

D'autre part, la représentation synthétique dans l'espace factoriel tridimensionnel des sources thermominérales étudiées nous a permis d'émettre des hypothèses selon lesquelles certaines eaux ne proviendraient pas d'un mélange des eaux chaudes anciennes avec les eaux froides récentes mais plutôt d'un cheminement souterrain différent des eaux chaudes minéralisées.

Cette dernière observation pourrait expliquer l'origine des sources Amont du Pont à Brides les Bains et Massiago à Salins les Thermes.

Afin de discriminer les sources en fonction de leur comportement dans le sous-sol et leurs origines respectives, nous avons étudié leurs teneurs en isotopes stables et instables : oxygène 18, Deutérium, Tritium.

CHAPITRE III



PREMIERE PARTIE - ETUDE DES TEMPERATURES DES EAUX THERMOMINERALES EN PROFONDEUR  
PAR LES GEOTHERMOMETRES CHIMIQUES

L'utilisation des géothermomètres chimiques est très délicate en présence de terrains évaporitiques.

Cependant, en raison de la proximité de terrains cristallins en Tarentaise (séries cristallophylliennes du massif de Belledonne à l'Ouest de La Léchère et massif cristallin d'Hautecour au Nord de Moûtiers) et en Maurienne (massif du Grand Chatelard), nous avons tenté d'utiliser les géothermomètres chimiques pour déterminer les T° atteintes par les eaux en profondeur.

Ainsi, nous avons utilisé le géothermomètre Silice (SiO<sub>2</sub>), le géothermomètre sodium-potassium (Na-K), le géothermomètre calcium-sodium-potassium (Ca-Na-K), le géothermomètre géologique de H. et M. Schoeller (1976), et enfin, les courbes de mélange des eaux selon la méthode de Fournier et Truesdell (1974).

I-1. Les géothermomètres Na-K et Na-K-Ca

Les teneurs en sodium et potassium des eaux proviennent de la dissolution de ces éléments par les eaux chaudes en profondeur dans les roches cristallines particulièrement dans les feldspaths.

En l'absence de terrains évaporitiques dans la couverture sédimentaire, lors de la remontée des eaux chaudes vers la surface, ces teneurs ne varient pas.

La température atteinte en profondeur calculée à partir du rapport Na/K est alors donnée par la formule:

$$T_2 = \frac{908}{\log \text{Na/K} + 0,70}$$

L'utilisation du géothermomètre Na-K-Ca préconisé par Fournier et Truesdell (1973) fait intervenir l'ion Ca provenant des plagioclases qui peut modifier les conditions de solubilité des autres éléments.

Lors de la remontée rapide des eaux chaudes, les teneurs, inférieures à la limite de solubilité des éléments, ne sont pas modifiées par le refroidissement des eaux car ces teneurs sont généralement peu élevées et très inférieures à la solubilité des ions à basse température.

De ce fait, les températures maximales atteintes par les eaux en profondeur peuvent être obtenues grâce à la formule :

$$T_3 = \frac{1647}{\log \text{Na/K} + \beta \log \sqrt{\text{Ca/Na}} + 2,24} - 273$$

avec  $\beta = 1/3$  ou  $4/3$

Cette formule est calculée à partir de la composition molaire des eaux.

### I-2. Le géothermomètre Silice

Ce géothermomètre permet, à partir des teneurs en silice observées aux émergences, de calculer la température minimale à laquelle s'est faite en profondeur la mise en solution de la silice des roches cristallines.

En effet, la teneur en silice dissoute est directement liée à la température. Lorsque les eaux chaudes remontent et se mélangent éventuellement avec des eaux froides, la valeur de saturation de la silice est atteinte et cette dernière précipite.

C'est pour cette raison que la silice obtenue à l'émergence correspond en fait à la teneur en silice du mélange des eaux chaudes avec des eaux froides (après précipitation d'une partie de la silice) et non à la teneur en silice des eaux chaudes à grande profondeur.

Nous obtenons donc à l'émergence une valeur minimale de la température atteinte en profondeur. Cette température est donnée par la formule de Fournier et Truesdell en 1974 :

$$T1 = \frac{1522}{5,75 - \log \text{SiO}_2 \text{ ppm}} - 273$$

### I-3. Le géothermomètre géologique

Ce géothermomètre mis au point par H. et M. Schoeller permet de calculer les coefficients de mise en solution des ions à partir de la composition chimique de la roche cristalline dans laquelle l'eau chaude circule en profondeur.

Comme nous l'avons déjà dit, c'est à partir de cette roche que l'eau acquiert sa teneur en silice, sodium et potassium lorsque, bien entendu, il n'existe pas de terrains salifères près des sources considérées.

Ces coefficients n et m sont en fait les coefficients de réaction entre la roche initiale et le produit final de la décomposition des feldspaths.

Ils sont donnés par les formules :

$$n = \frac{\text{Na} + \text{K}}{\text{SiO}_2 - \text{SiO}_2'}$$

$$\text{et } m = \frac{\text{Na} + \text{K} + \text{Ca} + \text{Mg}}{\text{SiO}_2 - \text{SiO}_2'}$$

Les teneurs en Na, K, Ca, et Mg de la roche cristalline sont exprimées en milliéquivalents.

La teneur en  $\text{SiO}_2$  est en moles.

$\text{SiO}_2'$  correspond à la quantité de silice qui reste fixée sous forme d'argile lors de la décomposition du feldspath alcalin. ( $\text{SiO}_2' = 2(\text{Al}_2\text{O}_3)$ ).

Ainsi, à partir de ces coefficients, nous pouvons calculer la teneur en silice maximale atteinte par les eaux en profondeur avant tout mélange avec des eaux froides. Pour cela, il faut tenir compte de la minéralisation de l'eau et la teneur en  $\text{H}_4 \text{SiO}_4$  est obtenue grâce aux formules :

$$\text{H}_4 \text{SiO}_4 = \frac{\text{Na} + \text{K} - \text{Cl}}{n}$$

$$\text{H}_4 \text{SiO}_4 = \frac{\text{Na} + \text{K} + \text{Ca} + \text{Mg} - \text{Cl}}{m}$$

où  $\text{H}_4 \text{SiO}_4$  est obtenue en millimoles.

Les concentrations en Na, K, Ca, Mg et Cl des eaux sont prises en milliéquivalents.

Ensuite, grâce à cette teneur maximale en silice atteinte en profondeur, il est possible de trouver la valeur de la température  $T4$  acquise par l'eau en profondeur en employant la formule donnant la température en fonction de la teneur en silice :



$$T4 = \frac{1522}{5,75 - \log \text{SiO}_2 \text{ ppm}} - 273$$

Les compositions chimiques des roches cristallines ayant servi au calcul des  $t^\circ$  en profondeur par le géothermomètre géologique de Schoeller sont données dans le tableau 91 ainsi que leurs coefficients  $n$  et  $m$ .

#### Les courbes de mélanges :

C'est une méthode proposée par Fournier et Truesdell en 1974.

Connaissant la température et la teneur en silice des eaux normales de la région, il est possible de calculer la température acquise en profondeur et le pourcentage d'eaux froides qui se mélangent à l'eau chaude.

Dans le cas de mélanges binaires, la fraction d'eau froide est fonction des températures et des enthalpies initiales des sources thermominérales et des eaux froides superficielles de la région :

$$x\% = \frac{H_c - s}{H_c - f}$$

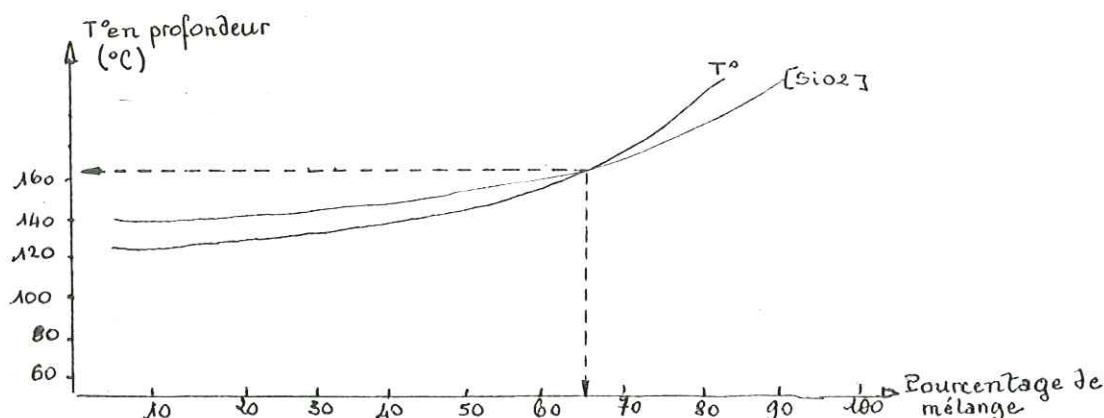
$\left\{ \begin{array}{l} H_c = \text{enthalpie de l'eau chaude} \\ T_s = T^\circ \text{ de l'eau thermominérale} \\ T_f = T^\circ \text{ de l'eau froide superficielle} \end{array} \right.$

D'autre part, les pourcentages de silice contenue dans les eaux chaudes profondes sont fonction des teneurs en silice des sources thermominérales et des eaux froides superficielles de la région considérée.

$$x\% \text{ SiO}_2 = \frac{\text{SiO}_2c - \text{SiO}_2s}{\text{SiO}_2c - \text{SiO}_2f}$$

$\left\{ \begin{array}{l} \text{SiO}_2c = \text{teneur en silice de l'eau chaude} \\ \text{SiO}_2s = \text{teneur en silice de la source thermominérale} \\ \text{SiO}_2f = \text{teneur en silice des eaux froides superficielles de la région.} \end{array} \right.$

Les courbes théoriques d'évolution des mélanges tracées à partir des valeurs des enthalpies et des teneurs en silice des eaux en profondeur se recoupent en un point qui correspond à la température maximale atteinte par l'eau en profondeur et au pourcentage d'eau froide intervenant dans le mélange :



#### I-4. Résultats obtenus

Toutes les températures  $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$ ,  $T4$ ,  $T5$ , des eaux en profondeur, calculées à partir des différents géothermomètres chimiques sont regroupées sur le tableau 90.

	T	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Hybord	37	101	143	210	165	220	170
Charles Albert	35	101	163	225	153	210	170
Grande Source Chaude	33	97	64	166	130	-	65
Petite Source Chaude	36	98	58	162	162	-	66
Source Massiago	31	76	61	156	170	150	69
La Coche	17	45	(217)	180	126	138	-
Radiana	53	108	163	194	150	190	170
Echailon	40	100	102	193	141	200	94

Tableau 90 : Tableau des températures des eaux en profondeur calculées à partir des différents géothermomètres.

T : température à l'émergence

T1: t° calculée à partir du géothermomètre SiO<sub>2</sub>

T2: t° calculée à partir du géothermomètre Na-K

T3: t° calculée à partir du géothermomètre Na-K-Ca

T4: t° calculée à partir du géothermomètre Schoeller-

T5: t° calculée à partir des courbes de mélanges.

T6: t° calculée à partir du géothermomètre Na-Li.

Roche analysée	Pourcentages d'oxydes						n	m
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O		
Granulite de Notre Dame de Briançon ( Tarentaise )	75.2	13.86	.30	.69	2.76	4.49	.187	.275
Granite du Châtelard ( Maurienne )	68.2	15.52	.80	1.66	2.70	4.75	.111	.170

Tableau 91 : Composition chimique des roches cristallines utilisées pour calculer T<sub>4</sub>.



Pour toutes les eaux, la température en profondeur donnée par le géothermomètre Silice est voisine de 100°.

La source La Coche échappe à cette observation. La teneur très faible de l'eau de La Coche en silice dissoute est due au fait que l'eau de La Coche résulte probablement d'un mélange d'eau chaude et d'eau froide plus superficielle.

Les températures fournies par le géothermomètre Na-K sont un peu plus élevées que les précédentes (en moyenne 50° de plus que les températures données par le géothermomètre silice).

Cependant, les températures T2 des sources thermominérales de Salins les Thermes sont beaucoup plus basses que les températures T1. Les sources thermominérales de Salins les Thermes étant les plus riches en ClNa proviennent probablement de la dissolution de terrains évaporitiques, il est normal que les températures obtenues par le géothermomètre Na-K ne soient pas significatives.

Le géothermomètre Na-K-Ca fait intervenir l'ion Ca qui se trouve en grande quantités dans les terrains évaporitiques de la région sous forme de gypses. De ce fait, là encore, les résultats obtenus dans le calcul des températures T3 des eaux chaudes en profondeur sont faussés. Les valeurs de températures trouvées paraissent exagérées, surtout en ce qui concerne les eaux thermominérales de la station de Brides les Bains. (cette station est située dans la zone des gypses qui sépare la Zone Subbriançonnaise à l'Ouest de la Zone Briançonnaise à l'Est).

Le géothermomètre géologique de Schoeller donne des températures T4 très homogènes, comprises entre 130° et 170°. Ces températures obtenues par calcul sont sûrement les plus proches des températures atteintes en réalité par les eaux chaudes en profondeur.

Les températures T5 données par les courbes de mélange sont très élevées et se rapprochent des températures calculées par le géothermomètre Na-K-Ca.

Nous avons en effet tracé sur un même diagramme, d'une part les courbes donnant la température observée à l'émergence en fonction du pourcentage de mélange, et, d'autre part, les courbes représentatives de la teneur en silice à l'émergence en fonction du pourcentage de mélange.

Tous les pourcentages de mélange calculés par cette méthode se sont révélés supérieurs à 80 % et incompatibles avec les teneurs en tritium mesurées sur ces eaux.

Cette observation nous incite à penser soit que nous nous trouvons en présence de mélanges faisant intervenir plus de deux constituants, soit que les eaux chaudes ne se mélangent pas avec des eaux superficielles, mais avec des eaux que nous qualifierons de "semi superficielles" ne provenant pas de la nappe alluviale mais de circulations dans le versant.

Récemment, Fouillac et Michard (1979) ont mis au point un nouveau géothermomètre faisant intervenir les ions Na et Li. Les températures atteintes par les eaux en profondeur sont données par la formule :

$$T6 = \frac{1000}{\log \frac{Na}{Li} + 0,38} - 273$$

Les températures T6 obtenues par le calcul sont reportées sur le tableau de la figure 90. Nous voyons que ces dernières sont très voisines des températures obtenues par le géothermomètre Na-K.

D'autre part, Oustrière et Leleu (1979) ont mis au point un nouveau géothermomètre faisant intervenir les concentrations en sulfates totaux et en carbonates totaux des eaux thermales étudiées.

Un modèle théorique a été établi à partir d'une étude statistique menée sur 76 forages répartis dans 6 zones géothermales différentes et nous avons tenté de l'appliquer avec nos données.

Les relations reliant d'une part les sulfates totaux et d'autre part le rapport des concentrations en carbonates totaux et sulfates totaux à la température des eaux thermales sont les suivantes :

$$T7 = 74,91 \log \frac{\sum CO_3}{\sum SO_4} + 192$$

$$T8 = 110,42 \log \sum SO_4 - 150$$

Les résultats obtenus à partir de nos données sont rassemblés dans le tableau :

Sources	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	T7°C	T8°C
Hybord	6,67	17,8	160°	43°
Charles Albert	6,73	17,68	160°	43°
Amont du Pont	4,54	11,11	162°	66°
Petite Source Chaude Grande Source Chaude	14	18,55	183°	41°
Source Massiago	12,03	15,34	184°	50°
Sources Radiana	1,56	16,55	115°	46°
Echailion	5,14	9,22	173°	74°
La Coche	4,42	15,45	151°	50°

Les températures T7 se rapprochent beaucoup des températures T3 ou T4 calculées à partir des géothermomètres Na-K-Ca et Schoeller. Seules, les sources Radiana donnent des températures plus basses avec cette dernière méthode de calcul.

Les températures T8 sont aberrantes et montrent là encore l'utilisation délicate des géothermomètres en présence de terrains évaporitiques.



DEUXIEME PARTIE - ETUDE DES EAUX PAR LES ISOTOPES

Il existe dans la nature divers isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène dont les caractéristiques sont les suivantes :

oxygène banal	$^{16}\text{O}$	99,76%	stable
oxygène	$^{17}\text{O}$	0,04%	"
oxygène	$^{18}\text{O}$	0,20%	"
Hydrogène banal	H	99,98%	stable
Deutérium (D)	$^2\text{H}$	0,015%	"
Tritium (T)	$^3\text{H}$	$10^{-15}$ à $10^{-12}$ %	instable radioactif (T = 12,6 ans)

Les isotopes stables :  $^{16}\text{O}$  et  $^2\text{H}$  ainsi que l'isotope radioactif  $^3\text{H}$  constituent de bons traceurs intrinsèques de la molécule d'eau.

L'étude des variations des teneurs en  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$  et  $^3\text{H}$  de la molécule d'eau permet d'une part de préciser le temps de transit moyen d'une eau dans le sous sol, et d'autre part, de révéler la présence de mélanges d'eaux anciennes avec des eaux récentes.

Dosage du Tritium : le tritium observé dans les précipitations a deux origines : une naturelle et l'autre artificielle.

La production naturelle de tritium résulte de l'interaction entre les neutrons provenant du rayonnement cosmique, et l'azote atmosphérique.

Le taux de cette production naturelle a été évalué à 0,25 atome/cm<sup>2</sup>/sec. (LAL et PETERS 1962, LAL et SUESS 1968). Les précipitations en contiendraient selon les régions de 5 à 20 UT (B. R. PAYNE 1972).

La production artificielle de tritium est la plus importante. Elle provient des explosions thermonucléaires qui ont débuté en 1952 puis en 1954, 1958, 1961, 1962.

Depuis cette période, les teneurs en tritium des précipitations sont montées à plusieurs centaines, voire plusieurs milliers d'unités tritium selon les années et ce phénomène oblitère totalement la production naturelle. Actuellement, les teneurs moyennes en tritium des précipitations dans les régions tempérées de l'hémisphère Nord sont proches de 80 à 100 UT.

Ainsi, en comparant la teneur en tritium d'une eau à son émergence avec les teneurs annuelles en tritium des précipitations locales, et en tenant compte du taux de décroissance du tritium (période 12,6 ans) nous pouvons déterminer le temps de transit moyen d'une eau dans le sol. Ce temps de transit est souvent appelé "âge" de l'eau.

Expression des résultats : les teneurs en tritium sont exprimées en unités tritium (UT), une unité tritium correspondant à la présence d'un atome de tritium pour  $10^{18}$  atomes d'hydrogène (soit un microcurie dans 300 m<sup>3</sup> d'eau).

Une eau tritiée qui s'infiltré dans le sol sans subir d'apports extérieurs perdra la moitié de son activité radioactif en 12 ans environ. A sa réapparition en surface, cette eau sera d'autant plus pauvre en tritium qu'elle se sera infiltrée profondément dans le sol, car il est généralement admis que l'eau s'infiltré lentement dans le sol et remonte par des voies d'ascension rapide. En ce qui concerne les eaux thermales, celles ci se caractérisant par des circulations à de très grandes profondeurs présenteront à leurs émergences les plus faibles teneurs en tritium si, bien entendu, elles ne subissent pas de mélanges d'eaux froides au cours de leur remontée vers la surface.

Les teneurs en tritium des eaux étudiées sont données dans le tableau 92.

	Température moyenne	Oxygène 18		Tritium				Deutérium
		Mai 78	Février 79	Mai 78	Octobre 78	Février 79	Avril 79	Avril 79
Amont du Pont	20°		-14,18			64 ± 4		
Hjborð	37°	-14,29		39 ± 3	36 ± 3		24 ± 4	
Charles Albert	35°		-14,42			24 ± 2		
Grande Source Chaude	33°	-13,35	-13,19			26 ± 3	20 ± 2	-96,1
Petite Source Chaude	56°	-13,31	-13,38		36 ± 3	27 ± 3		
Source Massiago	50°		-13,04		12 ± 2	12 ± 2	15 ± 2	
Source Froide	9°		-13,58			68 ± 5	61 ± 4	
Source du Cariveau	9°		-13,81			69 ± 5		
La Coche	17°		-13,27			29 ± 3		
Radiana 1	53°			17 ± 2	9 ± 1			
Radiana 3	50°		-13,01			15 ± 2		-91,4
Radiana 4	49°			21 ± 2				
Doron							78 ± 4	
F1							74 ± 4	
F2							76 ± 4	
F3							72 ± 4	
F4								
Bonnaval							39 ± 3	
Echailon	40°				8 ± 1			

Tableau 92 : Composition isotopique des eaux étudiées



Dosage de l'oxygène 18 :  $H_2^{16}O$  étant la variété la plus volatile, la vapeur d'eau océanique est appauvrie en isotopes lourds par rapport à l'eau océanique.

Au fur et à mesure que les nuages se déplacent vers l'intérieur du continent, leur vapeur d'eau sera de plus en plus appauvrie en isotopes lourds au cours des précipitations, et par conséquent, les pluies seront de plus en plus légères. Ce phénomène est appelé "l'effet de continentalité".

Les valeurs en oxygène 18 des eaux s'expriment en part pour mille de différence (ou ‰) par rapport à un standard international de référence : le SMOW défini par Craig en 1961.

$$\delta \text{ ‰} = \frac{R \text{ échantillon} - R \text{ standard}}{R \text{ standard}} \quad \text{avec } R = \frac{180}{160}$$

(Par définition  $\delta \text{ ‰}$  du SMOW est nul)

D'autre part, la pression de vapeur variant en fonction de la température, le fractionnement isotopique noté  $\delta$  varie en fonction inverse de la température. Comme dans une région donnée, la température varie avec l'altitude, il est possible de relier le fractionnement isotopique  $\delta$  à l'altitude. Ainsi, il est possible d'estimer l'altitude d'infiltration des eaux météoriques grâce à l'équation de Dansgaard :

$$\delta \text{ ‰}^{18}O = at + b$$

avec  $a = 0,55$  d'après E. Siwertz (1973) ;  $b = 1,38$  et  $t =$  température moyenne annuelle de l'air. En prenant un gradient altimétrique de température de  $0,53^\circ C$  par 100m (gradient calculé dans les Alpes par Angot), nous pouvons écrire :

$$t = m h + n \quad \text{avec} \quad \begin{cases} m = -0,53 \cdot 10^{-2} \\ n = 13,48 \\ t = \text{température moyenne annuelle} \end{cases}$$

Ainsi entre 2 points d'altitude différente :

$$\Delta \delta = \delta_2 - \delta_1 = 0,55 \Delta t \quad \Delta t = \frac{\Delta \delta}{0,55}$$

$$\text{or } \Delta t = t_2 - t_1 = -0,53 \cdot 10^{-2} (h_2 - h_1) = -0,53 \cdot 10^{-2} \Delta h$$

De là :

$$\Delta t = \frac{\Delta \delta}{0,55} = -0,53 \cdot 10^{-2} \Delta h \quad \Delta h = \frac{-\Delta \delta}{0,55 \times 0,53 \cdot 10^{-2}} = -343 \Delta \delta$$

Soit  $H_i$  l'altitude d'infiltration des eaux et  $H_o$  l'altitude de l'émergence :

$$\Delta h = H_i - H_o \quad H_i = \Delta h + H_o$$

$$H_i = -343 \Delta \delta + H_o$$

$$\Delta \delta = \delta^{18}O \text{ théorique} - \delta^{18}O \text{ de la source.}$$

calcul de  $\delta^{18}O$  théorique : La température moyenne annuelle calculée à partir des mesures mensuelles de la région est de  $10^\circ$ .

$$\delta^{18}O \text{ théorique} = (0,55 \times 10) + 1,38 = 6,88$$

Ayant toutes les données à notre disposition, nous avons calculé les altitudes d'infiltrations à partir de cette méthode.

Le tableau 92 regroupe les valeurs  $\delta^{18}O$  des eaux étudiées. A partir de ces dernières et des altitudes des émergences nous avons obtenu les altitudes d'infiltrations suivantes :

Brides-les-Bains	{	Hybord	3122 m
		Charles Albert	3166 m
		Amont du Pont	3089 m
Salins-les-Thermes	{	Grande Source Chaude	2644 m
		Petite Source Chaude	2716 m
		Source Massiago	2618 m

La Léchère                    { Radiana 1    2540 m  
                                  { Radiana 3 et Radiana 4    2450 m

Nous verrons plus loin quelle conclusion nous pouvons tirer de ces résultats.

Dosage du Deutérium : comme l'oxygène 18, les teneurs en deutérium sont régies par les processus de condensation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère.

Ainsi, les concentrations des précipitations en isotopes stables varient en fonction de la latitude, de l'altitude et de la saison. (Le fractionnement isotopique augmentant avec la température, c'est en hiver que les précipitations seront les plus pauvres en isotopes lourds).

Les mesures simultanées de ces 2 isotopes lourds  $^2\text{H}$  et  $^{18}\text{O}$  sont très intéressantes car les teneurs de ces derniers sont toujours proportionnelles et sont reliées linéairement par la relation de Craig 1961 :

$$\delta \text{ } ^2\text{H} = 8 \delta \text{ } ^{18}\text{O} + b$$

La constante b varie selon les régions. Pour toutes les précipitations d'origine océanique  $b = 10$  ; et b est un peu supérieur à 10 dans les petits bassins fermés.

Dans la région étudiée, nous prendrons  $b = 12,5$  qui correspond à la droite de Craig de référence donnée pour la région d'Evian (Haute-Savoie).

### Interprétations des résultats

Le tableau 92 donne les teneurs en isotopes lourds et en tritium des eaux étudiées.

Les teneurs en tritium les plus fortes apparaissent d'une part aux sources froides minéralisées de Salins les Thermes et d'autre part, à la Source Amont du Pont à Brides les Bains.

Par contre, les valeurs les plus faibles, de l'ordre de 15 UT, s'observent à la source Massiago de Salins les Thermes et aux sources Radiana de La Léchère. Ce sont donc ces eaux qui témoignent du plus faible pourcentage de mélange (si mélange il y a) avec des eaux froides semi-superficielles. De même les eaux de l'Echaillon sont extrêmement pauvres en tritium puisqu'elles ne possèdent que 8 UT.

Les eaux chaudes des stations de Brides les Bains (Hybord et Charles Albert) et de Salins les Thermes (Grande Source Chaude et Petite Source Chaude) ainsi que l'eau de La Coche - usine de Ste Hélène, présentent des teneurs un peu plus fortes que la source Massiago mais encore très faibles : de l'ordre de 30 UT.

La nappe alluviale du Doron prélevée dans les 4 piézomètres implantés à Salins les Thermes présente la même teneur en tritium que le Doron. Cette teneur, de l'ordre de 75 UT, est très proche de la concentration en  $^3\text{H}$  des précipitations actuelles.

La teneur en tritium de la source de Bonneval (40 UT) située au Nord de Bourg St Maurice à une trentaine de kilomètres au Nord des sources de Salins les Thermes s'est révélée aussi assez faible, mais un peu plus forte que la teneur en  $^3\text{H}$  des sources thermominérales de Salins.

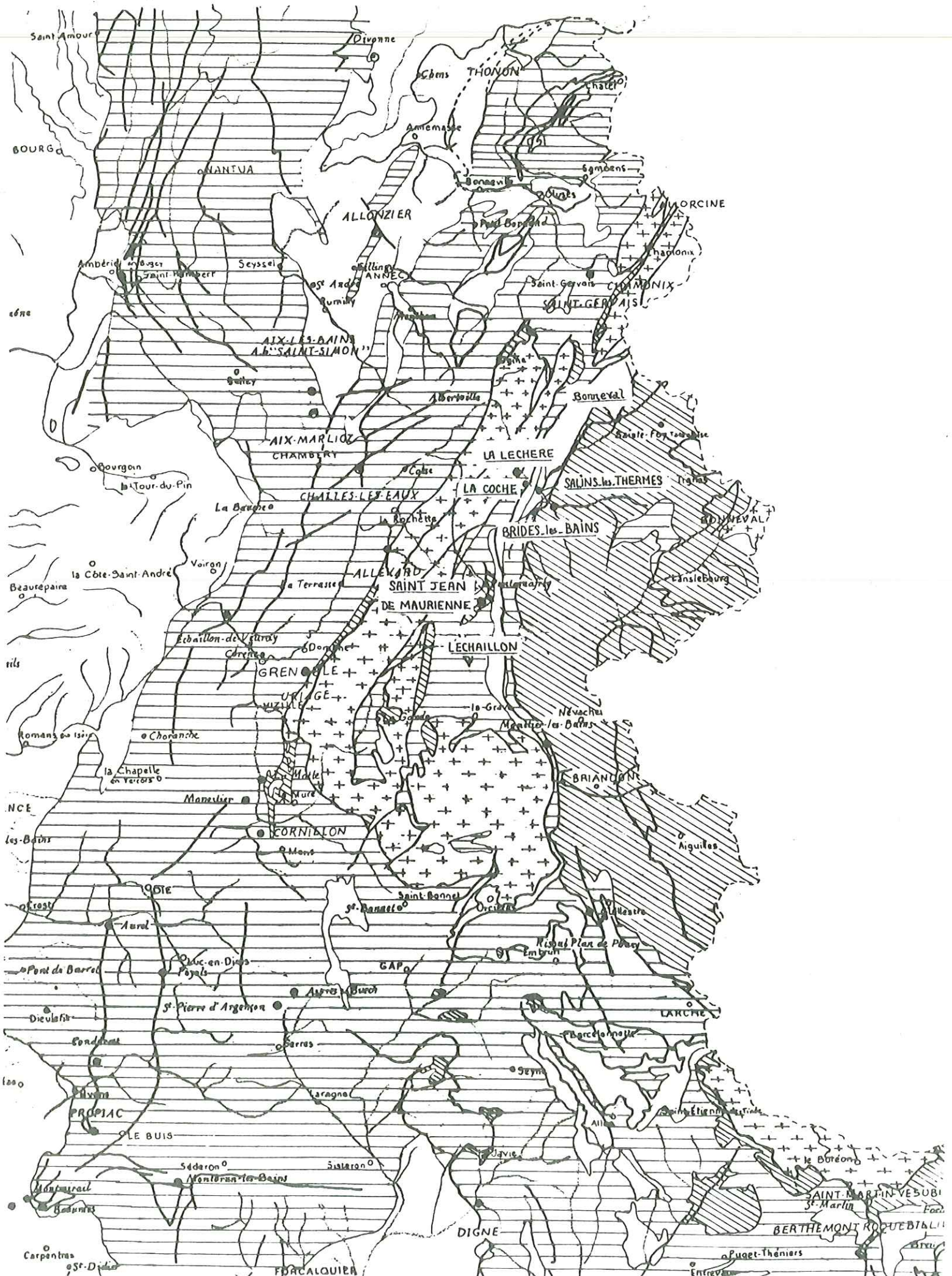
L'étude de cette source thermominérale de Bonneval nous a paru intéressante du fait de sa position dans les mêmes formations que les sources thermominérales de Salins les Thermes. (cf figure 93 ).

La source de Bonneval, maintenant abandonnée sort à environ 30°.

Nous n'avons pas pu étudier systématiquement cette eau du point de vue chimique, mais nous en avons cependant analysé la teneur en tritium et nous verrons aussi plus loin l'analyse des boues rouges qu'elle dépose à son émergence.



Fig 93- SITUATION GÉOGRAPHIQUE DES STATIONS THERMALES ÉTUDIÉES





Nous pensons que cette source de Bonneval subit un apport d'eau froide non négligeable mais que nous n'avons pas déterminé.

Compte tenu des très faibles teneurs en tritium (le plus souvent inférieures à 30 UT) des sources thermominérales étudiées, nous pensons que ces dernières correspondent soit à des eaux anciennes ayant circulé lentement dans le substratum, soit à des mélanges d'eaux très anciennes avec des pourcentages faibles d'eaux subsuperficielles à faibles teneurs en tritium.

Nous pouvons essayer d'évaluer l'ordre de grandeur des proportions dans les mélanges en utilisant le tritium comme un géothermomètre.

En considérant que les eaux thermominérales dérivent de mélanges binaires, nous pouvons retrouver les pourcentages de mélange d'eau chaude très ancienne sans tritium avec des eaux actuelles contenant environ 80 UT en écrivant :

$$x \times 0 \text{ UT} + (1 - x) \times 80 \text{ UT} = y \text{ UT}$$

avec  $x$  = pourcentage d'eau chaude ancienne sans tritium

$(1 - x)$  = pourcentage d'eau froide récente à 80 UT (teneur moyenne des précipitations régionales actuelles)

$y$  = teneur en tritium de la source thermominérale considérée.

Avec cette méthode en utilisant dans les calculs les teneurs en tritium des eaux minéralisées du mois de février 1979, nous obtenons les résultats suivants :

	y teneur en H de la source	x pourcentage d'eau chaude	(1 - x) pourcentage d'eau froide
La Léchère	12 UT	85 %	15 %
L'Echaillon	8 UT	90 %	10 %
La Coche	30 UT	62 %	38 %
Salins			
Sources chaudes minéralisées	26 UT	67 %	33 %
sources froides minéralisées	68 UT	15 %	85 %
source Massiago	14 UT	82 %	18 %
Bonneval	39 UT	51 %	49 %
Brides les Bains			
CA + Hybord	25 UT	68 %	32 %
Amont du Pont	62 UT	28 %	75 %

Ce tableau montre que dans le cas de mélanges binaires simples, les eaux thermominérales des stations thermales de La Léchère et de L'Echaillon seraient constituées d'environ 10 à 15% d'eau froide superficielle.

En revanche, dans les eaux thermales de La Coche, Salins (sources chaudes minéralisées) et Brides les Bains (Charles Albert et Hybord), le pourcentage d'eau froide qui se mélange à l'eau chaude ancienne serait plus important et compris entre 30 et 40 %.

Les eaux chaudes de Bonneval (au Nord de Bourg St Maurice) seraient diluées à 50 % par les eaux froides superficielles.



La source Massiagio de Salins les Thermes est moins influencée par les eaux froides superficielles, ces dernières ne participent que pour 18% à la composition de l'eau.

Du fait de sa très faible teneur en tritium, cette source Massiagio ne peut pas être considérée comme le résultat d'une dilution des sources chaudes minéralisées des Vieux Bains de Salins avec des eaux froides superficielles.

Il est étonnant de voir que la Source Amont du Pont de Brides les Bains fait intervenir une fraction importante d'eau froide superficielle égale à 75 %. Nous pensons que cette valeur ne reflète pas la réalité car elle ne coïncide pas avec le fait que la chimie de la source est très constante.

Ainsi, la source Amont du Pont ne provient pas d'un mélange binaire d'eau chaude profonde avec l'eau froide superficielle du Doron. Il faut donc envisager pour cette source soit un mélange d'eaux chaudes très anciennes avec des eaux semi-superficielles, soit un mélange comprenant plusieurs constituants, ce qui nous interdit alors d'utiliser cette méthode de calcul.

Ce sont les sources froides minéralisées des Vieux Bains de Salins les Thermes qui montrent le plus fort pourcentage d'eau froide, voisin de 85 %.

Les teneurs en oxygène 18 des sources étudiées sont très stables dans le temps comme en témoigne le tableau de la figure 92.

Ces valeurs obtenues aux émergences indiquent que les eaux thermales s'infiltrent à des altitudes très élevées, proches de 2700 m en moyenne.

Il est important de noter que des réactions d'échange d'oxygène 18 peuvent intervenir dans le circuit des eaux thermales : ces réactions sont de deux types.

\* échange avec la matrice du réservoir : la teneur en  $^{18}\text{O}$  de l'eau tend en général à se rapprocher de son encaissant. Dans ce cas, l'échange de l'oxygène 18 se fait dans le sens d'un enrichissement de l'eau en  $^{18}\text{O}$ .

\* échanges avec un composé gazeux : il faut que ce dernier soit en grande abondance. C'est alors la composition de ce gaz qui est modifiée plutôt que celle de l'eau. Cependant, la présence d'un gaz tel que le gaz carbonique peut provoquer un appauvrissement de l'eau en oxygène 18.

De ces deux cas, seul le deuxième peut être retenu dans le cadre de notre étude.

En effet, s'il y a échange de l'oxygène 18 avec celui de la roche, cela voudrait dire qu'à l'émergence les teneurs en  $^{18}\text{O}$  observées sont plus fortes que les teneurs réelles d'infiltration.

Nous aurions donc calculé à partir des teneurs en  $^{18}\text{O}$  aux émergences, une altitude minimale d'infiltration, et l'altitude réelle serait très supérieure à 3000 m, ce qui paraît invraisemblable.

La deuxième réaction, par contre, peut se produire dans le cas des sources étudiées. Cependant, il faut remarquer qu'à Salins-les-Thermes, la Grande Source Chaude très chargée en  $\text{CO}_2$  présente la même teneur en  $^{18}\text{O}$  que les sources froides minéralisées dépourvues en  $\text{CO}_2$  et que la Petite Source Chaude bien plus pauvre en gaz carbonique.

De ce fait, si la présence de  $\text{CO}_2$  dans les sources étudiées provoque des réactions d'échange d'oxygène 18, ces dernières sont infimes, et peuvent être considérées comme négligeables.

— Comparaison des différentes teneurs en isotopes

Le report des teneurs en  $\delta^{18}O$  des sources en fonction des teneurs en  $\delta^{3}H$  nous montre que les eaux dont les teneurs en  $\delta^{2}H$  ont été dosées se situent soit sur la droite des eaux météoriques de Craig (c'est le cas des sources Radiana), soit un peu en dessous de cette droite : c'est le cas de la Grande Source Chaude de Salins-les-Thermes. (Nous rappelons que la droite de Craig de référence que nous avons prise est caractérisée par la formule linéaire :

$$\delta^{3}H = 8 \delta^{18}O + 12,5 \quad (\text{cf. figure 94})$$

Nous avons essayé de corréler la teneur en  $\delta^{18}O$  des eaux étudiées avec leur teneur en tritium.

La représentation graphique de cette corrélation apparaît sur la figure 95 .

Nous voyons ainsi qu'il semble exister une relation entre les teneurs en tritium et en oxygène 18 des eaux thermominérales de Tarentaise. La teneur en tritium paraît inversement proportionnelle à la teneur en oxygène 18, ce qui pourrait prouver que les eaux froides intervenant dans les mélanges proviennent d'altitudes plus élevées que les eaux chaudes profondes.

D'autre part, cette représentation fait ressortir une évolution des teneurs en  $^3H$  et  $^{18}O$  des sources d'Est en Ouest.

En effet, les eaux thermominérales de Brides-les-Bains station thermale la plus orientale, sont les plus riches en tritium, mais les plus pauvres en oxygène 18.

Par contre, les eaux de la station de La Léchère qui se trouve être la station la plus occidentale de toutes, sont les plus pauvres en tritium mais les plus riches en oxygène 18.

Les eaux de la station de Salins les Thermes et les eaux de La Coche situées entre les deux stations précédemment citées, occupent une position intermédiaire sur le diagramme ainsi établi.

Cette observation nous incite à penser que les sources thermominérales de Tarentaise proviennent de circuits hydrothermaux alimentés par des mélanges d'eaux chaudes et froides au sein desquels, soit les eaux chaudes soit les eaux froides, se sont infiltrées à des altitudes de plus en plus élevées pour les stations les plus orientales.

Ce phénomène peut provenir d'un mélange de moins en moins important des eaux chaudes avec des eaux froides d'Est en Ouest car, dans ce sens de déplacement, les teneurs en tritium sont de plus en plus faibles.

En conclusion, nous pensons que les eaux thermominérales de Tarentaise sont des eaux d'origine météorique, qui se sont infiltrées à des altitudes élevées (de l'ordre de 2800 m) et croissantes d'Ouest en Est.

De telles altitudes d'infiltrations sont à rechercher à l'Est, dans des zones plus internes.

— Conséquence des résultats acquis sur la composition isotopique des eaux thermominérales étudiées

L'étude de la teneur en isotopes des eaux thermominérales nous a permis d'estimer les pourcentages de mélanges des eaux dans l'hypothèse simple de mélanges binaires.

Ainsi, les eaux thermominérales des sources jalonnant le contact cristallin - sédimentaire sont composées d'un mélange d'eau chaude avec environ 10 % d'eau froide superficielle.



Figure 94 : CORRÉLATION  $\delta\text{‰}^{18}\text{O}$ -D POUR LES SOURCES THERMOMINÉRALES DE TARENTEISE

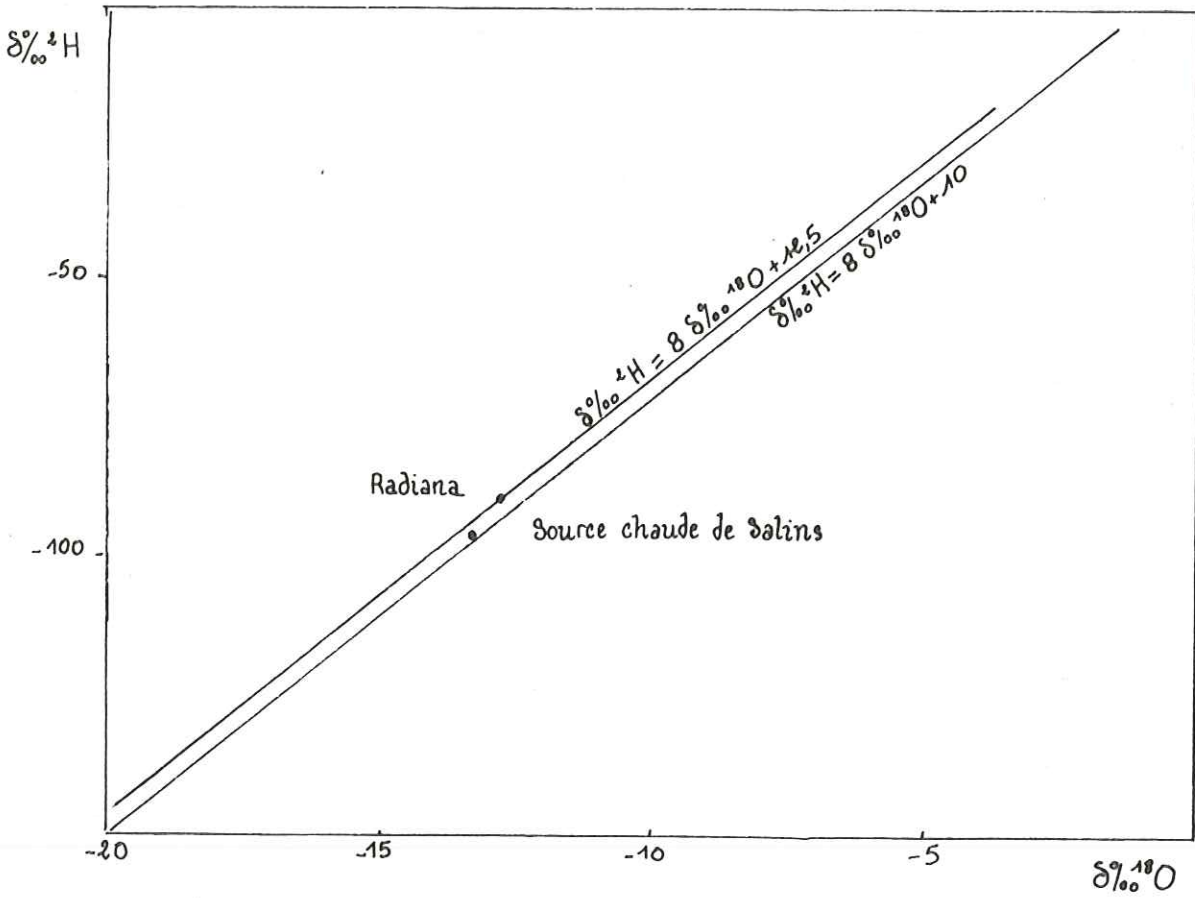
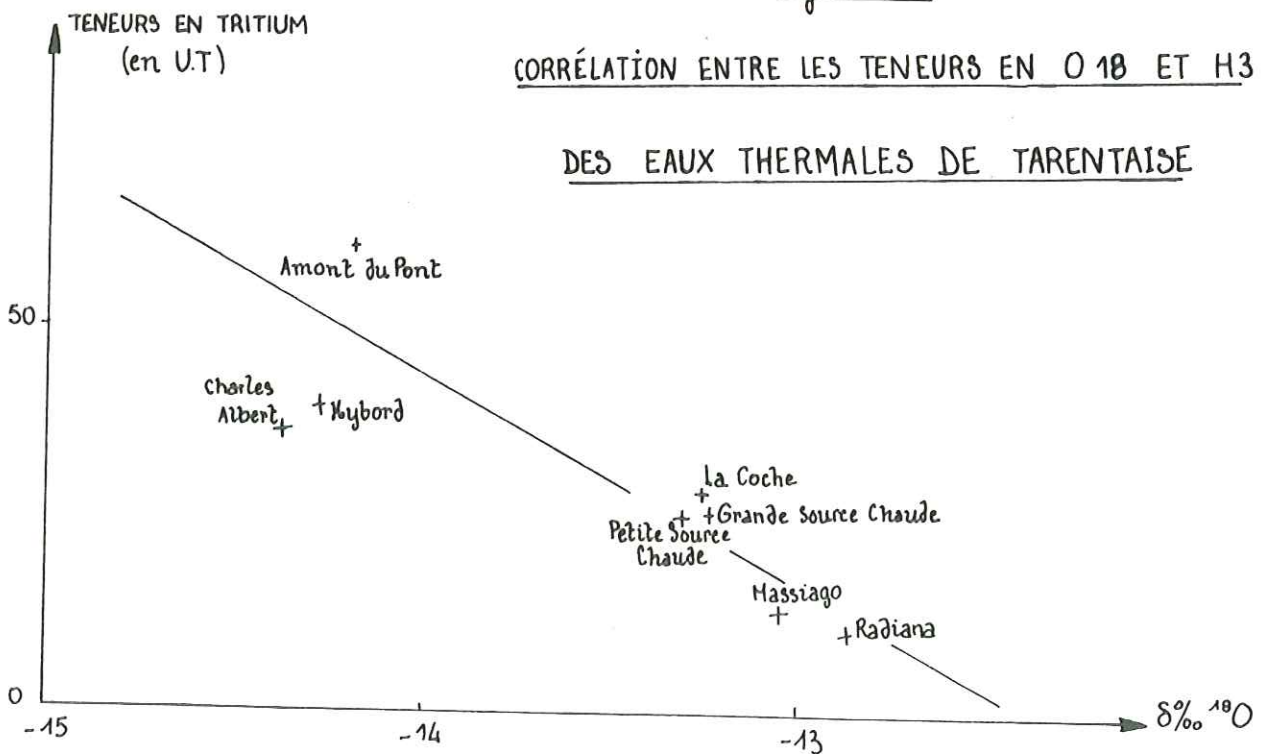


Figure 95

CORRÉLATION ENTRE LES TENEURS EN  $\text{O}^{18}$  ET  $\text{H}^3$  DES EAUX THERMALES DE TARENTEISE



En revanche, les compositions des sources émergeant au sein des formations sédimentaires font intervenir un pourcentage plus important d'eau froide compris entre 30 et 40 %.

Grâce à la teneur des sources en tritium, nous avons pu démontrer d'une part que les eaux de la source Massiago ne proviennent pas d'une dilution des eaux des sources chaudes minéralisées des Vieux Bains de Salins avec des eaux froides plus récentes (cette source est en effet la plus pauvre en tritium de toutes les eaux thermales de Salins) ; et d'autre part que la source Amont du Pont de Brides les Bains ne résulte pas d'un simple mélange binaire mais soit d'un mélange à plusieurs constituants, soit d'un mélange comprenant non pas des eaux actuelles superficielles, mais des eaux semi superficielles.

Par ailleurs, nous avons pu mettre en évidence une évolution des teneurs en isotopes d'Est en Ouest.

Les teneurs en tritium sont de plus en plus faibles d'Est en Ouest, alors que les teneurs en oxygène 18 sont de plus en plus fortes.

Il semble donc que d'Est en Ouest, les trajets hydrothermaux sont de plus en plus longs et les altitudes d'infiltrations de moins en moins élevées.

Il reste cependant à déterminer si ce sont les eaux chaudes ou les eaux froides intervenant dans la composition chimique des eaux thermales qui s'infiltrent à des altitudes croissantes d'Ouest en Est.

Si l'on se place dans l'hypothèse 2 selon laquelle les eaux thermales sont dues à la présence de grands accidents de socle de direction voisine de 160°, il faut considérer que toutes les eaux thermales de Tarentaise qui se sont infiltrées à des altitudes différentes forment en profondeur un mélange homogène mais que par contre les eaux froides intervenant dans les mélanges se sont infiltrées à des altitudes croissantes pour les stations les plus orientales.

Dans l'hypothèse 1, on peut envisager soit que les eaux chaudes s'infiltrent à des altitudes croissantes d'Ouest en Est, soit que les eaux chaudes s'infiltrent à une altitude moyenne de 2800 m et que ce sont les eaux froides des mélanges qui s'infiltrent à des altitudes croissantes d'Ouest en Est.

## TROISIEME PARTIE - ETUDE DES DEPOTS AUX EMERGENCES DES SOURCES THERMOMINERALES

### DE TARENTAISE

Certaines sources thermominérales de Tarentaise sont accompagnées de dépôts ferrugineux.

Ces dépôts se présentent sous forme de boues rouges dont la présence est due à la floculation du fer à partir de colloïdes formés à l'émergence.

Ce sont les eaux thermominérales des sources des Vieux Bains de Salins les Thermes qui déposent le plus de boues rouges. (Grande Source Chaude et Petite Source Chaude).

Ces boues ayant été reconnues d'intérêt thérapeutique par les médecins sont recueillies par décantation dans des piscines et utilisées à l'établissement thermal.

La source Massiago, située en amont de Salins les Thermes dépose aussi des boues rouges qui se transforment à la surface de l'eau en une croûte ferrugineuse verdâtre qui recouvre toute l'émergence.

Récemment, un plongeur de l'équipe Hydrokarst est descendu dans le griffon de cette source Massiago. Il a découvert un puits d'environ 14 m de profondeur dont le fond s'est révélé obstrué par des boues rouges.



Les sources minéralisées de Brides les Bains : Hybord et Charles Albert déposent aussi des boues rouges mais en quantités beaucoup moins importantes.

Les sources de La Coche Usine de Ste Hélène se repèrent aussi facilement par les dépôts de boues rouges qui marquent l'emplacement des arrivées d'eaux chaudes. Ainsi, le long de certains murs de l'usine souterraine, il est fréquent de voir des trainées rougeâtres dues aux suintements de ces eaux chaudes minéralisées.

La source de Bonneval, située en amont de Bourg-St-Maurice dépose aussi des boues rouges que nous avons prélevées afin de comparer leur analyse à celle des autres boues étudiées.

Les eaux thermominérales de La Léchère ne déposent pas de boues rouges ferrugineuses.

Nous avons procédé à deux types d'analyses de ces boues :

- . des analyses par fluorescence X effectuées au laboratoire de pétrologie de l'Institut Dolomieu par Francine Keller.
- . des analyses aux rayons X effectuées au laboratoire de radiocristallographie de l'Institut Dolomieu.

\* Les analyses en fluorescence X

Les éléments majeurs et les éléments traces ont été dosés par un spectromètre dont les caractéristiques sont les suivantes :

- . spectromètre CGR Alpha 2020 automatique
- . tubes : Cr, Mo 50 KV 50mA
- . cristaux : Lif 220, Lif 200, PET, ADP, RbAP.

Les résultats des analyses sont les suivants :

Oxydes	Sources des Vieux Bains de Salins	Eau de La Coche	Sources chaudes Brides-les-Bains	Source Bonneval
SiO <sub>2</sub>	23,55 % oxyde	8,84% oxyde	16,59 % oxyde	12,93 % oxyde
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,26 % "	0,64 % "	0,93 % "	2,65 % "
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37,19 % "	35,92 % "	54,00 % "	49,96 % "
MnO	0,01 % "	0,43 % "	0,01 % "	0,21 % "
MgO	1,52 % "	0,62 % "	0,67 % "	0,33 % "
CaO	9,75 % "	21,08 % "	6,14 % "	7,62 % "
Na <sub>2</sub> O	0,52 % "	0,67 % "	1,47 % "	0,23 % "
K <sub>2</sub> O	0,79 % "	0,09 % "	0,32 % "	0,49 % "
TiO <sub>2</sub>	0,22 % "	0,07 % "	0,20 % "	0,18 % "
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,29 % "	0,11 % "	0,28 % "	0,16 % "
Perte au feu	19,54 % "	27,02 % "	18,00 % "	24,51 % "
Total	96,64 % "	96,49 % "	98,61 % "	99,27 % "

Les pourcentages importants d'oxydes ferriques ne permettent pas d'avoir des mesures très précises.

## Résultats des analyses des éléments traces :

éléments (ppm)	V	Ni	Co	W	Cr
Salins	11	-9	-90	-4	37,68
La Coche	16	-6	-63	+4	38,40
Bonneval	55	10	-88	36	28,60

Les résultats de Ni et Co sont faussés par la présence considérable de fer

## Résultats des calcimétries effectuées sur les boues rouges :

	CO <sub>3</sub> Ca %	CO <sub>3</sub> Ca Mg %
La Coche	35 %	-
Salins	13 %	-
Bonneval	7 %	4 %

## \* Analyses des boues par diffraction X

Les boues des eaux minéralisées de La Coche, de Salins les Thermes et de Bonneval ont été soumises à des analyses aux Rayons X.

Les caractéristiques de l'appareillage sont les suivantes : l'appareil est un diffractomètre Philips, amplificateur et compteur CGR, (monochromateur L.F.) anticathode de Cu (40 KV - 20 mA).

Les trois diagrammes correspondant à cette analyse sont donnés en figure 96 .

Les pics qui ressortent sur les diagrammes traduisent la présence d'éléments exprimés. La hauteur des pics des fonction de la concentration en éléments.

Une étude de normes approchées effectuée par M. Gérard Vivier à partir des trois diagrammes obtenus, nous a permis de dresser le tableau suivant :

Boues	Eléments exprimés	quartz %	calcite %	feldspaths %	Illite micas argiles %	oxydes fer %
Bonneval		7,5	13	6	5	68,5
Salins=les=Thermes		15	16	7	7	55
La Coche		5	40	-	3	52

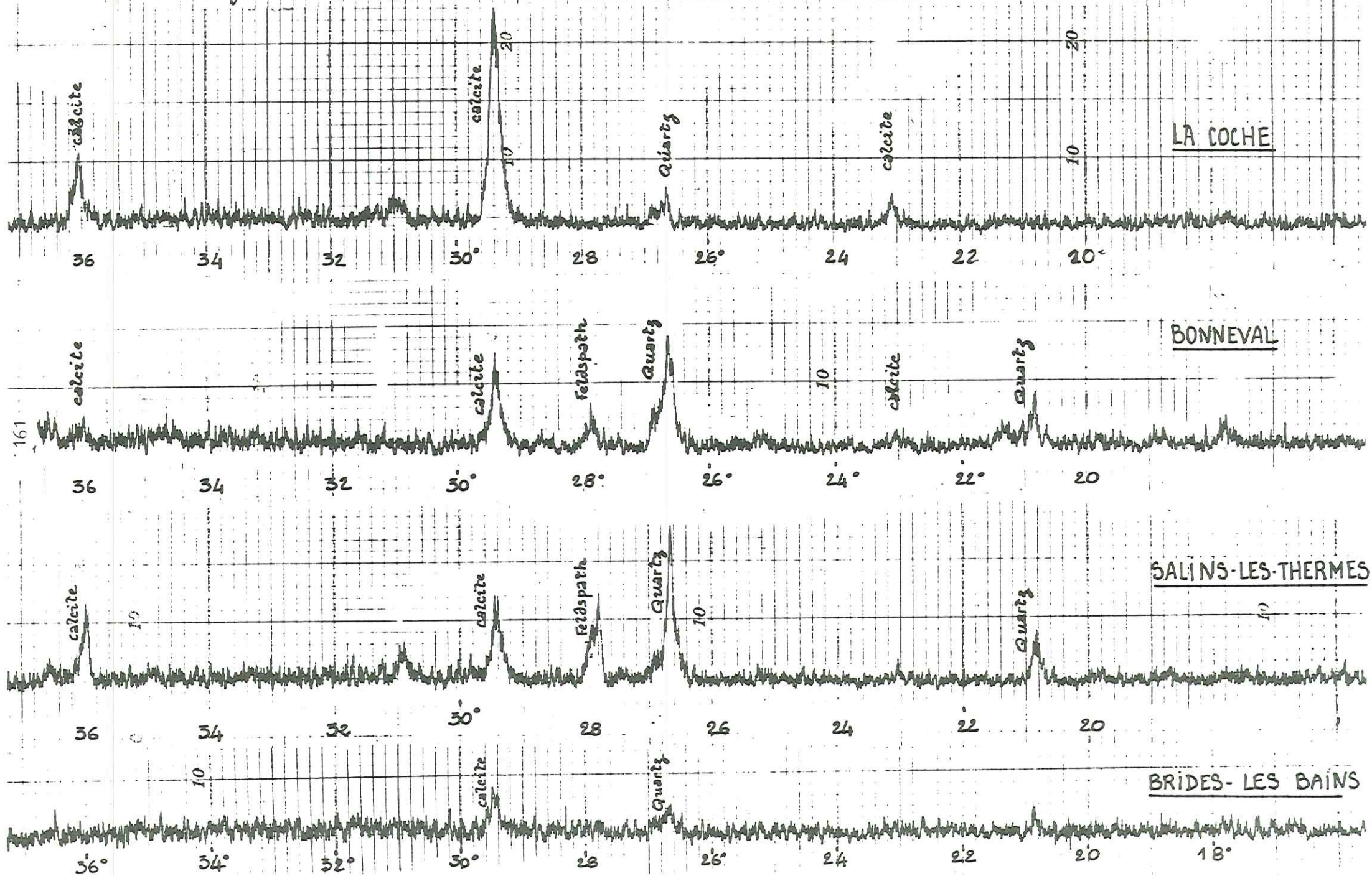
La figure 96 montre que le diagramme des boues de La Coche se distingue nettement des deux autres.

Cette distinction se retrouve dans le tableau précédent déduit des diagrammes de diffraction X.

Ainsi nous voyons que dans les boues de La Coche, l'élément exprimé qui prédomine est la calcite. Les 5 % de quartz qui ressortent de l'analyse de cette boue est en fait trop fort car il n'existe que 2 % de quartz exprimé.



Fig. 96 DIAGRAMMES OBTENUS PAR DIFFRACTION X SUR LES BOVES ETUDIEES



Dans les analyses des boues de Salins et de Bonneval (ces deux stations sont situées à une trentaine de km l'une de l'autre dans la même subdivision géologique), les pourcentages de quartz et de feldspaths exprimés ne sont pas négligeables. Par contre, la calcite apparait dans un pourcentage beaucoup plus faible que dans les boues de La Coche.

Dans toutes les boues le pourcentage d'oxydes de fer est très élevé (> 50%).

Toutes ces analyses effectuées sur les boues nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- les résultats obtenus par diffraction X coïncident avec ceux des calci-métries aux erreurs d'analyses près.

Par contre, par fluorescence X, les pourcentages de silice sont plus élevés et ceux du CaO plus faibles que par diffraction X.

Ceci vient du fait qu'en spectrographie de fluorescence X, on dose tout le Silicium, ( quartz ou silicate ) , et on ne dose pas le carbone des carbonates.

- à La Coche - Usine de Ste Hélène : seule la calcite est sous forme cristalline Les autres éléments sont sous forme cryptocristalline ou colloïdale.

- à Salins et Bonneval, les résultats d'analyses sont très voisins. Dans les boues de ces deux stations thermales, mis à part la calcite, il apparait une partie détritique provenant peut-être du socle cristallin et une partie colloïdale.

Ces observations nous incite à penser que les eaux thermominérales de Salins et de Bonneval traversent en profondeur des blocs de roches cristallines qui seraient coincés le long de la surface de chevauchement du Faisceau de Salins.

Il faut noter que la présence de "coins de cristallin" dans le Faisceau de Salins avait été envisagée par R. Barbier (1948).

Les boues étudiées ont donc des compositions différentes selon le plan de chevauchement le long duquel elles apparaissent.



QUATRIEME PARTIE - ETUDE DES GAZ DES SOURCES MINERALISEES DE TARENTAISE

Toutes les eaux thermominérales de Tarentaise contiennent des gaz mais en plus ou moins grandes quantités.

Les sources les plus riches en gaz sont les sources thermominérales des Vieux Bains de Salins, à savoir : la Grande Source Chaude et la Petite Source Chaude.

La source Massiago située à la sortie amont de Salins-les-Thermes présente des dégagements gazeux plus faibles que ceux des sources précédentes.

Les sources thermominérales de Brides-les-Bains contiennent aussi des gaz mais en quantités beaucoup plus faibles que les sources de Salins-les-Thermes.

A la station de La Léchère, l'eau thermominérale étant exploitée par pompage, des dégagements gazeux sont à peine perceptibles et très difficiles à évaluer.

L'eau de La Coche -Usine de Ste Hélène ne nous a pas révélé la présence de dégagement gazeux, peut-être à cause des conditions d'émergence.

Les gaz des sources thermominérales étudiées sont essentiellement constitués par du gaz carbonique associé à de l'azote et des gaz rares.

Nous n'avons analysé que la composition isotopique du CO<sub>2</sub> des sources thermominérales étudiées du fait de la prédominance de ce gaz sur les autres.

IV-1. Origine du CO<sub>2</sub>

Le gaz carbonique contenu dans les eaux a deux origines : une origine exogène et une origine endogène.

Le CO<sub>2</sub> d'origine exogène provient de l'atmosphère et de l'organo-synthèse (l'activité biologique des plantes conduit en effet au dégagement de CO<sub>2</sub> qui est alors susceptible de s'intégrer dans des réactions chimiques lors de la dissociation des bicarbonates et des carbonates).

Ce CO<sub>2</sub> d'origine endogène provient de la profondeur par suite de phénomènes tectoniques ou magmatiques, ou peut être lié au métamorphisme.

Les régions volcaniques sont souvent le siège d'émanations gazeuses importantes de CO<sub>2</sub>.

IV-2. Action du CO<sub>2</sub> sur le circuit hydrothermal

Le gaz carbonique entraîné par les eaux soit lors de leur infiltration, soit au cours de leur remontée vers la surface, est peu soluble à température élevée, et a tendance à se dégager.

La présence de CO<sub>2</sub> dans les eaux thermominérales a plusieurs conséquences :

- la détente adiabatique du CO<sub>2</sub> provoque un refroidissement de l'eau thermale au cours de sa remontée. Il est en général admis que ce refroidissement n'intervient que dans les derniers décimètres précédant l'émergence de l'eau (Maisonneuve 1974).

- la présence de gaz en émulsion abaisse le poids spécifique de l'eau et leur pression provoque l'ascension rapide de l'eau. Ce phénomène est surtout sensible près des émergences lorsque les gaz dissous passent en phase gazeuse et allègent la colonne d'eau.

- enfin, les dégagements gazeux observables aux émergences varient avec la pression atmosphérique. La solubilité du CO<sub>2</sub> est contrôlée par la température et la pression de la colonne d'eau. Lorsque la pression diminue, les dégagements gazeux s'accroissent et provoquent des bouillonnements à la surface de l'eau. La Grande Source Chaude de la station thermale de Salins-les-Thermes présente des bouillonnements très importants de l'eau à son émergence.

IV-3. Composition des gaz thermaux

Le gaz carbonique représente à lui seul plus de 90 % du volume des gaz observés aux émergences, le reste étant constitué par de l'azote et des gaz rares.

Les analyses des gaz des sources Hybord de Brides-les-Bains et Grande Source Chaude de Salins-les-Thermes, données en 1925 par P. Urbain et A. Lepape sont reportées dans les tableaux 97a et 97b :

tableau 97a

**Eau de la Source Hybord à Brides-les-Bains**

Analyse faite par MM. les Professeurs P. URBAIN et A. LEPAPE

Gaz libres en dissolution dans un litre d'eau vol. en cm<sup>3</sup>, à 0° et 760 mm) :

Anhydride carbonique .. ..	CO <sup>2</sup> .. ..	45,13 cm <sup>3</sup>	} 17,6 cm <sup>3</sup>
Oxygène .. .. .	O <sup>2</sup> .. ..	néant	
Gaz combustibles .. .. .	(en bloc) ..	0,250	
Azote .. .. .	N <sup>2</sup> .. ..	17,04	
Argon + traces de Kr et Xe ..	.. .. .	0,243	
Hélium + Néon .. .. .	.. .. .	0,085	
Radon .. .. .	Rn .. ..	0,27 × 10 <sup>-12</sup> (0,45 × 10 <sup>-9</sup> Curies)	

Composition centésimale, en volumes, des gaz spontanés secs

Anhydride carbonique .. ..	CO <sup>2</sup> .. ..	9,4
Oxygène .. .. .	O <sup>2</sup> .. ..	néant
Gaz combustibles .. .. .	(en bloc) ..	traces
Azote .. .. .	N <sup>2</sup> .. ..	89,15
Argon + traces de Kr et Xe ..	.. .. .	0,684
Hélium + Néon .. .. .	.. .. .	0,761
Radon (par litre) .. .. .	Rn .. ..	2,57 × 10 <sup>-9</sup> curies
Thoron .. .. .	Tn .. ..	néant

tableau 97b

**Eau de la Grande Source à Salins-les-Thermes**

Analyse faite MM. les Professeurs P. URBAIN et A. LEPAPE

Gaz libres en dissolution dans un litre d'eau (vol. en cm<sup>3</sup>, à 0° et 760 mm) :

Anhydride carbonique .. ..	CO <sup>2</sup> .. ..	193,8 cm <sup>3</sup>	} 16,9 cm <sup>3</sup>
Oxygène .. .. .	O <sup>2</sup> .. ..	néant	
Gaz combustibles .. .. .	(en bloc) ..	0,155	
Azote .. .. .	N <sup>2</sup> .. ..	16,50	
Argon + traces de Kr et Xe ..	.. .. .	0,23	
Hélium + Néon .. .. .	.. .. .	0,030	
Radon .. .. .	Rn .. ..	0,828 × 10 <sup>-12</sup> (1,38 × 10 <sup>-9</sup> curies)	

Composition centésimale, en volumes, des gaz spontanés secs

Anhydride carbonique .. ..	CO <sup>2</sup> .. ..	42,7
Oxygène .. .. .	O <sup>2</sup> .. ..	0,03
Gaz combustibles .. .. .	(en bloc) ..	néant
Azote .. .. .	N <sup>2</sup> .. ..	56,62
Argon + traces de Kr et Xe ..	.. .. .	0,439
Hélium + Néon .. .. .	.. .. .	0,214
Radon (par litre) .. .. .	Rn .. ..	6,63 × 10 <sup>-9</sup> curies
Thoron .. .. .	Tn .. ..	néant



#### IV-4. Résultats des analyses isotopiques des gaz

Nous avons prélevé les gaz de la Grande Source Chaude de Salins-les-Thermes au mois de février 1979.

Ces prélèvements ont été réalisés à l'aide d'un entonnoir immergé dans l'eau. Les gaz sont recueillis dans une ampoule de verre sous vide munie d'un robinet qu'il suffit de tourner pour faire pénétrer les gaz.

Les dosages du C13 et de l'O18 du gaz carbonique de la Grande Source Chaude ont été réalisés sur un spectrographe à double collection au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon par B. Blavoux. Les résultats obtenus sont les suivants :

$$\delta^{0/00} \text{ C13 / PDB} = - 8,8$$

$$\delta^{0/00} \text{ O18 / SMOW} = + 14,3$$

Ces valeurs doivent être comparées à celles observées dans le Massif Central français où les valeurs de  $\delta^{0/00} \text{ C 13}$  sont de l'ordre de  $-6 / \text{PDB}$  ainsi qu'à Vals où  $\delta^{0/00} \text{ C13 / PDB}$  va de  $-4$  à  $-7$ .

On peut rapprocher la valeur obtenue de celle de  $\delta^{0/00} \text{ C13} = -7,8$  du  $\text{CO}_2$  de St Galmier qui est celle d'un  $\text{CO}_2$  d'origine magmatique. Les valeurs très positives de  $\delta \text{ O18}$  peuvent plaider dans ce sens. On peut alors se demander si le  $\text{CO}_2$  provient du dégazage du manteau à la faveur de grandes fractures ou du métamorphisme dans le massif de la Vanoise.

Les calcaires sédimentaires étant caractérisés, selon Craig, par des valeurs de  $\delta \text{ C13}$  comprises entre  $- 2^{0/00}$  et  $+ 2^{0/00}$  (J.J. Risler et al 1978), il paraît moins probable que le  $\text{CO}_2$  puisse provenir de ces derniers, ou ait une origine exogène.

#### IV-5. Conclusion

\* si l'on se place dans le cas de l'hypothèse 2 de l'origine des eaux thermales, les études isotopiques pourraient confirmer l'existence d'une grande fracture de socle permettant la remontée du  $\text{CO}_2$  et sur laquelle circuleraient des eaux dont les teneurs en tritium seraient nulles et celles en O18 très constantes et voisines de  $-11$  en raison d'un mélange très homogène.

Les sources situées les plus à l'amont auraient des valeurs différentes par suite d'apports de tritium et de  $\delta^{0/00} \text{ O18}$  négatifs venant du ruissellement en haute altitude en proportions plus importantes.

\* si l'on se place par contre dans le cas de l'hypothèse 1, l'origine des eaux thermales serait liée aux chevauchements des zones internes les unes sur les autres.

Cependant, bien qu'il se produise encore des réajustements au niveau des chevauchements, il paraît difficile de croire que ces mouvements infinitésimaux produisent un échauffement important et, par suite, un dégagement de  $\text{CO}_2$ .

D'autre part, il serait intéressant de savoir si les pressions importantes créées au niveau des chevauchements par le redoublement des séries sont susceptibles de provoquer une transformation des calcaires et permettre des dégagements de  $\text{CO}_2$ . Si tel est le cas, on pourrait attribuer une origine métamorphique au  $\text{CO}_2$  observé aux émergences thermominérales étudiées.

En 1979, J.J. Risler et J. Maisonneuve attribuent une origine thermométamorphique au CO<sub>2</sub> des eaux thermales de la station de Salins-les-thermes. Leurs observations effectuées sur les eaux thermales de la ceinture péri-alpine carbonatée de l'Europe occidentale sont notées sur la figure 98.

Ces auteurs notent que dans certaines régions, l'existence de séries sédimentaires épaisses contenant de nombreux niveaux carbonatés peut être à l'origine d'un CO<sub>2</sub> thermométamorphique.

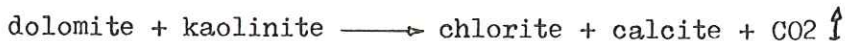
Ainsi, la genèse du gaz carbonique proviendrait du métamorphisme thermique des carbonates selon la réaction générale :



Cette réaction des carbonates se produit à haute température quand l'échappement du CO<sub>2</sub> formé, <sup>est possible,</sup> sinon elle est vite bloquée.

Ce processus est invoqué par Muffler et White (1968) pour expliquer l'origine du CO<sub>2</sub> du "Salton Sea geothermal system" en Californie. Dans ce cas, le gaz carbonique proviendrait de la destruction des carbonates des grès du Cénozoïque supérieur sous l'action du flux de chaleur par les réactions :

- à 300°C à 300 m de profondeur seulement :



- à plus de 300°C et à des profondeurs supérieures à 900 m :



Cette origine thermométamorphique du CO<sub>2</sub> a été retenue dans d'autres provinces carbonatées telle que le centre et l'Ouest des Etats Unis (Californie, New Mexico, Colorado, Utah ...) ou certaines eaux thermales d'URSS (Ivanov et al 1968).

Parfois, l'origine du gaz carbonique est expliquée par les deux processus suivants : différenciation mantellique et transformation métamorphique. C'est le cas du CO<sub>2</sub> des eaux du Caucase ( Buachidze, 1977) ou celui du CO<sub>2</sub> des eaux de la Slovaquie méridionale et de la Hongrie du Nord (Carnides, 1971).

La complexité des études effectuées sur l'origine du CO<sub>2</sub> contenu dans certaines eaux thermales a été mise en évidence par F. Pineau en 1977.

Les principaux résultats de cet auteur sont notés dans la figure qui suit.

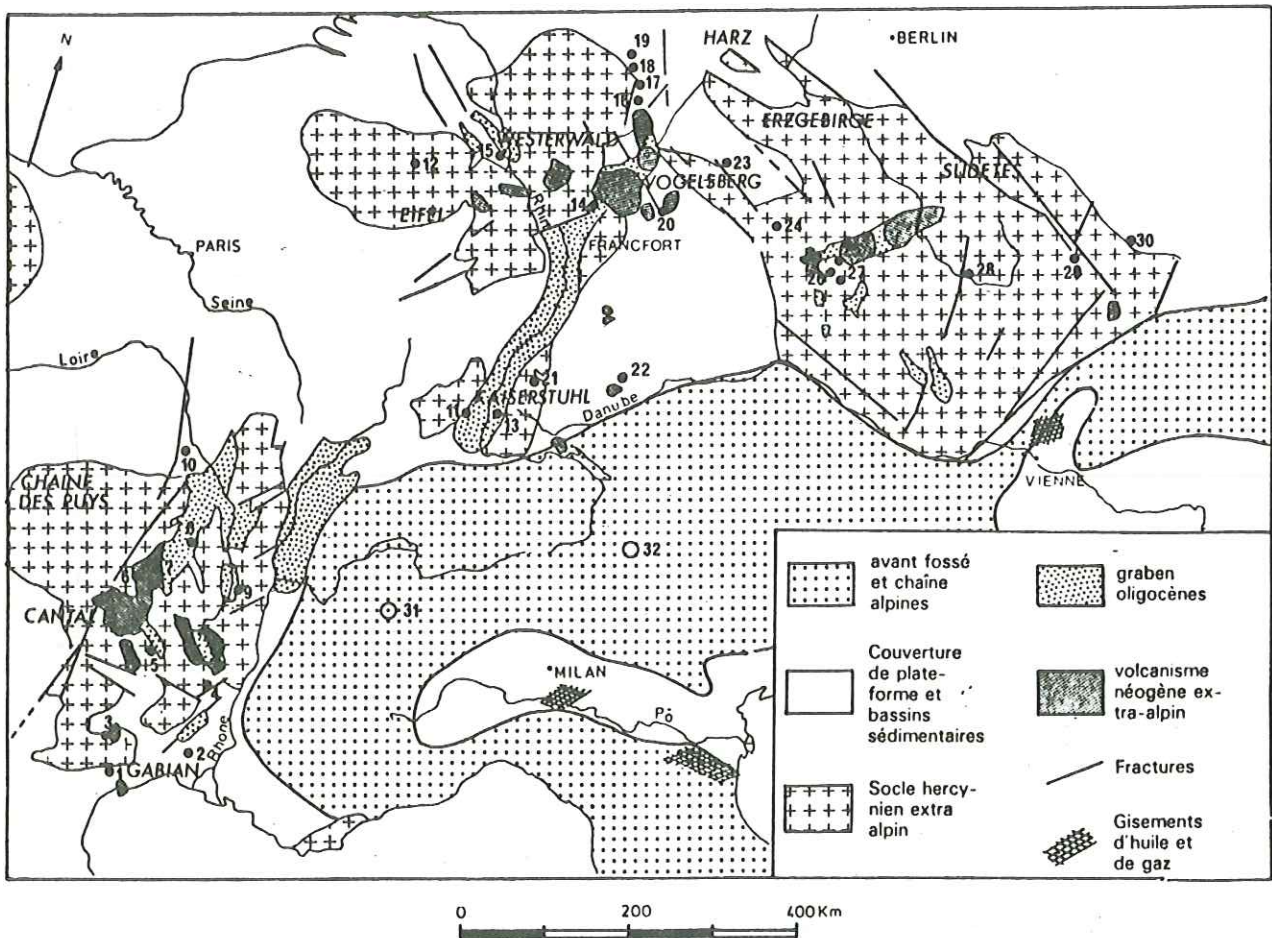
Nous avons reporté sur cette figure le point représentatif de la Grande Source Chaude de Salins les Thermes.

Nous pouvons constater qu'il n'appartient à aucun des deux domaines visualisés sur cette figure mais que, par contre, il s'en détache nettement ce qui nous interdit de donner une conclusion hâtive quant à l'origine du CO<sub>2</sub> des eaux de Salins-les-Thermes.



FIGURE 98

## CEINTURE PÉRI-ALPINE CARBO-GAZEUSE DE L'EUROPE OCCIDENTALE

**Sources thermales carbo-gazeuses**● CO<sub>2</sub> mantellique**France**

1. Lamalou
2. Vergèze (« Perrier »)
3. Andabre - Gissac
4. Vals
5. Saint-Géron
6. La Bourboule - Le Mont Dore
7. Royat - Chatelguyon
8. Vichy
9. Saint-Galmier
10. Pougues
11. Soultzmat

**Belgique**

12. Spa

**Allemagne (RFA)**

13. Bad Krozingen
14. Bad Nauheim
15. Bad Neuenahr
16. Bad Driburg
17. Bad Meinberg
18. Bad Salzuffen
19. Bad Oeynhausen
20. Bad Kissingen

**Allemagne (RDA)**

21. Gotha
22. Bad Steben

**Tchécoslovaquie**

23. Karlovy Vary
24. Mariánské Lázně
25. Františkovy Lázně
26. Pödebrady
27. Jeseník

○ CO<sub>2</sub> thermométamorphique**France**

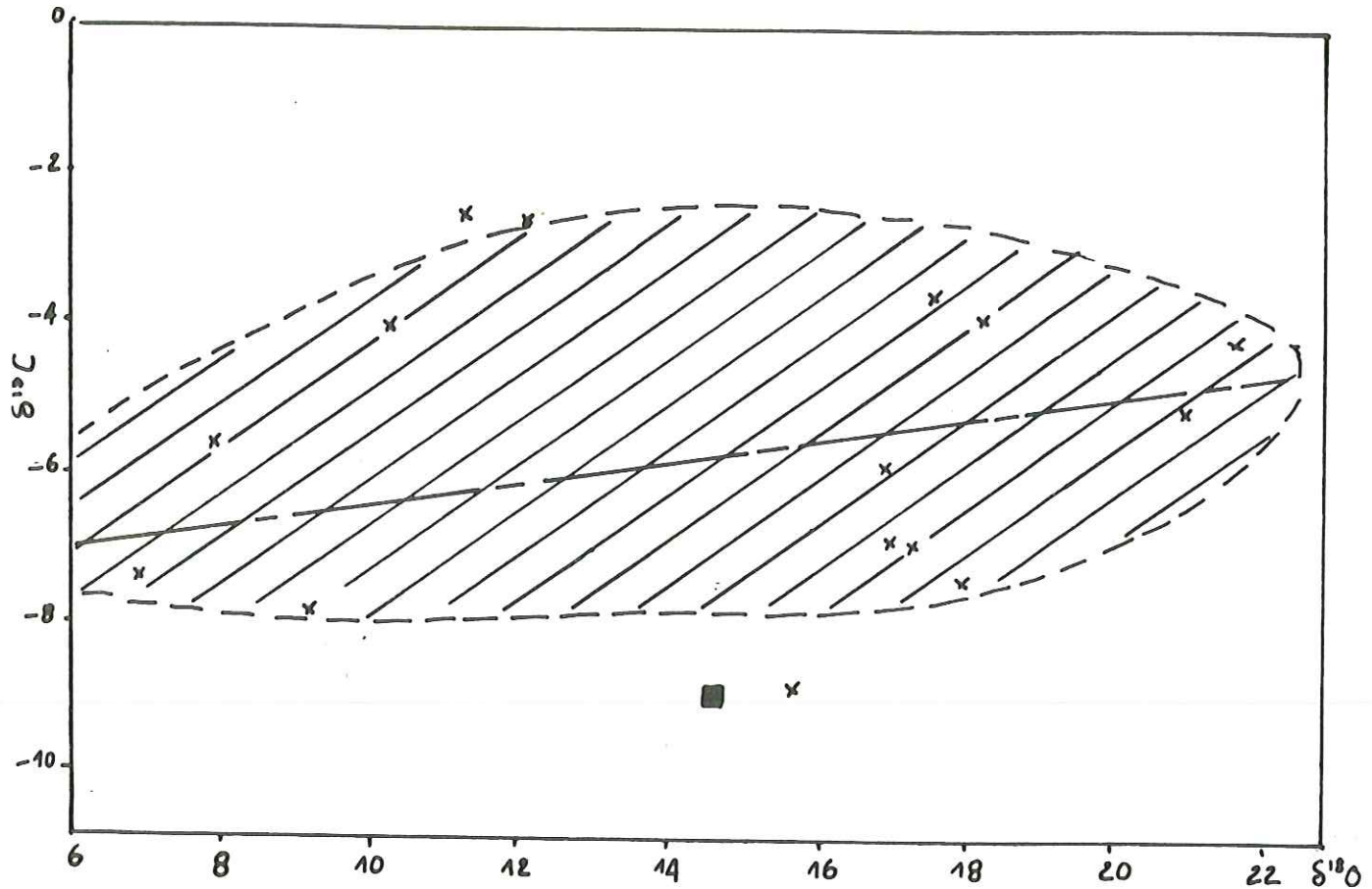
31. Salins - Moutiers

**Suisse**

29. Tarasp

FIG. 1. — La ceinture péri-alpine « carbo-gazeuse » de l'Europe occidentale (d'après A. DE GOER de HERVÉ et J. MERGOIL, 1971, fig. 13, p. 371, et d'après A. PERRODON, 1966, fig. 168, p. 364).

DOMAINES DES VALEURS ISOTOPIQUES DU CARBONE PROFOND  
EN FONCTION DE  $\delta^{18}\text{O}$  ET  $\delta^{13}\text{C}$  POUR DES CARBONATES MAGMATIQUES  
ET DES INCLUSIONS DE "POPPING-ROCKS" DE F. PINEAU - 1977



Ainsi, de nouvelles analyses isotopiques seront nécessaires pour conclure cette étude sur les gaz des eaux thermominérales de Tarentaise et de Maurienne.



CHAPITRE IV

ETUDE DE L'INFLUENCE DU DORON SUR LES SOURCES THERMOMINERALES  
DE SALINS-LES-THERMES

I- But de cette étude

Nous avons été conduits à étudier l'influence du Doron sur les eaux thermominérales de Salins-les-Thermes pour deux raisons :

\* La première concerne la sauvegarde des sources minéralisées de la station de Salins-les-Thermes. En effet, un projet d'aménagement hydroélectrique de la vallée du Doron envisagé depuis quelques années par EDF devrait aboutir au détournement d'une grande partie du débit du Doron en Amont de cette station.

Il était donc nécessaire d'étudier les relations Doron - sources thermominérales afin de parer aux éventuelles incidences qui pourraient perturber le régime des sources thermominérales de la station.

\* La deuxième raison est une conséquence de l'étude physicochimique des sources minéralisées des Vieux Bains.

En effet, nous avons vu dans les chapitres précédents que, d'une manière générale, tous les paramètres physico-chimiques des sources thermominérales sont constants à l'exception d'un seul paramètre : le débit.

Lorsque nous comparons les variations des résistivités et des débits des sources thermominérales (cf figures 26 et 22), il est étonnant de constater que les résistivités restent quasiment constantes au cours du temps, alors que les débits varient considérablement.

Ceci nous permet déjà de dire que l'augmentation des débits des sources thermominérales n'est pas due à des mélanges avec des eaux froides superficielles ou semi-superficielles.

Les résistivités des sources thermominérales de Salins-les-Thermes sont extrêmement faibles (de l'ordre de  $50 \Omega \cdot \text{cm}$ ) et nous pensons que le mélange d'une eau très minéralisée avec une eau superficielle présentant une résistivité 30 fois plus élevée (de l'ordre de  $1500 \Omega \cdot \text{cm}$ ) aurait abouti à la formation d'une eau à résistivité plus forte que celle que nous observons aux sources thermominérales de Salins-les-Thermes.

D'autre part, cet état de non mélange a été confirmé par l'étude des éléments isotopiques des eaux au chapitre III.

Il est important de noter que l'influence du Doron sur les sources thermominérales de la station thermale de Brides-les-Bains située à environ 6 km en amont de Salins-les-Thermes a déjà été étudiée vers les années 1925-1927 par MM. Rollin et Borel, puis par M. Michel vers 1959.

A la suite de ces dernières, il avait été dit que, par sa pression, le Doron provoquait le refoulement de l'eau chaude de griffons sauvages vers les griffons principaux qui, de ce fait, augmentaient de débits.

Ainsi, il est logique de penser que dans les deux stations thermales de Brides-les-Bains et Salins-les-Thermes, situées à quelques kilomètres de distance l'une de l'autre, l'influence du Doron sur les sources thermominérales est du même type.



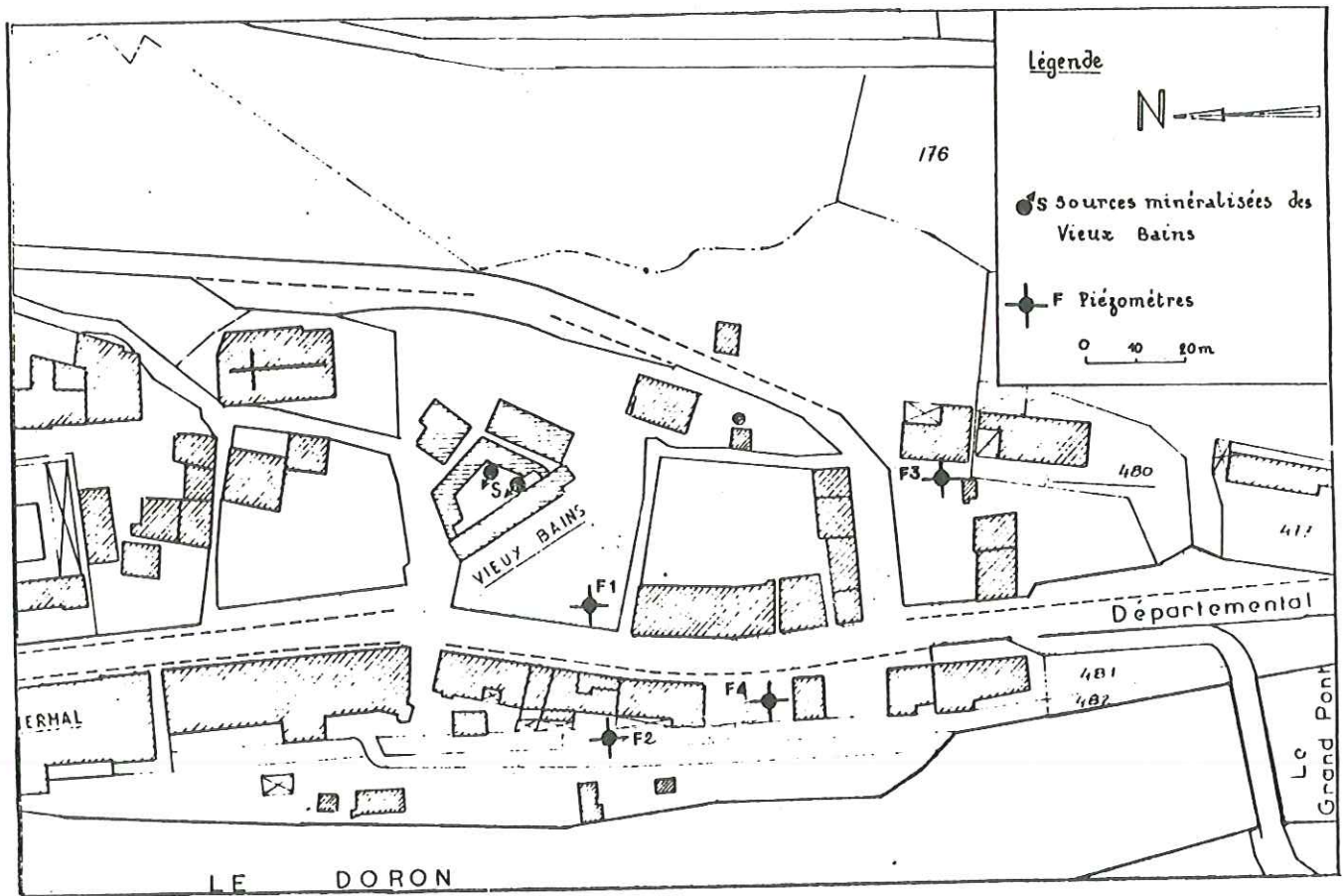


Fig. 99 EMPLACEMENT DES PIEZOMETRES A SALINS-LES-THERMES

Source	Source Froide	Source du Caniveau	Gde Source Chaude	Pte Source Chaude
Débit	12 l/s	18 l/s	23 l/s	6.4 l/s
Piezomètre	F1	F2	F3	F4
Niveau de l'eau	486.82 m	489.89 m	488.09 m	489.50 m

Tableau 100 : Mesures effectuées avant l'essai de pompage, le 3.9.79 à 6h30.

Pour ces deux raisons, nous avons donc étudié les relations qui pourraient éventuellement exister entre le Doron et les sources thermominérales de Salins les Thermes.

## II - Présentation de cette étude

A la station thermale de Salins-les-Thermes, les sources minéralisées des Vieux Bains sont situées à une centaine de mètres du Doron.

Les 4 piézomètres qui nous ont permis d'étudier les caractères physico-chimiques de la nappe alluviale sont implantés entre le Doron et les émergences des eaux minéralisées (cf figure 99).

Afin de concrétiser l'influence de la pression du Doron sur le débit des sources thermales, nous avons réalisé un essai de pompage dans la nappe alluviale du Doron à partir des 4 piézomètres.

Notre but était de provoquer un rabattement rapide du niveau de la nappe alluviale afin d'étudier le comportement des sources thermominérales lors d'une variation rapide de la pression exercée par le Doron et sa nappe alluviale. Nous dirons ici qu'au niveau de la station thermale de Salins-les-Thermes, le Doron alimente sa nappe alluviale.

Au cours de cet essai, des mesures de températures et de résistivité ont été effectuées sur les eaux de la nappe ainsi que sur celles des sources des Vieux Bains. Ces mesures étaient destinées à étudier les variations éventuelles de la composition chimique des eaux et à mettre en évidence un mélange possible entre les deux types d'eaux très différents.

L'essai de pompage a débuté le lundi 3 septembre 1979 ; il a été interrompu le vendredi 7 septembre.

La source Massiogo située à la sortie amont de Salins les Thermes a aussi été surveillée pendant l'essai de pompage.

## III - Matériel utilisé et données de départ

Pour réaliser cet essai de pompage, nous avons à notre disposition :

- un résistivimètre de terrain et un thermomètre qui nous ont permis d'étudier en continu la composition chimique des eaux superficielles et des eaux minéralisées.
- trois moto-pompes de surface dont le débit était mesuré à la sortie des tuyaux d'évacuation des eaux à l'aide de capacités jaugées de 220 L.
- deux sondes électriques grâce auxquelles nous avons pu mesurer à quelle profondeur se situait le niveau statique de l'eau dans les piézomètres.

Juste avant l'essai de pompage, une mesure des débits des sources minéralisées et du niveau de la nappe alluviale dans les 4 piézomètres a été effectuée. Les résultats sont indiqués sur le tableau 100.

Afin de ne pas perturber le fonctionnement de l'établissement thermal, les mesures des débits des sources minéralisées des Vieux Bains étaient réalisées trois fois par jour :

- . la première fois le matin à 6h 30 avant l'ouverture de l'établissement thermal
- . la seconde fois entre 13 et 15h pendant la fermeture.
- . la troisième fois, après 18h fermeture journalière de l'établissement.

Le niveau de la nappe alluviale du Doron dans les piézomètres était mesuré le plus régulièrement possible pendant la journée.

Pendant la nuit, les pompes nécessitant le remplissage de leurs réservoirs toutes les 2h 30 mn, trois mesures du niveau de la nappe alluviale étaient effectuées.



#### IV - Réalisation de l'essai de pompage

Les pompes de surface qui étaient à notre disposition ne pouvant pas aspirer à une profondeur supérieure à 7 m, il était donc exclu de pomper dans le forage F3 (cf figure 99) dans lequel le niveau statique de l'eau de la nappe alluviale du Doron fluctue aux alentours de 7,50m de profondeur.

Afin de ne pas procéder à la réalimentation de la nappe, les eaux pompées étaient évacuées par le système d'égoût de la ville de Salins les Thermes.

Nous avons mis successivement en route les pompes dans les piézomètres F1 (le plus proche des sources minéralisées des Vieux Bains), F2 (le plus proche du Doron), F4 (dans le petit jardin en bordure de la RN515).

Les mesures des débits des sources minéralisées réalisées au cours de l'essai, sont notées sur le tableau 104.

#### V - Interprétation des résultats obtenus

##### V-1. Dans les piézomètres

##### 1) rabattements obtenus

Dans les 4 piézomètres, l'essai de pompage nous a permis d'atteindre les niveaux suivants :

piézomètre	cote des piézomètres	cote du niveau de l'eau		rabattement (m)
		avant pompage	après pompage	
F 1	491,47 m	486,82 m	484,77 m	2,05 m
F 2	494,74 m	489,89 m	487,04 m	2,85 m
F 3	495,49 m	488,09 m	487,89 m	0,20 m
F 4	494,15 m	489,50 m	487,10 m	2,40 m

A la fin de l'essai, chaque pompe a été arrêtée indépendamment les unes des autres et la remontée de l'eau dans tous les piézomètres a été mesurée en continu.

L'arrêt des pompes a été effectué dans l'ordre suivant : la pompe installée sur la digue du Doron dans le piézomètre F2 a été arrêtée en premier et la remontée du niveau statique de l'eau dans ce forage a été suivie en continu jusqu'à sa stabilisation.

Lorsque ce niveau de la nappe s'est stabilisé, nous avons interrompu le pompage dans le piézomètre F4 et la remontée du niveau de l'eau dans ce forage a été suivie en continu.

Enfin, lorsque le niveau de la nappe alluviale s'est stabilisé dans ce piézomètre, nous avons stoppé le pompage du piézomètre F1, situé dans le jardin de l'établissement des Vieux Bains. La remontée de la nappe a aussi été mesurée en continu.

Pendant toute cette manipulation, le niveau statique de l'eau de la nappe alluviale du Doron a été mesuré régulièrement dans tous les piézomètres.

##### 2) étude de la perméabilité des terrains à partir des 4 points de pompage

Nous avons essayé de calculer la perméabilité des terrains à partir des données que nous avons à notre disposition.

Nous avons utilisé la méthode de Theis-Jacob pour calculer les caractéristiques hydrodynamiques des terrains à partir de la remontée de l'eau de la nappe alluviale après arrêt du pompage.

N'ayant pas arrêté les trois pompes simultanément, mais les unes après les autres, nous avons procédé de la façon suivante pour le dépouillement de l'essai de pompage:

- pour le piézomètre F2 dans lequel le pompage a été interrompu en premier, nous avons pris comme temps de remontée le temps compris entre l'arrêt de la pompe et de la stabilisation du niveau de l'eau dans ce piézomètre.
- pour le piézomètre F4, nous avons calculé la perméabilité à partir du temps compris entre l'arrêt de cette pompe et la nouvelle stabilisation du niveau de l'eau.
- dans le piézomètre F1, la perméabilité des terrains a été calculée à partir de la remontée de l'eau qui s'est effectuée entre les temps  $t_0$  initial, arrêt de la pompe et  $t_1$ : stabilisation de l'eau dans ce piézomètre. Ce temps  $t_1$  correspond au temps mis par l'eau pour retrouver le niveau initial qu'elle atteignait avant le pompage.

#### A - Présentation de la méthode Theis-Jacob

La perméabilité des terrains est tirée de l'exploitation de la courbe de remontée de la nappe par la méthode d'approximation logarithmique.

Sur un diagramme semi-logarithmique, les rabattements sont portés en ordonnées (mesures arithmétiques) et les rapports  $t/t'$  en abscisses (mesures logarithmiques). Le pompage n'ayant pas pu être réalisé à débit constant,  $t'$  correspond au temps fictif égal au rapport du volume global extrait de la nappe par le débit de pompage maximum. La pente  $c$  de la droite obtenue correspond au rabattement  $\Delta$  pour un cycle logarithmique.

Au cours de la remontée, le régime est de "non équilibre". La formule de Theis-Jacob donne la transmissivité du terrain:

$$T = \frac{0,183 Q}{c} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} Q = \text{débit de pompage} \\ c = \text{pente de la droite} \end{array}$$

puis la perméabilité est donnée par la formule:

$$K = \frac{T}{H} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} K = \text{perméabilité (m/sec)} \\ H = \text{épaisseur de l'aquifère} \end{array}$$

#### B - Résultats obtenus

##### ----- Piézomètre F 2 -----

Volume global extrait de la nappe:

4,47	.	$10^{-3}$	$\text{m}^3/\text{sec}$	×	1h15	=	$4,47 \times 10^{-3}$	(75 × 60)	=	20,115	$\text{m}^3$
+	4,13	"	"	×	5h30	=	81,774	$\text{m}^3$			
+	3,45	"	"	×	6h	=	74,520	$\text{m}^3$			
+	3,33	"	"	×	16h	=	191,808	$\text{m}^3$			
+	3,16	"	"	×	12h	=	136,512	$\text{m}^3$			
+	3,06	"	"	×	12h	=	132,192	$\text{m}^3$			
V Total							=	636,92	$\text{m}^3$		

$$Q_{\text{max}} : 4,47 \text{ l/s} = 4,47 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$\frac{V_{\text{Total}}}{Q_{\text{max}}} = \frac{636,92}{4,47 \cdot 10^{-3}} = 142,48 \times 10^3 \text{ sec} = 2375 \text{ mn}$$

d'où  $t$  fictif = 2375 mn



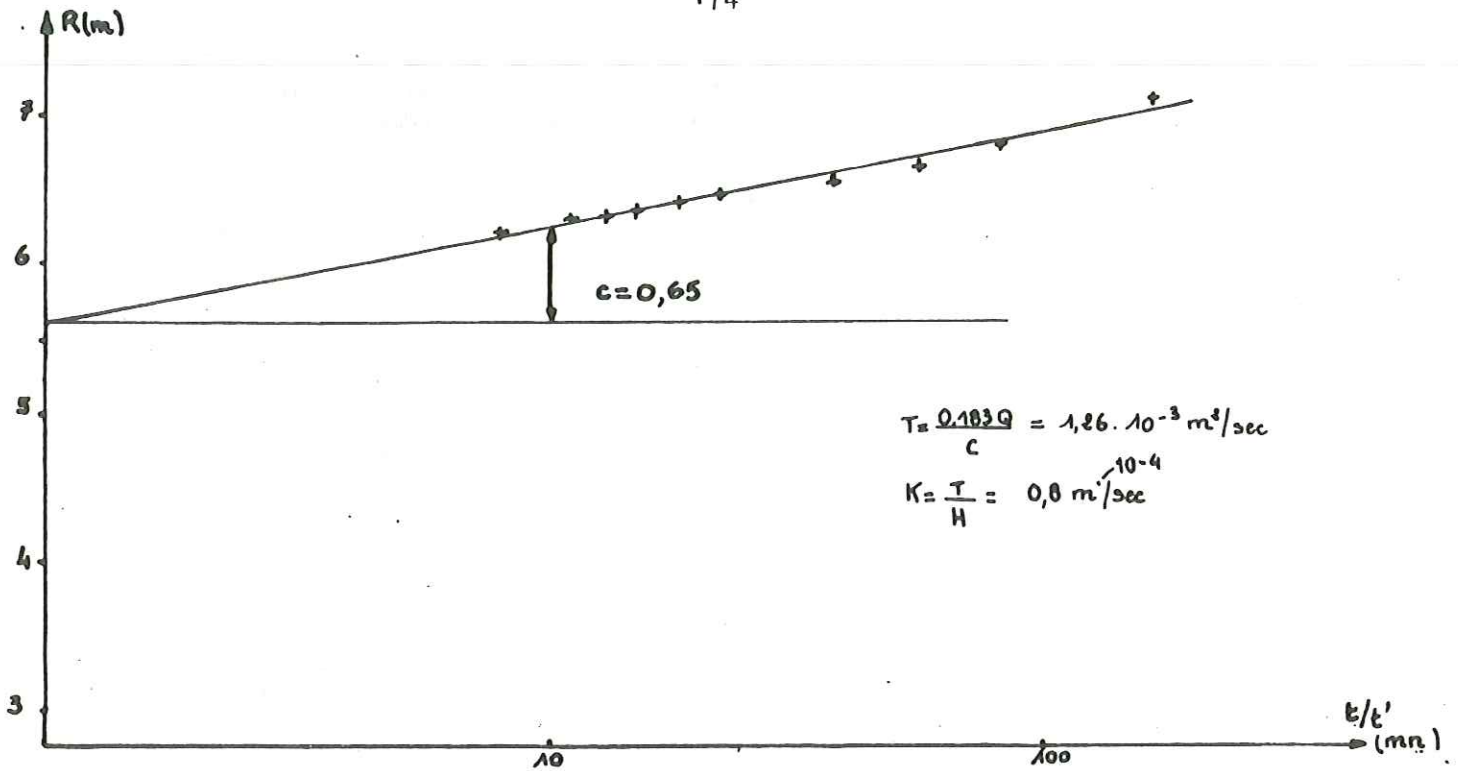


Fig. 101 - Essai de Pompage - Droite de remontée de la nappe dans le piézomètre F 2.

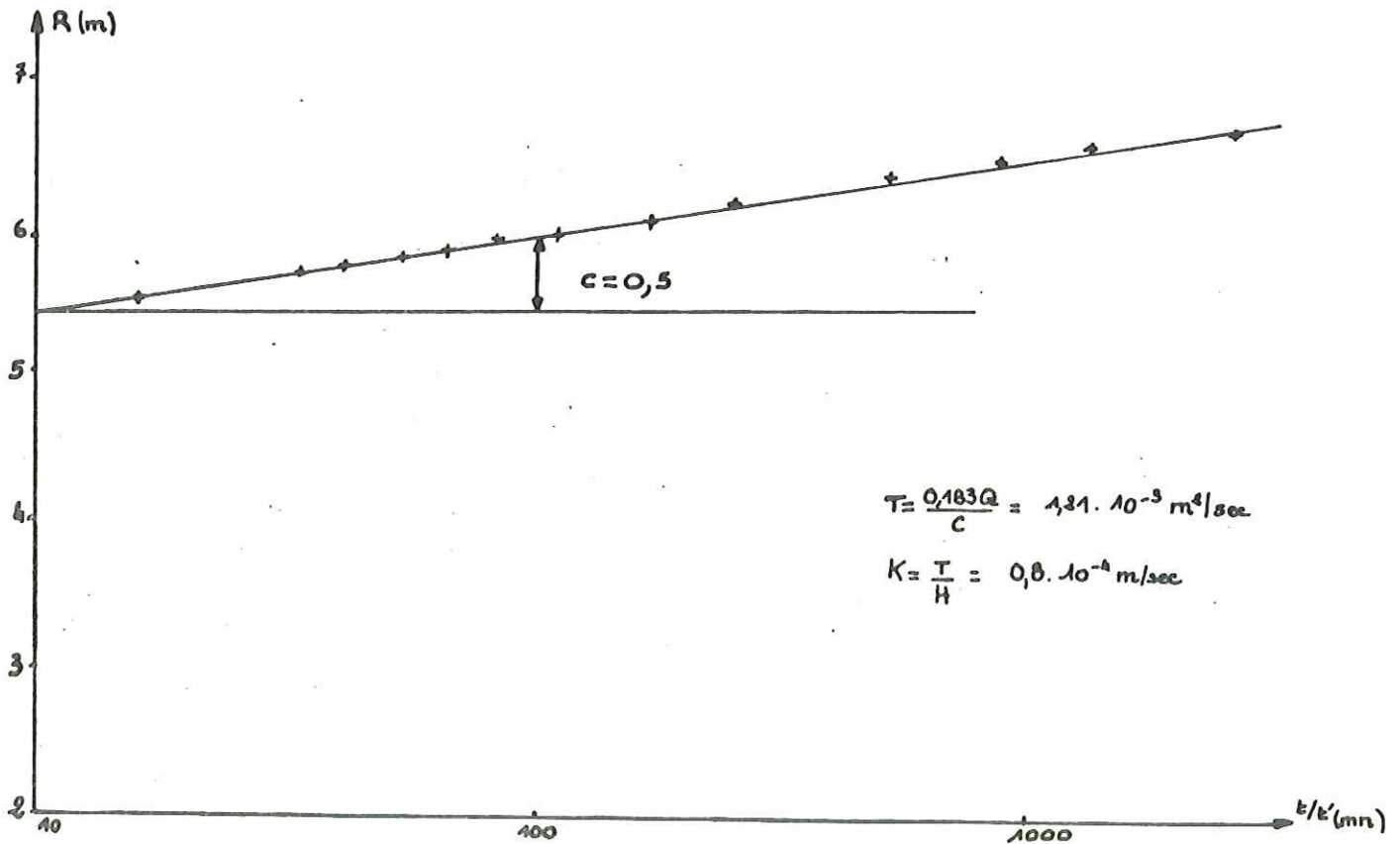


Fig. 102 - Essai de Pompage - Droite de remontée de la nappe dans le piézomètre F 4.

TABLEAU DE REMONTEE

heure 7.9.79	t fictif mn	t' mn	t/t'	R (m)	
8h15	2375	0	0		7,70
8h30	2390	15	159,3	0,60	7,10
8h45	2405	30	80,2	0,32	6,78
9h	2420	45	53,8	0,13	6,65
9h20	2440	65	37,5	0,10	6,55
10h	2480	105	23,6	0,09	6,46
10h30	2510	135	18,6	0,05	6,41
11h	2540	165	15,4	0,05	6,36
11h30	2570	195	13,2	0,04	6,32
12h	2600	225	11,5	0,03	6,29
13h30	2690	315	8,5	0,09	6,2
14h30	2750	375	7,3	0,09	6,11
15h15	2795	420	6,6	0,06	6,05
17h	2840	465	6,1	0,10	5,95

Dépouillement du pompage en F 2 :

Etude de la remontée à partir de l'arrêt du pompage, jusqu'à l'arrêt de la pompe en F4 : cf figure 101:

penne de la droite :  $c = 0,65$

$$T = \frac{0,183 \times 4,47 \cdot 10^{-3}}{0,65} = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$$

soit une épaisseur moyenne de l'aquifère de  $h = 15 \text{ m}$  environ

$$K = \frac{T}{H} = \frac{1,26 \times 10^{-3}}{15} = 0,08 \times 10^{-3} = 0,8 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$$

————— Piézomètre F 4 —————

Volume global extrait de la nappe :

$$\begin{array}{rcl}
 2,7 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} & \times & 2\text{h}40 \text{ (16800 sec)} = 45,36 \\
 + 3,3 \times 10^{-3} \text{ "} & \times & 1\text{h} \text{ (3600 s)} = 190,10 \\
 + 2,9 \times 10^{-3} \text{ "} & \times & 11\text{h}30 \text{ (41400 s)} = 120,06 \\
 + 2,8 \times 10^{-3} \text{ "} & \times & 15\text{h} \text{ (54000 s)} = 151,20 \\
 & & \hline
 & & 506,72 \text{ m}^3
 \end{array}$$

Débit maximal :  $3,3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$ .

$$\begin{aligned}
 \text{calcul de t fictif : } t \text{ fictif} &= \frac{506,72}{3,3 \times 10^{-3}} = 153,55 \times 10^3 \text{ sec} \\
 &= 2559 \text{ mn}
 \end{aligned}$$

$$t \text{ fictif} = 2559 \text{ mn}$$



Dépouillement du pompage : depuis l'arrêt de la pompe en F4 jusqu'à l'arrêt de la pompe en F1 : cf figure 102 :

heure 7.9.79	t fictif mn	t' mn	t/t'	R (m)	
10h40	2559	0	0		6,93
10h41	2560	1	2560	0,30	6,63
10h42	2561	2	1280,5	0,10	6,53
10h43	2562	3	854	0,10	6,43
10h45	2564	5	512,8	0,10	6,33
10h50	2569	10	2569	0,20	6,13
10h55	2574	15	171,6	0,10	6,03
11h03	2582	23	112,3	0,10	5,93
11h10	2589	30	86,3	0,05	5,88
11h18	2597	38	68,3	0,05	5,83
11h28	2602	48	54,2	0,05	5,78
11h42	2616	62	42,2	0,05	5,73
11h57	2631	77	3,42	0,05	5,68
13h28	2722	168	16,2	0,18	5,50

Pente de la droite  $c = 0,5$

$$T = \frac{0,183 Q}{c} = \frac{0,183 \times 3,3 \times 10^{-3}}{0,5} = 1,21 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$$

$$K = \frac{T}{H}$$

H = épaisseur moyenne de l'aquifère  $\approx 15$  m.

$$K = \frac{1,21}{15} \times 10^{-3} = 0,08 \times 10^{-3} = 0,8 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$$

————— Piézomètre F 1 —————

Volume global extrait de la nappe :

$6,29 \times 10^{-3}$	$\text{m}^3/\text{sec}$	$\times$	18600 sec	$=$	116,99 $\text{m}^3$
+	$5,24 \times 10^{-3}$	"	$\times$ 41400	$=$	216,94
+	$5,17 \times 10^{-3}$	"	$\times$ 35400	$=$	183,02
+	$5,16 \times 10^{-3}$	"	$\times$ 51900	$=$	267,80
+	$4,94 \times 10^{-3}$	"	$\times$ 24900	$=$	123
+	$4,86 \times 10^{-3}$	"	$\times$ 60600	$=$	294,52
+	$4,76 \times 10^{-3}$	"	$\times$ 19200	$=$	91,77

$$\text{Total } V = 1294 \text{ m}^3$$

Débit maximal :  $6,29 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$

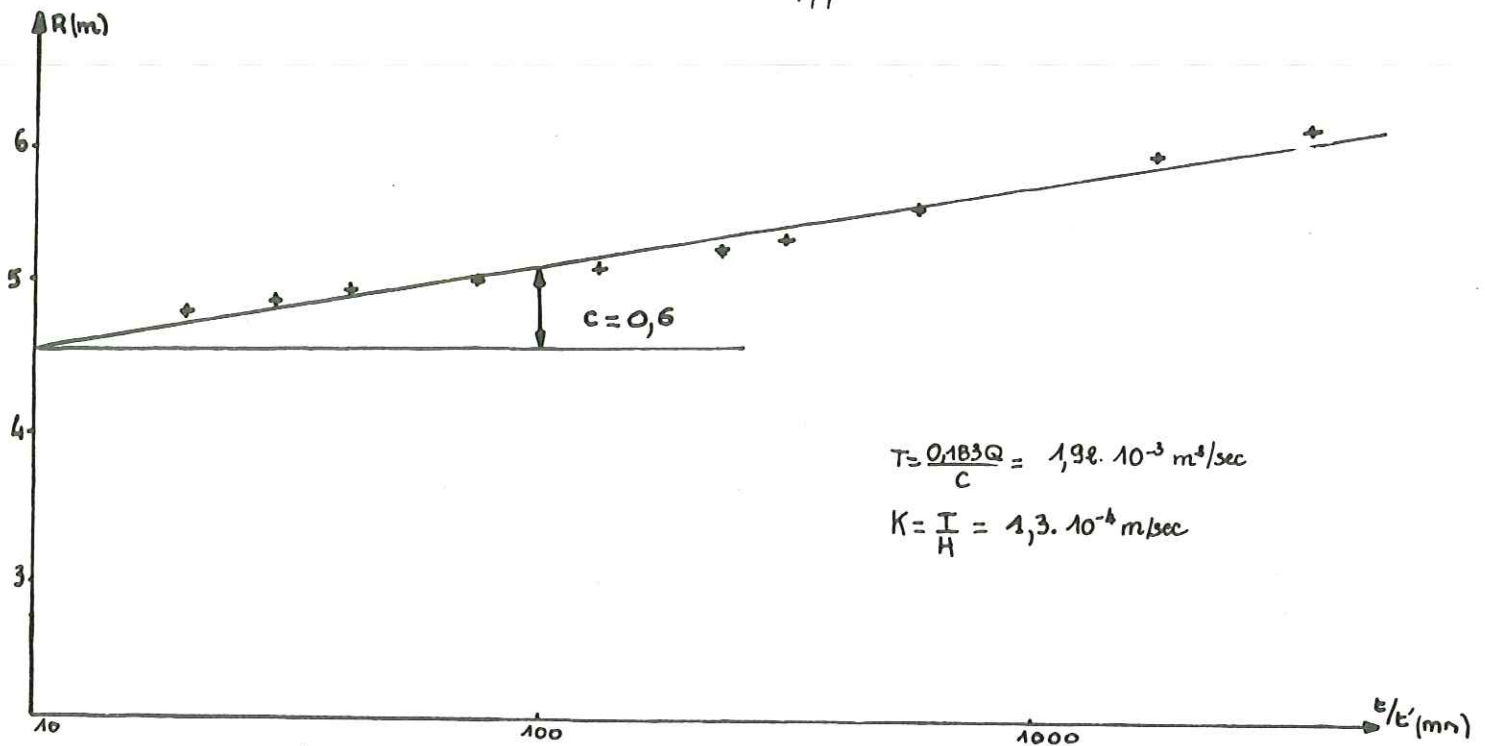


Fig.103 - Essai de Pompage - Droite de remontée de la nappe  
dans le piézomètre F 1.

Date	Heure	Source Froide	Source du Caniveau	Gde Source Chaude	Pte Source Chaude
3.9.79	18h15	11.9 l/s	18.1 l/s	22.5 l/s	6.4 l/s
	20h20	11.9 l/s	18.1 l/s	22.5 l/s	6.4 l/s
4.9.79	6h40	11.9 l/s	18.1 l/s	22.5 l/s	6.4 l/s
	13h30	11.9 l/s	19 l/s	22 l/s	6.4 l/s
	20h45	11.6 l/s	18.1 l/s	22.5 l/s	6.2 l/s
5.9.79	6h35	11.9 l/s	19.1 l/s	23 l/s	6.5 l/s
	13h40	11.9 l/s	19.5 l/s	22 l/s	6.2 l/s
	18h15	11.3 l/s	18.7 l/s	22.5 l/s	6.2 l/s
6.9.79	6h25	11.3 l/s	18.7 l/s	21 l/s	6;3 l/s
	13h45	11.6 l/s	18.4 l/s	22 l/s	6.3 l/s
	18h10	11.6 l/s	18.4 l/s	22 l/s	6.2 l/s
7.9.79	6h40	11.3 l/s	17 l/s	21 l/s	6.1 l/s
	14h15	11.6 l/s	16.7 l/s	21 l/s	6.1 l/s

Tableau 104 : Variations des débits des sources minéralisées  
de Salins durant l'essai de pompage



calcul de t fictif :  $t \text{ fictif} = \frac{1294}{6,29 \times 10^{-3}} = 205,72 \times 10^3 \text{ sec} = 3428,7$

t fictif = 3429 mn . Tableau de remontée: cf figure 103

heure 7.9.79	t fictif mn	t' mn	t/t'	R (m)	
13h48	3429	0	0		6,53
13h49	3430	1	3430	0,30	6,23
13h50	3431	2	1715,5	0,20	6,03
13h54	3435	6	572,5	0,40	5,63
13h59	3440	11	312,7	0,20	5,43
14h03	3444	15	229,6	0,10	5,33
14h14	3455	26	132,9	0,10	5,23
14h34	3475	46	75,54	0,10	5,13
14h55	3496	67	52,17	0,06	5,07
15h15	3516	87	40,4	0,05	5,02
16h50	3603	182	19,8	0,13	4,89

$$c = 0,6$$

$$T = \frac{0,183 \times 6,29 \times 10^{-3}}{0,6} = 1,92 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$$

$$K = \frac{1,92}{15} \times 10^{-3} = 0,13 \times 10^{-3} \text{ m/sec} = 1,3 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$$

#### \* Synthèse des résultats

$$F 2 \quad T = 1,26 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$$

$$K = 0,8 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$$

$$F 4 \quad T = 1,21 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$$

$$K = 0,8 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$$

$$F 1 \quad T = 1,92 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$$

$$K = 1,3 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$$

Les valeurs de transmissivité et perméabilité sont homogènes sur l'ensemble des points de pompage.

Il résulte de ces calculs que la perméabilité de la nappe alluviale du Doron est de l'ordre de  $10^{-4}$  m/sec, ce qui correspond à une valeur moyenne rencontrée généralement dans des sables hétérogènes.

#### V-2. Au niveau des sources minéralisées des Vieux Bains

Les mesures de débits des sources effectuées pendant toute la durée de l'essai de pompage sont réunies dans le tableau de le tableau 104.

Ces mesures ont été exécutées de différentes manières :

. Le débit de la Petite Source Chaude a été mesuré de la façon suivante :

Il était tout d'abord mesuré 2 fois grâce à une capacité jaugée de 50 l. Ensuite, une troisième mesure était effectuée par le remplissage du volume V connu du bassin de réception de la source. Ce bassin était alors vidé par siphonnage juste avant la mesure. La mesure finale prise en compte correspond à la valeur moyenne des 3 mesures.

. Le débit de la Source Froide était mesuré grâce à une capacité jaugée de 50 l.

. Les débits de la Source Froide du Caniveau et de la Grande Source Chaude étaient obtenus grâce à une réglette directement graduée en litres/seconde, placée au niveau d'un seuil.

Nous noterons donc que les mesures de débits de ces sources n'ont pas été réalisées dans des conditions idéales. D'autre part, les seuils n'étaient pas parfaitement horizontaux et, de ce fait, l'eau s'écoulait un peu trop rapidement. Cependant, nous n'avions pas d'autre possibilité de mesure de débit de ces sources.

La mesure du débit de la Grande Source Chaude nécessitait l'arrêt de la pompe destinée à envoyer l'eau chaude de cette source à l'établissement thermal de Salins les Thermes.

Le tableau de la figure 104 montre que les débits des sources n'ont pratiquement pas varié pendant l'essai de pompage.

La légère baisse de débit constatée aux sources pourrait paraître due aux erreurs de mesures mais, l'essai de pompage s'est tout de même fait sentir sur le régime des sources et c'est grâce à la Grande Source Chaude que nous avons pu mettre ce fait en évidence.

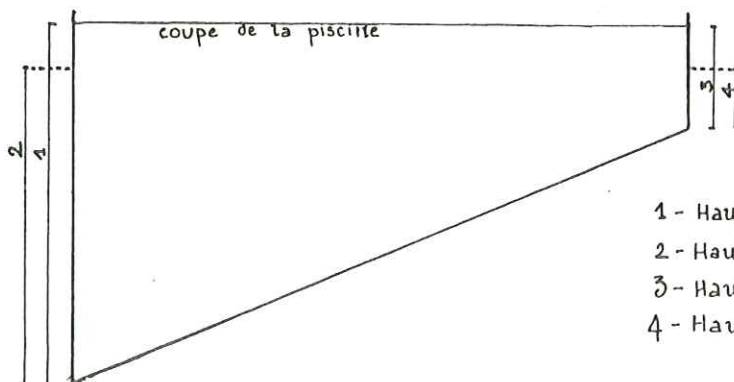
En effet, deux fois par semaine, l'eau de la Grande Source Chaude est utilisée pour le remplissage de la piscine de l'établissement. Le lundi soir et le jeudi soir l'eau de cette source est pompée et le remplissage de la piscine s'effectue pendant la nuit.

Le lundi soir qui a suivi la mise en route du pompage, il a fallu utiliser la pompe à son rendement maximal pour pouvoir remplir la piscine de  $880\text{m}^3$ .

Le jeudi soir suivant, la pompe est aussi utilisée à son rendement maximal. Cependant, le vendredi matin, il manquait 0,30 m d'eau dans la piscine, ce qui correspond à une baisse d'environ 17 % du volume initial.

La figure 105 montre schématiquement la baisse du niveau de l'eau dans la piscine.

Fig 105 : VARIATION DU NIVEAU DE L'EAU DANS LA PISCINE THERMALE



- 1 - Hauteur d'eau piscine pleine : 2,64 m
- 2 - Hauteur d'eau le 7/9 matin : 2,34 m
- 3 - Hauteur d'eau piscine pleine : 0,95 m
- 4 - Hauteur d'eau le 7/9 matin : 0,65 m

Volume piscine pleine :  $879\text{ m}^3$

Volume le 7/9 matin :  $732,4\text{ m}^3$

Différence :  $147\text{ m}^3$ , soit 16,8 % du volume initial



D'autre part, à partir du mardi qui a suivi la mise en route du pompage, le personnel de l'établissement thermal a remarqué une diminution du volume d'eau chaude utilisable.

L'essai de pompage que nous avons réalisé nous a permis de rabattre d'environ 1,70 m la nappe alluviale du Doron au dessous des cotes des émergences thermominérales et nous pensons que si les débits des sources n'ont que peu varié, c'est parce que le rabattement de la nappe n'était pas suffisant, ou qu'il concernait une zone beaucoup trop réduite près des émergences.

#### VI - Etude de la composition chimique des eaux durant l'essai de pompage

Comme nous l'avons déjà dit, des mesures de températures et de résistivités des eaux superficielles et des eaux chaudes ont été effectuées pendant toute la durée de l'essai de pompage.

Les mesures prises sur les eaux froides superficielles de la nappe alluviale dans les quatre piézomètres et sur les eaux minéralisées des Vieux Bains n'ont pas révélé de variations de résistivités et de température.

De ces observations, nous pouvons déduire les faits suivants :

- . les eaux de la nappe alluviale du Doron ainsi que les eaux minéralisées des Vieux Bains ont conservé leurs caractéristiques physicochimiques durant tout l'essai de pompage.

- . le pompage n'a pas provoqué de mélanges entre les différents types d'eaux : eaux froides superficielles du Doron, eaux froides minéralisées, et eaux chaudes minéralisées.

- . les eaux minéralisées n'ont pas été "aspirées" par le pompage, et de ce fait, ne sont pas parvenues au piézomètre F1 qui se situe pourtant très près de leurs émergences.

- . il faut noter d'autre part que l'eau extraite est restée claire durant toute la durée du pompage. Il n'y a pas eu d'apparition d'eau chargée de boue sablo-argileuse grise ou de boue rouge.

#### VII-- Comparaison de l'effet du pompage avec les variations naturelles de la nappe

Il est étonnant de voir que l'essai de pompage qui nous a permis de rabattre le niveau de la nappe d'environ 2 m n'a pas eu de répercussion sur les débits des sources alors que les variations naturelles de la nappe qui ne dépassent pas 1 m d'amplitude provoquent des variations très nettes des débits des sources.

Nous pensons que cette observation confirme l'action beaucoup trop localisée de l'essai de pompage.

Ainsi, un petit rabattement du niveau de la nappe sur une très grande étendue a une action beaucoup plus prononcée qu'un rabattement important limité à un périmètre restreint autour des émergences.

#### VIII - Conclusions à cette étude

L'essai de pompage que nous avons réalisé à Salins les Thermes ne nous apporte pas d'arguments définitifs pour démontrer l'action de la pression du Doron sur les sources minéralisées des Vieux Bains.

Nous ne pouvons en effet pas démontrer l'hypothèse selon laquelle le Doron agirait sur le régime des sources grâce à la pression qu'il exerce sur ces dernières mais, les observations faites sur plusieurs jours faisant apparaître une légère diminution du débit des eaux chaudes nous incitent à penser que l'action du Doron se matérialise bien de cette façon.

Nous aurions peut-être pu obtenir de meilleurs résultats :

. soit en créant un rabattement beaucoup plus important du niveau de la nappe alluviale afin de maintenir ce dernier bien en dessous des émergences minéralisées. Il faudrait dans ce cas utiliser non pas des pompes de surface qui sont limitées à une hauteur d'aspiration maximale de 7 m, mais des pompes immergées qui permettent d'atteindre de plus grandes profondeurs de rabattement.

Un rabattement plus important de la nappe alluviale nous aurait permis de créer une dépression beaucoup plus vaste, sollicitant une zone plus étendue autour des sources minéralisées. Le petit cône de dépression que nous <sup>avons</sup> obtenu n'était pas suffisant, et le rayon d'action était incontestablement trop réduit pour nous permettre d'observer une réaction rapide des sources.

. soit en prolongeant notre essai de pompage d'une semaine pour avoir des observations plus évidentes.

D'un autre point de vue, cet essai de pompage s'est révélé très instructif car il nous a permis de tirer des conclusions très intéressantes quant à l'étude des relations chimiques Doron-sources minéralisées.

A la fin de cette étude, nous pouvons en effet confirmer l'indépendance physicochimique des eaux du Doron et des eaux minéralisées. Il n'existe pas de mélanges notables entre ces deux types d'eaux.

Enfin, nous avons constaté grâce à cet essai que c'est avec le pompage effectué dans le piézomètre F4 que nous avons réalisé le meilleur écran à l'alimentation en eau de la nappe. Dès la mise en route du pompage dans ce piézomètre, la vitesse de rabattement du niveau de la nappe alluviale s'est accélérée.



CHAPITRE V

ETUDE DES CONDITIONS DE PROTECTION DES EAUX THERMALES

DE

SALINS - LES - THERMES

I - But de cette étude

Les relations avec la nappe alluviale du Doron n'étant que des relations de pression, il est apparu important de chercher s'il pouvait y avoir des risques d'infiltration vers les émergences thermominérales à partir du versant situé au Sud Est de la station.

En effet, on a là un massif de calcaires dolomitiques à caractère karstique.

II - Etude de la circulation dans le versant

Afin de mettre en évidence le mode de circulation des eaux dans ce massif de calcaires dolomitiques, nous avons réalisé un essai de traçage .

1) Préparation de l'essai de traçage

Avant de débiter l'essai de traçage, nous avons étudié l'emplacement géographique des sources minéralisées des Vieux Bains par rapport au plateau surplombant les émergences. La figure donne schématiquement cet emplacement.

Nous avons choisi les lieux d'injections en nous basant sur les critères suivants :

- . choisir un point d'injection à une centaine de mètres en amont des émergences thermales.
- . compte tenu du recouvrement des calcaires dolomitiques par des formations morainiques, des remblais et de la terre végétale, il fallait choisir des lieux d'injections permettant le creusement d'une tranchée par une pelle mécanique.

Les points d'injections réunissant toutes ces conditions n'étaient pas nombreux et après notre visite, nous en avons retenu deux. Ces derniers sont positionnés sur la figure .

Une petite enquête rapide auprès des habitants nous a révélé que toutes les maisons implantées en amont de la tranchée n° 1 ne sont pas fondées dans le substratum rocheux, mais par contre, la maison A (cf figure 106 ) est fondée dans le substratum rocheux.

M. R. Chedal ayant mis une pelle mécanique à notre disposition, nous avons fait creuser deux tranchées afin d'injecter le traceur le plus près possible des calcaires dolomitiques. Nous savons, en effet, que certains traceurs sont piégés par les formations superficielles pendant les premiers mètres d'infiltration.

Les deux tranchées, profondes d'environ 4 m, n'ont pas atteint le substratum, mais ont mis en évidence l'hétérogénéité des terrains de recouvrement.

La tranchée n°1 (cf figure 106) est creusée dans des formations constituées essentiellement de terre à caractère argileux.

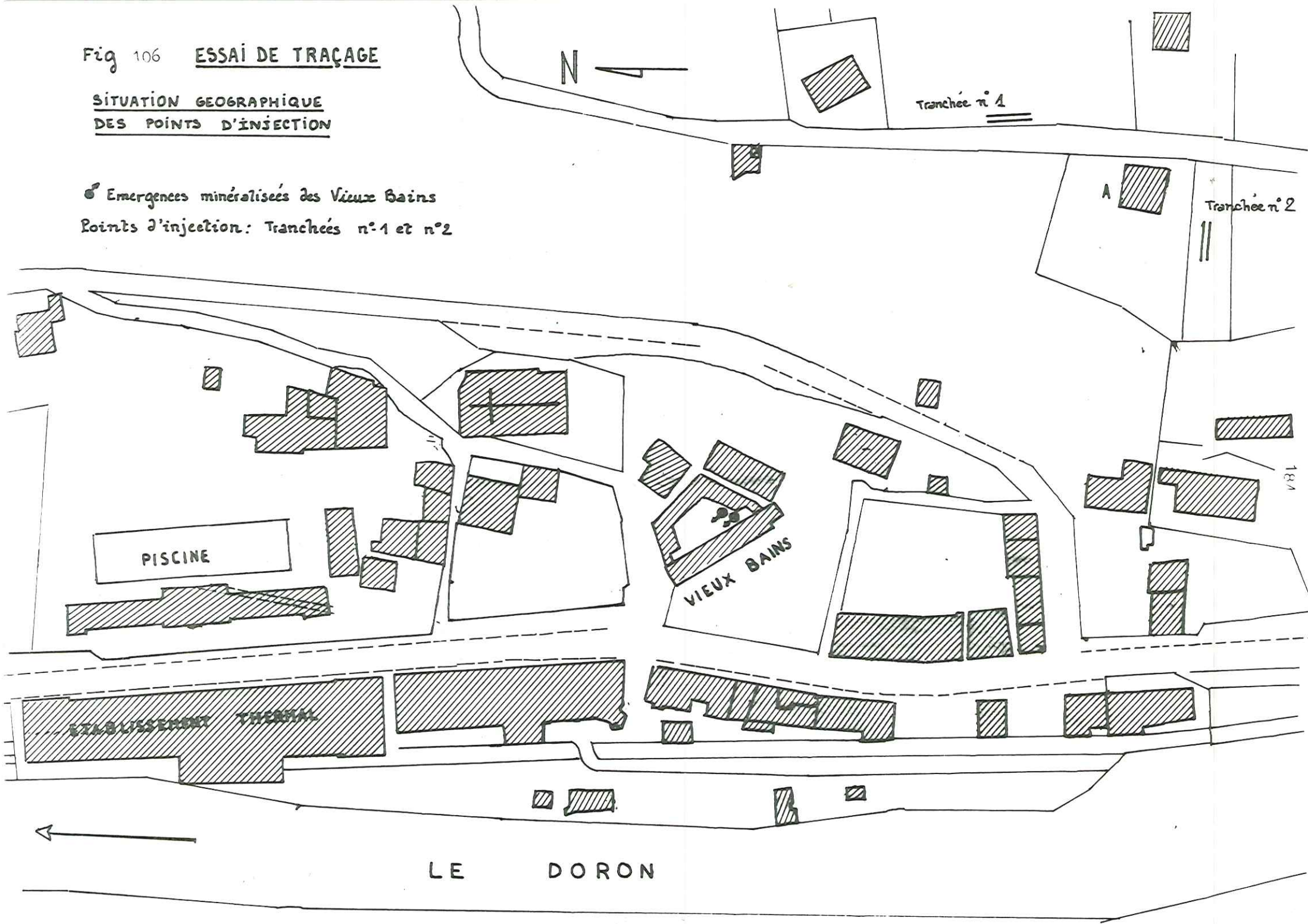
Par contre, la tranchée n°2 (cf figure 106) au Sud de la maison A, est creusée dans des formations plutôt graveleuses contenant de nombreux blocs morainiques.



Fig 106 ESSAI DE TRAÇAGE

SITUATION GEOGRAPHIQUE  
DES POINTS D'INJECTION

☉ Emergences minéralisées des Vieux Bains  
Points d'injection: Tranchées n°1 et n°2



Compte tenu de cette différence de constitution, nous avons choisi d'injecter deux traceurs différents dans chaque tranchée.

Dans la tranchée n°2, nous avons injecté de la Rhodamine WT alors que dans la tranchée n°1, nous avons injecté de la Fluorescéine.

Ce choix n'est pas arbitraire. Nous avons injecté la Rhodamine dans la tranchée n°2 car ce traceur est souvent piégé par les argiles lors de son infiltration.

Nous avons tout d'abord pensé injecter un traceur incolore et inoffensif qui ne nuirait pas au fonctionnement de l'établissement thermal, mais le chlorure de Lithium qui est parfois utilisé comme tel, n'a pas pu être injecté ici à cause de la teneur importante en chlorure et en Lithium des eaux minéralisées.

## 2) Déroulement du traçage

### \* Essai d'infiltration

La veille du traçage, un essai d'infiltration d'eau dans les tranchées a été effectué; grâce à un camion citerne, environ 150 l d'eau ont été versés dans chaque tranchée. Au bout de 4 heures environ, à peu près le 1/3 des volumes d'eau s'était infiltré. Ensuite, peut-être sous l'effet du colmatage des fonds des tranchées par les particules argileuses, l'infiltration a été beaucoup plus lente. Environ 20 heures après la mise en eau des tranchées, l'eau s'était totalement infiltrée dans le sol.

### \* Mise en place des préleveurs automatiques

La veille du traçage, des préleveurs automatiques ont été installés aux sources suivantes : source Massiago, Source Froide, source du Caniveau, Grande Source Chaude, Petite Source Chaude. La fréquence de prélèvement était de 1 heure. Le 1er prélèvement a été effectué le mardi matin juste après l'injection, à 10h. Les prélèvements ont été interrompus au bout de 4 jours.

### \* Mise en route du traçage

Les traceurs ont été injectés le mardi 4 septembre à 10h30.

- . 1kg de Fluorescéine en solution alcoolique à 200g/l a été versé dans la tranchée n° 1.
- . 1 kg de Rhodamine WT sous forme de solution alcoolique à 320 g/l a été injecté dans la tranchée n°2.

Afin de réduire l'effet de rétention des traceurs par les particules argileuses, nous avons versé de la soude en même temps que les traceurs. Environ 120 g de soude en solution ont été ajoutés dans les deux tranchées.

Il n'y a eu aucune précipitation durant l'essai de traçage et il a plu uniquement la veille de l'injection des traceurs.

## III - Résultats de cette expérience

Cette expérience a été réalisée dans le but de trouver un cheminement possible de l'eau déversant vers les émergences des sources minéralisées. De ce fait, nous ne l'avons pas réalisée du point de vue quantitatif, mais uniquement du point de vue qualitatif. Aucun calcul de restitution n'a été effectué aux sources minéralisées.

Les deux traceurs sont ressortis aux sources à des concentrations inférieures à la limite de détection à l'oeil nu (100 mg/m<sup>3</sup>).



	Date	Petite Source chaude	Grande Source chaude	Source du Caniveau	Source froide	Source Massiago
FLUORÉSCÉINE	4.9.79					
	12.13h	+	+	+	+	
	22h	+		+		
	5.9.79					
	3h	+	+	+		
	5h			+	+	
	8h	+	+	+		
	15.16h	+		+		
	6.9.79					6.9 à 21h
	18.19h	+	+			
7.9.79						
3h	+	+			7.9 à 16h10	
RHODAMINE	4.9					
	12.13h	+	+	+	+	
	23h	+	+	+		
	5.9					
	4.5h	+	+	+	+	
	6.7h	+	+	+		
	12.13h	+	+			
	18h	+	+		19h	
	23h		+		+	
	6.9					6.9 à 16h
	1.2h	+	+		3h	
	7-8h	+	+		9h	
	12.13h	+	+		+	
22.23h	+	+				
7.9					7.9 à 15h	
3h	+	+				
5.6h	+	+				
9.10h	+	+				

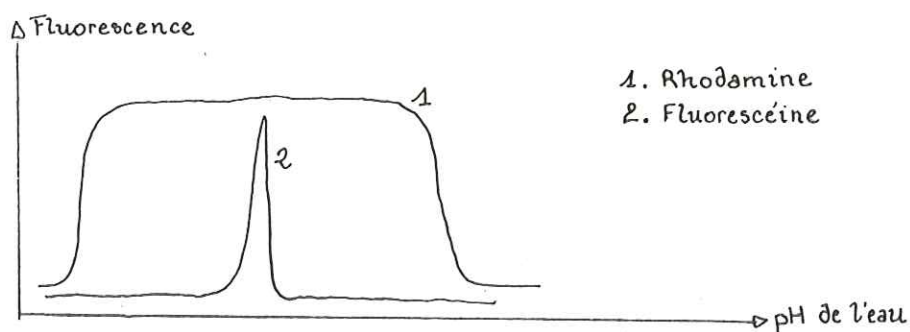
Tableau 107

PICS DE RESTITUTION DES TRACEURS AUX  
EMERGENCES MINERALISEES DE SALINS-LES-THERMES

Le dépouillement des traçages a été réalisé au laboratoire de chimie analytique de la Faculté de Pharmacie de Grenoble. L'appareil utilisé est un spectrofluorimètre. Cet appareil permet de sélectionner la longueur d'onde d'absorption lumineuse maximale ( $\lambda$  excitatrice) et la longueur d'onde de fluorescence maximale du traceur recherché ( $\lambda$  émission). Pour les deux traceurs utilisés, ces longueurs d'onde sont les suivantes :

traceur	$\lambda$ excitatrice	$\lambda$ émission
Fluorescéine	489 nm	514 nm
Rhodamine WT	554 nm	572 nm

La fluorescence émise par les traceurs est influencée par le pH de l'eau surtout en ce qui concerne la fluorescéine :



Ainsi, pour éviter l'influence possible des variations du pH, on rajoute à tous les échantillons une goutte de soude 0,1 N afin de rendre la solution basique.

Lors de leur passage dans le spectrofluorimètre, les traceurs soumis à un rayonnement lumineux émettent des radiations lumineuses dont la longueur d'onde qui les caractérise est différente de la longueur d'onde de la lumière excitatrice.

La restitution des traceurs aux sources minéralisées donne des indications sur le cheminement des traceurs depuis les points d'injections jusqu'aux points de prélèvements.

Le tableau de la figure 107 donne les heures pendant lesquelles les échantillons ont révélé la présence de traceurs.

Nous voyons que si nous mettons en parallèle la restitution de la fluorescéine avec celle de la Rhodamine WT, les deux traceurs apparaissent en même temps aux sources.

D'autre part, nous pouvons constater que la restitution de ces traceurs ne s'est pas faite en une seule fois durant l'expérience, mais par vagues successives réparties sur les 5 jours de prélèvements. Nous essayerons par la suite d'expliquer ce phénomène.

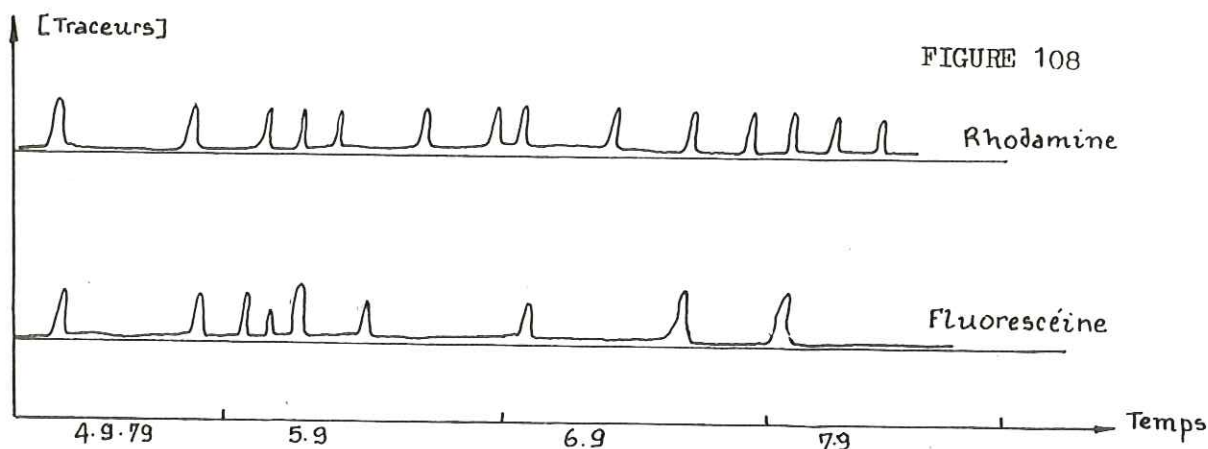
L'étude des concentrations des traceurs en fonction du temps permet de déterminer le temps de transit des traceurs dans le sol. Le premier prélèvement qui révèle la présence de traceur correspond au temps de transit des particules les plus rapides.

Aux émergences des sources minéralisées des Vieux Bains, la restitution des traceurs a débuté le jour même de l'essai de traçage, environ 1h30 après l'injection.



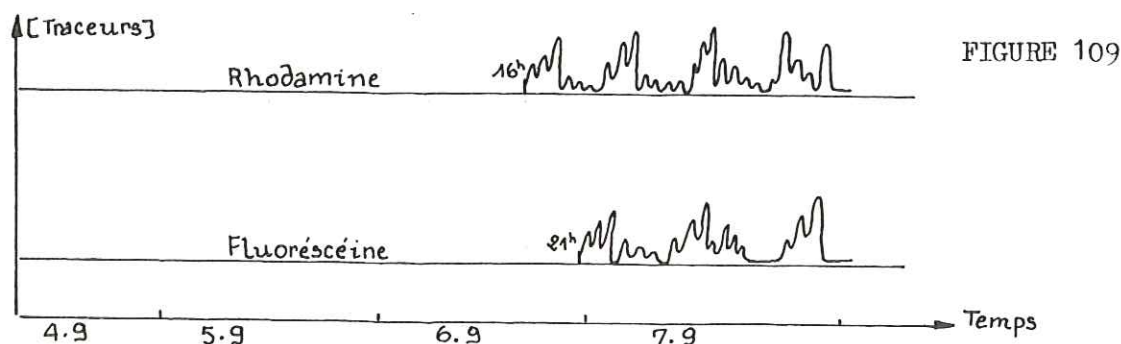
Ceci signifie que le temps de transit des particules les plus rapides des traceurs dans la falaise de calcaires dolomitiques est très court.

Ensuite, pendant les 4 jours suivants, nous pouvons schématiser les courbes de restitution des traceurs de la façon suivante :



Les courbes de restitutions des traceurs à la source Massiagio sont un peu différentes. Du fait du trajet beaucoup plus important entre les points d'injections et le point de prélèvements, le temps de transit des traceurs dans le sol a été plus long, et la restitution des traceurs à la source n'a débuté que deux jours après l'injection.

Les courbes de restitution des traceurs à cette source peuvent être schématisées ainsi :



Cette figure montre que les deux traceurs apparaissent à la source Massiagio 54 heures après le début de l'injection. La Rhodamine WT est ressortie en premier à la source, avant la Fluorescéine.

Là aussi, les traceurs sont ressortis à la source non pas en une seule fois, mais en vagues successives qui sont, dans le cas de cette source Massiagio, mieux marquées que dans le cas des sources minéralisées des Vieux Bains.

Du point de vue des concentrations des traceurs restitués à toutes les émergences, il est important de noter que ces dernières sont très faibles, presque à la limite de détection de l'appareil.

En effet, les teneurs en traceurs observées aux émergences se situent dans une gamme allant de  $10^{-8}$  à  $10^{-10}$  c'est-à-dire de 10 mg à 0,1 mg/m<sup>3</sup>.

Les concentrations minimales détectables par l'appareil sont de l'ordre de  $10^{-10}$  à  $10^{-11}$ .

Ces concentrations très faibles sont étonnantes du fait du trajet apparemment court qui sépare les sources des points d'injections.

Nous rappelons en effet que les points d'injections se situent sur la falaise calcaire (d'environ 60 m de haut) qui surplombe les sources et à une centaine de mètres en amont de leurs émergences.

#### IV - Etude des boues et des terrains des lieux d'injection

Les faibles concentrations obtenues pouvaient être dues à la rétention des traceurs par des particules argileuses.

De ce fait, des études d'absorption des traceurs par les terrains argileux en présence ont été réalisées au laboratoire de Chimie Analytique de la Faculté de Pharmacie de Grenoble sous la direction de J. Rochas.

Ces essais ont été effectués d'une part sur les boues rouges déposées par les eaux thermales, d'autre part sur les terrains au sein desquels les traceurs ont été injectés.

Les prélèvements des boues et des terrains avoisinant les points d'injections ont été effectués juste avant l'essai de traçage.

Manipulation : dans un premier temps, les échantillons sont déshydratés. Ensuite, pour chaque échantillon, on prépare deux flacons de 20 cm<sup>3</sup> de traceur 5. 10<sup>-3</sup> Mole contenant respectivement 1g, 0,5g et 0,25g de l'échantillon déshydraté.

D'autre part, il convient de garder un flacon témoin n°1 contenant uniquement 20 cm<sup>3</sup> de traceur 5. 10<sup>-3</sup> M et un témoin n°2 contenant 20 cm<sup>3</sup> d'eau distillée et 1g d'échantillon.

Les traceurs et les échantillons sont laissés en contact pendant 48 heures.

Les flacons sont ensuite centrifugés et l'eau récupérée est passée au spectro-fluorimètre après alcalinisation des témoins et des essais par une goutte de soude NaOH 0,1 N afin de ne pas enregistrer les variations de pH.

Le flacon témoin n°1 correspond à une restitution du traceur de 100 %. Le flacon témoin n°2 correspond au zéro de l'essai, c'est-à-dire à une restitution du traceur de 0 %.

#### Résultats concernant la fluorescéine

Les tableaux de restitution de ce traceur à chaque point de prélèvement sont les suivants :

- boues rouges déposées par les eaux minéralisées

	1 g	0,5 g	0,25
1er essai	96%	99%	100 %
2ème essai	95%	99%	100 %

- point d'injection n°1

1er essai	100 %	100 %	100 %
2ème essai	100 %	100 %	100 %

- point d'injection n°2

	1 g	0,5 g	0,25 g
1er essai	100 <sup>+</sup> %	100 <sup>+</sup> %	100 <sup>+</sup> %
2ème essai	100 <sup>+</sup> %	100 <sup>+</sup> %	100 <sup>+</sup> %



Les essais ont été préparés le 10.9.79 et leur fluorescence a été mesurée le 12.9.79.

### Résultats concernant la Rhodamine

La manipulation est la même que précédemment. Les essais et les témoins ont été mis en contact avec la Rhodamine le 17.9.1979 à 11h30.

La fluorescence des échantillons a été mesurée deux fois : une première fois le 17.9.1979 après centrifugation puis une deuxième fois le 19.9.79.

Voici les résultats obtenus :

- boues rouges des eaux chaudes

17.9.79 à 16h50

	1 g	0,5 g	0,25 g
1er flacon	77 %	88 %	91 %
2ème	76 %	92 %	93 %

19.9.79

	1 g	0,5 g	0,25 g
1er essai	73	83 %	86 %
2ème "	73	86 %	87 %

Point d'injection n°1

17.9.1979

	1g	0,5g	0,25g
1	95%	94%	95%
2	95%	95%	94%

19.9.1979

	1g	0,5g	0,25g
1	93%	93%	94%
2	92%	93%	94%

Point d'injection n°2

17.9.1979

	1g	0,5g	0,25g
1	100 <sup>+</sup> %	100 <sup>+</sup> %	100 <sup>+</sup> %
2	100 <sup>+</sup> %	100 <sup>+</sup> %	100 <sup>+</sup> %

19.9.1979

	1g	0,5g	0,25g
1	94%	93%	94%
2	95%	95%	95%

Dépôts blanchâtres dans les galeries

	1g	0,5g	0,25g
1	90%	94%	93%
2	91%	93%	93%

	1g	0,5g	0,25g
1	86%	89%	91%
2	86%	89%	89%

Tous ces tableaux montrent qu'il n'existe pas de rétention de la fluorescéine par les particules argileuses en présence pendant l'essai de traçage. Même après 48 h de contact avec les échantillons argileux, le traceur est restitué à plus de 95 %.

Par contre, la Rhodamine WT n'est pas restituée à 100 % au bout de 48h. Elle est même déjà fixée par les particules argileuses quelques heures après la mise en contact traceur-échantillon. Ceci est surtout vrai pour les dépôts blanchâtres observés dans les galeries et, plus particulièrement, pour les boues rouges déposées par les eaux chaudes minéralisées ; au bout de quelques heures, ces boues ne restituent que 75 % environ de la Rhodamine.

## V - Exploitation des résultats

Si nous reprenons tous les résultats obtenus au cours de cet essai de traçage, nous pouvons dire tout d'abord que les deux traceurs (fluorescéine et Rhodamine WT) sont ressortis à toutes les sources minéralisées dans des concentrations très faibles comprises entre  $10^{-8}$  et  $10^{-10}$ .

Aux sources minéralisées des Vieux Bains, les traceurs sont ressortis environ 1h30 après leur injection dans les tranchées. Puis, pendant les jours qui ont suivi l'injection, ils sont réapparus par vagues successives.

A la source Massiago située en amont de Salins, les traceurs sont apparus deux jours environ après l'injection. La Rhodamine est ressortie quelques heures avant la fluorescéine. Ensuite, comme dans les sources des Vieux Bains, les traceurs sont arrivés à la source par vagues successives mais toutefois mieux marquées que dans les sources minéralisées des Vieux Bains.

La mise en contact des boues, dépôts et terrains encaissants avec les traceurs utilisés nous permet d'écartier l'éventuelle possibilité de rétention des traceurs par les parties argileuses.

Seule la Rhodamine a été en partie fixée par les particules argileuses des boues rouges et des dépôts blanchâtres observés dans les galeries. Cependant, au bout de 48 heures, la restitution de ce traceur est encore de plus de 73 %. Il semble donc que la soude versée lors de l'injection a minimisé l'effet d'adsorption de ce traceur par les argiles. L'adjonction de soude à la fluorescéine a permis d'obtenir l'Uranine, forme basique du traceur, et qui présente la fluorescence. (dans ce cas il n'y a pas d'effet de charge). (RERAT - 1976)

Les faibles concentrations des traceurs observées aux émergences ne proviennent donc pas de leur rétention par les argiles en présence.

Nous pensons plutôt que ces faibles concentrations sont dues à une grande dilution d'un petit apport de traceurs dans une grande masse d'eau minéralisée.

Il est possible aussi que les traceurs soient en partie détruits au niveau des émergences d'eaux chaudes par la présence de gaz à l'origine des gros bouillonnements observables surtout à la Grande Source Chaude.

On pourrait penser que dans le cas de concentrations faibles, les pics de fluorescence obtenus sont dus à des "bruits de fond" et non aux traceurs eux-mêmes.

Cependant, grâce au spectrofluorimètre, nous pouvons sélectionner la longueur d'onde excitatrice d'une part et la longueur d'onde d'émission d'autre part. Cet avantage nous permet d'avoir la certitude que les pics de fluorescence obtenus proviennent uniquement de la présence des traceurs de longueur d'onde d'émission caractéristique et ne sont pas dus à la présence de substances parasites fluorescentes telles que les matières organiques.

La restitution des traceurs par vagues successives peut s'expliquer de deux façons différentes et de ce fait introduit trois hypothèses:

- 1ère hypothèse : chaque traceur est piégé momentanément au cours de son trajet souterrain et n'est restitué que par intermittence sous forme de vagues dues aux remplissages successifs de petites cavités du système karstique.
- 2ème hypothèse : chaque pic de fluorescence correspond à un trajet particulier des traceurs dans la falaise. En effet, le traceur peut emprunter des cheminements différents au fur et à mesure de son infiltration.
- 3ème hypothèse : entraînement par des apports sporadiques.

Les deux premières hypothèses peuvent être schématisées de la façon suivante :



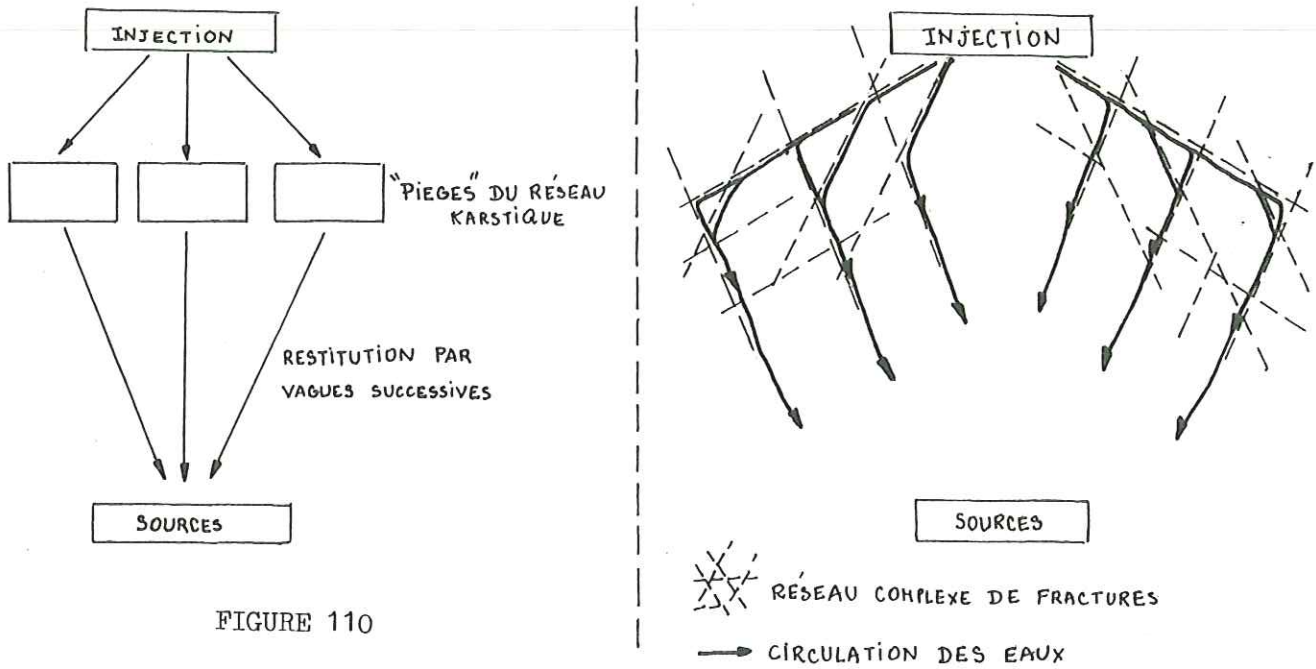


FIGURE 110

La 1ère hypothèse pourrait expliquer le fait que les traceurs n'apparaissent pas aux sources régulièrement, mais de façon tout à fait arbitraire, par vagues successives. Il faudrait alors réunir plusieurs conditions avant que ces pièges constitués par le réseau karstique de la falaise calcaire dolomitique laissent échapper une petite masse de traceur.

La 2ème hypothèse est aussi plausible du fait des très nombreuses fractures qui affectent la falaise de calcaires dolomitiques. Les traceurs auraient emprunté différentes diaclases au fur et à mesure de leur infiltration. Cette 2ème hypothèse n'explique cependant pas pourquoi les traceurs n'apparaissent pas de façon continue aux sources.

En fait, nous pensons que la présence simultanée de très nombreuses fractures et d'un réseau karstique complexe est à l'origine de la restitution des traceurs par vagues successives.

D'autre part, nous pensons que l'arrivée des traceurs à la source Massiagio est due au réseau de fractures N 30° E qui affecte le massif calcaire triasique.

## VI - Conclusion

L'étude des circulations dans le versant dominant la station de Salins les Thermes nous a permis de mettre en évidence la contamination possible des eaux minéralisées par les eaux d'infiltration.

Cependant, nous pouvons dire que cet apport d'eau froide est très faible puisque d'une part, nous avons vu précédemment que la chimie des eaux est constante et que d'autre part, la restitution des traceurs ne s'est faite que dans de très faibles concentrations.

L'état très fracturé de la falaise triasique ne peut qu'accentuer le phénomène de contamination des eaux minéralisées par ces eaux d'infiltration.

Nous ne pouvons pas dire dans quel pourcentage l'eau froide arrive aux sources minéralisées car cette expérience n'a été réalisée que du point de vue qualitatif et aucun calcul de restitution n'a été effectué. D'autre part, nous avons interrompu nos prélèvements au bout de quatre jours et, de ce fait, nous ne sommes pas en mesure de dire jusqu'à quelle date les traceurs sont ressortis aux émergences minéralisées.

CHAPITRE VI



## SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

### ÉTUDE DE L'ORIGINE DES SOURCES THERMOMINÉRALES ÉTUDIÉES

#### I-Synthèse des résultats

A la fin de cette étude, nous allons faire une synthèse de tous les résultats que nous avons acquis et essayer de discuter de l'origine des sources thermominérales étudiées.

Du point de vue géologique, nous avons vu que toutes les sources thermominérales étudiées étaient situées

\* soit au niveau des chevauchements des zones internes les unes sur les autres. C'est le cas des eaux thermominérales des stations de Brides les Bains, Salins les Thermes, Bonneval et de l'eau de La Coche -Usine souterraine de Ste Hélène.

\* soit au niveau du contact entre le socle cristallin et sa couverture sédimentaire. C'est le cas d'une part des sources minéralisées de la station thermale de La Léchère en Tarentaise (contact : séries cristallophylliennes du massif de Belledonne et Zone Dauphinoise) et, d'autre part, de la station thermale de l'Echaillon dont les eaux thermominérales sortent au contact du massif du Chatelard avec les séries sédimentaires de la Zone Dauphinoise.

Les mesures de fracturation effectuées près des stations thermales ont fait ressortir trois grandes directions principales de fractures : N 30°, N130° à N140° et N170° sans prédominance d'un système de fracturation sur les autres.

La présence simultanée des grands chevauchements de direction N30° et de ces grandes directions de fracturations nous font envisager deux hypothèses quant à l'origine des eaux thermominérales.

Dans une première hypothèse on pourrait penser que les eaux minéralisées sont uniquement liées à la présence des chevauchements. Les eaux chaudes remonteraient vers la surface en dissolvant les gypses rencontrés le long des chevauchements.

D'un autre côté, l'alignement plus ou moins parfait des sources thermominérales de Tarentaise dans le prolongement de la vallée de l'Isère (à N140°) introduit la deuxième hypothèse. Ainsi, les eaux thermales pourraient être liées à un système de fracturation profonde proche de N140°.

L'étude hydrochimique nous a permis de faire ressortir différents types d'eaux à chaque station thermale :

. les eaux froides superficielles représentées par l'Isère à La Léchère et le Doron et sa nappe alluviale à Salins-les-Thermes et Brides-les-Bains. La composition chimique de ces eaux s'est révélée très influencée par les apports saisonniers. Ainsi, nous avons pu observer des concentrations minimales correspondant aux pluies d'automne et à la fonte des neiges et des concentrations maximales pendant la période chaude et sèche de l'été et la période froide de l'hiver (stockage de l'eau sous forme de glace ou de neige).

Ces eaux présentent des résistivités élevées supérieures à 1000  $\Omega$ .cm et leur température varie de 15° en été à 3° en hiver. Leur pH est proche de 8.

Elles se situent sur diagramme de Piper dans le domaine des eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes, près du pôle hypersulfaté.

. Les sources froides de versant : ce sont les sources La Verpillère, Les Moulins, Leray et Barral de la station thermale de Brides-les-Bains.

Les sources La Verpillère et Les Moulins émergent en rive droite du Doron aux altitudes respectives de 650 m et 600 m dans des dépôts morainiques plus ou moins remaniés par des formations de versant.

Les sources Leray et Barral émergent en rive gauche du Doron. La source Leray sort en bordure du Doron au pied du versant morainique des Chavonnes.

La source Barral sort à  $\approx$  650 m d'altitude au contact d'un énorme paquet glissé de gypses avec la moraine.

Le chimisme de ces sources de versant est très influencé par le régime de précipitations.

La température des eaux varie de 7 à 13° selon les saisons ; leur pH est voisin de 7,5 ; leurs résistivités moyennes sont de 1500  $\Omega$ .cm pour les sources Leray, Les Moulins, La Verpillère, et de 450  $\Omega$ .cm pour la source Barral.

Sur diagramme Piper, les points représentatifs des sources Leray, Les Moulins, La Verpillère se situent dans le domaine des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes ; contrairement aux deux autres, la source La Verpillère se situe au sommet du domaine.

La source Barral se place dans le domaine des eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes, très près du pôle représentatif des eaux hypersulfatées.

#### . Les eaux minéralisées :

- les eaux froides minéralisées. La Source Froide et la Source Froide du Caniveau de Salins-les-Thermes sont des eaux froides minéralisées qui émergent près des eaux thermominérales aux Vieux Bains de Salins.

La température de ces eaux est assez stable dans le temps et ne varie que de 9 à 11°. Leurs débits allant de 3 à 13 l/s pour la source Froide et de 18 à 30 l/s pour la Source Caniveau montrent des variations identiques à celles du débit du Doron

Leur résistivité moyenne est de 500  $\Omega$ .cm et leur pH de 7,3.

Leur minéralisation totale s'élève à  $\approx$  1,5 g/l. Leur composition chimique et leur évolution dans le temps sont identiques. Ainsi, les concentrations maximales apparaissent vers le mois de mars et les concentrations minimales vers le mois d'août.

Par rapport à la composition chimique des sources chaudes minéralisées de Salins, ces eaux froides représentent :

- . environ 5 % des teneurs en  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  des eaux chaudes.
- . environ 25 % des teneurs en  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ;  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SiO}_2$  des sources chaudes.

Sur diagramme Piper, les sources froides minéralisées se situent dans le domaine des eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes.

#### . Les eaux thermominérales.

Les eaux chaudes minéralisées étudiées se situent d'une part en Tarentaise aux stations thermales de La Léchère (Sources Radiana 1,2 et 4) La Coche (eau de La Coche) Salins-les-Thermes (Grande Source Chaude, Petite Source chaude, Source Massiago), Brides-les-Bains (Hybord, Charles Albert, Amont du Pont) et d'autre part en Maurienne à la station de l'Echaillon.

D'un point de vue général, tous les paramètres physico-chimiques de ces eaux sont constants.

Leur température, résistivité et pH moyens sont les suivants :



		Température (°C)	Résistivité ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	pH	
T A R E N E A I S E	Brides-les-Bains	Hybord	36°5	150	6,9
		Charles Albert	34°	150	6,9
		Amont du Pont	19°5	380	7,3
	Salins-les-Thermes	Grande Source Chaude	33°	50	6,4
		Petite Source Chaude	34°5	46	6,4
		Source Massiagio	30°	95	6,5
	La Coche	La Coche	17°	450	7
		Radiana 1	53°	545	7,2
		Radiana 3	50°	350	7,1
		Radiana 4	49°5	350	7,2
Echaillon (Maurienne)	Echaillon	40°	130	7,1	

Sur diagramme Piper, les sources thermominérales se situent soit dans le domaine des eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes, soit dans le domaine des eaux chlorurées sodiques et potassiques.

La composition chimique des eaux thermales est restée stable dans le temps et les coefficients de variabilité des éléments sont le plus souvent très inférieurs à 10 % de la valeur moyenne annuelle. Cette stabilité s'est traduite sur diagrammes Schoeller par la formation d'un domaine de variation très étroit compris entre le profil des teneurs minimales et celui des teneurs maximales observées aux émergences.

La matrice de corrélation réunissant toutes les sources thermominérales étudiées nous a permis de faire ressortir les associations minérales à l'origine de la minéralisation des eaux.

Ces dernières proviennent essentiellement des gypses, dolomies, calcaires dolomitiques du Trias, des calcaires du Lias.

La présence de chlorure de sodium dans les eaux varie d'une station thermale à l'autre. Ainsi, les eaux de La Coche qui émergent à moins de 5 km à l'Ouest des eaux thermominérales de Salins-les-Thermes sont très pauvres en NaCl alors que les sources minéralisées de Salins-les-Thermes sont les plus riches en NaCl avec des teneurs supérieures à 7 g/l.

Des prélèvements de gypse effectués entre Salins-les-Thermes et Brides-les-Bains dans la Nappe du Pas du Roc ont été soumis à des analyses par diffraction X. Ces dernières n'ayant jamais révélé la présence de chlorure de sodium associé aux gypses, il serait intéressant de faire des essais de lixivation sur un grand nombre d'échantillons.

Ainsi, la présence du NaCl dans les eaux étudiées reste problématique. Nous n'avons pas observé l'accroissement du NaCl vers les zones plus internes décrit par G. Busson (conférence à l'Institut Dolomieu 1979).

Plusieurs hypothèses peuvent donc être envisagées quant à l'origine du NaCl :

1. La répartition du NaCl serait fonction de la paléogéographie.
2. Il existerait des eaux connées qui auraient facilité les chevauchements et qui seraient plus ou moins chargées en NaCl selon les niveaux.
3. Une partie des ions Cl pourrait être d'origine magmatique comme le CO<sub>2</sub> (H. et M. Schoeller 1979).

Chaque station thermale présente donc des eaux thermominéralisées de composition chimique particulière selon la prédominance du gypse sur le chlorure de sodium ou vice versa.

D'autre part, les eaux minéralisées des stations de La Léchère en Tarentaise et de l'Echaillon en Maurienne étant situées au contact du cristallin présentent les plus fortes teneurs en silice et manganèse.

L'étude des dépôts aux émergences des sources de Tarentaise nous a apporté des informations très intéressantes. Chaque niveau de chevauchement s'est caractérisé par des analyses chimiques des dépôts différents.

En effet, les boues des eaux thermominérales de Brides-les-Bains et La Coche sont essentiellement formées par de la calcite et des oxydes ferriques. Mise à part la calcite, il n'existe pas d'éléments sous forme minéralisée.

Par contre, les boues des stations de Salins-les-Thermes et de Bonneval contiennent en plus de la calcite et des oxydes ferriques un pourcentage non négligeable d'une fraction détritique provenant peut-être du socle cristallin. Ainsi, il est fort probable que la surface de chevauchement par laquelle remontent ces eaux soit jalonnée de blocs de cristallin. Ce chevauchement met en contact l'ex "Faisceau de Salins" à l'Est et le "Faisceau de Moûtiers" à l'Ouest (ces deux derniers ayant été définis en 1948 par R. Barbier).

Grâce aux géothermomètres nous avons pu évaluer la température atteinte par les eaux en profondeur. D'une manière générale, cette température est voisine de 160° pour toutes les eaux thermales étudiées.

#### Les analyses isotopiques des eaux thermominérales de Tarentaise.

Nous avons vu que d'une manière générale les sources thermominérales sont très pauvres en tritium et en oxygène 18.

Les teneurs moyennes sont les suivantes :

	Tritium (UT)	Oxygène 18 ( $\delta \text{ ‰ } ^{18}\text{O}$ )
La Léchère - (Radiana)	15	- 13
Echaillon	8	-
Salins-les-Thermes	20	- 13,35
Brides-les-Bains	25	- 14,2

A partir de  $\delta \text{ ‰ } ^{18}\text{O}$ , nous avons calculé les altitudes auxquelles les eaux se seraient infiltrées. Ces dernières très élevées se situent en moyenne aux alentours de 2800 m.

Du fait de la grande régularité du chimisme des eaux thermominérales et de leurs faibles teneurs en tritium, nous pouvons dire que les eaux chaudes étudiées ne se mélangent pas avec les eaux froides actuelles de la nappe alluviale mais avec des eaux semi superficielles.

D'autre part, l'analyse sur données centrées réduites nous a montré qu'au sein d'une même station thermale, les eaux chaudes provenant d'un même tronç thermal pouvaient emprunter un cheminement souterrain différent. C'est le cas des sources Massiago à Salins-les-Thermes et Amont du Pont à Brides-les-Bains qui présentent des caractères physico-chimiques différents des autres eaux thermominérales.

En utilisant le tritium comme géothermomètre et en considérant que les eaux thermominérales proviennent de mélanges binaires simples faisant intervenir des eaux très anciennes sans tritium et des eaux actuelles à environ 80 UT, nous avons pu estimer le pourcentage d'eau froide participant à la composition chimique des eaux chaudes.



Celui-ci s'élève à 10 % pour les eaux de La Léchère et l'Echaillon (au contact du socle cristallin avec sa couverture sédimentaire), et à 30 à 40 % pour les eaux de La Coche, Salins-les-Thermes, Brides-les-Bains (émergeant au sein des formations sédimentaires).

D'autre part, nous avons remarqué que les teneurs en isotopes (que ce soit en tritium ou en oxygène 18) montrent une évolution d'Est en Ouest.

D'Est en Ouest, nous avons pu constater qu'il existe un appauvrissement des eaux en tritium, mais par contre un enrichissement en oxygène 18.

Si l'on se place dans l'hypothèse 1 selon laquelle les eaux thermales sont uniquement liées aux chevauchements, ces résultats isotopiques pourraient indiquer : soit que les eaux chaudes s'infiltrent à des altitudes croissantes d'Ouest en Est, soit que les eaux chaudes s'infiltrent à une altitude moyenne de 2800 m et que ce sont les eaux froides des mélanges qui s'infiltrent à des altitudes croissantes d'Ouest en Est.

Si l'on se place dans l'hypothèse 2 qui fait intervenir l'existence de grandes directions de fracturation voisines de N 140°, il faut admettre que les eaux chaudes s'infiltrent à une altitude moyenne de 2800 m et que les eaux froides intervenant dans les mélanges s'infiltrent à des altitudes croissantes d'Ouest en Est.

Les analyses isotopiques effectuées sur le gaz carbonique des eaux thermales de Salins-les-Thermes ont déterminé un  $\delta C 13$  de - 8,8 par rapport au PDB et un  $\delta O 18$  de + 14,3 par rapport au SMOW. Ces valeurs, comparées à d'autres analyses de stations thermales connues laissent supposer un  $CO_2$  d'origine magmatique.

Les débits des sources thermominérales de l'arentaise sont aussi très différents d'une station thermale à l'autre. L'étude des débits peut être résumée de la façon suivante :

- A la station thermale de Brides-les-Bains qui est la plus orientale de toutes, les sources thermominérales sortent avec un débit relativement faible qui semble être influencé par la pression du Doron.

- A Salins-les-Thermes, les débits des sources thermominérales sont beaucoup plus importants. Les variations des débits des sources sont identiques à celles du débit du Doron. L'influence du Doron et de sa nappe alluviale est ici plus nette.

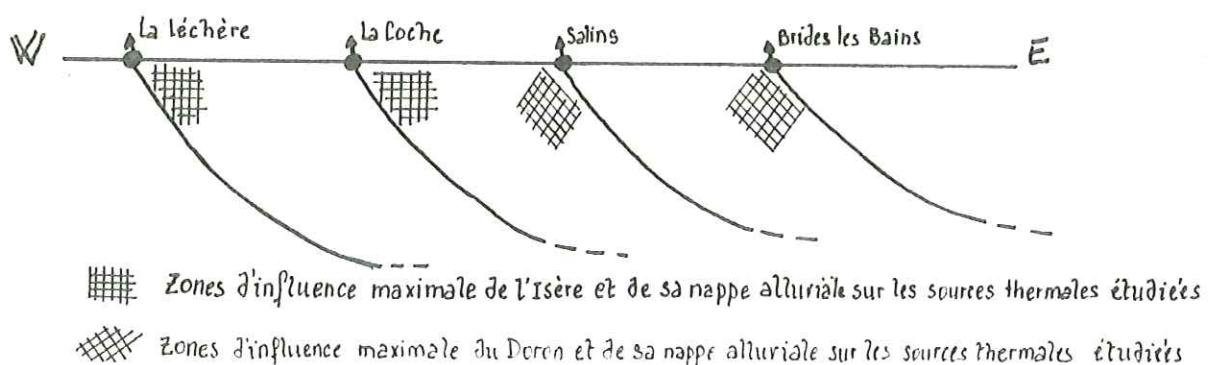
Le coefficient de variabilité élevé des débits montre que ceux-ci varient de façon importante au cours de l'année.

- Les eaux minéralisées de La Coche et de La Léchère n'émergent pas en surface. Les eaux de La Léchère sont exploitées par pompages. Les eaux de La Coche, non exploitées émergent dans l'usine souterraine de Ste Hélène.

En définitive, il semble qu'il existe aussi une évolution des débits d'Est en Ouest.

Cette dernière pourrait être liée à la situation géographique du Doron et de l'Isère et de leurs nappes alluviales par rapport aux émergences thermales.

Nous pouvons schématiser cette observation de la façon suivante :





Toutes les eaux thermales émergent au niveau des surfaces de chevauchements des zones internes les unes sur les autres.

Aux stations thermales de Brides-les-Bains et Salins-les-Thermes, l'influence du Doron et de sa nappe alluviale serait maximale à l'aval des chevauchements ce qui expliquerait les grosses variations de débits des eaux chaudes en concordance avec celles du Doron (cette observation étant surtout nette à Salins-les-Thermes).

Par contre, à La Coche et La Léchère, la position de l'Isère et de sa nappe alluviale à l'amont des chevauchements par rapport aux émergences thermominérales empêcherait les eaux minéralisées d'arriver en surface.

Si l'on se place dans l'hypothèse 1, un autre phénomène pourrait se surimposer à l'action du Doron et de l'Isère (et de leurs nappes alluviales).

En effet, en considérant que l'origine des eaux thermales de Tarentaise est uniquement liée aux chevauchements, on pourrait penser que les eaux thermales circulent à des profondeurs croissantes d'Est en Ouest et de ce fait, auraient de plus en plus de difficulté à remonter en surface.

Nous pensons d'autre part que la présence de la retenue d'eau du barrage des Gorges d'Hannibal peut expliquer la présence des eaux minéralisées de La Coche.

La mise en eau de la retenue semble être à l'origine de la mise en charge de l'eau thermominérale de La Coche en rive gauche de l'Isère. Cependant, cette mise en charge n'était pas suffisante pour permettre à l'eau thermominérale d'arriver jusqu'en surface. Plus tard, l'implantation de l'usine souterraine de Ste Hélène dans le massif liasique de la rive gauche de l'Isère créant un point de moindre charge, aurait permis à l'eau thermale de se frayer un passage jusqu'à l'usine. L'arrivée de l'eau thermale ne se ferait pas en une seule émergence, mais plutôt sous forme d'une "invasion" de l'usine par de multiples points d'émergences.

Cette même mise en eau est peut-être aussi à l'origine de la disparition de la source chaude d'Aigueblanche en rive droite de l'Isère.

En définitive, la mise en eau du barrage aurait agi de deux façons opposées dans le circuit thermal souterrain.

D'une part, elle aurait fait "écran" à la venue de l'eau thermale en rive droite de l'Isère ce qui expliquerait la disparition de la source chaude d'Aigueblanche.

D'autre part, elle aurait permis la mise en charge de cette même eau thermale en rive gauche de l'Isère.

L'influence du Doron sur les eaux thermominérales de Salins-les-Thermes a été mise en évidence grâce à la réalisation d'un essai de pompage dans la nappe alluviale du Doron.

Cependant, les variations naturelles saisonnières de la nappe alluviale du Doron qui ne dépassent pas 1 m d'amplitude ont eu une action beaucoup plus prononcée sur les débits des sources que l'essai de pompage par lui-même (ce dernier ayant rabattu le niveau de la nappe d'environ 2 m dans un périmètre restreint autour des émergences thermales).

Cet essai de pompage a d'autre part confirmé l'indépendance physico-chimique des eaux superficielles du Doron et des eaux minéralisées.

Enfin, l'étude de la circulation des eaux dans le massif triasique qui surplombe les sources de Salins-les-Thermes a mis en évidence la possibilité d'une "contamination" des eaux chaudes par les eaux de versant.



Cependant, les résultats de l'essai de traçage qui nous a permis de faire cette étude, montrent que le pourcentage d'eau froide arrivant aux émergences est très faible et ne perturbe pas la régularité de la composition chimique des eaux thermominérales de Salins-les-Thermes.

Par rapport aux volumes de traceurs injectés (1kg de fluorescéine et 1 kg de Rhodamine WT) et au trajet apparent relativement court ( $\approx 60$  m de dénivellation) les concentrations des traceurs restitués aux émergences se sont avérées très faibles (de l'ordre de  $10^{-3}$ ).

Les traceurs pouvant être parfois fixés par des argiles, des essais d'absorption des traceurs par les terrains avoisinant les points d'injections d'une part, et par les boues déposées par les eaux thermominérales d'autre part, ont été réalisés au laboratoire de Chimie Analytique de Grenoble sous la direction de J. Rochat.

Après 48 h de contact avec les traceurs, les terrains ont tous restitué l'uranine à plus de 95 %. La Rhodamine a été plus fixée par les argiles ; cependant, elle a toujours été restituée à plus de 73 % au bout de 48 h de contact (échantillon-traceur).

Etant donnés les résultats d'analyses et compte tenu du fait que nous avons rajouté de la soude lors des injections afin de minimiser l'effet de rétention, nous pouvons écarter l'éventuelle possibilité de fixation des traceurs par les particules argileuses en présence.

Ainsi, ces observations nous incitent à penser que les traceurs parviennent aux émergences dans des proportions très faibles ; ce qui expliquerait leur pourcentage de restitution très bas.

Les traceurs sont ressortis aux sources minéralisées non pas en une seule fois mais sous forme de vagues successives. Aux sources minéralisées des Vieux Bains de Salins, les traceurs sont arrivés 1h30 après le début de l'injection ; par contre, à la Source Massiago, ils sont apparus le deuxième jour suivant la mise en route de l'essai de traçage.

La restitution des traceurs par vagues successives peut s'expliquer de deux façons :

- dans une première hypothèse, on peut penser que chaque traceur piégé momentanément dans des cavités du réseau karstique qui affecte la falaise, est ensuite restitué par intermittence.
- dans une seconde hypothèse, du fait de la fracturation très intense de la falaise de calcaires dolomitiques, on peut supposer que les traceurs empruntent des cheminements souterrains différents au fur et à mesure de leur infiltration, et que chaque pic de fluorescence observé aux émergences correspond à un trajet particulier.

En fait, la "contamination" des eaux minéralisées par les eaux de versant doit provenir de la présence simultanée d'un réseau karstique complexe et de nombreuses fractures dans la falaise triasique surplombant les émergences.

Ayant interrompu les prélèvements quatre jours après l'injection, nous ne sommes pas en mesure de dire jusqu'à quelle date les traceurs sont ressortis aux sources.

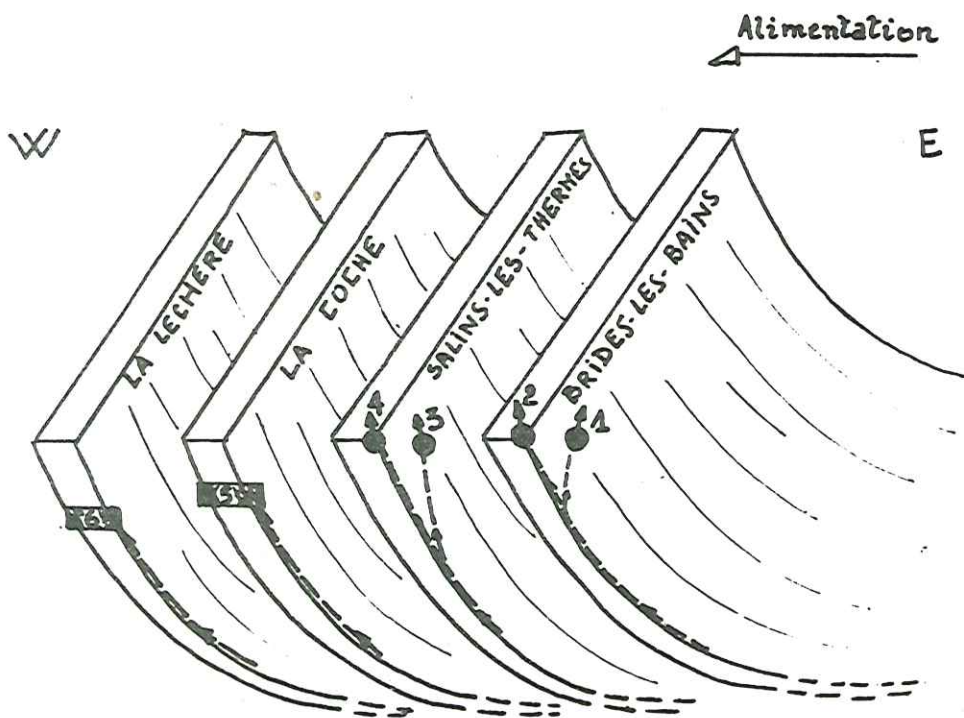
## II- Origine des eaux thermales de Tarentaise

A la fin de cette étude, nous proposerons deux hypothèses susceptibles d'expliquer l'origine des eaux thermales de Tarentaise. Ces deux hypothèses sont schématisées dans la figure 111.

Selon la première hypothèse l'origine des eaux thermales de Tarentaise est liée aux chevauchements. Dans ce cas, il faut considérer que l'aire d'alimentation des eaux est située à l'Est, dans des zones plus internes.

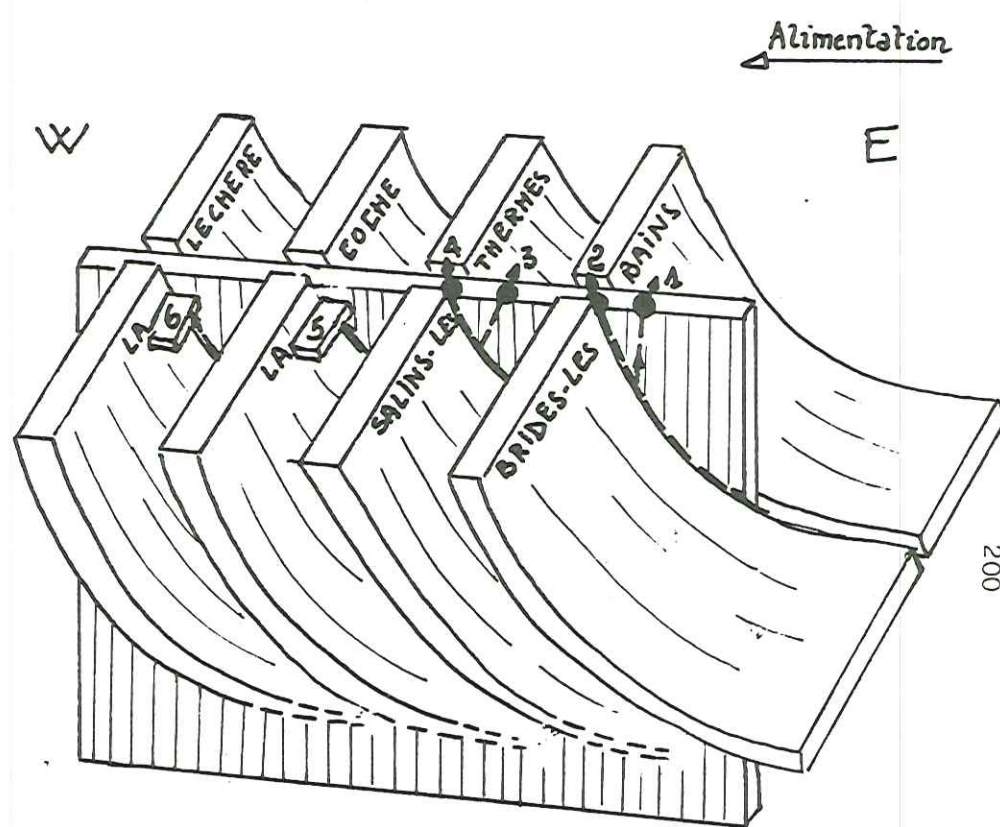
Fig 111 - SCHEMATISATION DANS L'ESPACE DE L'ORIGINE DES EAUX THERMALES DE TARENTAISE SELON LES HYPOTHESES DE DEPART-

HYPOTHESE 1 DES CHEVAUCHEMENTS



← Diminution des teneurs en Tritium  
Accroissement des teneurs en Oxygène 18

HYPOTHESE 2 DES GRANDS ACCIDENTS DE VALLEE



← Diminution des teneurs en Tritium  
Accroissement des teneurs en Oxygène 18

- BRIDES-LES-BAINS: 1- Source Amont du Pont . . . . 2- Nybord et Charles Albert  
 SALINS-LES-THERMES: 3- Source Massiagou . . . . 4- Grande Source Chaude et Petite Source Chaude  
 LA COCHE 5- La Coche  
 LA LÉCHÈRE 6- Sources Radiana 3,4 et 1.



La deuxième hypothèse fait intervenir l'existence éventuelle d'un grand système de fracturation de direction  $\approx N160^\circ$  qui serait à l'origine des eaux thermales. Les eaux chaudes circuleraient à très grande profondeur le long de ce réseau de fracturation, puis remonteraient à la surface aux intersections de ce dernier avec les chevauchements.

Les mélanges entre eaux chaudes ascendantes et eaux froides descendantes se produiraient alors au niveau de ces intersections.

En définitive, les deux hypothèses proposées permettent d'expliquer les résultats acquis au cours de cette étude.

Ainsi, dans chacune d'elles, nous pouvons synthétiser nos observations de la façon suivante :

Dans l'Hypothèse 1 : l'indépendance des caractères physico-chimiques et isotopiques des eaux minéralisées et des boues d'une station thermique à l'autre s'explique par le cheminement différent des eaux de chaque station le long des surfaces de chevauchements.

L'évolution des débits d'Est en Ouest provient du cheminement plus long des eaux d'Est en Ouest.

L'alimentation des eaux est à rechercher à l'Est dans des zones plus internes.

Dans l'Hypothèse 2 : l'indépendance des caractères physico-chimiques et isotopiques provient d'une part de l'arrivée en surface des eaux le long des différents plans de chevauchements, et d'autre part, du mélange des eaux chaudes anciennes avec des eaux froides "semisuperficielles" de composition différente selon chaque plan de chevauchement.

La position géographique de l'Isère, du Doron et de leurs nappes alluviales, explique l'évolution des débits d'Est en Ouest.

L'aire d'alimentation des eaux thermales peut se trouver aussi bien à l'Est qu'à l'Ouest des stations étudiées mais il nous paraît raisonnable de penser qu'elle est à l'Est.

Que se soit dans l'hypothèse 1 ou l'hypothèse 2, l'évolution des teneurs en  $SiO_2$ ,  $^3H$ ,  $^{18}O$  d'une part et des débits d'autre part, est la même d'Est en Ouest. Cette évolution est matérialisée sur la figure 111.

## C O N C L U S I O N

Au terme de cette étude, il ressort que certains problèmes posés n'ont pas pu être interprétés correctement, et nécessiteraient un complément d'informations.

Nous en retiendrons cependant deux qui nous paraissent être les plus importants.

Le premier concerne la répartition du NaCl dans les assises triasiques, et d'un point de vue plus général, la composition physicochimique des eaux thermales issues du Trias.

En effet, dans les Alpes, il ne paraît pas exister de relation physico-chimiques entre les eaux thermales émergeant au sein du Trias, et, de ce fait, il serait intéressant d'orienter les études dans ce sens, c'est-à-dire d'effectuer des recherches plus approfondies sur l'existence de corrélations entre les stations thermales.

Le deuxième fait ressortir la difficulté d'utilisation des géothermomètres chimiques en présence de terrains évaporitiques. Là encore, de nouvelles données seront nécessaires pour permettre une meilleure adaptation de ces derniers dans les secteurs d'études marqués par la prédominance du Trias.

En conclusion, nous ne pouvons pas approfondir et interpréter les phénomènes actuellement observés sur les sources thermales étudiées.

Avant toute synthèse, il est nécessaire de développer de nombreux éléments de comparaison, et nous pensons, par ce travail, avoir participé à cette élaboration.

L'étude que nous avons réalisée tant sur le plan géochimique que sur le plan factoriel, n'aura de sens que dans un cadre paléogéographique et tectonique plus vaste réunissant un plus grand nombre de sources thermales, et nous espérons qu'elle contribuera à une meilleure connaissance des manifestations thermominérales des Alpes.

" Mais ne proposant cet écrit que comme une histoire, ou, si vous l'aimez mieux, que comme une fable, en laquelle, parmi quelques exemples qu'on peut imiter, on en trouvera peut-être aussi plusieurs autres qu'on aura raison de ne pas suivre, j'espère qu'il sera utile à quelques uns, sans être nuisible à personne, et que tous me sauront gré de ma franchise."

DESCARPES



A N N E X E S

A N N E X E 1PRESENTATION DES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES

## I - Les mesures effectuées sur le terrain

La température : elle a été mesurée au point de prélèvement à l'aide d'un thermomètre à mercure gradué en degrés de 0 à 100°C. La précision de la lecture est de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ .

Les débits : ils ont été mesurés de façon différente selon les points d'émergences.

Le débit de certaines sources a été mesuré à l'aide de capacités jaugées. Par contre, d'autres débits tels que ceux de la Grande Source Chaude et de la Source Froide du Caniveau de Salins ont été mesurés à l'aide d'une réglette graduée directement en litres par seconde.

Les eaux thermales de La Léchère étant sollicitées par pompage, nous n'avons pas mesuré le débit des sources car celui-ci est fixé selon les besoins de l'établissement thermal.

Les débits des eaux de La Coche et des sources de l'Echaillon ne sont pas connus. Les eaux de la Coche arrivent de façon diffuse à l'Usine de Ste Hélène. Les eaux de l'Echaillon arrivent dans une caverne où elles sont alors captées vers l'établissement thermal.

## II - Les mesures effectuées aux laboratoires

La résistivité : elle a été mesurée au laboratoire dans les 24h qui ont suivi les prélèvements.

L'appareil utilisé est un résistivimètre Philips comportant une cellule de mesure à électrodes de 25 mm<sup>2</sup> au noir de Platine. Le coefficient de cellule est d'environ 0,81.

Le pH : les mesures de pH ont été réalisées grâce à un pH - mètre à électrode combinée verre - calamel. Les résultats sont exprimés en unités de pH à la température de 20°C.

## Les paramètres chimiques

Environ 330 analyses ont été réalisées soit au laboratoire d'hydrogéologie de l'Institut Dolomieu, soit au laboratoire de Chimie Analytique de la faculté de Pharmacie sous la direction de J. Rochas.

Analyses chimiques réalisées à l'Institut Dolomieu : toutes les analyses ont été effectuées dans les 3 jours qui suivaient les prélèvements.

Les ions dosés sont les suivants :  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{NO}_3^-$ . La silice dissoute a également été dosée. Accessoirement les teneurs en fer total, phosphates et nitrites ont été déterminées.

Deux méthodes d'analyses ont été utilisées : la titrimétrie, la colorimétrie.



Toutes les méthodes de mesure sont indiquées dans le mémento "Analyses physicochimiques des eaux" de C. Armand et B. Delaquaize (1977) et, de ce fait, nous n'en donnerons que les principes généraux..

La titrimétrie permet la détermination des ions calcium, magnésium bicarbonates et chlorures. Les dosages des ions calcium et magnésium se font par complexométrie, ceux des carbonates et bicarbonates par acidimétrie.

La colorimétrie permet le dosage des substances qui donnent avec des réactifs une coloration dont la densité optique est fonction de leur concentration. Eléments dosés par cette méthode : nitrates, nitrites, phosphates, fer total, sulfates, silice dissoute.

Analyses chimiques réalisées au laboratoire de chimie analytique : les dosages du sodium et du potassium ont été effectués par émission et absorption atomiques.

#### Les mesures isotopiques

Les analyses isotopiques des eaux et des gaz ont été effectuées au laboratoire de Recherche Géodynamiques de Thonon sous la direction de B. Blavoux.

L'appareil utilisé pour la mesure de l'Oxygène 18 est un spectromètre de masse à double collecteur équipé d'un système d'introduction permettant une comparaison entre le standard et l'échantillon. (Letolle et al 1965). L'erreur expérimentale sur le est de  $\pm 0,1 \%$ .

Le tritium est mesuré par une méthode de comptage de scintillations en phase liquide. L'erreur expérimentale est généralement de  $\pm 10 \%$ .

Il nous a paru inutile d'effectuer l'analyse de l'isotope du Soufre S34 car la relation des sources chaudes avec les évaporites du Trias est évidente.

A N N E X E    I I

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES EFFECTUEES DE

MAI 1978 A JUIN 1979



ABREVIATIONS

01 Amont du Pont	10 Radiana 1, 3, 4
02 Leray	13 Isère
03 Hybord	14 Sce Massiagio
04 Les Moulins	15 Nappe Alluviale (F1, F2, F3, F4)
05 La Verpillère	17 Doron (à Salins et à Brides)
06 Gde Sce Chaude	18 Sce Barral
07 Pte Sce Chaude	19 Charles Albert
08 Sce Froide	20 Echailon
09 Sce Caniveau	26 La Coche

	1978	1979
Janvier	-	Ja9
Février	-	F9
Mars	-	m9
Avril	-	A9
Mai	M8	M9
Juin	J8	J9
Juillet	j8	j9
Aout	A8	-
Septembre	S8	-
Octobre	O8	-
Novembre	N8	-
Décembre	D8	-

LISTE DU FICHER

SERIE	NOM	* Ca	* Mg	* Na	* K	* Cl	* SO4	* HCO3	* SiO2	* Res	* T
01	M8	372.7*	85.1*	309.0*	17.0*	340.0*	1090.0*	274.5*	13.5*	392.0*	20.0
01	J8	372.7*	83.6*	311.0*	17.3*	341.0*	1080.0*	274.5*	13.5*	391.0*	20.0
01	j8	360.7*	97.2*	320.0*	18.2*	356.0*	1160.0*	273.2*	15.0*	368.0*	19.0
01	AB	380.7*	85.1*	305.0*	17.5*	341.0*	1050.0*	262.3*	14.0*	407.0*	19.0
01	S8	380.7*	82.7*	310.0*	18.0*	351.0*	1040.0*	273.3*	13.7*	405.0*	19.0
01	OB	356.7*	85.1*	302.0*	16.9*	341.0*	950.0*	272.1*	15.0*	395.0*	18.5
01	N8	360.7*	85.1*	312.0*	18.2*	346.0*	1050.0*	285.5*	15.5*	369.0*	19.0
01	DB	352.7*	74.6*	308.0*	18.0*	340.0*	1100.0*	256.2*	14.0*	380.0*	19.0
01	Ja	364.7*	70.5*	304.0*	17.2*	336.0*	1000.0*	280.6*	15.2*	384.0*	19.0
01	F9	380.7*	68.1*	328.0*	18.6*	344.7*	1000.0*	298.9*	14.0*	338.0*	19.1
01	m9	388.8*	75.3*	319.0*	18.0*	338.0*	1050.0*	300.1*	13.0*	352.0*	19.0
01	A9	372.7*	80.2*	309.0*	19.3*	349.0*	1140.0*	276.9*	13.0*	335.0*	19.0
01	M9	384.7*	77.8*	295.0*	17.2*	332.0*	1160.0*	280.6*	13.0*	398.0*	19.5
02	M8	100.2*	14.8*	9.2*	8.4*	7.1*	30.0*	346.5*	6.8*	1632.0*	9.9
02	J8	97.8*	20.6*	10.0*	10.2*	7.6*	33.0*	364.8*	10.0*	1421.0*	10.5
02	j8	102.2*	16.5*	8.3*	9.1*	7.4*	35.0*	362.3*	8.0*	1402.0*	10.0
02	AB	98.9*	21.9*	8.1*	7.7*	8.9*	29.0*	361.1*	7.0*	1571.0*	10.3
02	S8	102.2*	22.3*	8.0*	7.7*	7.9*	32.0*	364.8*	7.0*	1645.0*	10.8
02	OB	105.4*	20.2*	7.9*	8.7*	9.1*	35.0*	357.4*	10.0*	1658.0*	10.8
02	N8	101.0*	16.5*	9.7*	10.0*	7.0*	38.0*	352.6*	8.5*	1657.0*	11.0
02	DB	95.8*	16.0*	12.2*	11.0*	10.4*	43.0*	341.6*	9.0*	1610.0*	11.0
02	Ja	98.2*	18.7*	11.3*	10.7*	10.0*	37.0*	339.2*	9.0*	1600.0*	11.0
02	F9	94.6*	17.2*	11.4*	11.0*	16.6*	38.0*	344.0*	7.5*	1623.0*	10.5
02	m9	95.8*	10.9*	10.9*	11.7*	12.8*	35.0*	292.8*	7.0*	1721.0*	10.2
02	A9	98.6*	19.7*	9.4*	10.4*	13.2*	33.0*	339.2*	7.0*	1644.0*	10.0
02	M9	97.8*	15.8*	9.1*	10.2*	9.0*	33.0*	342.8*	8.0*	1719.0*	11.0
02	J9	100.2*	17.7*	9.7*	10.5*	10.9*	36.0*	357.5*	7.5*	1630.0*	11.2
03	M8	649.3*	106.9*	900.0*	82.0*	1260.0*	1710.0*	398.9*	34.0*	149.0*	37.0
03	J8	649.3*	116.7*	950.0*	84.0*	1245.0*	1715.0*	409.9*	35.0*	146.0*	37.0
03	j8	621.2*	123.9*	906.0*	79.0*	1200.0*	1720.0*	400.2*	35.5*	143.0*	37.0
03	AB	625.2*	116.7*	915.0*	77.0*	1297.0*	1698.0*	406.3*	36.0*	161.0*	37.0
03	S8	645.3*	119.1*	920.0*	80.0*	1290.0*	1702.0*	414.8*	35.5*	157.0*	37.0
03	OB	649.3*	109.4*	930.0*	78.0*	1293.0*	1705.0*	416.0*	36.0*	160.0*	36.0
03	N8	629.3*	111.0*	935.0*	84.0*	1300.0*	1730.0*	409.9*	36.0*	150.0*	36.0
03	DB	649.3*	106.9*	928.0*	79.0*	1290.0*	1717.0*	402.6*	35.5*	156.0*	35.0
03	Ja	613.2*	109.4*	932.0*	83.0*	1302.0*	1726.0*	400.2*	36.0*	153.0*	35.0
03	F9	617.2*	106.9*	927.0*	80.5*	1295.0*	1711.0*	402.6*	37.0*	156.0*	35.5
03	m9	637.3*	102.1*	930.0*	82.0*	1302.0*	1723.0*	406.3*	36.5*	152.0*	35.5
03	A9	617.2*	102.1*	919.0*	84.0*	1299.0*	1735.0*	409.9*	35.5*	146.0*	37.0
03	M9	625.2*	104.5*	907.0*	81.0*	1290.0*	1708.0*	403.8*	35.0*	150.0*	37.0
03	J9	629.2*	102.1*	910.0*	81.0*	1275.0*	1698.0*	403.8*	34.0*	150.0*	38.0



		* Ca *	Mg *	Na *	K *	Cl *	SO4 *	HCO3 *	SiO2	Res *	T
04	M8	* 89.8*	23.3*	7.0*	3.1*	6.1*	20.0*	335.5*	8.8*1867.0*		10.0
04	J8	* 82.1*	16.8*	6.9*	2.7*	5.5*	18.0*	318.4*	10.0*1708.0*		10.0
04	J8	* 82.9*	16.5*	6.8*	2.7*	4.3*	18.0*	323.3*	8.5*1698.0*		9.9
04	A8	* 81.7*	18.2*	7.2*	2.8*	4.1*	15.0*	320.8*	8.0*2014.0*		11.5
04	S8	* 84.5*	18.9*	7.5*	2.3*	3.0*	17.0*	331.8*	.7*2034.0*		10.5
04	08	* 80.6*	19.2*	7.2*	2.5*	3.6*	17.0*	309.9*	9.3*2050.0*		9.0
04	N8	* 84.2*	13.1*	7.7*	2.5*	1.3*	18.0*	305.0*	8.3*2108.0*		7.8
04	D8	* 81.4*	12.9*	8.8*	2.5*	2.8*	19.0*	297.7*	9.0*2055.0*		8.8
04	Ja	* 80.6*	13.8*	9.0*	2.5*	2.4*	20.0*	295.2*	9.2*2057.0*		7.5
04	F9	* 86.6*	12.4*	8.1*	3.3*	3.2*	19.0*	313.5*	9.2*1884.0*		7.5
04	m9	* 88.6*	8.7*	8.3*	3.9*	7.4*	20.0*	280.6*	6.0*1892.0*		9.0
04	A9	* 86.6*	17.0*	6.9*	3.5*	5.9*	16.0*	315.9*	6.9*1905.0*		9.5
04	M9	* 82.2*	18.2*	6.2*	3.3*	5.7*	18.0*	319.6*	7.5*1985.0*		10.8
04	J9	* 86.2*	16.8*	6.1*	3.4*	6.7*	18.0*	325.7*	7.0*1990.0*		10.8
05	M8	* 100.6*	28.7*	7.5*	2.4*	6.2*	170.0*	275.7*	9.8*1473.0*		11.5
05	J8	* 121.0*	17.7*	7.1*	2.3*	5.1*	150.0*	285.5*	10.5*1410.0*		11.9
05	J8	* 135.5*	18.7*	5.4*	2.2*	4.3*	150.0*	286.7*	11.0*1294.0*		13.0
05	A8	* 141.1*	14.8*	4.5*	1.7*	3.1*	163.0*	287.9*	11.1*1302.0*		13.2
05	S8	* 155.9*	12.1*	4.0*	1.0*	3.1*	190.0*	285.5*	11.0*1308.0*		13.0
05	08	* 161.1*	11.7*	3.8*	1.3*	3.7*	187.0*	275.7*	13.0*1305.0*		12.8
05	N8	* 163.9*	11.4*	5.2*	1.3*	4.8*	190.0*	278.2*	12.5*1316.0*		11.0
05	D8	* 169.5*	11.7*	5.9*	1.5*	6.2*	210.0*	283.0*	12.0*1250.0*		11.0
05	Ja	* 151.1*	13.1*	5.0*	1.4*	5.1*	200.0*	252.5*	12.0*1315.0*		9.5
05	F9	* 114.2*	18.5*	5.6*	2.1*	3.4*	135.0*	257.4*	10.0*1482.0*		10.0
05	m9	* 118.6*	17.0*	5.2*	2.5*	4.0*	168.0*	242.8*	9.0*1546.0*		10.0
05	A9	* 119.0*	14.3*	5.1*	2.0*	4.2*	145.0*	262.3*	9.2*1623.0*		10.0
05	M9	* 110.2*	27.9*	6.7*	2.0*	4.2*	162.0*	283.0*	10.5*1584.0*		11.0
05	J9	* 138.3*	12.4*	6.5*	2.1*	6.1*	170.0*	284.3*	11.0*1442.0*		12.5
06	M8	* 805.6*	158.1*4550.0*		106.0*6807.0*	1600.0*	841.8*	38.0*	61.0*		33.0
06	J8	* 805.6*	158.0*4422.0*		96.0*6770.0*	1650.0*	841.8*	39.0*	50.0*		32.8
06	J8	* 793.6*	158.0*4351.0*		89.0*6640.0*	1650.0*	829.6*	39.5*	51.0*		33.0
06	A8	* 809.6*	158.0*4410.0*		89.0*6671.0*	1690.0*	817.4*	40.0*	54.0*		33.0
06	S8	* 833.7*	138.6*4440.0*		87.5*6840.0*	1680.0*	854.0*	39.0*	55.0*		33.0
06	08	* 797.8*	145.9*4393.0*		88.1*7140.0*	1700.0*	829.6*	39.5*	60.0*		33.0
06	N8	* 801.6*	148.3*4430.0*		100.0*6869.0*	1660.0*	805.2*	40.0*	58.0*		33.0
06	D8	* 817.6*	106.7*4360.0*		105.0*7118.0*	1721.0*	854.0*	41.0*	59.0*		33.0
06	Ja	* 737.5*	119.1*4480.0*		100.0*7373.0*	1740.0*	793.0*	41.0*	54.0*		33.0
06	F9	* 741.5*	128.8*4500.0*		97.0*7416.0*	1720.0*	841.8*	40.0*	54.0*		33.0
06	m9	* 781.6*	150.7*4480.0*		103.0*7544.0*	1700.0*	866.2*	39.5*	56.0*		33.0
06	A9	* 777.5*	121.5*4530.0*		93.3*7561.0*	1700.0*	841.8*	38.0*	51.0*		33.0
06	M9	* 785.6*	148.3*4500.0*		95.0*7548.0*	1660.0*	866.2*	38.0*	55.0*		33.7
06	J9	* 793.6*	148.3*4785.0*		99.0*7260.0*	1690.0*	805.2*	38.5*	57.0*		33.3
07	M8	* 817.6*	172.6*4850.0*		100.0*7300.0*	1750.0*	854.0*	41.5*	52.0*		36.0
07	J8	* 829.6*	175.0*4800.0*		99.0*7350.0*	1795.0*	842.0*	42.0*	52.0*		32.0
07	J8	* 805.6*	177.4*4840.0*		91.0*7500.0*	1712.0*	866.2*	41.5*	47.0*		34.0
07	A8	* 781.6*	165.3*4682.0*		85.5*7750.0*	1730.0*	890.6*	41.0*	49.0*		34.8
07	S8	* 193.6*	175.0*4710.0*		86.0*8000.0*	1723.0*	915.0*	40.9*	48.0*		33.0
07	08	* 829.6*	160.4*4805.0*		90.0*8229.0*	1680.0*	915.0*	41.0*	55.0*		33.5
07	N8	* 805.6*	165.3*4740.0*		95.0*7816.0*	1760.0*	878.4*	41.5*	45.0*		36.0
07	D8	* 821.6*	155.6*4960.0*		105.0*7799.0*	1750.0*	854.0*	42.0*	50.0*		36.0
07	Ja	* 809.6*	148.3*5080.0*		110.0*7752.0*	1740.0*	866.2*	42.0*	49.0*		36.0
07	F9	* 781.6*	148.3*5100.0*		108.0*8137.0*	1910.0*	878.4*	41.0*	51.0*		36.0
07	m9	* 817.6*	155.6*5000.0*		99.0*8033.0*	1960.0*	872.3*	40.0*	51.0*		35.5
07	A9	* 813.6*	148.3*4820.0*		102.0*8171.0*	1850.0*	878.4*	40.0*	46.0*		36.0
07	M9	* 817.6*	133.7*4700.0*		99.0*7795.0*	1780.0*	878.4*	39.5*	51.0*		34.5
07	J9	* 641.3*	126.4*4730.0*		92.0*7523.0*	1790.0*	671.0*	39.0*	59.0*		29.0
08	M8	* 304.6*	70.5* 190.0*		8.0* 440.0*	580.0*	256.2*	8.5*	411.0*		9.9
08	J8	* 228.5*	46.2* 175.0*		7.7* 400.0*	460.0*	191.5*	8.5*	513.0*		9.9
08	J8	* 200.4*	44.9* 157.0*		6.4* 360.0*	395.0*	180.6*	9.8*	527.0*		10.0
08	A8	* 192.4*	36.4* 155.0*		5.4* 295.0*	310.0*	270.8*	10.0*	639.0*		10.5
08	S8	* 236.5*	43.7* 169.0*		5.0* 320.0*	415.0*	204.9*	10.2*	553.0*		11.0
08	08	* 256.5*	53.5* 185.0*		5.6* 425.0*	510.0*	206.2*	8.5*	485.0*		10.5
08	N8	* 272.5*	60.8* 220.0*		8.0* 495.0*	590.0*	207.4*	9.5*	437.0*		9.5
08	D8	* 276.6*	75.3* 244.0*		8.0* 520.0*	610.0*	219.6*	9.0*	417.0*		9.0
08	Ja	* 288.6*	51.0* 251.0*		8.5* 535.0*	630.0*	219.0*	9.2*	406.0*		9.0
08	F9	* 280.6*	65.6* 251.0*		8.9* 550.0*	600.0*	231.8*	9.0*	390.0*		9.1
08	m9	* 320.6*	72.9* 259.0*		10.8* 500.0*	670.0*	256.2*	9.5*	354.0*		9.5
08	A9	* 348.7*	60.8* 265.0*		9.3* 490.0*	670.0*	256.2*	9.8*	327.0*		9.7
08	M9	*3086.0*	60.8* 210.0*		8.8* 465.0*	610.0*	244.0*	10.2*	393.0*		10.0
08	J9	* 216.4*	43.7* 180.0*		7.8* 366.0*	530.0*	196.4*	10.0*	570.0*		10.0
09	M8	* 264.5*	41.3* 156.0*		6.8* 350.0*	450.0*	200.1*	10.0*	526.0*		9.0
09	J8	* 208.4*	36.4* 141.0*		6.1* 320.0*	430.0*	183.0*	8.5*	590.0*		8.9
09	J8	* 172.3*	38.9* 135.0*		5.4* 290.0*	390.0*	174.4*	8.8*	657.0*		9.0
09	A8	* 168.3*	31.6* 121.0*		4.0* 265.0*	300.0*	172.0*	9.0*	769.0*		9.9
09	S8	* 204.4*	31.6* 148.0*		4.5* 280.0*	370.0*	176.9*	10.2*	710.0*		10.0
09	08	* 216.4*	46.2* 157.0*		4.3* 310.0*	460.0*	190.3*	10.5*	580.0*		10.8
09	N8	* 209.2*	56.9* 170.0*		6.0* 355.0*	510.0*	191.5*	10.0*	545.0*		10.1
09	D8	* 209.2*	53.9* 176.0*		6.5* 359.0*	505.0*	189.1*	10.0*	523.0*		10.0
09	Ja	* 260.5*	36.4* 179.0*		7.0* 381.0*	520.0*	191.5*	9.3*	449.0*		9.0
09	F9	* 252.5*	43.7* 182.0*		7.1* 398.0*	520.0*	204.9*	9.5*	445.0*		9.0
09	m9	* 280.5*	53.5* 190.0*		8.5* 408.0*	530.0*	213.5*	9.0*	430.0*		9.0
09	A9	* 324.6*	29.2* 175.0*		7.5* 416.0*	535.0*	204.9*	9.1*	463.0*		9.0
09	M9	* 280.5*	43.7* 151.0*		6.9* 387.0*	505.0*	212.3*	7.5*	501.0*		8.8
09	J9	* 210.4*	40.1* 115.0*		5.8* 296.0*	420.0*	183.0*	6.8*	640.0*		8.5



		* Ca	* Mg	* Na	* K	* Cl	* SO4	* HCO3	* SiO2	* Res	T
10	MB	* 553.1*	51.0*	225.0*	19.0*	120.0*	1580.0*	91.5*	53.0*	350.0*	53.0
10	J8	* 561.1*	48.6*	227.0*	20.0*	119.0*	1600.0*	92.7*	52.0*	346.0*	52.8
10	J8	* 545.1*	53.5*	227.0*	21.0*	119.0*	1570.0*	95.1*	52.5*	340.0*	52.0
10	AB	* 541.1*	48.6*	223.0*	18.0*	117.0*	1540.0*	96.4*	52.0*	350.0*	52.3
10	S8	* 565.1*	48.6*	230.0*	20.0*	123.0*	1600.0*	98.8*	50.4*	358.0*	52.5
10	OB	* 557.1*	48.6*	227.0*	19.0*	121.0*	1580.0*	95.1*	49.5*	355.0*	51.0
10	N8	* 529.0*	58.3*	228.0*	20.0*	119.0*	1590.0*	92.7*	50.0*	349.0*	52.0
10	A9	* 549.1*	41.3*	231.0*	23.0*	132.0*	1630.0*	96.4*	49.0*	346.0*	51.0
10	M9	* 545.1*	41.3*	229.0*	21.0*	129.0*	1600.0*	102.5*	48.5*	360.0*	50.8
10	J9	* 533.1*	43.7*	231.0*	18.0*	121.0*	1600.0*	95.2*	53.0*	357.0*	53.5
13	J8	* 161.5*	25.5*	12.0*	1.4*	9.3*	320.0*	173.2*	8.8*	1171.0*	14.0
13	J8	* 150.3*	20.9*	12.5*	1.5*	10.1*	360.0*	172.0*	9.0*	1077.0*	15.0
13	AB	* 163.5*	25.3*	14.9*	2.1*	10.1*	340.0*	170.0*	9.5*	1110.0*	17.0
13	S8	* 169.3*	29.6*	15.9*	2.3*	15.7*	370.0*	173.2*	7.3*	1086.0*	12.0
13	OB	* 150.7*	22.1*	16.4*	2.6*	16.8*	335.0*	163.5*	7.8*	1106.0*	12.8
13	N8	* 155.1*	24.0*	16.9*	2.7*	17.4*	360.0*	163.5*	8.0*	1076.0*	10.0
13	DB	* 145.5*	21.1*	15.6*	1.8*	9.8*	300.0*	161.0*	7.2*	1250.0*	7.5
13	Ja	* 142.7*	19.2*	14.2*	1.8*	6.8*	290.0*	159.8*	6.0*	1280.0*	7.0
13	F9	* 136.3*	15.3*	14.0*	2.1*	6.6*	250.0*	173.2*	5.1*	1342.0*	5.0
13	m9	* 149.9*	16.3*	15.4*	2.9*	10.6*	245.0*	208.6*	7.5*	1271.0*	9.0
13	A9	* 155.5*	18.7*	15.9*	2.4*	10.7*	260.0*	206.2*	6.8*	1126.0*	9.0
13	M9	* 116.2*	4.8*	12.9*	2.0*	8.0*	210.0*	145.2*	6.8*	1905.0*	8.0
13	J9	* 66.1*	14.8*	11.5*	1.1*	5.9*	150.0*	113.4*	6.5*	2323.0*	8.0
14	AB	* 645.3*	119.1*	1980.0*	36.0*	2593.0*	1490.0*	793.0*	29.0*	92.0*	30.0
14	S8	* 641.3*	114.2*	2000.0*	40.0*	2607.0*	1480.0*	781.0*	29.5*	94.0*	30.0
14	OB	* 649.3*	119.1*	2150.0*	40.5*	2977.0*	1490.0*	695.4*	29.0*	94.0*	29.0
14	N8	* 649.3*	123.9*	2200.0*	55.0*	3057.0*	1500.0*	695.4*	28.0*	96.0*	27.0
14	DB	* 641.3*	121.5*	2210.0*	60.0*	3068.0*	1500.0*	707.6*	28.5*	58.0*	27.0
14	Ja	* 621.4*	121.5*	2280.0*	45.0*	3180.0*	1440.0*	671.0*	28.5*	102.0*	28.0
14	F9	* 613.2*	123.9*	2300.0*	54.0*	3298.0*	1440.0*	756.4*	30.0*	108.0*	31.5
14	m9	* 617.2*	119.1*	2210.0*	51.0*	3200.0*	1450.0*	756.4*	27.5*	107.0*	29.7
14	A9	* 601.2*	116.7*	2120.0*	51.0*	2981.0*	1480.0*	768.6*	30.0*	100.0*	31.5
14	M9	* 609.2*	121.5*	2130.0*	50.0*	2919.0*	1460.0*	719.8*	30.0*	109.0*	33.7
15	AB	* 94.6*	15.8*	3.0*	1.2*	2.5*	230.0*	97.6*	6.5*	1570.0*	11.5
15	S8	* 117.4*	22.1*	3.5*	1.3*	3.2*	290.0*	102.5*	6.0*	1270.0*	9.8
15	OB	* 163.1*	18.2*	3.9*	1.5*	4.2*	355.0*	119.5*	5.5*	1108.0*	7.5
15	N8	* 180.3*	22.8*	4.0*	1.5*	4.5*	400.0*	124.4*	5.2*	1043.0*	7.0
15	Ja	* 198.4*	30.8*	8.3*	2.1*	6.9*	460.0*	135.4*	5.0*	967.0*	6.0
15	F9	* 204.4*	31.6*	8.7*	2.1*	7.4*	475.0*	150.0*	4.5*	957.0*	4.5
15	m9	* 214.0*	32.8*	9.3*	2.5*	10.5*	490.0*	150.1*	5.0*	935.0*	4.5
15	A9	* 216.4*	31.6*	9.5*	2.2*	11.2*	500.0*	157.4*	5.5*	907.0*	5.7
15	M9	* 184.4*	21.9*	4.7*	2.2*	6.9*	440.0*	152.5*	6.0*	1285.0*	7.0
15	J9	* 131.5*	19.7*	4.1*	1.6*	5.6*	305.0*	119.6*	6.0*	1654.0*	8.5
17	J8	* 86.9*	12.6*	2.8*	0.7*	2.4*	205.0*	92.7*	7.5*	1672.0*	11.5
17	AB	* 89.4*	16.5*	3.1*	0.9*	2.5*	245.0*	95.2*	7.8*	1639.0*	11.5
17	S8	* 127.4*	20.6*	4.3*	1.0*	3.2*	310.0*	106.1*	6.5*	1468.0*	7.5
17	OB	* 175.5*	22.6*	5.6*	1.1*	4.6*	405.0*	122.0*	5.2*	1318.0*	4.8
17	N8	* 192.4*	23.3*	9.3*	1.5*	5.1*	440.0*	117.1*	4.2*	1149.0*	2.5
17	DB	* 207.6*	33.3*	9.5*	1.5*	7.4*	500.0*	12.4*	4.5*	1076.0*	3.0
17	Ja	* 209.6*	35.7*	10.8*	2.0*	7.9*	520.0*	130.5*	5.2*	1106.0*	4.0
17	F9	* 213.6*	41.6*	11.3*	2.5*	8.6*	535.0*	143.9*	4.8*	1024.0*	3.5
17	m9	* 204.4*	38.9*	10.0*	2.5*	8.2*	490.0*	150.1*	5.0*	1040.0*	4.0
17	A9	* 200.4*	25.0*	8.1*	2.4*	7.0*	430.0*	142.7*	6.0*	1116.0*	5.2
17	M9	* 130.2*	15.3*	5.7*	1.5*	5.9*	300.0*	114.7*	6.8*	1630.0*	7.5
17	J9	* 101.0*	10.9*	5.3*	1.4*	2.9*	215.0*	96.4*	6.5*	2349.0*	7.5
18	J8	* 589.2*	85.1*	4.8*	1.8*	5.1*	1510.0*	184.2*	6.2*	414.0*	9.5
18	J8	* 573.1*	77.8*	4.7*	1.6*	4.7*	1440.0*	187.9*	6.1*	427.0*	9.4
18	AB	* 565.1*	70.5*	4.5*	1.5*	4.2*	1370.0*	197.6*	7.0*	468.0*	10.0
18	S8	* 569.1*	65.6*	4.4*	1.5*	4.2*	1350.0*	200.1*	6.2*	477.0*	9.5
18	OB	* 561.1*	65.6*	4.4*	1.4*	4.0*	1400.0*	187.9*	6.7*	468.0*	9.5
18	N8	* 541.1*	70.5*	3.9*	1.5*	3.9*	1380.0*	183.0*	6.8*	477.0*	9.8
18	DB	* 541.9*	65.1*	3.3*	1.7*	3.7*	1370.0*	183.0*	7.2*	482.0*	9.0
18	F9	* 525.1*	87.5*	3.2*	1.7*	5.0*	1380.0*	184.2*	5.8*	495.0*	9.0
18	m9	* 529.1*	89.9*	3.2*	1.5*	4.7*	1400.0*	185.4*	6.0*	489.0*	9.0
18	M9	* 557.1*	82.6*	4.3*	1.9*	4.7*	1460.0*	183.0*	6.2*	466.0*	9.7
18	J9	* 569.1*	87.5*	4.6*	1.9*	4.9*	1480.0*	183.0*	6.5*	459.0*	10.0
19	J8	* 657.3*	109.4*	910.0*	78.0*	1220.0*	1715.0*	411.0*	36.0*	137.0*	36.0
19	J8	* 637.3*	121.5*	906.0*	78.0*	1200.0*	1711.0*	408.7*	35.0*	142.0*	36.5
19	AB	* 641.3*	92.4*	909.0*	80.0*	1260.0*	1697.0*	405.0*	35.0*	154.0*	35.1
19	S8	* 633.3*	109.4*	911.0*	77.0*	1260.0*	1700.0*	414.8*	35.0*	152.0*	34.0
19	OB	* 645.3*	109.4*	920.0*	71.0*	1287.0*	1689.0*	414.8*	35.5*	157.0*	33.0
19	N8	* 617.2*	89.9*	920.0*	80.0*	1285.0*	1698.0*	409.9*	36.0*	148.0*	33.0
19	DB	* 609.2*	109.4*	916.0*	76.0*	1275.0*	1670.0*	400.2*	36.0*	158.0*	33.0
19	Ja	* 617.2*	97.2*	925.0*	83.0*	1300.0*	1710.0*	408.7*	38.0*	148.0*	33.0
19	F9	* 617.2*	87.5*	927.0*	83.0*	1300.0*	1704.0*	412.3*	36.0*	148.0*	35.0
19	m9	* 637.3*	102.1*	920.0*	78.0*	1291.0*	1696.0*	414.8*	35.0*	151.0*	33.0
19	A9	* 637.3*	92.4*	920.0*	77.0*	1290.0*	1700.0*	417.2*	36.0*	151.0*	33.0
19	M9	* 621.2*	106.9*	915.0*	74.0*	1267.0*	1691.0*	417.2*	35.0*	153.0*	33.0
19	J9	* 621.2*	106.9*	916.0*	76.0*	1242.0*	1698.0*	414.8*	35.0*	149.0*	35.2
20	J8	* 311.1*	44.7*	1800.0*	57.0*	2787.0*	870.0*	314.7*	46.0*	133.0*	39.8
20	J8	* 324.6*	43.7*	1810.0*	55.0*	2678.0*	870.0*	315.9*	45.5*	135.0*	39.0
20	AB	* 344.7*	48.6*	1790.0*	51.0*	2669.0*	890.0*	330.6*	45.5*	136.0*	37.0
20	S8	* 364.7*	48.6*	1800.0*	47.5*	2856.0*	890.0*	333.1*	46.4*	137.0*	39.5
20	OB	* 348.7*	55.9*	1772.0*	44.6*	2636.0*	890.0*	325.7*	45.0*	132.0*	39.0
20	N8	* 348.7*	48.6*	1760.0*	60.0*	2639.0*	900.0*	320.8*	45.0*	127.0*	39.0
20	F9	* 324.6*	41.5*	1840.0*	65.0*	2989.0*	900.0*	297.7*	46.0*	133.0*	40.1
20	m9	* 332.7*	39.0*	1810.0*	65.0*	2873.0*	910.0*	296.4*	46.5*	136.0*	40.1
20	A9	* 324.6*	41.3*	1790.0*	65.3*	2926.0*	900.0*	302.6*	46.0*	133.0*	40.5
20	M9	* 322.6*	44.9*	1800.0*	65.3*	2915.0*	880.0*	305.0*	45.0*	129.0*	40.5
20	J9	* 316.6*	46.2*	1820.0*	62.0*	2873.0*	850.0*	308.7*	46.0*	131.0*	40.0
26	Ja	* 553.1*	80.2*	30.0*	4.0*	4.0*	1400.0*	264.7*	13.0*	462.0*	15.5
26	F9	* 557.1*	89.9*	25.2*	2.8*	5.0*	1420.0*	267.2*	14.0*	454.0*	17.0
26	m9	* 577.1*	75.4*	23.6*	2.9*	4.9*	1435.0*	267.2*	13.0*	457.0*	17.0
26	A9	* 573.1*	80.2*	25.2*	2.9*	7.4*	1540.0*	262.3*	14.5*	477.0*	17.0
26	M9	* 577.1*	70.5*	23.6*	3.2*	4.6*	1560.0*	267.6*	15.0*	467.0*	17.0
26	J9	* 565.1*	80.2*	22.1*	3.2*	4.5*	1550.0*	266.7*	15.0*	454.0*	17.0



A N N E X E 3REPORT D'UN POINT SUPPLEMENTAIRE SUR LES AXES FACTORIELS

Manuellement, à l'aide d'un calcul simple bien qu'assez fastidieux, il est possible de reporter un individu supplémentaire sur les axes factoriels:: les plans factoriels sont les plans définis par les axes pris deux à deux ; ce sont donc des plans repérés par deux coordonnées.

Chaque coordonnée est calculée de façon identique, seules les valeurs des coefficients qui relient les variables et les axes factoriels seront à changer.

L'analyse sur données centrées réduites étant effectuées dans une métrique particulière, le premier travail sera de recalculer les analyses physico-chimiques des sources dans cette nouvelle métrique.

Pour cela, il faut tout d'abord centrer chacune des dix variables (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Res, T°) représentatives de la source considérée par rapport à la moyenne :

$$(\text{variable } n) - m_n = \text{variable centrée}$$

(variable <sub>n</sub>) = valeur de la variable n de la source étudiée.

$m_n$  : valeur de la moyenne de la variable n calculée à partir des analyses moyennes annuelles de toutes les sources thermominérales.

L'écart type des variables étant pris comme unité de mesure dans les représentations graphiques, il faut ensuite pondérer chaque variable centrée par rapport à son propre écart type :

$$\frac{\text{variable}_n - m_n}{n} = A_n$$

$\frac{\text{variable}_n - m_n}{n} = \text{variable centrée par rapport à la moyenne.}$

$n = \text{écart type de la variable}_n \text{ (sur la population dont on a calculé la moyenne } m_n \text{.)}$

$A_n = \text{valeur centrée réduite de la variable } n.$

Calcul des coordonnées

Chaque mesure, convertie dans la nouvelle métrique, sera maintenant pondérée par le coefficient correspondant à la variable et au facteur considérés : cf tableau ci-dessous :

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Res	T
F 1	0,33	0,38	0,38	0,36	0,37	0,22	0,39	0,02	-0,35	-0,07
F 2	0,08	-0,2	+0,03	0,10	0,03	0,19	-0,14	0,66	-0,09	0,66
F 3	0,48	0,14	-0,23	-0,15	-0,23	0,71	-0,09	-0,13	0,31	-0,01

TABIEAU : coefficients de corrélations des 10 variables selon les 3 directions de projections les plus discriminantes : F 1, F 2, F 3.



T A B L E A U . A

CALCUL DES COORDONNEES D'UN POINT SUPPLEMENTAIRE

VARIABLES	Valeurs centrées réduites des variables	calcul de la mesure de la projection sur l'axe 1	calcul de la mesure de la projection sur l'axe 2	calcul de la mesure de la projection sur l'axe 3
Ca	$\frac{[Ca] - \bar{m}Ca}{\sigma Ca} = A Ca$	$A Ca \times 0,33 = x 1$	$A Ca \times 0,08 = y 1$	$A Ca \times 0,48 = z 1$
Mg	$\frac{[Mg] - \bar{m}Mg}{\sigma Mg} = A Mg$	$A Mg \times 0,38 = x 2$	$A Mg \times (-0,2) = y 2$	$A Mg \times 0,14 = z 2$
Na	$\frac{[Na] - \bar{m}Na}{\sigma Na} = A Na$	$A Na \times 0,38 = x 3$	$A Na \times 0,03 = y 3$	$A Na \times (-0,23) = z 3$
K	$\frac{[K] - \bar{m}K}{\sigma K} = A K$	$A K \times 0,36 = x 4$	$A K \times 0,10 = y 4$	$A K \times (-0,15) = z 4$
Cl	$\frac{[Cl] - \bar{m}Cl}{\sigma Cl} = A Cl$	$A Cl \times 0,37 = x 5$	$A Cl \times 0,03 = y 5$	$A Cl \times (-0,23) = z 5$
SO <sub>4</sub>	$\frac{[SO_4] - \bar{m}SO_4}{\sigma SO_4} = A SO_4$	$A SO_4 \times 0,22 = x 6$	$A SO_4 \times 0,19 = y 6$	$A SO_4 \times 0,71 = z 6$
HCO <sub>3</sub>	$\frac{[HCO_3] - \bar{m}HCO_3}{\sigma HCO_3} = A HCO_3$	$A HCO_3 \times 0,39 = x 7$	$A HCO_3 \times (-0,14) = y 7$	$A HCO_3 \times (-0,09) = z 7$
SiO <sub>2</sub>	$\frac{[SiO_2] - \bar{m}SiO_2}{\sigma SiO_2} = A SiO_2$	$A SiO_2 \times 0,02 = x 8$	$A SiO_2 \times 0,66 = y 8$	$A SiO_2 \times (-0,13) = z 8$
Res	$\frac{Res - \bar{m}Res}{\sigma Res} = A Res$	$A Res \times (-0,35) = x 9$	$A Res \times (-0,09) = y 9$	$A Res \times 0,31 = z 9$
T	$\frac{T - \bar{m}T}{\sigma T} = A T$	$A T \times (-0,07) = x 10$	$A T \times 0,66 = y 10$	$A T \times (-0,01) = z 10$
		$X = \sum_{i=1}^{10} x_i$	$Y = \sum_{i=1}^{10} y_i$	$Z = \sum_{i=1}^{10} z_i$
		Mesure de la projection sur l'axe 1	Mesure de la projection sur l'axe 2	Mesure de la projection sur l'axe 3

En définitive, pour une nouvelle source, nous devons établir le tableau A.

Dans notre étude, le nombre d'axes est limité à 3 ; pour d'autres analyses statistiques, ce nombre peut être plus important.

Par 3 axes, on définit un trièdre trirectangle dont deux projections particulières suffisent pour visualiser toutes les variations. Par exemple : plan des axes 1 et 2 plus plan des axes 2 et 3 ou bien plan des axes 1 et 2 et plan des axes 1 et 3.

L'origine du trièdre est le centre de gravité du nuage de points représentatifs de nos échantillons.

Application : calcul des coordonnées de la source Amont du Pont. cf tableau B.

La projection sur les axes 1, 2 et 3 de la source Amont du Pont est donnée par les valeurs :

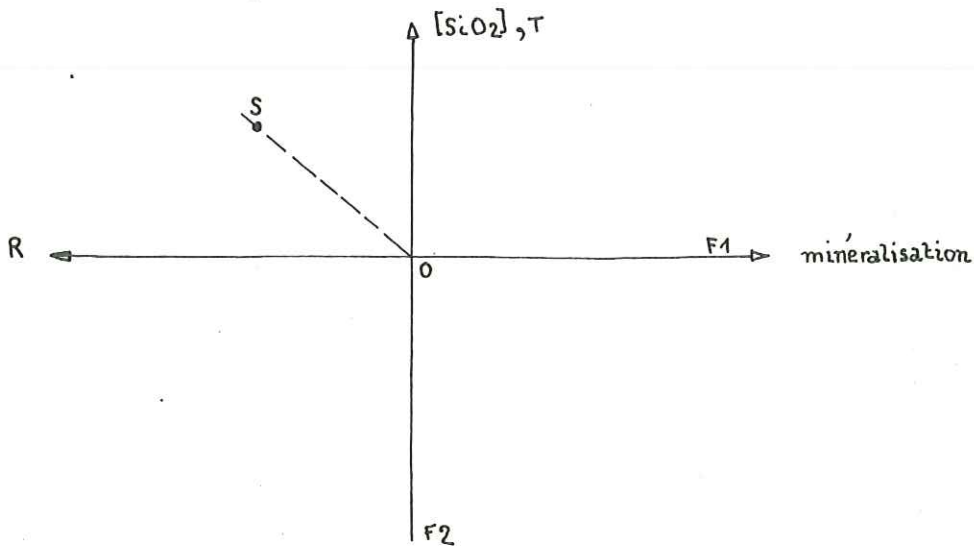
$$X = - 2,09$$

$$Y = - 2,7$$

$$Z = - 0,76$$

#### Notion de qualité de représentation

Soit S le point représentatif d'une source dans le plan déterminé par les directions de projections F 1 et F 2 :



La qualité de représentation de la source S dans le plan des axes 1 et 2 est donnée par le carré du cosinus de l'angle délimité par le vecteur  $OS$  et le plan des axes 1 et 2, le plan de la feuille étant un sous-espace bidimensionnel particulier de l'espace initial à 10 dimensions.

On peut aussi définir la qualité de la représentation de la source S par le facteur F 1 sur l'axe 1 comme le carré du cosinus de l'angle formé par le vecteur  $OS$  et l'axe 1. (cf tableau et tableau : qualité de représentation des sources dans le plan (1,2) et le plan (1,3)).

Cette notion de qualité est appelée "communauté partielle sur l'axe 1".



T A B L E A U . 8

CALCUL DES COORDONNEES DE LA SOURCE AMONT DU PONT

VARIABLES	Teneurs moyennes annuelles de la source	Moyennes annuelles pour l'ensemble des sources	$\sigma_r$ = écart type des variables pour l'ensemble des sources	valeurs centrées réduites	calcul de la mesure de la projection sur		
					l'axe 1	l'axe 2	l'axe 3
Ca	371,5 mg/l	570,6 mg/l	140,5	- 1,42	-0,47 = x 1	-0,11 = y 1	-0,68 = z 1
Mg	81 mg/l	88,5 mg/l	41,1	- 0,18	-0,07 = x 2	0,036 = y 2	-0,02 = z 2
Na	310 mg/l	1461 mg/l	1726	- 0,66	-0,25 = x 3	-0,02 = y 3	0,15 = z 3
K	17,8 mg/l	48 mg/l	35	- 0,86	-0,31 = x 4	-0,08 = y 4	0,13 = z 4
Cl	343 mg/l	2177 mg/l	2818	- 0,65	-0,24 = x 5	-0,02 = y 5	0,15 = z 5
SO <sub>4</sub>	1067 mg/l	1486 mg/l	277	- 1,51	-0,33 = x 6	-0,28 = y 6	-1,07 = z 6
HCO <sub>3</sub>	278 mg/l	403 mg/l	283	- 0,44	-0,17 = x 7	0,06 = y 7	0,04 = z 7
SiO <sub>2</sub>	14 mg/l	36 mg/l	12	- 1,83	-0,036 = x 8	-1,21 = y 8	0,24 = z 8
Rés	378 $\Omega \cdot \text{cm}$	234 $\Omega \cdot \text{cm}$	152	+ 0,95	-0,33 = x 9	-0,08 = y 9	0,29 = z 9
T°C	19,1°C	36°C	11	- 1,53	0,11 = x 10	-1,01 = y 10	0,01 = z 10

Mesures de la projection sur les axes 1 (x), 2 (y), 3 (z) =  $X = \sum_{i=1}^{10} x_i = - 2,09$   
 $Y = \sum_{i=1}^{10} y_i = - 2,7$   
 $Z = \sum_{i=1}^{10} z_i = - 0,76$

La somme des communautés partielles sur plusieurs facteurs donnera la communauté cumulée.

La communauté cumulée sur les 10 axes factoriels est égale à 1.

Application : communauté des variables

Les variables étant des échantillons particuliers, on peut définir leur communauté à partir du tableau des coefficients factoriels.

Exemple : pour la variable Ca

. coefficient factoriel sur l'axe 1 : 0,33

Communauté partielle de Ca avec l'axe 1 :  $(0,33)^2 = 0,11$

. coefficient factoriel sur l'axe 2 : 0,08

communauté partielle de Ca sur l'axe 2 :  $(0,08)^2 = 0,0064$

. coefficient factoriel sur l'axe 3 : 0,48

communauté partielle de Ca sur l'axe 3 :  $(0,48)^2 = 0,23$

Communauté cumulée sur les 3 premiers axes :

$$(0,33)^2 + (0,08)^2 + (0,48)^2 = 0,35$$

QUALITE DE REPRESENTATION			
PLAN	1	2	
NOM, COS(X, horiz),	COS(X, vert),	COS(X, plan)	
00*AP	-0.7566	-0.6086	+0.9710
00*HY	+0.1328	+0.5150	+0.5319
00*GS	+0.0360	+0.9895	+0.9901
00*PS	+0.0604	+0.9865	+0.9884
00*R1	+0.6733	-0.6950	+0.9677
00*R3	+0.5487	-0.8137	+0.9815
00*R4	+0.5318	-0.8289	+0.9848
00*Ma	-0.4707	+0.7582	+0.8925
00*CA	+0.0649	+0.4949	+0.4991
00*Ec	+0.1590	-0.3418	+0.3770
00*LC	-0.7382	-0.5339	+0.9110

QUALITE DE REPRESENTATION			
PLAN	1	3	
NOM, COS(X, horiz),	COS(X, vert),	COS(X, plan)	
00*AP	-0.2180	-0.6086	+0.6465
00*HY	+0.4552	+0.5150	+0.6874
00*GS	-0.0201	+0.9895	+0.9897
00*PS	-0.0104	+0.9865	+0.9866
00*R1	+0.2335	-0.6950	+0.7332
00*R3	+0.1378	-0.8137	+0.8253
00*R4	+0.1123	-0.8289	+0.8365
00*Ma	-0.0886	+0.7582	+0.7634
00*CA	+0.4515	+0.4949	+0.6699
00*Ec	-0.9215	-0.3418	+0.9823
00*LC	+0.3779	-0.5339	+0.6541



## BIBLIOGRAPHIE

- ANTOINE P. 1970- Une nouvelle subdivision dans le domaine valaisan en Tarentaise et dans le Haut Val d'Aoste - C.R.acad.Sc. Paris t 270.
- ANTOINE P. BARBIER R. COLLART J. 1973- L'âge jurassique de la série du Quermoz au Nord de Moûtiers- C.R.Soc.Géol.Fr Fasc 5.
- ANTOINE P. BARBIER R. COLLART J. 1973- Mise en évidence d'un pli couché kilométrique dans la zone des Brêches de Tarentaise au Nord-Ouest d'Aime (Savoie)- Géol. Alpine t49 p13.
- ANTOINE P. BARBIER R. COLLART J. 1974- Le problème des "couches supérieures" de Villette en Tarentaise (Savoie)- C. R. Acad. Sc. t278 SérieD p37-39.
- ANTOINE P. BARBIER R. 1978- Idées nouvelles sur la structure de la région de Moûtiers (Savoie)- Géol. Alpine t54 p5.
- ARCHAMBAULT J. 1974- Rapport d'expertise concernant les répercussions éventuelles du projet d'aménagement de La Coche sur les sources thermales de Salins-les-Thermes et Brides-les-Bains- R. 138E. 345. Juin 1974.
- ARMAND C. DELAQUAISE B. 1977- Analyse physicochimique des eaux. Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Institut Dolomieu. Grenoble.
- BARBIER R. 1938- Sur la Zone du Pas du Roc dans le massif du Perron des Encombres- Soc. Géol. de Fr. n° 14 p279.
- BARBIER R. 1942- Les zones Subbriançonnaise et Ultradaphinoise au Nord du Pelvoux- Ann. Univ. Grenoble tXVIII p135.
- BARBIER R. 1943- Observations géologiques dans la région de Moûtiers (Savoie)- Soc. Géol. Fr. n° 12 p149.
- BARBIER R. 1948- Les zones Ultradaphinoise et Subbriançonnaise entre l'Arc et l'Isère- Mém. Carte Géol. France.
- BARBIER R. 1951- La prolongation de la zone Subbriançonnaise de France en Italie et en Suisse- Travaux du Laboratoire de Géologie Tome XXIX.
- BARBIER R. TRUMPY R. 1955- Sur l'âge du Flysch de la zone des Brêches de Tarentaise- Bull. Soc. Géol. Fr. 6 t5 p207-216.
- BATARD F. BOSCH B. et al. 1979- Les gaz rares, une caractéristique des sources thermominérales du Nord du Massif Central Français- C. R. des séances de l'Acad. Sc. Mars 1979.
- BLAVOUX B. 1978- Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium- Thèse d'Etat Paris VI.
- BOSCH B. DAZY J. LEPILLER M. OLIVE Ph. POULAIN PA. SARROT-REYNAULD J 1976- Données nouvelles sur quelques sources thermominérales des Alpes Françaises- International Congress on thermal water. I.A.H.S. Athènes .
- BORDET. 1959- Les modes de circulation de l'eau dans les terrains cristallins- Congrès de l'Univ. de Liège. V14 (61-94).
- BUENO ROMERO E. 1969- Etude hydrochimique et isotopique des sources thermominérales- Bassin du Mt Dore. Thèse 3° cycle Paris.

- B.R G.M. 1973- "Carte des eaux minérales et thermales de la France".  
par JJ Risler BRGM AME.
- CAILLEAUX P, FOUILLAC C, MICHARD G, OUZOUNIAN G, 1976- Etude géochimique des sources thermales de Chaudes Aigues (Cantal)- C. R. Acad. Sc. Paris t282 SérieD p1237-1240.
- CAILLEAUX P, 1976- Les éléments traces dans les eaux thermominérales du Massif Central- Thèse 3<sup>o</sup> cycle Paris 7.
- CARRET JP, 1979- L'infiltration dans les cones de déjection- Vallée de la Basse Tarentaise- Thèse 3<sup>o</sup> cycle. Grenoble.
- CASTANY G. 1967- Traité pratique des eaux souterraines- Dunod. Paris.
- COLLART J. 1973- La zone des Brêches de Tarentaise entre Montgirod et le vallon du Cormet d'Arêches au Nord de Moûtiers (Savoie)- Thèse 3<sup>o</sup> cycle. Grenoble.
- DEBELMAS J, 1970- Alpes (Savoie et Dauphiné)- Guides géologiques régionaux- Masson- Paris.
- DEGRANGES P et al. 1978- Etude chimique et isotopique de l'eau minérale et des gaz thermaux de Royat((Puy de Dome)- Cahiers d'Artériologie de Royat TVI p14-25.
- ELLIS AJ, MAHON WAJ, 1967- Natural hydrothermal systems and experimental hot water-rock interaction- Geochim.Cosmochim. Acta 31 1967 p519-532.
- ELLIS AJ, 1970- Quantitative interpretation of chemical characteristics of hydrothermal systems- Geothermics 2. p516-528.
- ETUDE GEOPHYSIQUE réalisée à Salins-les-Thermes par Hydroforage- 1977 Dossier n° 7327.
- FONTES JC et al. 1967- Oxygène 18 et Tritium dans le Bassin d'Evian- International Atomic Energy Agency, Vienna .
- FONTES JC, 1976- Les isotopes du milieu dans les eaux naturelles- La Houille Blanche n° 3/4.
- FOUILLAC C, MICHARD G, OUZOUNIAN G, MERLIVAT L, 1976- Modifications subsuperficielles de la composition chimique des eaux thermales du Massif Central. International Congress on thermal waters, geothermal energy and Vulcanism of the Mediterranean sea- Athens, octobre 1976.
- FOUILLAC C, MICHARD G, 1979
- FOURNIER RO, ROWE JJ, 1966- Estimation of underground temperatures from Silica content of waters from hot Springs and wet steam wells. Am. J. Sc. 264 p685-697.
- FOURNIER RO, TRUESDELL AH, 1973- An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters- Geochim. Cosmochim. Acta 37 p1255-1276.
- FOURNIER RO, TRUESDELL AH, 1974- Geochemicals indicators of subsurface temperature- Journal Research. U. S. Geological Survey Vol2 n° 3 p263-270.
- FUDRAL S. 1973- Contribution à l'étude de l'unit" de Moûtiers entre le vallon du Cormet d'Arêches et le hameau des Chapieux- Thèse de 3<sup>o</sup> cycle- Grenoble.



- FUDRAL S. 1978- Rapport géologique sur les conditions d'implantation d'une décharge d'ordures ménagères- Canton de Bozel (Savoie)- Centre universitaire de Savoie- Chambéry.
- GASQUET D. 1979- Etude pétrographique, géochimique et structurale des terrains cristallins de Belledonne et du Grand Châtelard traversés par la galerie EDF-Arc-Isère- Alpes Françaises- Thèse de 3<sup>o</sup> cycle- Grenoble.
- GLANGEAUD L. BLAVOUX B. FONTES JC. et al. 1967- Utilisation des méthodes des isotopiques dans l'étude des eaux minéralisées- Presse thermale et climatique- Vol104 p66-69.
- GRAPPIN Ch. 1977- Contribution à l'étude géochimique du brome en milieu évaporitique par activation neutronique- Thèse de 3<sup>o</sup> cycle - Géochimie - Orléans.
- JAMIER D. OLIVE Ph. SIWERTZ E. VIAL R. 1973- Des accidents profonds N 50<sup>o</sup> conditionnent-ils la structure de l'ensemble Jura Plateau molassique - Préalpes - Soc. Phys. Hist. Nat. de Genève vol8 Fasc.1-3 p45-52.
- JEANTIN M. 1979- Les sources minérales carbogazeuses de la Haute Ardèche- Etude géologique et hydrogéologique- Thèse 3<sup>o</sup> cycle Grenoble.
- JODEAU MD. 1975- Essai comparatif sur les méthodes colorimétriques de dosage du bore dans l'eau- DEPS d'Hydrologie - Université de Paris XI.
- KLOVAN et al. 1976- Methods in Geomathematics
- LEGUY C. 1979- Application des mesures isotopiques des teneurs en tritium à l'étude des circulations et mélanges d'eaux souterraines dans différents milieux poreux- Thèse 3<sup>o</sup> cycle-Grenoble.
- LE PRIOL J. 1974- Etude Hydrogéologique du BV de la Bourbre - Application à l'étude d'une ville nouvelle: l'Isle d'Abeau Thèse de 3<sup>o</sup> cycle - Grenoble.
- LOUVIER N et MONITION L. 1971- Acquisition de la composition chimique des eaux minérales- Presse thermale et climatique- Vol108 p141.
- LOUVRIER M. VUILLAUME Y. 1971- Etude des sources thermominérales à l'aide des méthodes statistiques et isotopiques- Presse thermale et climatique- Vol108 Fasc.3 p152-154.
- MAISONNEUVE et RISLER - 1979. La ceinture péri-alpine "carbogazeuse" de l'Europe occidentale - Bull. BRGM (2) III, 2.
- MANGANO F. MARCE A. MARTIN JM. OLIVE Ph. 1969- Remarques sur l'utilisation des isotopes radioactifs pour la datation des eaux souterraines- Bull. du BRGM- section3 n<sup>o</sup> 3 p39-46.
- MARCE A. 1971- Eléments d'hydrogéologie isotopique- Applications aux sources minérales d'Evian et du Mt Dore- Presse thermale et climatique- Fasc.38-3.
- MICHARD G. STETTLER A. FOUILLAC C. OUZOUNIAN G. MANDEVILLE D. 1976- Subsuperficial changes in chemical composition of the thermomineral waters of Vichy Basin- Geochem. J10 p155-161.
- MICHARD G. FOUILLAC C. EVRARD M. LAMBRET B. 1978- Acquisition des ions alcalino-terreux par les eaux thermales carbogazeuses- Earth and Planetary Science Letters 41 p170-174.
- MICHEL R. 1957- Etude pétrographique des schistes cristallins de la feuille de Moûtiers à 1/50000- Bull. Soc. Géol. France, fasc.B tLV p17-30.



- MICHEL R. 1959- Rapport Hydrogéologique sur les sources froides des environs de Brides-les-Bains (Savoie)- Institut Dolomieu - Grenoble.
- MICHEL R. 1963- Rapport Hydrogéologique sur les travaux de protection de la "Petite Source Chaude" à Salins (Savoie)- Institut Dolomieu - Grenoble.
- MICHEL R. 1966- Rapport Hydrogéologique sur les travaux de protection de la source Hybord à Brides-les-Bains (Savoie)- Institut Dolomieu - Grenoble.
- MICHEL R. 1966- Rapport Hydrogéologique sur les travaux de protection de la "Petite Source Chaude" à Salins (Savoie)- Institut Dolomieu - Grenoble.
- MOLINARI. 1976- Quelques remarques pratiques et une représentation commode facilitant l'exploitation des variations naturelles en Deutérium et en Oxygène 18 dans les eaux- Journal of Hydrology, 32 p383-393.
- MORET L. 1946- Les sources thermominérales- Masson - Paris.
- MORET L. 1949- Les travaux projetés sur la rive droite du Doron de Bozel menacent-ils les sources thermales de Brides et de Salins près de Moûtiers (Savoie)- Archives EDF.
- MUNNICH KO. ROETHER W. THILO L. 1967- Dating of groundwater with tritium and C14- "Isotopes in Hydrology"- Proceed Symp. I.A.E.A Vienna p305-320.
- NOTICE GEOLOGIQUE SOMMAIRE- Chute de Salins- R.E.H Alpes I. Pièce n° 3- (non datée).
- OLIVE Ph. 1976- Données élémentaires d'hydrogéologie isotopique- CRG Thonon- Fac. des Sc; de Paris.
- OUSTRIERE ET LELEU 1979. Utilisation possible de la teneur en sulfates et carbonates totaux des eaux chaudes en géothermométrie. C.R. Acad. Sc. Paris t 289 Série D p. 805
- OUZOUNIAN G. 1978- Etude des éléments en traces dans les eaux thermominérales du Sud de la France- Thèse de 3<sup>e</sup> cycle- Université de Paris 7.
- PEPIN D, PETIT J, GARDES A. et al. 1973- Etude spectrographique des éléments traces des eaux minérales- Dosage de quelques éléments après extraction: Cu, Ni; Sn, Ag, Pb, V, Mo- Analisis 2, 8 p549-555.
- PINEAU F. 1977 - La géochimie isotopique du Carbone profond - Thèse Docteur ès Sciences Physiques - Paris VII.
- POULAIN PA. 1977- Les eaux minérales et thermominérales dans le département des Hautes Alpes - Thèse de Docteur d'université- Grenoble-
- HERAT JC. 1976 - La Rhodamine B - Propriétés physico-chimiques. Etude de leurs incidences sur son utilisation comme traceur en hydrologie et sur son épuration dans les effluents - Doctorat Univ. Pharmacie - n° ordre 4 USIG.
- RISLER JJ et al. 1976- Essai de caractérisation des gaz dissous dans les eaux thermominérales par analyse isotopique de l'Argon, du gaz carbonique, et du méthane- BRGM.
- ROBERT D. 1970- Le thermalisme: une clé vers la géologie du socle- Revue Industr. Mineral. Fr, 52, n° 4, p265-279.



- ROCH E. 1926- Etude stratigraphique et tectonique des environs de Moûtiers (Savoie)- Bull. Serv. Carte Géol. France, tXXIX, n° 160, Paris.
- SALEHI E. 1978- Sources thermominérales et anomalies géothermiques en Azerbaïdjan oriental (Iran). Thèse Doctorat Etat. Grenoble.
- SALEHI E, SARROT-REYNAULD J. 1976- Caractéristiques principales et localisation des sources thermominérales carbogazeuses de Sarcine et Bouchli (Azerbaïdjan oriental-Iran) - Intern. Congress on thermal waters. Geothermal Energy and Volcanism of the Mediterranean area Athenes- Vol2, p485-493.
- SALEHI E. SARROT-REYNAULD J, 1977- Détermination des taux de mélange des eaux thermominérales et superficielles par utilisation des géothermomètres chimiques en Azerbaïdjan oriental (Iran)- C. R. 102° Congrès Nat. Soc. Sav. Limoges, fasc2 p191.
- SARROT-REYNAULD J. POULAIN PA, MARCE A. 1977- Tectonique et anomalies géothermiques- Les sources thermominérales des bordures orientales et méridionales du massif du Pelvoux - Géologie Alpine, fasc.53, t1, p75-82.
- SARROT-REYNAULD J, SALEHI E. BLAVOUX B. 1978- Caractéristiques isotopiques et origine des eaux thermominérales d'Azerbaïdjan oriental (Iran). C. R. 103° Congrès Soc. Sav. Nancy, F.IV p141.
- SARROT-REYNAULD J, SIMEON Y. 1979- Tectonique et anomalies géothermiques- Données nouvelles sur les sources thermominérales de Tarentaise: Brides, Salins, La Léchère (Savoie)- C. R. Congrès Nat. Soc. Sav. Bordeaux - Avril 1979.
- SCHOELLER H, 1929- La Nappe de l'Embrunais au Nord de l'Isère- Bull. Serv. Carte Géol. France- tXXXII n° 175.
- SCHOELLER H, 1962- Les eaux souterraines- Masson Paris.
- SCHOELLER H et M. 1976- Calcul de la température des sources thermominérales à leur origine profonde. C. R. Ac. Sc. t283 p753.
- SIMEON Yves. 1979- Etude pétrologique, géochimique et structurale des terrains cristallins de Belledonne entre l'Arc et l'Isère alpes Françaises- Thèse de 3° cycle - Grenoble.
- THERMAL AND CHEMICAL PROBLEMS of thermal waters, 1975- Proceedings of the Grenoble Symposium, Aug, Sept 1975.
- URBAIN P. 1967- Géochimie et Hydrogéologie des enveloppes aqueuses et des eaux thermominérales- Librairie Sc. et Techn. Blanchard.

" .... les hommes jugent les choses selon la disposition de leur cerveau et les imaginent plutôt qu'ils ne les connaissent. S'ils les avaient clairement connues, elles auraient, comme en témoigne la mathématique, la puissance sinon d'attirer, du moins de convaincre tout le monde."

SPINOZA

Je dédie ce travail à Yves et Gaëlle.