



HAL
open science

Etude géologique, hydrogéologique et limnologique dans une région de moyenne montagne : le bassin versant des lacs de Laffrey et Petichet (Isère) Alpes françaises

Bernard Delaquaize

► To cite this version:

Bernard Delaquaize. Etude géologique, hydrogéologique et limnologique dans une région de moyenne montagne : le bassin versant des lacs de Laffrey et Petichet (Isère) Alpes françaises. Hydrologie. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1979. Français. NNT : . tel-00604298

HAL Id: tel-00604298

<https://theses.hal.science/tel-00604298>

Submitted on 28 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.

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

ETUDE GEOLOGIQUE, HYDROGEOLOGIQUE ET LIMNOLOGIQUE
DANS UNE REGION DE MOYENNE MONTAGNE :
LE BASSIN VERSANT DES LACS DE LAFFREY ET PETICHET (Isère)

par Bernard DELAQUAIZE

Soutenue le février devant la commission d'examen :

R. BARBIER	Professeur à l'U.S.M.G.	Président
J. SARROT-REYNAULD	Professeur à l'U.S.M.G.	Rapporteur
L. LEMOINE	Directeur Départemental de l'Agriculture de l'Isère	Examineur
Ph. OLIVE	Sous-Directeur du Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon (PARIS VI)	Examineur

"... défendre la nature sur tous les fronts est chose malaisée, car on se heurte à l'indifférence, à l'ignorance, au scepticisme; et surtout l'on a contre soi, plus ou moins ouvertement, tous ceux qui donnent aux convoitises personnelles le pas sur l'intérêt commun, tous ceux qui prêts à compromettre le futur pour un avantage immédiat, ne font pas objection au déluge pourvu qu'ils ne soient plus là pour y assister."

Jean ROSTAND

S O M M A I R E

I - INTRODUCTION	3
1.1. ORIGINE ET BUTS DE L'ETUDE	3
1.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE	5
1.2.1. Situation régionale	5
1.2.2. Limites géographiques de notre étude	5
1.2.3. Limites administratives, population et cheptel du secteur étudié	6
1.2.4. Principales caractéristiques morphométriques du bassin versant	6
1.3. PRESENTATION DE L'ETUDE	10
2 - GEOLOGIE DE LA REGION DES LACS DE LAFFREY.....	13
2.1. GEOLOGIE DU SUBSTRATUM	13
2.1.1. Lithologie et stratigraphie	15
2.1.1.1. Les micaschistes	15
2.1.1.2. Le Houiller	15
2.1.1.2.1. Le Westphalien	17
2.1.1.2.2. Le Stéphaniens	17
2.1.1.2.3. Comportement hydrologique du Houiller	18
2.1.1.3. La couverture mésozoïque	18
2.1.1.3.1. Le Trias	18
2.1.1.3.2. Le Lias	21
2.1.1.3.2.1. Le Lias dauphinois épais	23
2.1.1.3.2.2. Le Lias réduit de la région de Laffrey	23
2.1.1.3.2.3. Comportement hydrologique du Lias	25
2.1.1.3.3. Le Dogger	25
2.1.1.4. Evolution paléogéographique	26
2.1.2. Les principaux éléments tectoniques affectant le secteur étudié	26
2.1.2.1. Les accidents tectoniques	27
2.1.2.1.1. Les accidents transverses	27
2.1.2.1.2. Les accidents subméridiens	29
2.1.2.2. Les axes synclinaux et anticlinaux	30
2.1.2.3. Ordre de succession des mouvements tectoniques	31
2.1.3. Conclusion	32
2.2. ETUDE GEOPHYSIQUE	32
2.2.1. Présentation générale de l'étude	32
2.2.1.1. But de l'étude	32
2.2.1.2. Situation géographique des sondages	33
2.2.1.3. Méthode de prospection	33
2.2.1.4. Interprétation des sondages	35
2.2.1.5. Profondeur d'investigation	35
2.2.2. Etalonnage des terrains	36
2.2.2.1. Résistivité des terrains du substratum	39
2.2.2.2. Résistivité des terrains de couverture	40
2.2.2.2.1. Les moraines	40
2.2.2.2.2. Les alluvions de cônes de déjection	40
2.2.2.2.3. Les dépôts lacustres	40
2.2.2.2.4. Les éboulis et moraines repris par le ruissellement	41
2.2.2.2.5. Le terrain superficiel	41
2.2.2.2.6. Les confusions possibles	41
2.2.3. Résultats de l'étude géophysique	41
2.2.3.1. Coupe géologique 1	41
2.2.3.2. Coupes géologiques 2,3 et 4	43

2.2.3.2.1. Coupe géologique 2	43
2.2.3.2.2. Coupe géologique 3	45
2.2.3.2.3. Coupe géologique 4	47
2.2.3.3. Coupe géologique 5	47
2.2.3.4. Coupes géologiques 6, 7 et 8	49
2.2.4. Conclusion à l'étude géophysique	49
2.3. ETUDE DES FORMATIONS QUATERNAIRES	50
2.3.1. Introduction	50
2.3.1.1. Historique	50
2.3.1.2. Méthode d'étude	50
2.3.2. Morphologie du substratum	51
2.3.2.1. Origine de la Matheysine	51
2.3.2.2. Morphologie transversale du nord de la Matheysine	53
2.3.2.2. Morphologie longitudinale du nord de la Matheysine ...	53
2.3.3. Morphologie et lithologie des formations quaternaires.....	54
2.3.3.1. Les formations glaciaires et fluvioglaciaires	54
2.3.3.1.1. Les moraines frontales	55
2.3.3.1.2. Les moraines latérales	58
2.3.3.1.3. Les terrasses fluvioglaciaires et les chenaux marginaux	59
2.3.3.2. Les dépôts quaternaires non glaciaires	60
2.3.3.2.1. Les cônes de déjection mixtes	60
2.3.3.2.2. Les cônes de déjection torrentiels	61
2.3.3.2.3. Les éboulis	61
2.3.3.2.4. Les dépôts lacustres et marécageux	61
2.3.3.2.5. Les glissements de terrains	62
2.3.3.3. Comportement hydrologique des formations quaternaires.	63
2.3.4. Place de la morphologie étudiée dans le schéma actuel du Quaternaire régional	65
2.3.4.1. Histoire géologique régionale du Quaternaire	65
2.3.4.2. Les conséquences de ce schéma sur l'ensemble morpholo- gique étudié	66
2.3.5. Les stades de retrait de la diffluence du glacier würmien de la Romanche en Matheysine	67
2.3.6. Conclusion à l'étude du Quaternaire	73
2.4. CONCLUSION A L'ETUDE GEOLOGIQUE	76
3 - ETUDE HYDROCLIMATIQUE	79
3.1. ETUDE DES PRINCIPAUX PARAMETRES CLIMATIQUES	79
3.1.1. Etude des précipitations	79
3.1.1.1. Le réseau météorologique existant	79
3.1.1.2. L'appareillage complémentaire	79
3.1.1.3. Les précipitations à l'échelle régionale	84
3.1.1.3.1. La pluviométrie annuelle	84
3.1.1.3.2. La pluviométrie mensuelle	86
3.1.1.4. Les précipitations sur le bassin versant étudié.....	88
3.1.1.4.1. Intensité des précipitations	88
3.1.1.4.2. Les précipitations neigeuses	90
3.1.1.4.3. Détermination du gradient altimétrique	90
3.1.1.4.4. Calcul de la lame d'eau précipitée	91
3.1.2. Etude des températures	91
3.1.2.1. Données régionales	91
3.1.2.2. Les températures sur le bassin versant étudié.....	92
3.1.2.2.1. Les températures moyennes	92
3.1.2.2.2. Le gradient altimétrique de la température	94
3.1.2.2.3. Les températures extrêmes d'octobre 76 à Septembre 77	95
3.1.3. Etude de l'hygrométrie	95
3.1.4. L'insolation	96
3.1.5. Les vents	96

3.2.	ETUDE DE L'EVAPOTRANSPIRATION	97
3.2.1.	L'évapotranspiration potentielle mensuelle	98
3.2.1.1.	Calcul de l'évapotranspiration selon la formule de L.TURC	98
3.2.1.2.	Calcul de l'évapotranspiration selon C.W. THORNTHWAITE	99
3.2.3.1.	Calcul de l'évapotranspiration selon B. PRIMAULT	100
3.2.2.	Déficit d'écoulement annuel	101
3.2.2.1.	Calcul du déficit d'écoulement selon L. TURC	101
3.2.2.2.	Calcul du déficit d'écoulement selon COUTAGNE	101
3.2.3.	Conclusion	101
3.3.	ETUDE DE L'EVAPORATION A LA SURFACE DES LACS	103
3.3.1.	Calcul de l'évaporation selon la formule de LUGEON et SKYENKIEWICZ	103
3.3.2.	Calcul de l'évaporation selon la formule de A.MEYER	104
3.3.3.	Conclusion	105
3.4.	CONCLUSION A L'ETUDE HYDROCLIMATIQUE	
4 -	HYDROLOGIE	109
4.1.	LES EAUX DE SURFACE	109
4.1.1.	Le réseau hydrographique	109
4.1.2.	Mesures des débits	110
4.1.3.	Débits quotidiens du ruisseau des Moulins	113
4.1.4.	Débits caractéristiques du ruisseau des Moulins	115
4.1.5.	Débits moyens mensuels du ruisseau des Moulins, de l'exutoire de Petichet et de l'exutoire de Laffrey	117
4.1.6.	Lame d'eau écoulée et autres paramètres annuels concernant les écoulements de surface	119
4.2.	LES EAUX SOUTERRAINES	120
4.2.1.	Evaluation du volume des réserves souterraines	120
4.2.2.	Les circulations souterraines	125
4.2.2.1.	Les circulations souterraines internes au bassin versant	125
4.2.2.2.	Les circulations souterraines avec l'extérieur du bassin versant	126
4.3.	BILANS HYDROLOGIQUES	128
4.3.1.	Bilan du bassin versant du ruisseau des Moulins d'octobre 76 à septembre 77.....	128
4.3.2.	Bilan du bassin versant total d'octobre 76 à septembre 77..	129
4.3.3.	Bilan hydrologique approché pour la période 1948-1970.....	130
4.4.	CONCLUSION A L'ETUDE HYDROLOGIQUE	131
5 -	LE MILIEU LACUSTRE	135
5.1.	ORIGINE DES LACS	135
5.2.	MORPHOLOGIE ET BATHYMETRIE	137
5.3.	FLUCTUATIONS DE NIVEAU	138
5.4.	TEMPS DE RENOUVELLEMENT	139
5.5.	LES PRELEVEMENTS	139
5.6.	LE REGIME THERMIQUE DES DEUX LACS	139
5.7.	TRANSPARENCE DES EAUX LACUSTRES	143
5.8.	L'OXYGENE DISSOUS	144
5.8.1.	Répartition de l'oxygène dissous dans le lac de Laffrey....	144
5.8.2.	Répartition de l'oxygène dissous dans le lac de Petichet ..	146
5.9.	Le pH	147
5.10.	CHIMIE DES EAUX LACUSTRES, CARACTERES PRINCIPAUX, EVOLUTION DANS LE TEMPS	149
5.10.1.	Le calcium	149
5.10.2.	Le magnésium	151
5.10.3.	Le sodium et le potassium	151
5.10.4.	La silice	151
5.10.5.	Les chlorures	153
5.10.6.	Les sulfates	153
5.10.7.	Les bicarbonates	154

5.10.8. L'azote minéral	154
5.10.8.1. L'azote dans le lac de Petichet	155
5.10.8.2. L'azote dans le lac de Laffrey	157
5.10.9. Le phosphore	158
5.10.10. Le carbone organique total	160
5.11. ETUDE DES SEDIMENTS ET DU MILIEU INTERSTITIEL	162
5.11.1. Les sédiments	162
5.11.2. Les eaux interstitielles	164
5.12. ETAT TROPHIQUE DES LACS DE LAFFREY ET PETICHET	165
5.13. CONCLUSION A L'ETUDE DU MILIEU LACUSTRE	168
6 - BILAN CHIMIQUE DES LACS DE PETICHET ET LAFFREY.....	171
6.1. BILAN CHIMIQUE DU LAC DE PETICHET	171
6.1.1. Apports du ruisseau des Moulins	171
6.1.1.1. Origine des apports	171
6.1.1.2. Echantillonnage	172
6.1.1.3. Les méthodes de calcul des bilans	173
6.1.1.4. Les modèles concentration-débit	174
6.1.1.5. Variations des concentrations en éléments dissous	176
6.1.1.5.1. Les éléments principaux	176
6.1.1.5.2. Les éléments mineurs	179
6.1.1.6. Bilan des éléments dissous transportés par le ruisseau des Moulins	179
6.1.1.7. Les " bouffées de pollution "	181
6.1.2. Apports des versants du lac	182
6.1.3. Les apports atmosphériques directs sur le lac	184
6.1.3.1. Importance de ces apports	184
6.1.3.2. Les prélèvements et les analyses	185
6.1.3.3. Origine des éléments contenus dans les précipitations atmosphériques	185
6.1.3.4. Bilan des apports atmosphériques sur le bassin versant des lacs de Laffrey	187
6.1.4. Charge dissoute sortant du lac de Petichet	188
6.1.5. Bilan chimique du lac de Petichet	188
6.2. BILAN CHIMIQUE DU LAC DE LAFFREY	191
6.2.1. Apports des cours d'eau	191
6.2.2. Apports des versants du lac	191
6.2.3. Apports atmosphériques directs	192
6.2.4. Charge dissoute sortant du lac de Laffrey	192
6.2.5. Bilan chimique du lac de Laffrey	192
6.3. EVALUATION DE L'EROSION CHIMIQUE	194
6.4. LES APPORTS EN ELEMENTS NUTRITIFS ET LEUR IMPACT SUR LES LACS	195
6.5. CONCLUSION A L'ETUDE DU BILAN CHIMIQUE DES LACS DE PETICHET ET LAFFREY	198
7 - LES SOURCES	201
7.1. METHODE D'ETUDE	201
7.1.1. Les points de prélèvements	201
7.1.2. Les mesures effectuées sur le terrain	203
7.1.2.1. Les débits	203
7.1.2.2. La température	203
7.1.3. Les mesures effectuées au laboratoire	203
7.1.3.1. La résistivité	203
7.1.3.2. Le pH	204
7.1.4. Les analyses chimiques	204
7.1.5. Présentation des résultats	205

7.2	. CARACTERES GENERAUX DES SOURCES ETUDIEES	205
7.2.1.	Résistivité des eaux de sources	205
7.2.1.1.	Gamme de résistivité des eaux de sources	205
7.2.1.2.	Relation minéralisation totale-résistivité	206
7.2.2.	Température des émergences	209
7.2.3.	Composition chimique des eaux de sources	209
7.2.3.1.	Faciès chimique	209
7.2.3.2.	Gammes de teneurs des principaux constituants chimiques	210
7.2.3.3.	Classification des sources	210
7.3	. HYDROGEOLOGIE DESCRIPTIVE DES SOURCES	211
7.3.1.	Les sources du Houiller	211
7.3.1.1.	Source du conglomérat de base du Houiller	211
7.3.1.1.1.	Localisation et conditions d'émergence	211
7.3.1.1.2.	Les débits	211
7.3.1.1.3.	Les températures	212
7.3.1.1.4.	La résistivité	212
7.3.1.1.5.	Chimie	212
7.3.1.1.6.	Conclusion	213
7.3.1.2.	Les sources des schistes gréseux du Houiller	213
7.3.1.2.1.	Localisation et conditions d'émergence	213
7.3.1.2.2.	Les débits	215
7.3.1.2.3.	Les températures	216
7.3.1.2.4.	Les résistivités	216
7.3.1.2.5.	Chimie	216
7.3.1.2.6.	Conclusion	219
7.3.2.	Les sources du Lias dauphinois et du Calcaire de Laffrey.	219
7.3.2.1.	Localisation et conditions d'émergence	219
7.3.2.2.	Les débits	221
7.3.2.3.	Les températures	221
7.3.2.4.	Les résistivités	221
7.3.2.5.	Chimie	222
7.3.2.6.	Conclusion	223
7.3.3.	Les sources de l'Aalénien	223
7.3.3.1.	Localisation et conditions d'émergence	223
7.3.3.2.	Les débits	225
7.3.3.3.	Les températures	225
7.3.3.4.	Les résistivités	225
7.3.3.5.	Chimie	226
7.3.3.6.	Conclusion	227
7.3.4.	Les sources des moraines würmiennes	227
7.3.4.1.	Localisation et conditions d'émergence	227
7.3.4.2.	Les débits	227
7.3.4.3.	Les températures	229
7.3.4.4.	Les résistivités	229
7.3.4.5.	Chimie	229
7.3.4.6.	Conclusion	230
7.3.5.	Les sources mixtes	230
7.3.5.1.	Localisation et conditions d'émergence	231
7.3.5.2.	Les débits	233
7.3.5.3.	Les températures	233
7.3.5.4.	Les résistivités	233
7.3.5.5.	Chimie	234
7.3.5.6.	Conclusion	235
7.3.6.	Les sources des formations quaternaires à éléments sédimentaires	235
7.3.6.1.	Localisation et conditions d'émergence	235
7.3.6.2.	Les débits	237
7.3.6.3.	Les températures	237
7.3.6.4.	Les résistivités	238
7.3.6.5.	Chimie	238
7.3.6.6.	Conclusion	239

7.3.7. Conclusion à l'hydrogéologie descriptive	239
7.4. HYDROGEOLOGIE COMPARATIVE	239
7.5. CONCLUSION A L'ETUDE DES SOURCES	250

8- CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE	259
ANNEXES	265
LISTE DES FIGURES	293
LISTE DES TABLEAUX	296

INTRODUCTION

1. INTRODUCTION

1.1. ORIGINE ET BUTS DE L'ÉTUDE

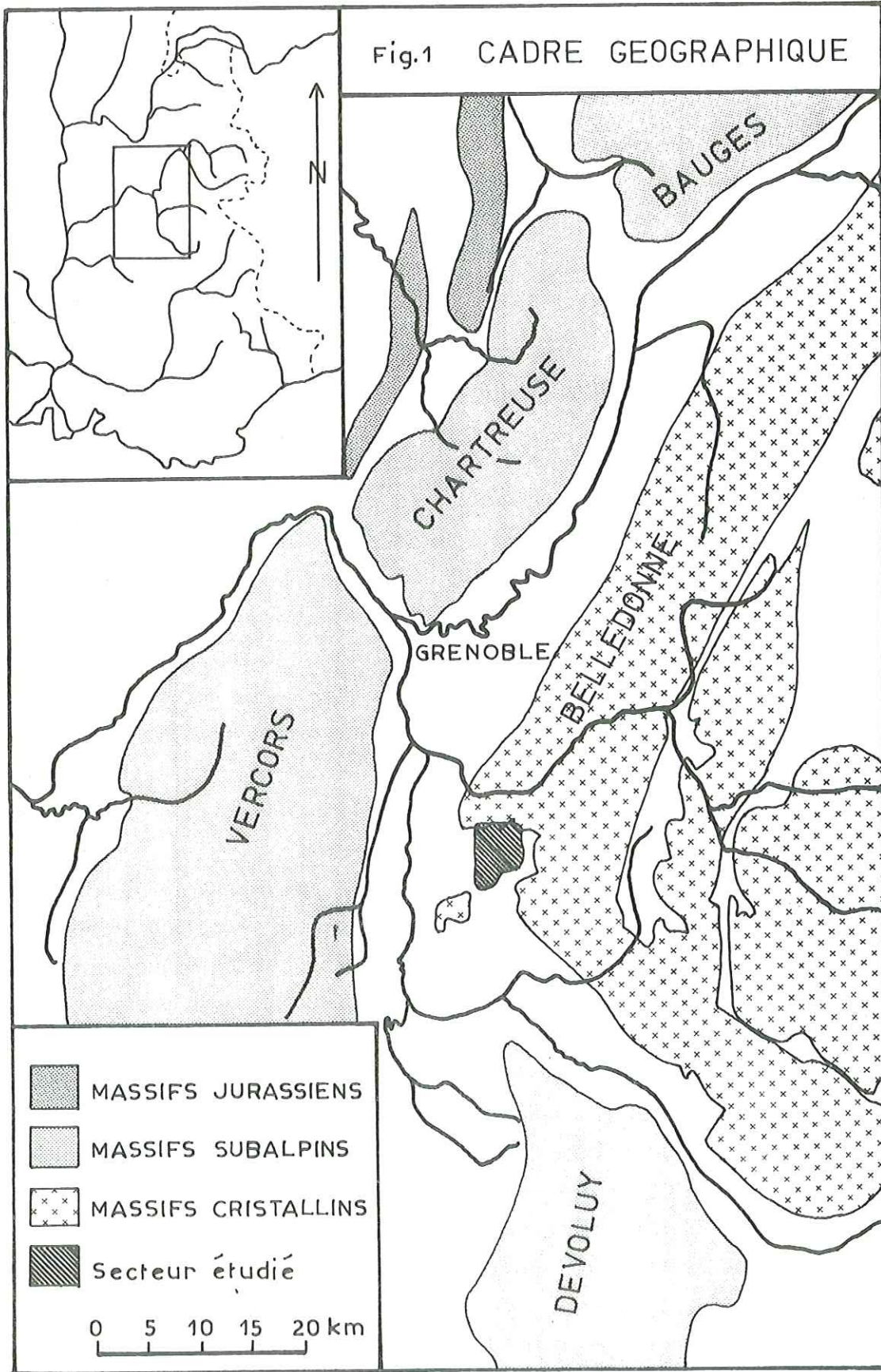
L'économie de la région des lacs de Laffrey repose principalement sur deux activités : une activité agricole axée sur l'élevage et une activité touristique gravitant autour des plans d'eau. Il semble que l'activité touristique soit appelée à un fort développement dans les années à venir, ce qui pose de nombreux problèmes tant au point de vue de la préservation de la richesse naturelle que constituent les lacs, qu'au point de vue des ressources en eau. D'autre part, les diverses études ponctuelles effectuées depuis une dizaine d'années montraient que les lacs de Laffrey et Petichet étaient arrivés à un niveau de pollution critique, lié aux apports en éléments nutritifs (N et P) en provenance des exploitations agricoles, des habitations et des camping ceinturant les lacs.

Tous ces facteurs ont amené la Direction Départementale de l'Agriculture à mettre sur pied un plan général d'assainissement qui comprend la construction, en plusieurs étapes, d'un collecteur d'égouts et d'une station d'épuration qui récupéreront et traiteront les eaux usées du bassin versant des lacs de Laffrey et Petichet.

La mise au point de ce projet nécessitait une meilleure connaissance de l'hydrogéologie du bassin versant des lacs de Laffrey et Petichet, la Direction Départementale de l'Agriculture s'adressa alors au laboratoire d'hydrogéologie de l'Institut Dolomieu pour lui confier la présente étude.

Cette étude devait comporter notamment :

- l'analyse hydrogéologique des bassins versants des lacs de Laffrey et Petichet,
- l'établissement d'un bilan hydrologique faisant ressortir les éventuels apports occultes aux lacs,



- l'établissement d'un bilan chimique (masse d'apports dissous aux lacs, masse d'éléments dissous sortant des lacs).

Pour étayer cette étude sur des bases solides, il nous a paru indispensable de replacer les problèmes posés dans leur cadre général.

Cette démarche nous a amené à étudier en détail la structure, la morphologie et la lithologie de la région et plus spécialement la nature et la répartition des formations quaternaires par les méthodes de la géologie et de la géophysique.

Le présent mémoire comporte donc les résultats de notre étude d'ensemble de la région et les résultats concernant plus particulièrement les questions posées qui s'avèrent indissociables du contexte d'ensemble.

1.2. SITUATION GÉOGRAPHIQUE

1.2.1. SITUATION REGIONALE (fig.n° 1)

Le secteur étudié fait partie de la région naturelle appelée plateau matheysin. Celui-ci est situé dans les zones externes des Alpes françaises, à l'extrémité méridionale de la chaîne de Belledonne, à une vingtaine de kilomètres au sud de Grenoble.

Le plateau matheysin, vaste dépression à valeur synclinale, approfondie par une érosion fluviale, puis retouchée par les érosions glaciaires successives, s'allonge sur 16 km, entre les massifs montagneux du Connexe et du Sennépy à l'ouest, du Grand Serre et du Tabor à l'est. Il est limité au nord par les gorges de la Romanche et au sud par la vallée du Drac.

Ce large sillon, profondément marqué par la morphologie glaciaire, abrite toute une série de lacs, du nord au sud : le lac Mort, le lac de Laffrey, le lac de Petichet et le lac de Pierre-Châtel.

1.2.2. LIMITES GEOGRAPHIQUES DE NOTRE ETUDE

Notre étude intéresse plus particulièrement les lacs de Petichet et de Laffrey, ainsi que leur bassin versant, ce qui correspond approximativement à la moitié nord du plateau matheysin.

Le bassin versant, d'une superficie de 17,37 km², est limité à l'est par la crête du Grand Serre et à l'ouest par le sommet des collines des Crêts et du Crey; les limites nord et sud sont moins marquées dans la topographie

et sont constituées par les bourrelets morainiques qui séparent le lac Mort du lac de Laffrey d'une part, et le lac de Petichet du lac de Pierre-Châtel d'autre part.

Notre étude a souvent débordé du cadre étroit que constituaient les limites du bassin versant géographique, notamment en ce qui concerne la géologie.

Le réseau hydrographique est peu développé, il est constitué principalement par le ruisseau des Moulins qui prend sa source au nord-est du bassin versant, au pied du Grand-Serre, il se jette ensuite dans le lac de Petichet; les eaux de ce dernier se déversent dans le lac de Laffrey dont l'exutoire canalisé par l'Electricité de France est turbiné dans les gorges de la Romanche par les centrales de l'Oule et de Jouchy.

1.2.3. LIMITES ADMINISTRATIVES, POPULATION ET CHEPTEL DU SECTEUR ETUDIE

Sur le plan administratif le bassin versant englobe la totalité des communes de Cholonge et de St Théoffrey, ainsi qu'une petite partie du territoire de la commune de Laffrey.

Afin de faciliter la lecture de ce mémoire nous avons établi une carte regroupant la plupart des noms de lieux cités dans le texte (voir la fig.n° 2 hors texte).

La population est peu élevée, de l'ordre de 400 résidents pour l'ensemble du bassin versant, mais elle est considérablement accrue en période estivale où elle peut atteindre 2 500 à 3 000 habitants. Le cheptel du bassin versant est de l'ordre de 380 bovins et 160 porcins, ces derniers étant tous sur le territoire de la commune de Cholonge (données du recensement général de 1970).

Nous verrons, au cours de cette étude, que les déchets agricoles et les eaux usées des habitants sont les principaux responsables de la pollution des lacs de Petichet et Laffrey.

1.2.4. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DU BASSIN VERSANT

Le bassin versant des lacs de Laffrey et Petichet culmine à 2 141 m d'altitude (Le Grand Serre) alors que son altitude minimale est 909 m, c'est donc un bassin versant de moyenne montagne.

Pour des raisons pratiques (lieux d'implantation des appareils de mesures, nécessité de calculer des bilans hydrologiques et chimiques partiels) nous avons subdivisé ce bassin versant en sous-bassins versants; le plus important de ceux-ci étant celui du ruisseau des Moulins, fermé à son embouchure (voir fig. n° 4).

Nous avons calculé les répartitions altimétriques des surfaces du bassin versant total et du sous-bassin versant du ruisseau des Moulins; celles-ci sont consignées dans les tableaux n° 1 et 2 .

Tranche d'altitude en mètre	Superficie en km ²	Pourcentage
2100-2141	0,069	0,39
2000-2100	0,225	1,29
1900-2000	0,294	1,69
1800-1900	0,362	2,08
1700-1800	0,410	2,36
1600-1700	0,437	2,51
1500-1600	0,456	2,62
1400-1500	0,550	3,17
1300-1400	0,606	3,49
1200-1300	1,012	5,82
1100-1200	2,762	15,90
1000-1100	3,744	21,55
909-1000	6,449	37,11
909-2141	17,37	100

Tableau n° 1 . Bassin versant des lacs de Laffrey et Petichet - Répartition altimétrique et fréquences altimétriques des surfaces.

COURBES HYSOMETRIQUES et FREQUENCES ALTIMETRIQUES

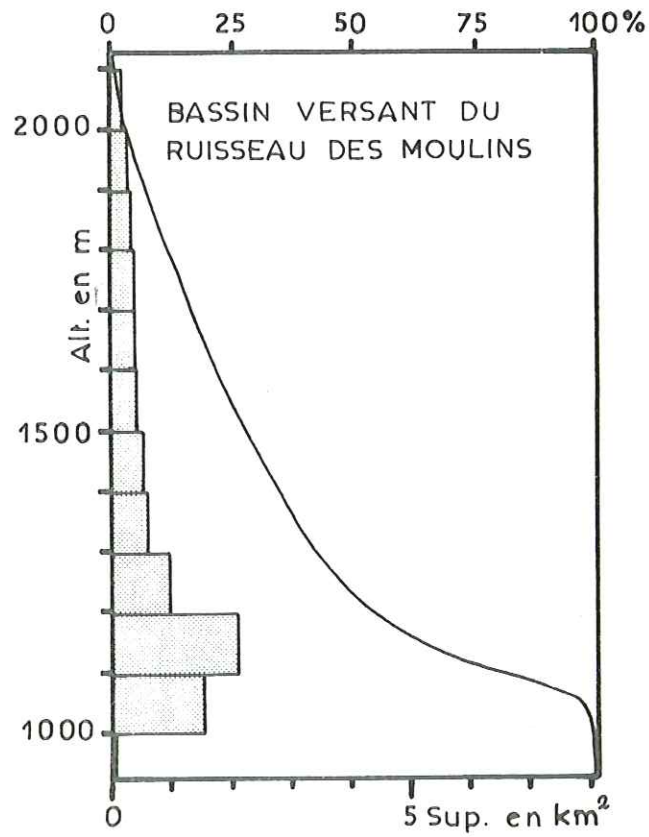
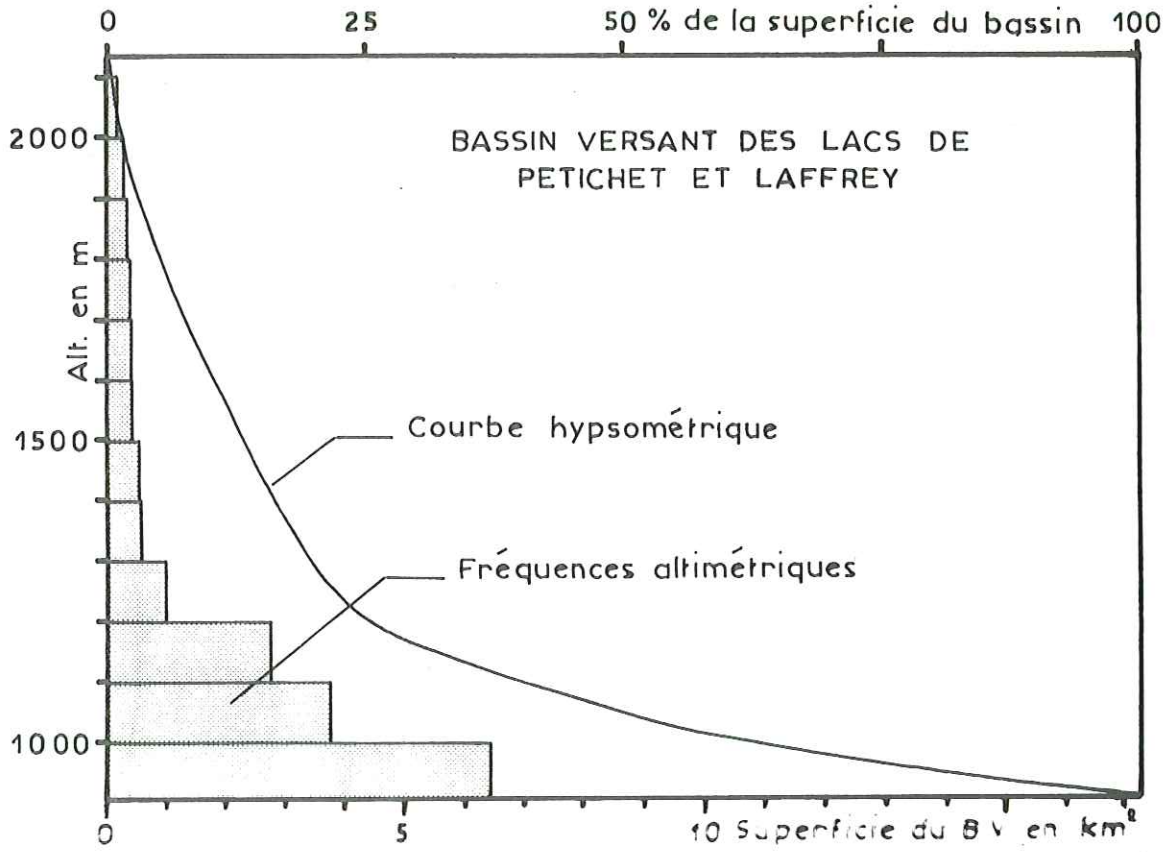


FIG. 3

Tranche d'altitude en mètre	Superficie en km ²	Pourcentage
2100-2141	0,069	0,85
2000-2100	0,225	2,76
1900-2000	0,294	3,60
1800-1900	0,362	4,44
1700-1800	0,410	5,03
1600-1700	0,437	5,36
1500-1600	0,456	5,59
1400-1500	0,550	6,74
1300-1400	0,606	7,43
1200-1300	0,981	12,02
1100-1200	2,137	26,19
1000-1100	1,544	18,92
925-1000	0,087	1,07
925-2141	8,158	100

Tableau n° 2 . Bassin versant du ruisseau des Moulins - Répartition altimétrique et fréquences altimétriques des surfaces.

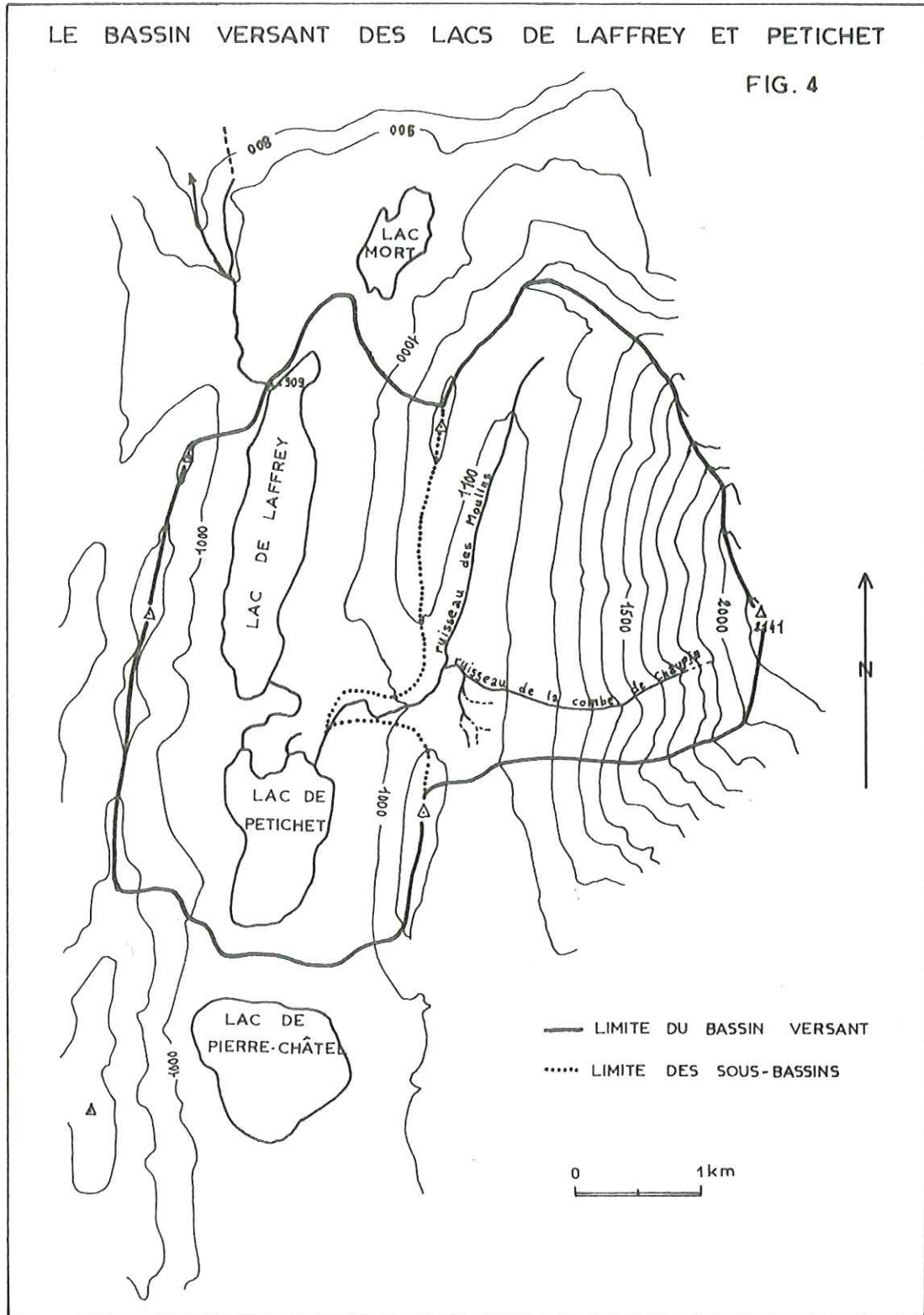
A partir de ces résultats, nous avons tracé les courbes hypso-métriques ainsi que les histogrammes de fréquences altimétriques de ces deux bassins versants (voir fig. n° 3).

- Le bassin versant total, d'une superficie de 17,37 km², a une altitude moyenne de 1 159 m alors que l'altitude médiane (fréquence 1/2) n'est que de 1 040 m ce qui indique l'importance en superficie des zones de faible altitude.

L'indice de compacité (indice de Gravélius $K = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}}$) est égal à 1,35 ce qui indique que le bassin versant a une forme légèrement allongée.

- Le sous-bassin versant du ruisseau des Moulins, d'une superficie de 8,16 km², a une altitude moyenne de 1 348 m alors que l'altitude médiane est de 1 230 m, ce qui montre l'importance en superficie des zones de faible altitude.

L'indice de compacité, égal à 1,28 souligne la forme assez compacte du bassin-versant, proche d'un cercle (indice de compacité égal à 1).



1.3. PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE

Nous nous intéresserons dans un premier temps à la géologie de la région des lacs de Laffrey, nous poursuivrons par l'étude climatique et hydrologique, avant d'aborder les problèmes spécifiques au milieu lacustre et à la pollution des lacs. Nous terminerons, enfin, par une étude essentiellement hydrochimique des sources de la région.

GEOLOGIE DE LA REGION DES LACS DE LAFFREY

2. GEOLOGIE DE LA REGION DES LACS DE LAFFREY

Nous aborderons en premier dans ce chapitre la géologie du substratum. L'étude géophysique que nous avons entreprise dans cette région, et qui touche principalement les terrains quaternaires, sera présentée en second, de manière à pouvoir y faire référence dans la troisième partie qui s'intéressera à la couverture quaternaire proprement dite.

2.1. GÉOLOGIE DU SUBSTRATUM

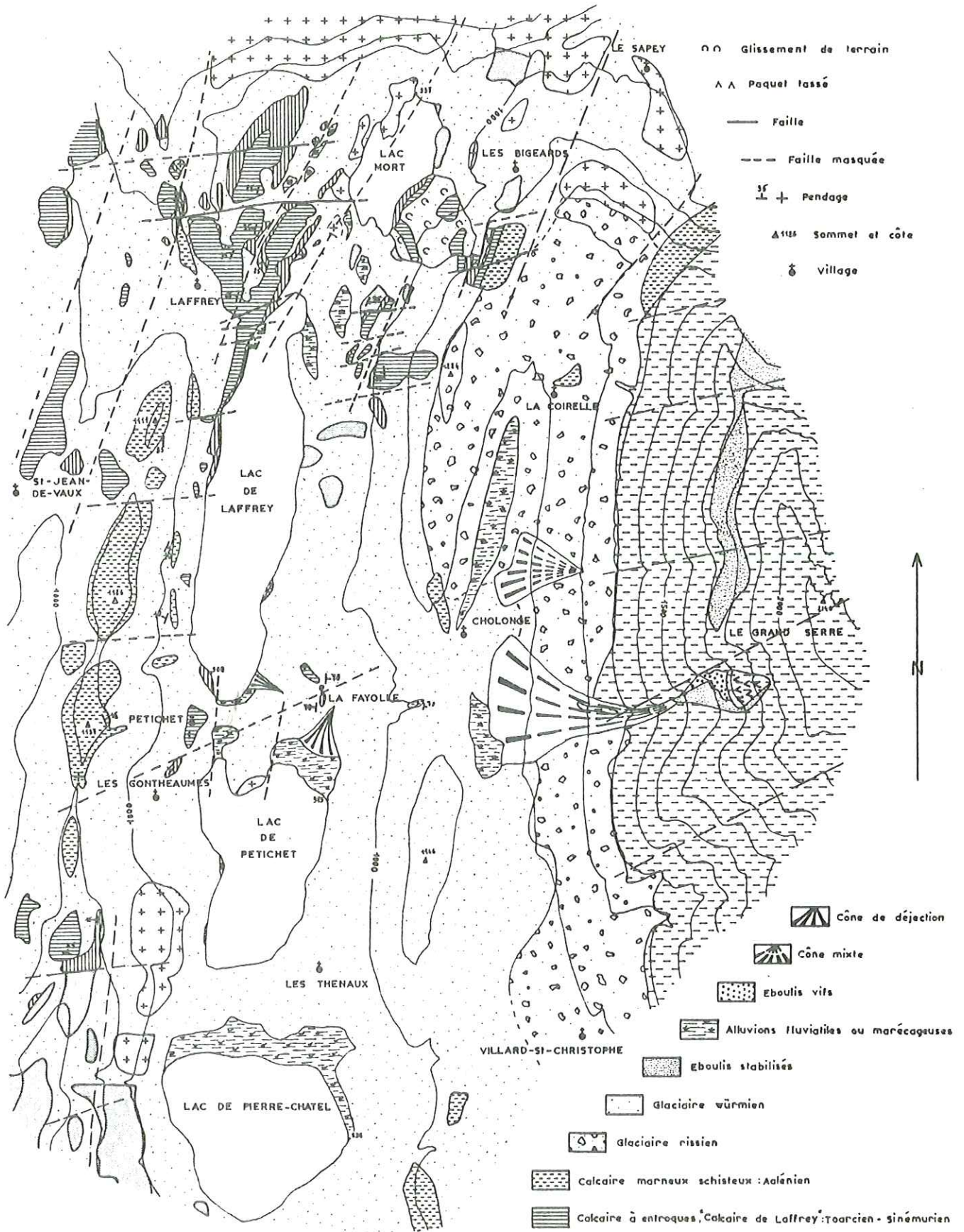
La région étudiée correspond essentiellement au nord du dôme de La Mure. L'appellation " dôme de La Mure " a une signification essentiellement géologique; il s'agit en effet d'un large bombement du socle hercynien et de sa couverture triasique et liasique. Celui-ci est séparé à l'est du massif cristallin de l'Oisans par un graben communément appelé synclinal matheysin et dont la structure géologique est peu connue.

La dôme de La Mure a été récemment l'objet d'une étude géologique complète (J.SARROT-REYNAULD 1961), qui a bénéficié des renseignements fournis par les travaux souterrains des Houillères du Bassin du Dauphiné (actuelles H.B.C.M.); ce sont essentiellement les résultats de cette étude qui concernaient notre secteur que nous présentons ici.

Nous avons cartographié au 1/10 000 un secteur compris entre les gorges de la Romanche au nord et Pierre-Châtel au sud, les collines des Crêts à l'ouest et le sommet du Grand-Serre à l'est; la figure n° 5 présente une réduction de cette carte (la morphologie quaternaire y est peu détaillée car elle fait l'objet d'une cartographie spéciale que nous présenterons plus loin).

Nous aborderons la description de la géologie du substratum, tout d'abord sous l'angle lithologique et stratigraphique, puis sous l'angle structural et tectonique.

LES LACS DU PLATEAU MATHEYSIN
 CARTE GEOLOGIQUE FIG.5



carte établie à partir de :

- Carte géologique du dôme de La Mure 1/20000 (J.Sarrot-Reynaud inédit)
- Carte géologique Vizille 1/50000 (B.R.G.M)
- Levés personnels 1/10000

Equidistance des courbes : 100 m.

2.1.1. LITHOLOGIE ET STRATIGRAPHIE

Les terrains sédimentaires houillers, triasiques et jurassiques reposent sur le socle qui est constitué, sur le dôme de La Mure, par des micaschistes.

2.1.1.1. Les Micaschistes

Ce sont les micaschistes du rameau externe de Belledonne. Ils affleurent au nord de la zone étudiée au Sappey, aux Bigeards, sur les pourtours du lac Mort, mais également plus au sud sur les berges nord et ouest du lac de Petichet ainsi qu'à l'ouest du lac de Pierre-Châtel.

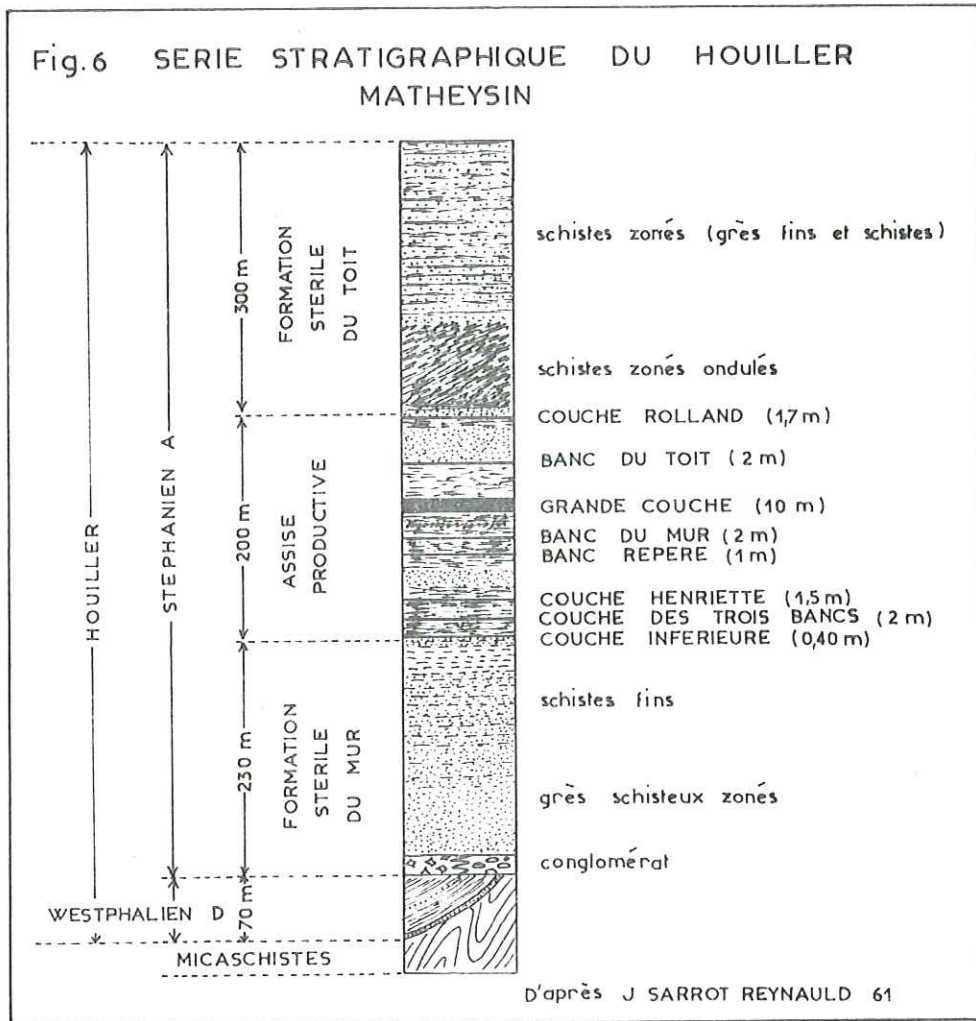
Leur lithologie est assez monotone: il s'agit de micaschistes à deux micas qui présentent des alternances métriques, tantôt plus micacées, tantôt plus quartzeuses; ils ont les caractères d'une série de type flysch non calcaire.

A l'affleurement on observe une altération assez poussée dans les zones les plus micacées où la schistosité et les diaclases sont remplies de limonite; les zones quartzeuses sont par contre plus massives.

Cette formation semble imperméable, néanmoins des circulations assez importantes peuvent exister dans les zones très fracturées bien que nous n'en ayons pas observé dans la région étudiée.

2.1.1.2. Le Houiller

Il affleure en de nombreux points de la zone étudiée et notamment dans le secteur des Bigeards et des Allards; on l'observe également sur la berge ouest du lac de Laffrey, aux Josserands ainsi qu'à l'ouest du lac de Pierre-Châtel. On le rencontre d'autre part dans de nombreux forages qui l'ont traversé sur de grandes épaisseurs (voir la présentation des forages au chapitre 2.2.2.); enfin la prospection géophysique que nous avons entreprise l'a reconnu sous le recouvrement quaternaire entre le lac Mort et le lac de Laffrey, ainsi qu'entre les lacs de Petichet et Pierre-Châtel.



Le Houiller a été, depuis longtemps, l'objet d'une exploitation assez intense de ses couches productrices d'anthracite dont l'épaisseur cumulée varie de 15 à 20 mètres.

Deux étages sont généralement représentés dans la région : le Westphalien et le Stéphanien dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 800 mètres dont 70 pour le Westphalien (voir la figure n° 6). Ces deux étages n'ont pas été distingués sur la carte géologique que nous

présentons, les conditions d'affleurement ne le permettant pas.

2.1.1.2.1. Le Westphalien

Il est discordant sur le socle de micaschistes et débute par un conglomérat de 20 à 40 cm d'épaisseur. C'est un conglomérat polygénique à petits éléments bien roulés de quartz, de micaschistes et de roches vertes, enrobés dans une pâte micacée.

Au-dessus de ce conglomérat, on observe une série de schistes noirs, fins, bitumineux, et de grès très fins sur 70 mètres d'épaisseur.

Les schistes ont fourni une flore à *Mixoneura ovata* et plusieurs espèces de *Pecopteris* qui permettent de lui attribuer un âge Westphalien D (J.SARROT-REYNAULD 1961).

2.1.1.2.2. Le Stéphanien

Au-dessus du Westphalien, repose la puissante série de schistes et grès composant l'assise productive.

Cette série débute par un conglomérat épais d'une vingtaine de mètres reposant en discordance tantôt sur les micaschistes tantôt sur le Westphalien D. Ce conglomérat se présente soit sous un faciès à éléments anguleux de quartz et de Houiller (pseudo-brèche), soit sous un faciès à éléments de micaschistes roulés, selon le substratum sur lequel il repose.

Au-dessus du conglomérat, on distingue 3 zones principales :

- la formation stérile du mur (230 m) constituée de grès schisteux zonés avec quelques passées de schistes fins et de quartzites,

- l'assise productive proprement dite (200m) constituée par une alternance de grès, de schistes et de couches d'anhracite; ces dernières ont une épaisseur variant de 0,4 m à 10-12 m,

- la formation stérile du toit (300m) formée d'une succession de schistes plissotés et de schistes zonés (grès fins et schistes noirs).

La faune et la flore récoltées dans l'assise productive sont typiques du Stéphanien A (J.SARROT-REYNAULD 1961).

Cette série stratigraphique moyenne du Stéphaniens de La Mure présente des variations de faciès qu'il est cependant difficile d'étudier dans notre secteur, où les travaux miniers sont peu importants et anciens. Il semblerait néanmoins que la grande couche soit parfois absente dans la concession de St Théoffrey; par ailleurs, dans la concession de Laffrey (au nord des Josserands), seules la couche inférieure, la couche des trois bancs et la couche Henriette ont été rencontrées, on ne sait pas si la grande couche existe .

2.1.1.2.3. Comportement hydrologique du Houiller

De par sa nature schisto-gréseuse, le Houiller est un terrain imperméable, cependant les dislocations tectoniques peuvent permettre des circulations souterraines importantes (P.CAMPOROTA 1963). D'autre part, les travaux miniers, très anciens dans la région, ont laissé tout un réseau de galeries plus ou moins obstruées qui sont le siège de circulations.

2.1.1.3. La couverture mésozoïque

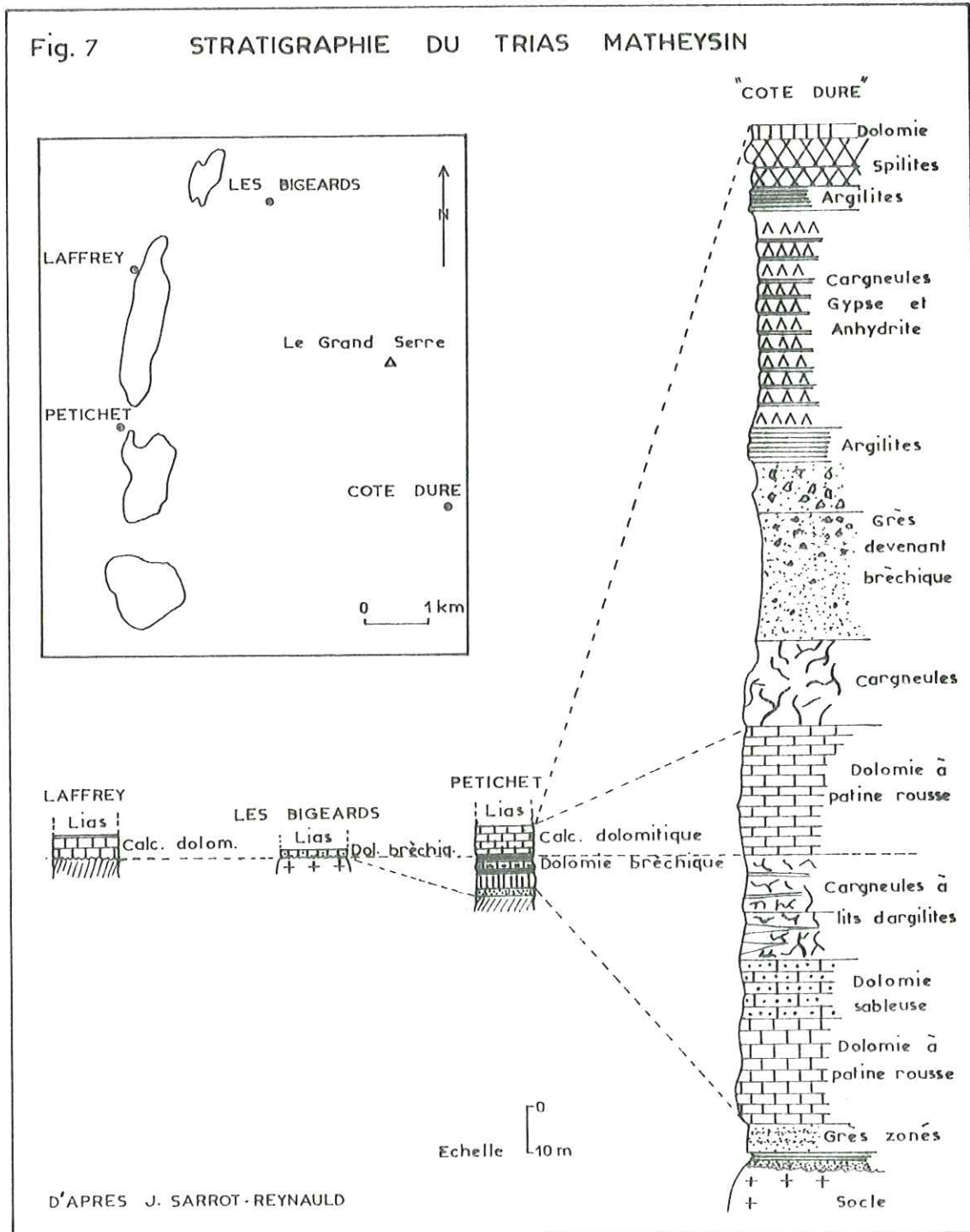
Elle n'est représentée, dans le secteur étudié, que par les terrains du Trias, du Lias et du Dogger qui reposent en discordance soit sur le Houiller, soit sur les micaschistes du socle.

2.1.1.3.1. Le Trias

Il affleure surtout dans la partie nord du secteur étudié : on peut en effet l'observer au nord de Laffrey, aux environs des Bigeards, aux Josserands; on le rencontre également sur la rive ouest du lac de Laffrey ainsi qu'à la Bergogne, La Fayolle, Petichet et St Théoffrey. D'autre part de nombreux forages l'ont traversé (voir le paragraphe n°2.2.2.).

Il présente des variations de faciès très importantes dans la région de La Mure puisque son épaisseur varie de quelques mètres à près de trois cents mètres. L'épaisseur minimale se situe aux environs de Petichet et Laffrey, alors qu'à l'est et à l'ouest du secteur étudié, la série a une puissance de deux à trois cents mètres.

Nous verrons que si certaines réductions d'épaisseur peuvent s'expliquer par une érosion anté-liasique, d'autres sont en fait dues à la présence d'un haut fond dans le secteur étudié qui perturbait la sédimentation triasique.



Afin de mettre en évidence les variations de faciès et les réductions d'épaisseur, nous présentons la coupe de Côte Dure qui est la plus complète; elle est située sur la bordure est du dôme de La Mure, entre le massif du Grand Serre et celui du Tabor.

La coupe de Côte Dure (figure n° 7) présente, en partant de la base, la succession lithologique suivante (J.SARROT-REYNAULD) :

- une brèche de base constituée par une croûte durcie, de grès verdâtres déposés sur le socle cristallin,
- les grès de base à petits éléments roulés et ripple-marks reposant sur un hard-ground,
- les dolomies inférieures à patine rousse (dolomies capucins) devenant gréseuses vers le sommet,
- des cargneules à lits d'argilites qui correspondent à un niveau à gypse et anhydrite sur d'autres coupes mieux conservées (galerie du Drac),
- les dolomies principales à patine rousse qui constituent l'horizon repère du Trias de la région,
- des cargneules,
- des grès passant vers le haut à des brèches,
- une série de gypse et d'anhydrite alternant avec des lits d'argilites, surmontée d'un horizon dolomitique,
- des coulées de spilites avec de fines intercalations d'argilites rouges,
- un niveau dolomitique termine la série triasique vers le haut.

Cette série a une épaisseur d'environ 270 m.

Par rapport aux séries de Côte Dure à l'est, ou de la galerie du Drac à l'ouest, la région de Petichet-Laffrey présente une diminution très forte de l'épaisseur des dépôts triasiques. C'est ainsi que la puissante série de gypse et de cargneules inférieures comprise entre deux horizons dolomitiques repères à Côte Dure, n'est plus représentée à Petichet que par quelques bancs de schistes et de dolomie.

Ces fortes épaisseurs de sédiments dans la série de Côte Dure ne peuvent s'expliquer que par la présence de mouvements de subsidence très importants dans cette zone, voire par une sédimentation syntectonique.

Les coulées de spilites des marges du dôme de La Mure confirment d'ailleurs l'instabilité tectonique du secteur au Trias.

Les horizons inférieurs de la série de Côte Dure sont même parfois totalement absents comme à Laffrey ou aux Bigeards, où la sédimentation triasique ne débute qu'au niveau des dolomies principales,

époque à laquelle la transgression marine atteint le haut fond de Laffrey. La présence du haut fond est d'ailleurs confirmée par la présence de dépôts contenant des blocs rocheux écroulés de falaises bordant un rivage (J.C. BARFETY et al. 1970).

La réduction d'épaisseur de la partie supérieure de la série (Laffrey, Les Bigeards) est à attribuer à l'érosion anté-liasique qui fut intense, comme en témoignent les premiers dépôts liasiques, constitués par une brèche à éléments dolomitiques ravinant le Trias.

La région étudiée est donc caractérisée par un Trias réduit sans dépôts d'évaporites.

La faune et la flore récoltée dans la coupe de Côte Dure a permis à J.SARROT-REYNAULD en 1963 de proposer la chronologie suivante :

- grès de base	âge indéterminé
- dolomies inférieures	Muschelkalk supérieur
- gypse et anhydrite inférieurs	Keuper inférieur
- dolomie principale	Keuper moyen
- les horizons supérieurs	Keuper supérieur.

En résumé, les dépôts triasiques sont caractérisés par l'importance des variations de faciès, lesquelles sont dues à l'existence d'un haut fond où la sédimentation est réduite, encadré de sillons subsidents où une série épaisse s'est déposée.

- Comportement hydrologique du Trias

Le Trias présente en général dans les Alpes, une perméabilité très importante liée aux cargneules et au gypse. Par contre dans le secteur étudié où le Trias n'est constitué que de dolomies, c'est surtout la fracturation de celles-ci, ainsi que leur dissolution dans les zones de circulation les plus intenses qui détermineront sa perméabilité. L'absence d'évaporites aura par ailleurs, des répercussions sur la chimie des eaux de sources issues du Trias.

2.1.1.3.2. Le Lias

Après les dépôts quaternaires, c'est lui qui représente en superficie la plus grande part des affleurements du secteur étudié.

Comme le Trias, les dépôts liasiques présentent des variations de faciès très marquées qui confirment l'existence d'un haut fond sur l'emplacement du dôme de La Mure.

Fig. 8 LE LIAS EPAIS DAUPHINOIS

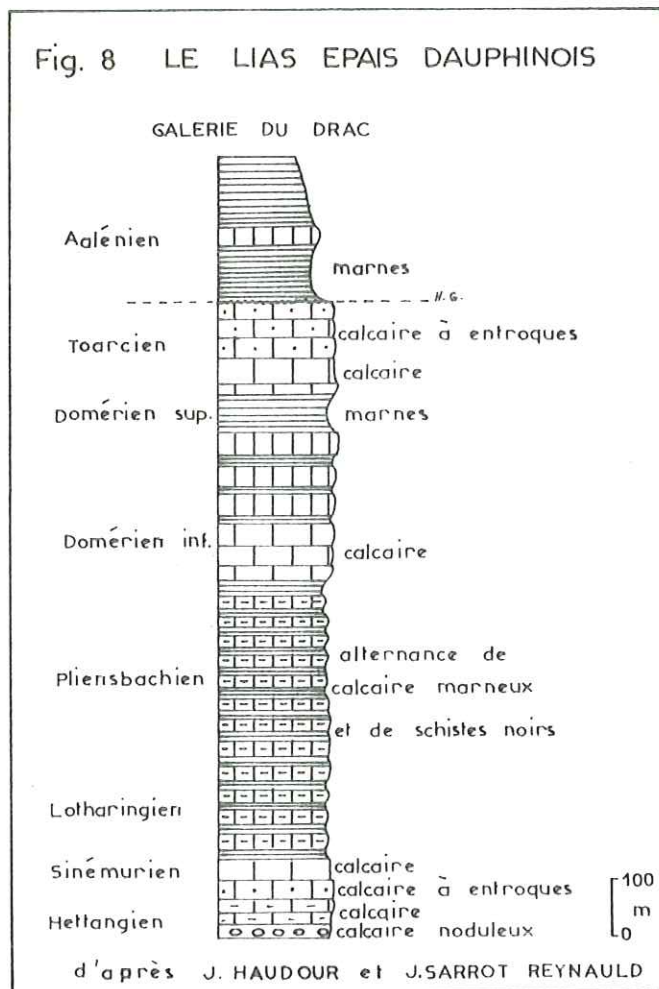
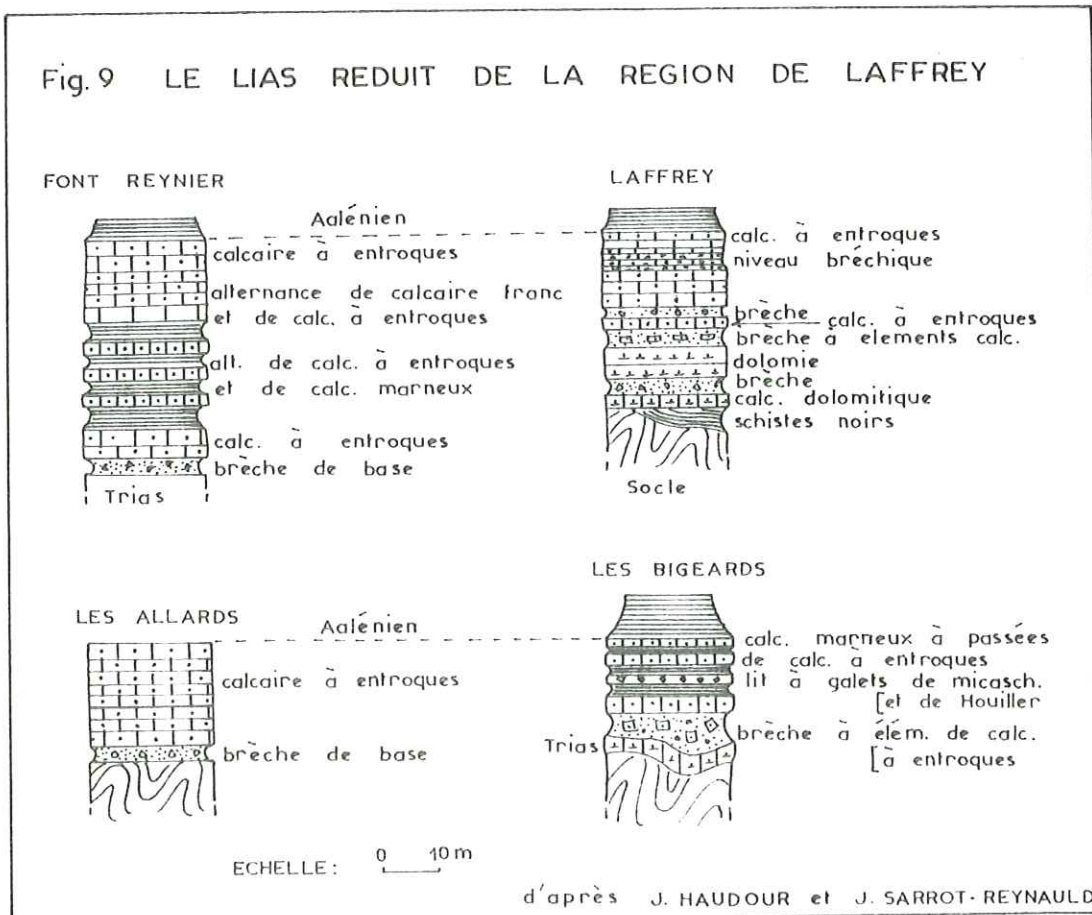


Fig. 9 LE LIAS REDUIT DE LA REGION DE LAFFREY



Deux faciès très différents sont représentés sur le secteur étudié : le faciès dauphinois très épais, qui constitue l'imposante masse liasique du Grand Serre, et le faciès réduit du dôme de La Mure, plus communément appelé " Calcaire de Laffrey " depuis les travaux de Ch.Lory en 1864. Nous présenterons successivement les deux types de faciès en groupant l'Aalénien avec le Lias pour simplifier.

2.1.1.3.2.1. Le Lias dauphinois épais (figure n° 8)

Le Grand Serre ne permet pas d'observer une série complète du Lias, aussi décrivons-nous la coupe de la galerie du Drac, située à l'ouest du dôme de La Mure, qui présente une grande analogie de faciès avec celle du Grand Serre (elle semble toutefois légèrement plus épaisse). Cette coupe, étudiée tant au point de vue stratigraphique que paléontologique par MM. COLLIGNON, J. HAUDOUR et J. SARROT-REYNAULD, débute par des calcaires noduleux peu épais datés de l'Hettangien. Au-dessus, on trouve une série de bancs de calcaires marneux surmontés par quelques bancs de calcaires à Entroques et couronnée par un calcaire franc qui termine la série sinémurienne. On observe ensuite, une puissante formation constituée d'une alternance de calcaires marneux et de schistes noirs datés par des fossiles du Lotharingien et du Pliensbachien. Puis un épisode de bancs de calcaires francs correspond au Domérien inférieur, alors que le Domérien supérieur est représenté par des couches de marnes. Après ces marnes, une nouvelle série de bancs calcaires plus ou moins francs pouvant devenir crinoïdiques vers le sommet, représente le Toarcien. Au sommet du Toarcien, on observe un hard-ground sur lequel s'est déposée la série de marnes de l'Aalénien dont la monotonie est rompue par la barre de calcaires marneux de la zone à opalinum qui sépare l'Aalénien inférieur du supérieur.

L'épaisseur de la série liasique de l'Hettangien au Toarcien peut être estimée à 1200 mètres.

2.1.1.3.2.2. Le Lias réduit de la région de Laffrey (fig.N° 9)

Le Lias à faciès réduit se développe de Fau Laurent au nord de la Romanche jusqu'au pied des premiers reliefs du Dévoluy. Nous nous contenterons d'étudier les coupes des environs de Laffrey qui intéressent notre étude.

Ces coupes ont été l'objet des études des auteurs cités précédemment et ce sont leurs travaux que nous présentons, sans

revenir sur la description de l'Aalénien qui a sensiblement le même faciès et la même épaisseur que dans les zones bordières du dôme de La Mure.

- La coupe de Font Reynier située à l'ouest de Laffrey, et qui rappelle par ses niveaux marneux le Lias dauphinois, débute par une brèche de base ravinant le Trias, surmontée de calcaires à Entroques. Au-dessus, on observe une alternance de calcaires à Entroques et de calcaires marneux, surmontée par une barre de calcaires à Entroques. L'Aalénien termine cette série. Les études paléontologiques ont montré l'existence de deux lacunes : celle du Rhétien-Hettangien et celle de la majeure partie du Pliensbachien et du Domérien.

- La coupe de la carrière de Laffrey débute par des schistes noirs et des dolomies qui semblent représenter le Rhétien et l'Hettangien. Une brèche à éléments calcaires et dolomitiques surmonte l'Hettangien. Au-dessus, on trouve des calcaires à Entroques contenant plusieurs niveaux bréchiques puis l'Aalénien; les niveaux bréchiques souligneraient l'existence des lacunes du Pliensbachien et du Domérien.

- Plus à l'est, aux Allards, le Lias débute par une lumachelle du Lotharingien reposant sur une brèche de base à éléments triasiques. Au-dessus, on trouve une barre de calcaires à Entroques datés à leur sommet du Toarcien; le niveau marneux qui interrompt cette série calcaire pourrait représenter une série réduite.

- Plus à l'est encore, aux Bigeards, le Lias débute par une brèche de base remaniant un Trias réduit. Cette brèche, à éléments cristallins, quartzeux et dolomitiques, est cimentée par un calcaire contenant quelques Entroques. On trouve au-dessus un niveau de calcaires à Entroques, lui-même surmonté de marnes datées du Sinémurien. Plus haut dans la série, ces marnes se chargent en éléments allochtones (galets du Houiller et micaschistes). La coupe se termine par des lits marneux puis par des calcaires marneux alternant avec des calcaires à Entroques qu'on peut attribuer au Toarcien puisqu'ils sont surmontés par l'Aalénien.

Les études paléontologiques et les analogies de faciès permettent de dire que ces coupes réduites présentent des lacunes stratigraphiques importantes. En effet, le Rhétien et l'Hettangien sont absents sur toutes les coupes (sauf peut-être à Laffrey où les schistes noirs et les dolomies de la base pourraient correspondre à ces deux étages); de même, on observe après la transgression sinémurienne, qui est générale, une nouvelle lacune du Pliensbachien et du Domérien qui pourrait correspondre

aux niveaux brèchiques supérieurs de certaines coupes. Ce n'est qu'à l'Aalénien que la sédimentation s'uniformisera dans toute la région marquant ainsi la disparition du dôme de La Mure.

On retrouve là le même type d'antagonisme au niveau de la sédimentation qu'au Trias, à savoir, une sédimentation réduite (30 m) avec de nombreuses lacunes et présentant des faciès bioclastiques sur le dôme de La Mure, alors qu'à l'est et à l'ouest du dôme, on observe une série très épaisse (1 200 m) qui ne peut s'expliquer que par des phénomènes de subsidence très importants en marge d'un talus sous-marin ou même par une sédimentation syntectonique.

En résumé, nous souscrivons aux définitions de J.SARROT-REYNAULD à propos des faciès du Lias, à savoir que : " Le Lias dauphinois se présente comme une série subsidente marno-calcaire quasi-continue où les épisodes calcaires correspondent à une période de stabilité du fond marin " et que " le Calcaire de Laffrey est un calcaire néritique, riche en débris de crinoïdes et piquants d'oursins, grenu, de couleur grise, dus à la cassure miroitante, pouvant devenir parfois spathique ou bréchoïde (à éléments primaires et triasiques) se présentant en bancs d'environ un mètre de puissance ...".

2.1.1.3.2.3. Comportement hydrologique du Lias

Le Lias dauphinois et l'Aalénien, de par leur faciès marnocalcaire, sont imperméables et ce ne seront que les accidents tectoniques majeurs qui pourront localement permettre des circulations dans ces zones broyées.

Le calcaire de Laffrey peut être considéré comme imperméable dans les zones où il n'a pas subi d'efforts tectoniques, par contre, dans les zones plus ou moins plissées, le calcaire de Laffrey, de par sa compétence, s'est cassé suivant un réseau de diaclases ouvertes très dense permettant ainsi des circulations.

2.1.1.3.3. Le Dogger

C'est le terrain du substratum le plus récent rencontré dans la région étudiée, puisque le Crétacé et le Tertiaire n'existent pas soit qu'ils ne se soient pas déposés, soit qu'ils aient été érodés.

Il est composé d'une alternance de calcaires marneux en gros bancs à débit en boules ^{et} de lits plus marneux. Il affleurerait, d'après P.LORY, au sommet de la colline du Crey à l'ouest des Gonthéaumes, néanmoins il est assez difficile de le différencier de l'Aalénien aussi nous ne l'avons pas distingué de ce dernier sur notre carte géologique.

2.1.1.4. Evolution paléogéographique

Les dépôts les plus anciens observables dans la région débutent par les sédiments continentaux du Westphalien D qui se déposent sur le socle cristallophyllien. Ces dépôts ont été soulevés et partiellement érodés durant la phase asturienne. Les sédiments du Stéphanien A se sont déposés ensuite soit sur le Westphalien D, soit sur le cristallin, dans des bassins limniques particulièrement subsidents.

Le régime continental se poursuit durant tout le Permien (non observable dans la région) et le début du Trias.

La phase palatine est à l'origine de la discordance angulaire du Trias sur le Houiller.

Les premières incursions marines ne se font sentir qu'au Muschelkalk, la région de La Mure est alors caractérisée par l'existence d'un haut fond, fragment de la chaîne vindelicienne, bordé de sillons subsidents qui perturbent la sédimentation triasique. Une régression généralisée a lieu à la fin du Keuper avec formation d'évaporites et émission de laves spilitiques (phase cimmérienne).

Durant le Lias inférieur et moyen, l'opposition entre sillons subsidents et haut fond subsiste, et ce n'est qu'au Lias supérieur qu'apparaîtra une uniformisation des faciès par comblement de ces sillons.

L'absence de dépôts postérieurs au Dogger dans la zone étudiée ne permet pas de définir l'évolution paléogéographique depuis cette époque.

2.1.2. LES PRINCIPAUX ELEMENTS TECTONIQUES AFFECTANT LE SECTEUR ETUDIE

Nous allons essayer ici de décrire les structures tectoniques du nord de la Matheysine; cette description sera nécessairement très incomplète, le recouvrement quaternaire et végétal ne permettant pas l'observation des

structures dans de bonnes conditions.

C'est ainsi que les directions et les tracés des accidents sont souvent hypothétiques, ils sont plus déduits du style tectonique régional que réellement observés en tous points sur le terrain.

La discontinuité extrême des affleurements n'a pas, non plus, permis l'établissement de coupes géologiques détaillées.

2.1.2.1. Les accidents tectoniques

Deux directions principales d'accidents se dégagent de l'étude géologique : une famille de failles de direction sensiblement N 70E et une famille de direction N 10 à N 30 E; cette dernière famille regroupe probablement des accidents n'ayant pas tous la même signification, mais il n'est cependant pas possible de les distinguer dans notre zone d'étude.

2.1.2.1.1. Les accidents transverses (figure n° 5)

Ces accidents N 70 E affectent le socle de micaschistes et sa couverture sédimentaire, ils sont assez marqués dans la topographie. On rencontre successivement du nord au sud .

- La faille de la Monta - les carrières

Cette faille s'observe à l'ouest au niveau de La Monta et plus à l'est dans le secteur des Carrières où elle est localement minéralisée; son rejet vertical observable au niveau de la couverture triasico-liasique est très faible, le compartiment sud étant légèrement abaissé.

- La faille de Laffrey

Cet accident situé légèrement au nord de ce village est très marqué dans la topographie, il est minéralisé en blende au-dessus du lac Mort; il se prolongerait à l'est en direction du hameau des Bigeards. Il relève le compartiment sud mais son rejet vertical est très faible au niveau de la couverture.

- L'accident des Beaumes

Cet accident, bien visible au bord du lac de Laffrey où il redresse à la verticale les dolomies triasiques, se prolongerait à l'est à travers la falaise des Bigeards puis au-delà encore, au col du fond des Sciaux.

De bonnes conditions d'affleurement permettent d'observer toute une série d'accidents satellites parallèles entre l'accident des Beaumes et celui des Josserands plus au sud.

- L'accident des Josserands

Cet accident est visible au bord du lac de Laffrey où il met en contact le Trias avec le Calcaire de Laffrey, il se poursuit au niveau du hameau des Josserands, et plus à l'est encore au travers de l'extrémité nord du massif du Grand Serre. Il remonte le compartiment sud.

- L'accident de la petite Cuche

Cet accident visible sur le Grand Serre se prolonge probablement à l'ouest par la faille qui traverse la colline des Crêts.

- L'accident de la grande Cuche

Il est visible sur le Grand Serre au sud de la grande Cuche, plus à l'ouest il limite au sud le pointement triasico-liasique de La Bergogne et sectionne ensuite la colline des Crêts au nord des Nizets.

- L'accident du Grand Serre

Bien visible sur les pentes de cette montagne où il décale les bancs du Lias qui marquent ainsi la topographie par un ressaut, son prolongement éventuel vers l'ouest est délicat à déterminer.

- L'accident de St Théoffrey

Il limite vers le sud le synclinal triasico-liasique du Crey qu'il met en contact avec le Houiller. On peut voir son prolongement vers l'est dans la faille qui affecte le sud du massif du Grand Serre au niveau du col du Parché.

- La faille de La Festinière

Cet accident majeur qui limite au sud notre zone d'étude, se suit du Drac à l'ouest, jusqu'au nord du massif gabbroïque du Tabor à l'est. Il correspond à une remontée du compartiment sud par rapport au compartiment nord, son rejet vertical est important.

Tous ces accidents déjà décrits pour la plupart par J.SARROT-REYNAULD se prolongent de part et d'autre du secteur étudié. Ils ont des rejets verticaux variables, mais semblent tous avoir joué plus ou moins en décrochement dextre bien que cela soit difficilement observable dans le secteur étudié.

2.1.2.1.2. Les accidents subméridiens (Figure n° 5)

Ces accidents, N 10 à N 30 E, sont beaucoup plus délicats à mettre en évidence car ils sont sensiblement parallèles aux grandes structures morphologiques et n'apparaissent donc pas à la faveur de leur intersection avec un relief, comme les accidents transverses.

- L'accident médian

Cet accident majeur qui met en contact les rameaux externe et interne de Belledonne est bien individualisé au nord de la Romanche alors qu'au sud il semble s'ouvrir et se prolonger par deux accidents un à l'est du Grand Serre, l'autre à l'ouest de ce massif où il met en contact l'Aalénien et les micaschistes au col du fond des Sciaux. Le Grand Serre correspond ainsi à un compartiment de socle abaissé entre les deux rameaux de Belledonne.

L'accident médian qui est post-Houiller, mais anté-Permien, aurait rejoué à l'époque alpine.

- La faille Grand Eury

Cet accident qui met en contact le synclinal matheysin avec l'est du dôme de La Mure s'observe uniquement au sud de celui-ci. Il se poursuit plus au nord sous le recouvrement quaternaire du plateau matheysin; au-delà de la faille de La Festinière, son tracé est hypothétique, vue l'absence totale d'affleurements, il pourrait rejoindre la branche occidentale de l'accident médian à La Coirelle. La faille Grand Eury correspondrait alors au rejeu de l'accident médian à l'époque alpine.

- L'accident du Canier

Cet accident sépare les micaschistes du col du fond des Sciaux des affleurements paléozoïques et mésozoïques du sommet du Canier, il se prolongerait au nord en direction du Sappey, puis au-delà de la Romanche par l'accident de Fau Laurent.

- La faille de la falaise des Bigeards

Cette faille traverse la falaise des Bigeards et abaisse le compartiment ouest par rapport au compartiment est; son prolongement au sud est malaisé à suivre.

- La faille des Josserands

Cette faille qui s'observe facilement au niveau de ce hameau, abaisse le compartiment ouest par rapport à l'autre. Il a été reconnu par des travaux miniers (A. BADOUREAU 1903).

- La faille du lac Mort

Cet accident qui traverse le lac Mort et rejoint ensuite le lac de Laffrey où on le perd, semble séparer un compartiment à l'est où le Trias repose sur le Houiller, d'un compartiment à l'ouest où le Trias repose sur les micaschistes. Son rejet au niveau du Mésozoïque semble très faible, auquel cas il s'agirait d'une faille ayant joué avant le Trias.

- L'accident de Jouchy-St Jean-de-Vaux

Cet accident majeur se suit de la centrale de Jouchy (dans la vallée de la Romanche), jusqu'à St-Jean-de-Vaux au sud. Il correspond à un anticlinéal faillé dont le compartiment ouest est relevé par rapport à l'autre.

2.1.2.2. Les axes synclinaux et anticlinaux

Le secteur étudié a subi deux phases de plissements: une à la fin du cycle hercynien, l'autre durant le cycle alpin. Le raccourcissement dû à ces plis atteint 50 % au niveau du Houiller dont 28 % sont imputables au cycle Hercynien (J.SARROT-REYNAULD 1961). On observe dans le secteur étudié une série d'anticlinaux et de synclinaux à axes sensiblement N10E. Nous décrirons succinctement cette série de plis d'est en ouest.

Les couches liasiques du Grand Serre, dont le pendage général est dirigé vers l'ouest, sont cependant affectées par des ondulations à valeur anticlinale et synclinale. Ces ondulations comportent essentiellement deux axes anticlinaux séparés par un synclinal. Cette structure est visible dans la combe de Chaupin où l'érosion présente les couches par la " tranche" ce qui permet de suivre les variations du pendage.

A l'ouest du Grand Serre se situe le synclinal matheysin dont la localisation et la structure sont totalement inconnues dans le secteur étudié; il est limité à l'ouest par la faille de Grand Eury dont la situation est également mal définie; plus à l'ouest, nous nous trouvons sur le dôme de La Mure.

La colline du Canier est constituée par un anticlinal qui se prolonge au nord dans la base de la falaise des Bigeards. Cet anticlinal est suivi à l'ouest par un synclinal faillé au niveau des Josserands auquel succède un vaste anticlinal dont la retombée occidentale se suit sur la rive ouest du lac de Laffrey et dans le village de Petichet.

La colline des Crêts est formée d'un synclinal perché qui se prolonge au nord jusque dans le village de Laffrey il est suivi à l'ouest par l'anticlinal faillé de la vallée de St Jean-de-Vaux qui fait réapparaître le Trias au niveau de ce village.

Ces plis, qui s'observent assez bien sur la majeure partie de la région, sont cependant presque absents sur le plateau au nord et à l'est de Laffrey, où les structures de la série sédimentaire très réduite (absence de Houiller, Trias et Lias très minces) sont directement conditionnées par les failles de socle méridiennes et transverses.

2.1.2.3. Ordre de succession des mouvements tectoniques

La succession d'un très grand nombre de phases tectoniques que nous avons déjà signalées à propos de la paléogéographie, rend très difficile l'établissement d'une chronologie des mouvements, d'autant plus que les accidents tectoniques hercyniens ont rejoué à l'époque alpine. A la suite de travaux de J.HAUDOUR et J.SARROT-REYNAULD sur le dôme de La Mure, la chronologie suivante a été proposée.

Les déformations hercyniennes . Les plis du Houiller, beaucoup plus accentués que ceux du Trias, et la discordance de ce dernier sont la preuve d'une tectonique post-stéphanienne; ces plis ont une orientation N 170 à N 175 E qui diffère sensiblement des directions alpines. Les failles associées à ces plis ont une direction voisine.

Les déformations alpines. Les accidents N70 E qui coïncident au sud du dôme de La Mure avec des plis transverses anté-sénoniens (plis de Ponsoimas-La Beaume) peuvent être considérés comme de même âge, mais correspondent probablement au rejeu d'accidents anté-houillers. On peut attribuer à l'orogénèse alpine proprement dite, le réseau d'accidents N 10 - N 30 E, ainsi que les plis de directions identiques. Les accidents transverses auraient rejoué à cette époque en décrochements dextres.

2.1.3. CONCLUSION

La région de La Mure se caractérise par une instabilité très marquée du socle, du Westphalien au Lias supérieur qui retentit sur la sédimentation durant tout ce laps de temps; les dépôts présentent en effet des variations de faciès très marquées, dues à une sédimentation sur des hauts fonds parfois émergés et dans des sillons fortement subsidents.

Ce n'est qu'à la fin du Lias qu'un calme relatif s'instaure et que la sédimentation devient homogène sur toute la région.

La sédimentation et les structures sont principalement conditionnées par des failles de socle à la fois méridiennes et transverses qui, héritées de l'orogénèse hercynienne, ont rejoué à l'époque alpine.

2.2. ÉTUDE GÉOPHYSIQUE

Nous présentons ici l'étude géophysique car, bien que certains résultats concernent le substratum, c'est essentiellement au niveau de la couverture quaternaire et de la morphologie glaciaire qu'elle a apporté le plus de renseignements. Ceci nous permettra d'autre part, d'y faire plus facilement référence dans les chapitres suivants.

2.2.1. PRESENTATION GENERALE DE L'ETUDE

2.2.1.1. But de l'étude

La prospection géophysique avait essentiellement deux buts :

- le premier était de préciser les possibilités de communication entre les différents lacs de la Matheysine, et de déterminer la forme des sillons glaciaires éventuellement présents dans ces zones;
- le second était de déterminer l'importance, la géométrie et la nature du remplissage, du vallon du pré de l'Epaule (situé entre Cholonge et La Coirelle).

Pour répondre d'une manière suffisamment précise à ces deux problèmes, nous avons effectué 58 sondages électriques (numérotés de 1 à 58).

Nous avons dans chaque cas, essayé de déterminer la nature des formations du Quaternaire et du substratum, bien que cela ait parfois posé d'importants problèmes du fait des similitudes des résistivités spécifiques des différents terrains.

2.2.1.2. Situation géographique des sondages

La figure N° 10 présente le lieu d'implantation de chaque sondage, ainsi que l'orientation de l'extension des lignes. Six profils ont été réalisés, leur direction est perpendiculaire à l'axe supposé des structures morphologiques du substratum.

2.2.1.3. Méthode de prospection

Le dispositif employé était du type Schlumberger, avec deux électrodes d'envoi du courant A et B, et deux électrodes de mesures M et N.

La résistivité apparente dans ce dispositif est :

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{i} \cdot K \quad \text{où}$$

- ρ_a s'exprime en $\Omega.m$
- ΔV s'exprime en millivolts
- i s'exprime en milliampères
- K est un coefficient dépendant de la géométrie du système A.M.N.B., qui est égal à $\pi \left(\frac{AM \cdot AN}{MN} \right)$

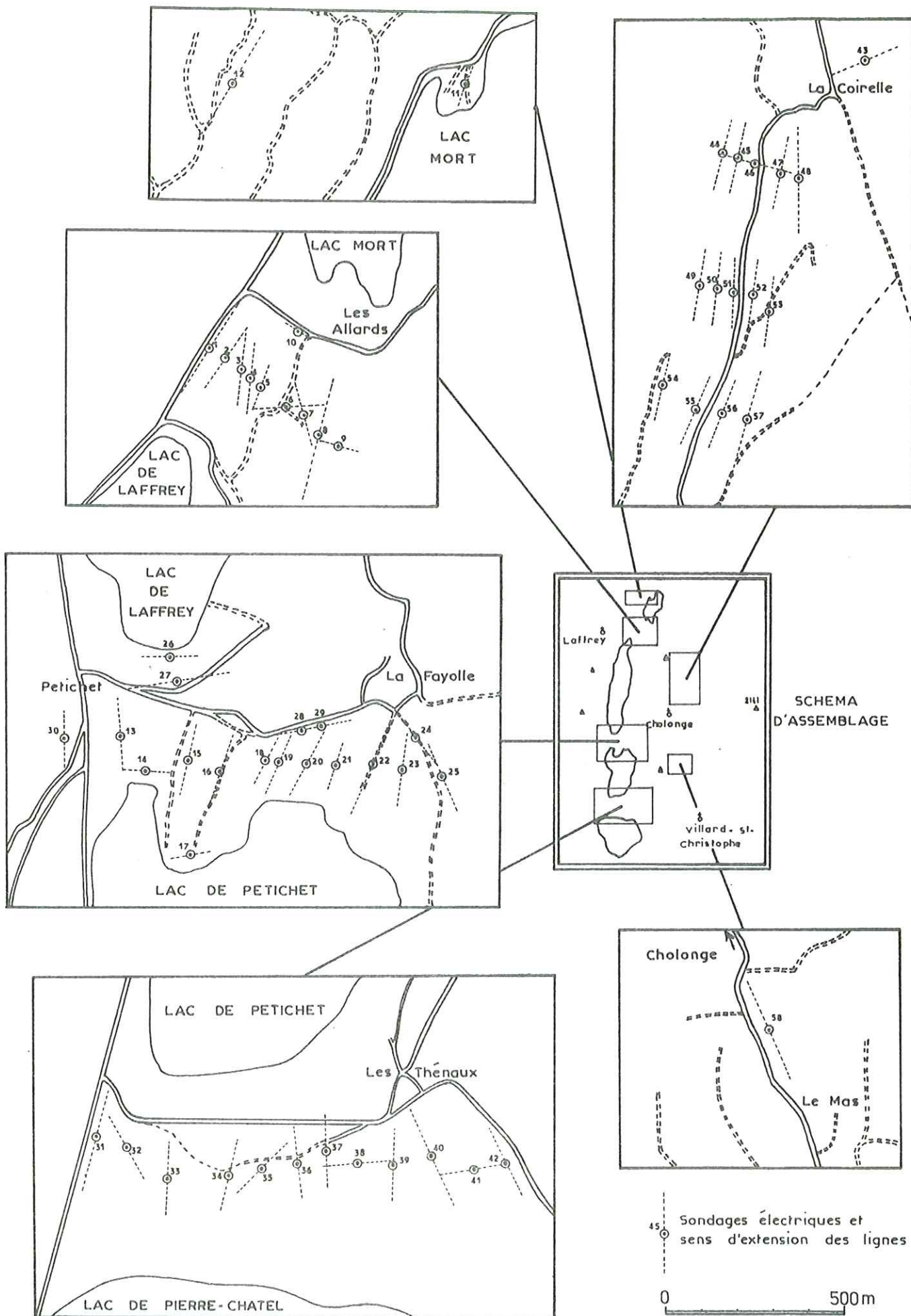
à condition de respecter la symétrie du dispositif par rapport au centre (les distances entre les électrodes s'exprimant en mètres, K s'exprime également en mètres).

La progression des distances AB et MN la plus fréquemment utilisée au cours de l'étude est résumée dans le tableau ci-dessous.

AB/2	MN	K	AB/2	MN	K	AB/2	MN	K
1	0,2	15,5	4	1,5	32,3	30	15	177
1,1	0,2	18,8	5	1,5	51,2	40	15	323
1,2	0,2	22,4	7	1,5	101	50	15	512
1,5	0,2	35,2	10	1,5	208	70	15	1014
2	0,2	62,6	10	5	58,9	70	30	489
2	0,5	24,7	15	5	137	100	30	1023
3	0,5	56,1	20	5	247	150	30	2331
4	0,5	100	30	5	561			

Tableau N° 3 . Progression des distances AB et MN de la prospection électrique (en m).

Fig. 10 PLANS DE SITUATION DES SONDAGES ÉLECTRIQUES



L'extension des lignes était, dans la mesure du possible orientée parallèlement aux structures, de manière à se rapprocher le plus possible des conditions théoriques d'application de la méthode (couches horizontales parallèles et d'étendues infinies).

L'appareil de mesure était un potentiomètre de type Cagniard qui donne d'excellents résultats à condition de manipuler avec soin, néanmoins sa conception peu pratique ne permettait pas de faire un sondage en moins de deux heures.

L'alimentation comportant trois piles radio de 90 volts, permettait d'obtenir des tensions d'alimentation de 45,90,135,180,235 et 270 volts.

2.2.1.4. Interprétation des sondages

Les résistivités apparentes ont été reportées en fonction de $AB/2$ sur un papier bilogarithmique. L'interprétation s'est faite par comparaison, avec les abaques de courbes théoriques à deux terrains et avec les abaques des " lieux de croix " (P.K. BHATTACHARYA et H.P. PATRA 1968) pour les sondages rencontrant plus de deux terrains (voir annexe N° 4).

2.2.1.5. Profondeur d'investigation

La profondeur d'investigation est fonction de la longueur de la ligne AB, mais elle est dans tous les cas, au plus égale à $AB/4$ (profondeur maximale théorique d'investigation). Elle se situe plutôt entre $AB/6$ et même $AB/10$ si les terrains rencontrés sont très conducteurs en surface, et résistants en profondeur; en effet la couche conductrice canalise les lignes de courant qui n'atteignent pas alors la couche inférieure plus résistante. D'autre part il faut noter qu'aux grandes longueurs de lignes ($AB = 300$ m), la précision de la résistivité apparente est faible . En effet, la différence de potentiel entre M et N est fréquemment de l'ordre de 10 mV, ce qui pose des problèmes de mesures dus à plusieurs causes :

- le potentiomètre ne permet qu'une lecture à 0,25 mV près, d'où une incertitude élevée,
- pour conserver une différence de potentiel suffisante entre M et N, le voltage d'alimentation est augmenté jusqu'à 270 volts; l'intensité

est alors très élevée (100 à 300 mA), alors que le type de piles utilisé est prévu pour débiter 10 mA. La mesure est donc rendue difficile en raison de la baisse rapide de l'intensité débitée par les piles,

- la polarisation spontanée, annulée avant toute mesure, subit fréquemment une variation brutale, au moment de l'injection du courant (à coup de prise), qu'il est difficile de compenser, or cet à coup de prise atteint parfois plusieurs dizaines de millivolts et fausse complètement la mesure si la compensation n'est pas effectuée avec le plus grand soin.

2.2.2. ETALONNAGE DES TERRAINS

Les terrains susceptibles d'être rencontrés dans la zone d'étude étant nombreux et leur résistivité propre n'étant pas connue, il a été nécessaire de procéder à des étalonnages.

Les sondages d'étalonnage du substratum étaient implantés soit à proximité d'un forage, soit sur un affleurement du substratum, soit enfin dans une zone où l'étude géologique préalable permettait de définir avec certitude la nature du substratum lorsque celui-ci était masqué par des formations superficielles.

Les forages utilisés, à des titres divers au cours de cette étude, sont situés sur la figure n° 11 . Ils sont au nombre de 7 que nous présentons ci-après (Données H.B.C.M.).

<u>PE</u> ₁	0-10 m galets	<u>LF</u> ₁	0-14,8 m galets de cristallin
	10-34 m Trias		14,8-85 m micaschistes
	34-97 m Houiller	<u>LF</u> ₂	0-10 m éboulis
	97-150m micaschistes		10-80 m micaschistes
<u>PE</u> ₂	0- 8 m galets	<u>S40</u>	0-15,65m moraine
	8-27 m Trias		15,65-25,2 m Trias
	27-111,4m Houiller		25,2-36,5 m Houiller
<u>PE</u> ₃	0-34,7 m Galets		36,5-41,1 m micaschistes
	34,7-41,5 m Houiller	<u>S41</u>	0-8 m galets
	41,5-52 m Micaschistes		8-23 m " Calcaire de Laffrey"
	52 - 63m Houiller		23-40 m Trias (schistes et grès)
	63 -107m Brèche à Quartz		40-325m Micaschistes
	107-187,8 m Micaschistes		

Fig. 11 CARTE DE SITUATION DES FORAGES

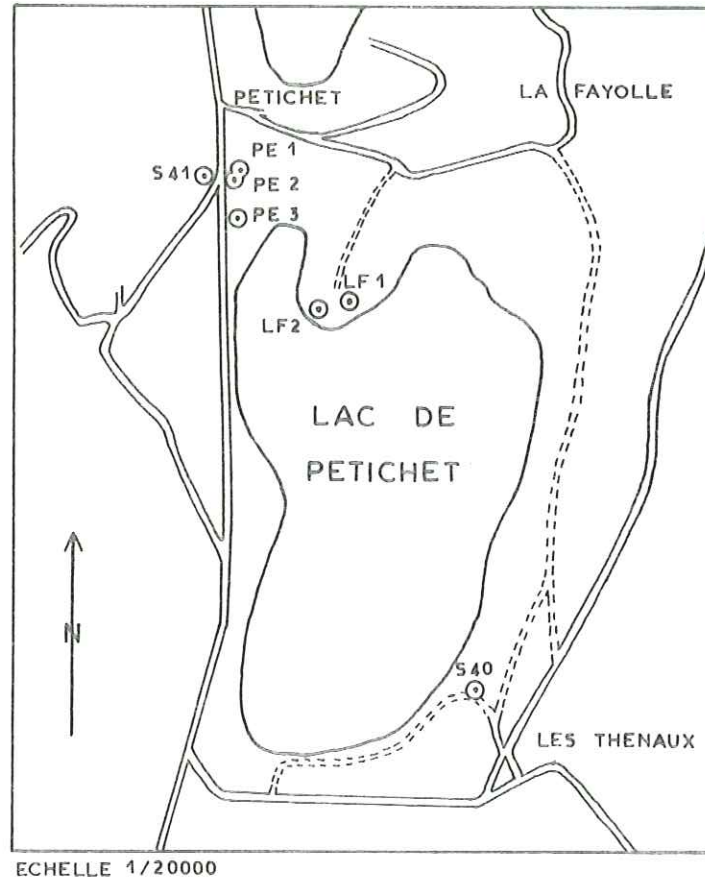


Fig 12 ETALONNAGES DE LA RESISTIVITE DU SUBSTRATUM

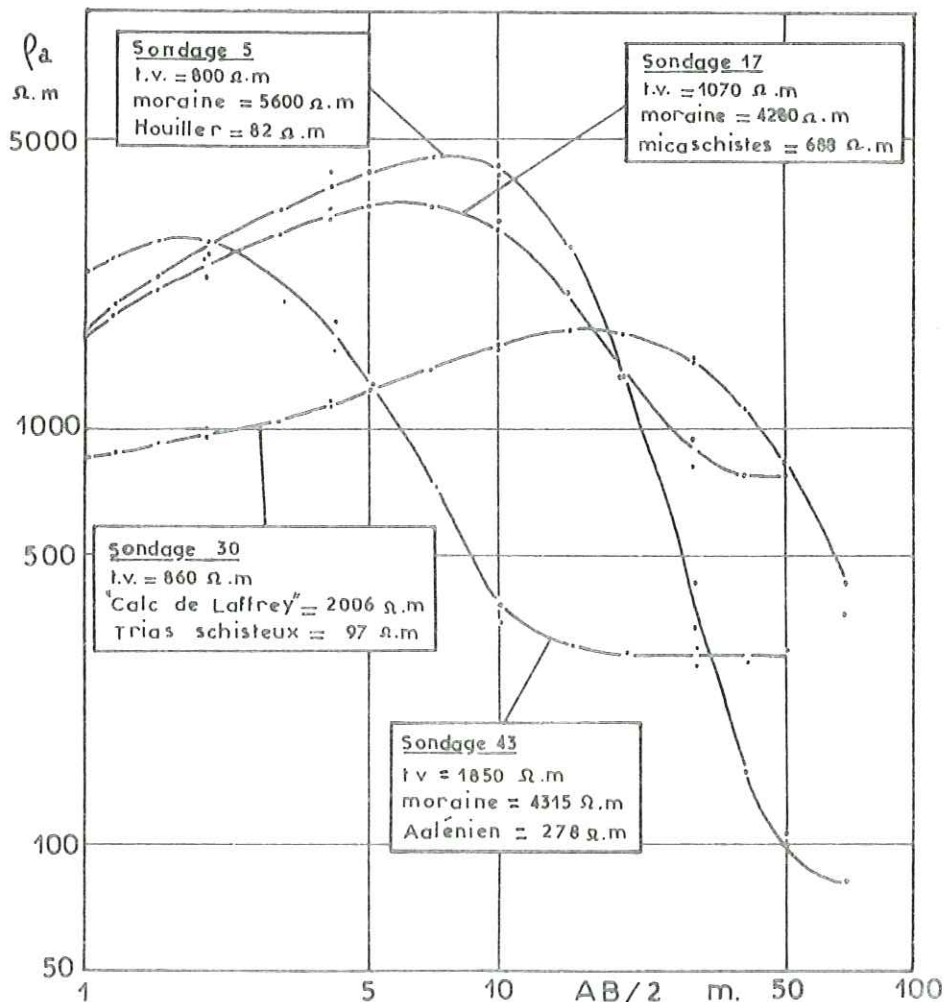
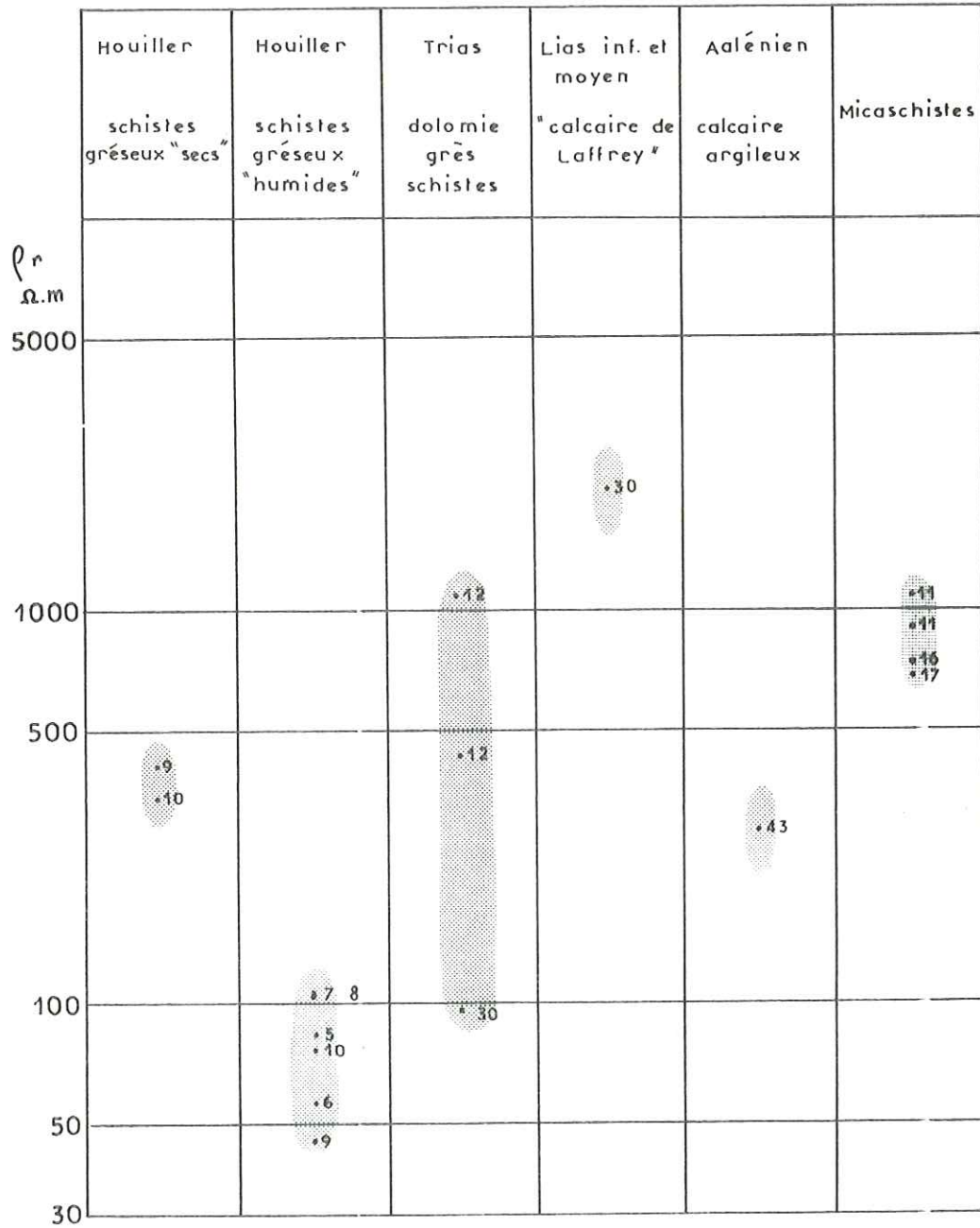


Fig. 13



RESISTIVITES REELLES DES TERRAINS
DU SUBSTRATUM

Les étalonnages des formations superficielles ont été plus délicats à réaliser; en effet les forages ne détaillent pas la nature de ces terrains, d'autre part, la résistivité propre de ces terrains dépend étroitement de la granulométrie et de la teneur en eau, deux paramètres que nous ne mesurons pas. En conséquence, les dénominations que nous donnons à ces terrains sont le résultat de nos observations de surface, ce sont les plus probables, mais elles peuvent être légèrement différentes dans le détail, notamment en ce qui concerne la granulométrie.

2.2.2.1. Résistivité des terrains du substratum

La figure N° 13 présente la résistivité réelle de chaque terrain, déterminée par les sondages électriques d'étalonnage. La figure n° 12 présente quelques courbes de résistivité apparentes de sondages d'étalonnages caractéristiques.

Le résultat des sondages permet d'établir le tableau suivant :

	résistivité spécifique	nombre de sondages
Micaschistes	680 - 1100 $\Omega.m$	4
Schistes gréseux hors nappe Houiller	330 - 400 $\Omega.m$	2
Schistes gréseux sous nappe Houiller	44 - 106 $\Omega.m$	6
Schistes du Trias	97 $\Omega.m$	1
Grès ? du Trias	430 $\Omega.m$	1
Dolomie du Trias	1100 $\Omega.m$	1
" Calcaire de Laffrey "	2000 $\Omega.m$	1
Calcaires argileux de l'Aalénien	278 $\Omega.m$	1

Tableau n° 4 Gammes de résistivités spécifiques des terrains du substratum

Au vu de ce tableaux on constate que des confusions peuvent avoir lieu entre certains terrains :

- entre les micaschistes et les dolomies du Trias,
- entre les schistes du Houiller hors nappe, les grès du Trias et les calcaires argileux de l'Aalénien.

Néanmoins l'étude géologique permet généralement de lever l'incertitude concernant la nature du substratum.

2.2.2.2. Résistivité des terrains de couverture

2.2.2.2.1. Les moraines

Elles se présentent à l'affleurement sous forme d'un matériau très hétérogène, sableux et caillouteux, plus ou moins argileux. Ce matériau a été très lavé par les eaux de ruissellement qui ont entraîné la fraction fine (argileuse) dans les creux de vallons.

La résistivité des moraines est donc très variée :

- moraines sablo-caillouteuses très lavées : 500 à 5 000 $\Omega.m$ (parfois localement plus),
- moraines argilo-caillouteuses où subsiste une partie de l'argile originelle : 100-150 à 500 $\Omega.m$,
- moraines argilo-sableuses peu lavées: 60 à 100-150 $\Omega.m$.

Remarque : deux échantillons de moraine ont fait l'objet d'une analyse granulométrique (terrain de résistivité 5 600 $\Omega.m$ du sondage 5 au sud-ouest des Allards, et terrain de résistivité 1 392 $\Omega.m$ du sondage 27 à Petichet). Les résultats des analyses granulométriques expliquent très bien les différences de résistivités ainsi que les valeurs élevées de celles-ci (voir paragraphe n° 2.3.).

2.2.2.2.2. Les alluvions de cône de déjection

Il s'agit essentiellement du cône de déjection du ruisseau des Moulins à l'aval de La Fayolle. Ce sont des sables argileux à galets, en majorité sédimentaires. Leur résistivité varie de 150 à 275 $\Omega.m$ (parfois localement plus).

2.2.2.2.3. Les dépôts lacustres

Il s'agit des dépôts argileux et tourbeux des lacs de Petichet et Laffrey, dans des zones marécageuses envahies périodiquement par des lacs. Leur résistivité varie de 60 à 85 $\Omega.m$.

2.2.2.2.4. Les éboulis et moraines repris par le ruissellement

Il s'agit d'un matériau très hétérogène, composé d'éboulis et de moraines plaquées sur les flancs du Grand Serre et étalé par le ruissellement sur le vallon du Pré de l'Épaulé. La gamme de résistivité de ce terrain est donc très étendue à cause du classement granulométrique subi de haut en bas : 1920, 700, 225 et 116 $\Omega.m$.

2.2.2.2.5. Le terrain superficiel

Il s'agit en général de la terre végétale dont la nature, la granulométrie et la teneur en eau sont extrêmement variables d'un point à un autre. La gamme de résistivité est très large (de 80 à 3 400 $\Omega.m$) avec cependant une valeur fréquemment comprise entre 300 et 400 $\Omega.m$. Ce terrain étant le premier rencontré dans un sondage, il ne peut y avoir de confusion avec les autres formations.

2.2.2.2.6. Les confusions possibles

Certains terrains de couverture peuvent être confondus avec le substratum, néanmoins en prolongeant l'extension du sondage électrique, on atteint en général un palier de résistivité, signe d'une formation très épaisse qui dans le cas étudié ne peut être que le substratum.

D'autre part, des confusions sont possibles entre les différents terrains de couverture et les ambiguïtés sont parfois difficiles à lever. L'hypothèse que nous présentons sur les coupes est la plus probable, compte tenu des données géologiques du secteur étudié.

2.2.3. RESULTATS DE L'ETUDE GEOPHYSIQUE

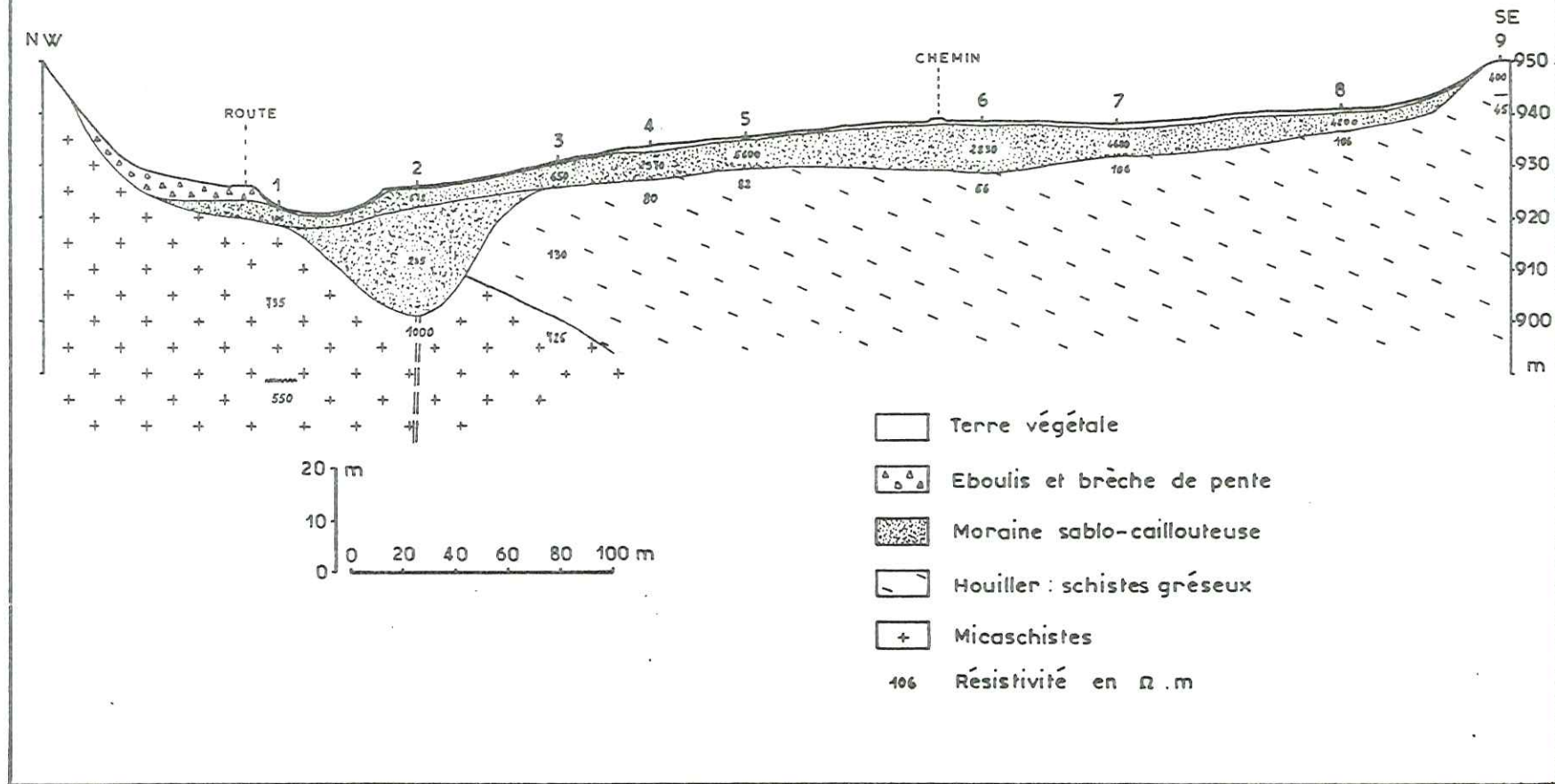
Les résultats de l'étude sont résumés sur huit coupes géologiques (fig. n° 14, 15, 16 et 17).

2.2.3.1. Coupe géologique 1 (Figure n° 14)

Cette coupe (nord-ouest, sud-est) est située entre le lac Mort et le lac de Laffrey. On distingue deux parties dans cette coupe.

Fig 14

COUPE GEOLOGIQUE -1-
sondages électriques 1 à 9



- La partie sud-est (sondages 4 à 9). Sous la terre végétale on atteint un terrain très résistant (2200 à 5600 $\Omega.m$), il s'agit d'un placage morainique plus ou moins lavé selon qu'il se situe sur un sommet ou dans un creux topographique du substratum. Son épaisseur est moyenne : de 4 à 9 mètres.

Sous ce matériel morainique, on atteint le substratum qui est constitué de schistes gréseux du Houiller.

- La partie nord-ouest (sondages 1 à 3).

Le sondage 1 rencontre après 3,4 m de moraine argileuse, le substratum constitué ici de micaschistes.

Le sondage 3 traverse 5 m de moraine, puis 26 m de schistes gréseux du Houiller avant d'atteindre les micaschistes.

Le sondage 2 traverse lui aussi le matériel morainique sur 3 mètres avant d'atteindre un terrain de résistivité moyenne (235 $\Omega.m$) qu'il traverse sur 21 m. Les micaschistes constituent le dernier terrain. Nous pensons que le terrain de résistivité 235 $\Omega.m$ est un matériel morainique remplissant un sillon glaciaire assez étroit. Ce sillon aurait été creusé dans une zone de moindre résistance mécanique du substratum, due à la présence de la faille N 30° qui sépare deux compartiments : à l'ouest un compartiment où le Trias repose directement sur les micaschistes, à l'est un compartiment où le Trias repose sur le Houiller. Il ne faut cependant, pas écarter totalement l'hypothèse selon laquelle le terrain à 235 $\Omega.m$ ne serait en fait que des micaschistes broyés dans la zone fracturée.

2.2.3.2. Coupes géologiques 2, 3 et 4 (Figure n° 15)

2.2.3.2.1. Coupe géologique 2

Cette coupe est-ouest est située entre le lac de Laffrey et le lac de Petichet. Elle met en évidence la présence de deux larges sillons glaciaires nord-sud, séparés par une butte de micaschistes qui ont résisté à l'érosion.

Le flanc ouest du sillon occidental est constitué de " Calcaire de Laffrey " et de Trias reposant sur une grande épaisseur de Houiller comme le montrent le sondage 30 et le forage PE2.

Le substratum du sillon occidental n'a été atteint que par le sondage 13, il s'agit de micaschistes.

La butte de micaschistes est recouverte, au niveau de la coupe, par environ 8 mètres de placage morainique, plus résistant en surface qu'en profondeur où l'entraînement des argiles a été moins intense.

Le substratum du sillon oriental a été atteint par tous les sondages. Il s'agit : à l'ouest (S19 et S20) , d'un terrain très résistant (2280 Ω m - 1635 Ω m) que nous avons interprété comme étant du " Calcaire de Laffrey ", à l'est d'un terrain moins résistant (240 - 420 Ω .m) que nous pensons être des calcaires argileux de l'Aalénien.

Le remplissage de ces sillons est très hétérogène.

Le sillon ouest est rempli par le matériel morainique du vallum externe de Petichet, dont la résistivité varie de 360 à 470 Ω .m, avec une passée plus argileuse à 120 Ω .m.

Le sillon possède un remplissage plus complexe où nous avons distingué 3 formations :

- au fond une formation de résistivité faible
66-115 Ω .m,
- au-dessus une formation plus résistante
148-196 Ω .m,
- puis une formation de faible résistivité
59- 84 Ω .m.

L'interprétation que nous en donnons est la suivante : le terrain le plus profond serait un matériel morainique argileux appartenant au vallum externe, le terrain intermédiaire serait constitué par les alluvions du ruisseau des Moulins, le dernier terrain est formé par les dépôts d'argiles lacustres du lac de Petichet.

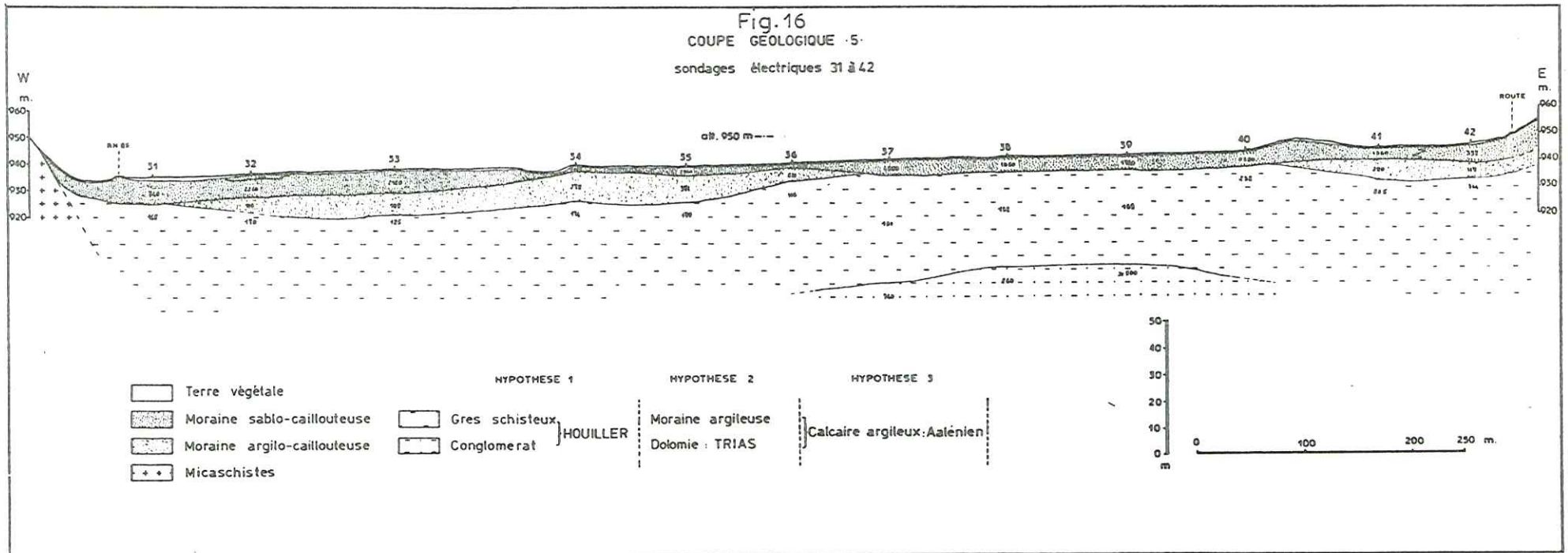
2.2.3.2.2. Coupe géologique 3

Cette coupe a une orientation nord-sud, elle va du lac de Petichet à celui de Laffrey en passant au travers des deux vallums morainiques de Petichet. Le substratum a été atteint par le sondage 26 à un peu moins de 20 m de profondeur.

Le sondage 27 traverse l'arc morainique interne au matériel très résistant pour rencontrer ensuite le matériel morainique moins résistant de l'arc externe.

Le sillon ouest se prolonge donc en direction du lac de Laffrey mais son remplissage, moins épais au nord qu'au sud, devient

Fig. 16
 COUPE GÉOLOGIQUE 5
 sondages électriques 31 à 42



moins résistant du sud au nord, donc moins perméable.

2.2.3.2.3. Coupe géologique 4

Cette coupe est-ouest est parallèle à la coupe 2, mais elle est située plus au nord. Le substratum n'a été atteint que par le sondage 24, il s'agit de calcaires argileux de l'Aalénien. Les sondages 28 et 29 traversent le matériel morainique de l'arc externe, très résistant en surface (1 200 - 2 700 $\Omega.m$), moins résistant en profondeur (130-250 $\Omega.m$).

Le sillon est se prolonge donc lui aussi vers le nord, cependant sa forme exacte n'a pu être déterminée, le substratum n'ayant pas été atteint.

2.2.3.3. Coupe géologique 5 (figure n° 16)

Cette coupe est-ouest est située entre le lac de Petichet et celui de Pierre-Châtel.

Tous les sondages rencontrent à une profondeur de 5 à 18 mètres un terrain d'une résistivité variant de 115 à 230 $\Omega.m$ et même 344 $\Omega.m$. Sous ce terrain les sondages 37 à 39 ont rencontré un terrain plus résistant à environ 40 mètres de profondeur.

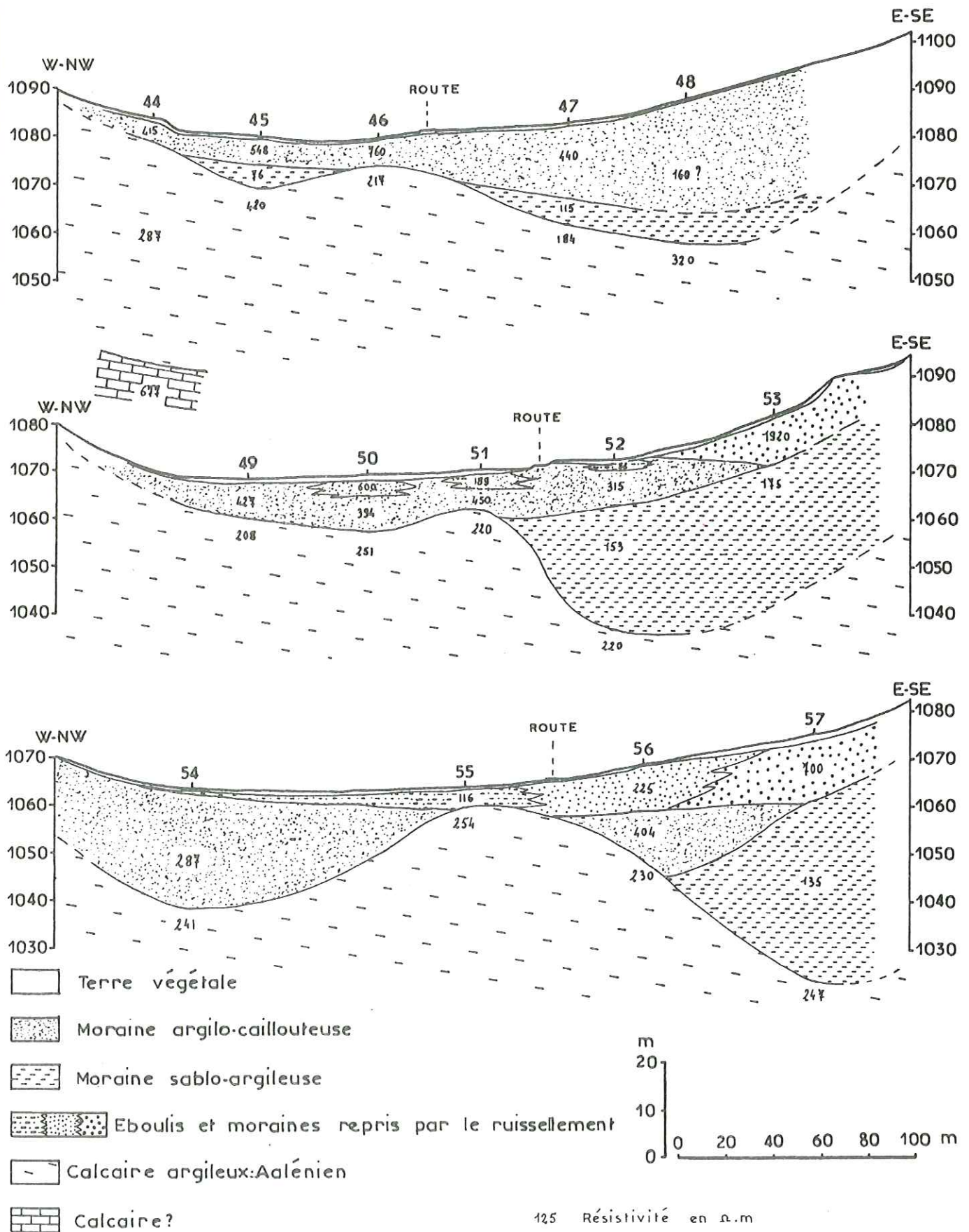
La nature de ces deux terrains est difficile à définir, il peut s'agir :

- de grès schisteux surmontant le conglomérat de base,
- de moraine argilo-sableuse surmontant du Trias ou de l'Aalénien ,
- des calcaires argileux de l'Aalénien.

Nous pensons que la première hypothèse est la bonne : en effet dans la partie sud-ouest du lac de Petichet, le conglomérat du Houiller affleure à 925 mètres d'altitude, or le sondage 31 rencontre un terrain de résistivité 165 $\Omega.m$, à la même altitude. D'autre part le forage S 40 rencontre le substratum à environ 923 mètres d'altitude ce qui, dans cette hypothèse, est peu différent de l'altitude du substratum au niveau des sondages 38 et 39.

Les variations de résistivité de ce terrain sont probablement dues à des variations de pendage et de nature pétrographique.

FIG. 17
 COUPES GEOLOGIQUES · 6 · 7 · 8 ·
 sondages électriques 44 à 57



Au-dessus de ce substratum Houiller, se trouvent les dépôts glaciaires de l'arc morainique qui sépare les deux lacs; ces dépôts sont très hétérogènes comme l'indiquent les résistivités qui varient de 108 à 5 350 Ω .m.

2.2.3.4. Coupes géologiques 6, 7 et 8 (voir figure n° 17)

Ces coupes géologiques est-ouest se situent dans le vallon du Pré de l'Epaule, entre La Coirelle et Cholonge.

Le substratum de calcaire argileux de l'Aalénien a été atteint par tous les sondages à des profondeurs variables, mettant ainsi en évidence la présence de deux sillons parallèles de direction nord-sud, séparés par un drumlin à ossature d'Aalénien. Le fond de ces deux sillons s'abaisse régulièrement du nord au sud :

	Coupe 6	Coupe 7	Coupe 8
sillon ouest	1 069 m	1 057 m	1 039 m
sillon est	1 057 m	1 036 m	1 023 m

Tableau n° 5 Altitude du fond des sillons glaciaires entre La Coirelle et Cholonge.

Le remplissage de ces deux sillons est assez complexe.

Sur toutes les coupes on trouve en profondeur un matériau assez peu résistant (70 à 175 Ω .m), il s'agit probablement d'un dépôt morainique à dominante argileuse; il est surmonté par une formation plus résistante (300 - 700 Ω .m) qui pourrait être un matériau morainique plus caillouteux.

Au-dessus de ces deux formations on trouve sur les coupes 7 et 8, des dépôts de résistivités variables (de 1 920 ou 700 Ω .m à l'est, à 116 Ω .m à l'ouest); nous pensons qu'il s'agit d'éboulis et de moraines repris par le ruissellement et étalés sur le vallon du Pré de l'Epaule sous forme de vastes cônes de déjection mixte.

2.2.4. CONCLUSION A L'ETUDE GEOPHYSIQUE

L'étude géophysique que nous venons de présenter a permis de déterminer la forme et la nature du substratum entre les lacs matheysins. Entre les lacs de Petichet et Laffrey, le substratum est entaillé par deux sillons

glaciaires parallèles dont le remplissage morainique est susceptible de permettre une communication entre les deux lacs.

Entre le lac Mort et celui de Laffrey il semble qu'il existe un petit sillon glaciaire mais sa section est assez réduite.

Il n'existe pas de sillon glaciaire entre le lac de Petichet et celui de Pierre-Châtel.

D'autre part cette étude a mis en évidence la présence de deux sillons glaciaires parallèles dans le substratum du vallon du Pré de l'Épaulé. Le remplissage de ces deux sillons, essentiellement morainique, est susceptible de posséder une nappe phréatique assez importante.

En résumé, l'étude géophysique a précisé la morphologie du substratum dans les zones où les dépôts quaternaires la masquaient.

2.3. ÉTUDE DES FORMATIONS QUATERNAIRES

2.3.1. INTRODUCTION

2.3.1.1. Historique

La grande extension des formations quaternaires dans la région étudiée ainsi que la morphologie glaciaire typique et bien conservée, ont attiré depuis longtemps l'attention des géologues alpins tels P. LORY, M. GIGNOUX, L. MORET et plus récemment J. HAUDOUR et J. SARROT-REYNAULD. Enfin, il y a quelques années, G. MONTJUVENT présentait, dans un mémoire sur le quaternaire du bassin du Drac, la synthèse de ses travaux qui éclairait d'un jour nouveau la géologie du Quaternaire régional. Notre étude du Quaternaire ne fait que préciser certains détails des travaux antérieurs.

2.3.1.2. Méthode d'étude

Notre travail s'est volontairement limité à une étude morphologique de détail; en effet les études antérieures avaient montré que l'agent de dépôt était uniquement le glacier de la Romanche, des études sédimentologiques classiques n'auraient donc pas permis une différenciation nette à l'intérieur des formations quaternaires. D'autre part la Matheysine, vallée morte suspendue, a conservé d'une manière remarquable la morphologie du dernier

retrait glaciaire, et l'origine des dépôts était donc clairement définie par celle-ci.

Notre approche des formations quaternaires peut se résumer en quelques phases :

- une première reconnaissance du terrain définissant les grands traits morphologiques,
- une étude fine des photographies aériennes en liaison avec le fond topographique au 1/20 000,
- une seconde campagne de terrain vérifiant les hypothèses émises. Parallèlement à ce travail une étude géophysique précisait la morphologie du substratum (voir chapitre 2.2.).

2.3.2. MORPHOLOGIE DU SUBSTRATUM

2.3.2.1. Origine de la Matheysine

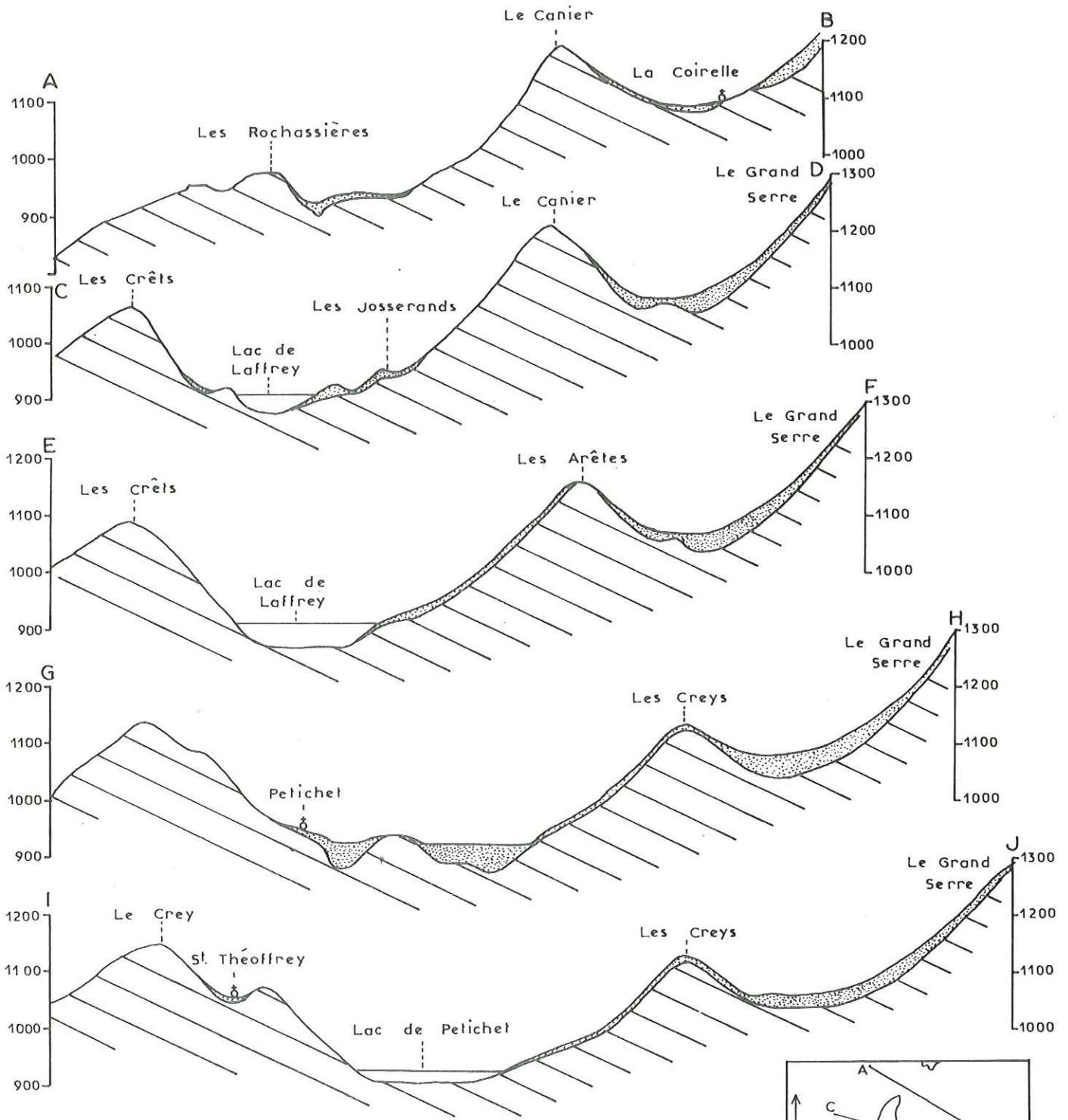
Le plateau matheysin se présente comme une vaste dépression s'allongeant du nord au sud entre la Romanche et le Drac, mais située en altitude nettement au dessus de ces deux rivières.

Ce large sillon aurait une origine fluviale très ancienne, miocène et peut-être même oligocène d'après G. MONJUVENT. Cet auteur envisage en effet, qu'à l'Oligocène une pré-Romanche, issue du Pelvoux, empruntait la Matheysine pour aller se jeter dans le golfe du Dévoluy au sud : la structure synclinale de la Matheysine entre deux horsts de cristallin aurait d'ailleurs facilité l'installation du cours d'eau dans cette zone. Cette pré-Romanche aurait apporté le matériel détritique constituant la molasse rouge aquitanaïenne du Dévoluy.

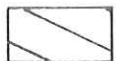
Cette pré-Romanche aurait continué à couler à travers la Matheysine durant le Miocène rejoignant vers La Mure, le Drac (augmenté de la Durance).

Ce serait au Miocène terminal que le réseau hydrographique aurait acquis son identité actuelle, la Matheysine devenant ainsi une vallée morte suspendue qui ne serait plus empruntée que par les diffluences des glaciers de la Romanche et du Drac durant le Quaternaire. Ces diffluences successives du glacier de la Romanche ont chacune contribué au façonnement de la Matheysine, mais c'est probablement au Riss que se sont élaborés les traits principaux de la morphologie actuelle du substratum.

Fig.18 MORPHOLOGIE DU SUBSTRATUM
Coupes séries

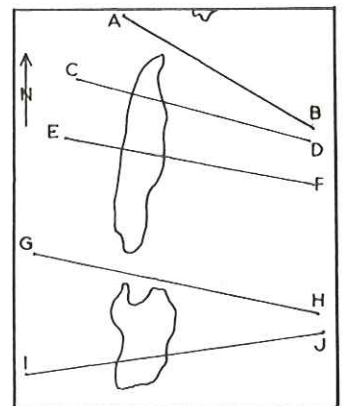


 Formations quaternaires

 Substratum

ECHELLE VERTICALE 1/10000

100 m
0
ECHELLE HORIZONTALE 1/25000
1 km



2.3.2.2. Morphologie transversale du nord de la Matheysine

Le nord de la Matheysine présente une large auge glaciaire allant du Connexe à l'ouest, au Grand Serre à l'est; dans le détail on note la présence de deux alignements de collines de directions méridiennes interrompant la régularité du profil transversal de la vallée. A l'ouest, un alignement de collines part du village de Laffrey et se termine à la Pierre Percée au sud; l'autre alignement à l'est part du hameau des Bigeards et se poursuit vers le sud jusqu'au Serre Bouvet. Ces alignements, dont certains ont parfois été décrits comme des moraines latérales, sont en fait des drumlins, possédant une ossature rocheuse visible en de nombreux points sous leur couverture de dépôts morainiques (voir la carte géologique).

La figure n° 18 présente des coupes sériées à travers le terrain étudié mettant en évidence la présence de ces drumlins et leur évolution du nord au sud.

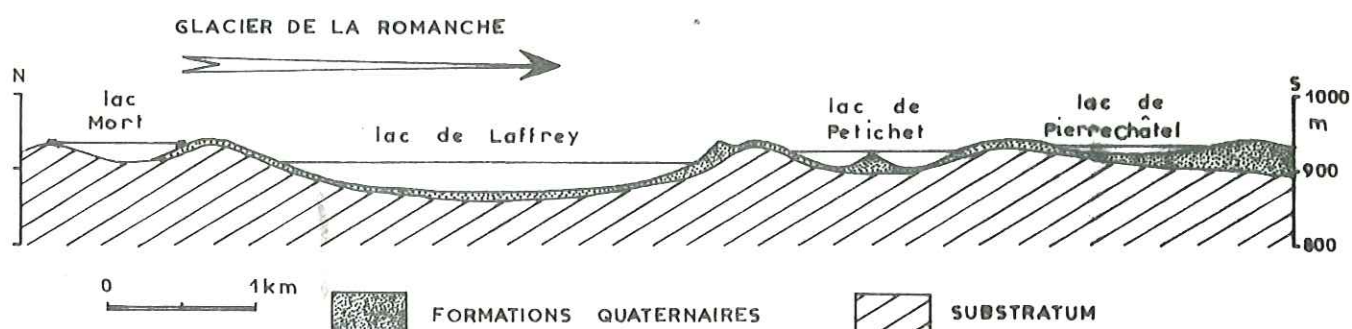
Deux sillons glaciaires secondaires séparés par un drumlin ont été découverts grâce à la prospection géophysique dans le vallon du Pré de l'Epaule; leur orientation est parallèle aux axes des drumlins principaux.

Les sillons et drumlins auraient été imprimés dans le substratum avant le Wurm; en effet, les moraines würmiennes se moulent par endroit sur les drumlins ce qui suppose ceux-ci préexistants. C'est donc probablement le glacier rissien de la Romanche qui a modelé le substratum du nord de la Matheysine tel qu'il apparaît actuellement.

2.3.2.2. Morphologie longitudinale du nord de la Matheysine

Une coupe longitudinale passant par les quatre lacs matheysins révèle des particularités morphologiques intéressantes. Le substratum présente une série de verrous et d'ombilics, ces derniers abritant chacun un des lacs matheysins (voir figure n° 19).

Fig. 19 COUPE LONGITUDINALE DU NORD DE LA MATHEYSINE



Le surcreusement atteint au moins 60 mètres dans l'ombilic occupé par le lac de Laffrey. Cette coupe montre d'autre part que les lacs matheysins, souvent présentés comme des exemples de lacs de barrages morainiques, sont en fait (sauf le lac de Pierre-Châtel) des lacs occupant des surcreusements glaciaires séparés par des verrous. Les vallums morainiques ne font qu'obturer les sillons glaciaires nord-sud qui entaillent certains de ces verrous.

La nature de ces verrous est variable, il peut s'agir soit de micaschistes (nord du lac Mort et nord du lac de Petichet), soit de schistes gréseux du Houiller (nord du lac de Laffrey et peut-être nord du lac de Pierre-Châtel).

2.3.3. Morphologie et lithologie des formations quaternaires

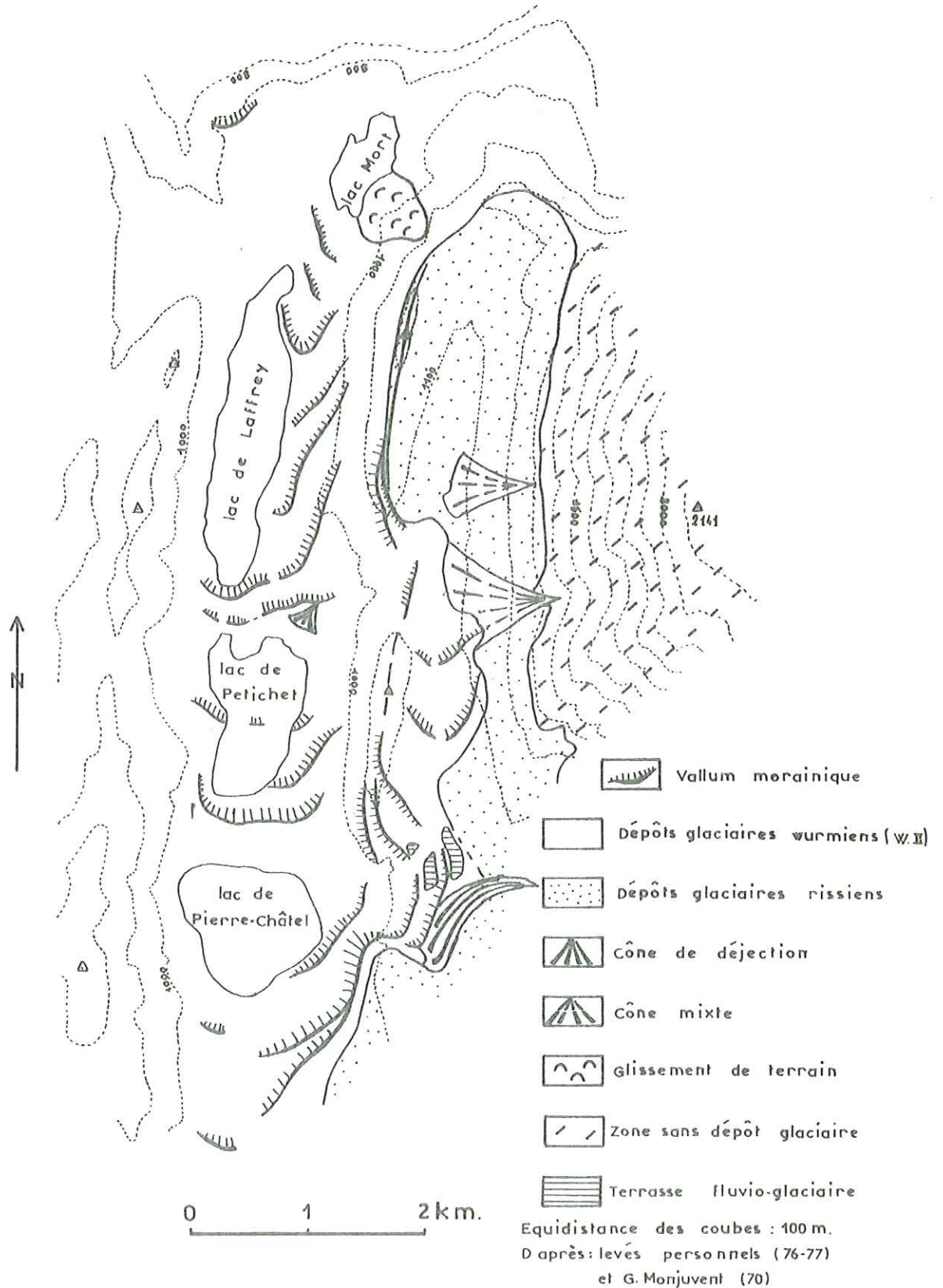
Les formations quaternaires sont essentiellement représentées par les dépôts glaciaires et fluvioglaciaires que nous étudierons en premier. Nous verrons ensuite les formations de versant, les cônes de déjection et les dépôts lacustres qui sont peu importants dans le secteur étudié.

La figure n° 20 présente une carte morphologique au 1/50 000 sur laquelle le substratum n'a pas été figuré pour ne pas la surcharger.

2.3.3.1. Les formations glaciaires et fluvioglaciaires

La Matheysine, vallée morte suspendue très au-dessus du lit des rivières actuelles, a été soustraite à l'action des érosions post-glaciaires, ce qui a permis une étude morphologique fine.

Fig. 20
 LES LACS DU PLATEAU MATHEYSIN
 CARTE MORPHOLOGIQUE
 1/50000



2.3.3.1.1. Les moraines frontales

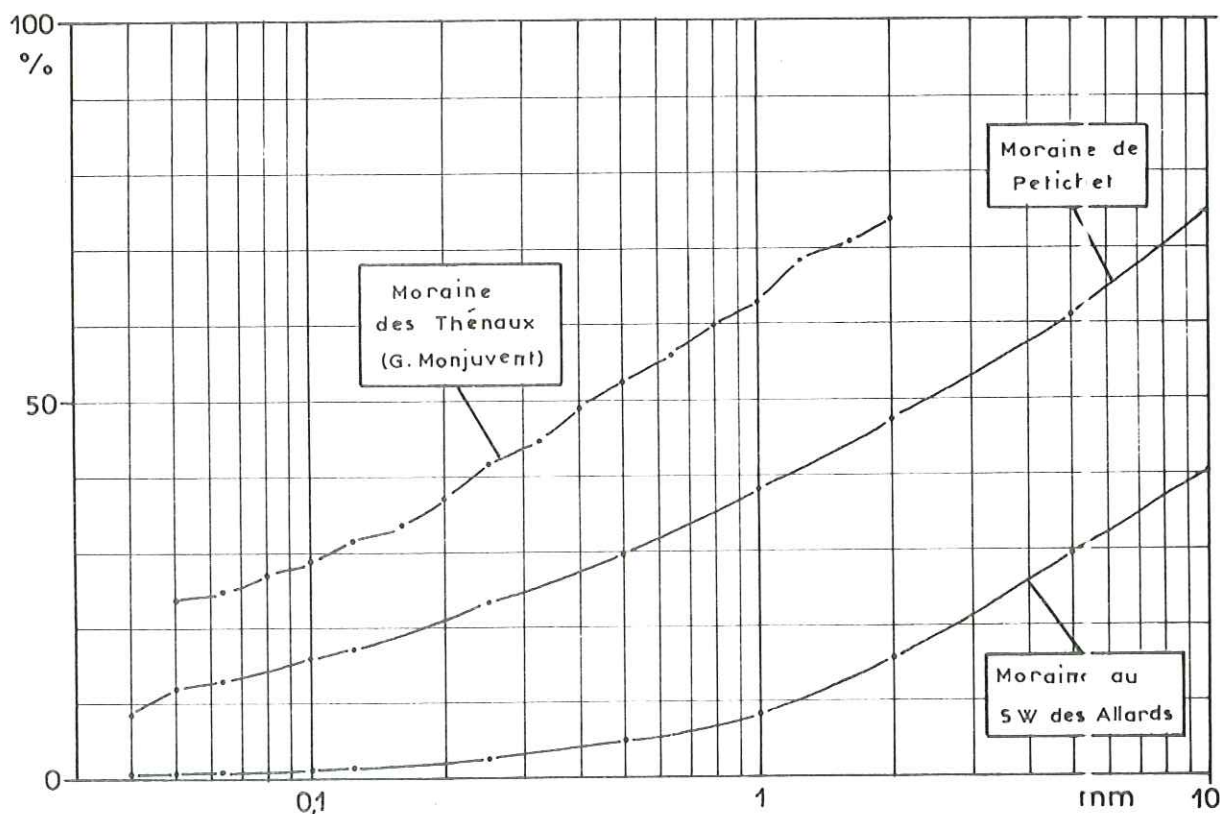
Du lac Mort au village de Pierre-Châtel, il est possible de distinguer toute une série de moraines soit sous forme de beaux vallums frontaux réguliers à concavité nord, soit sous forme de bouchons plus ou moins informes.

- Lithologie. Ces moraines sont sableuses et caillouteuses avec très peu d'argile, ce qui s'explique par la nature essentiellement cristalline du bassin versant de la Romanche. Les gros éléments sont d'ailleurs uniquement cristallins (granite du Pelvoux, gneiss, amphibolites).

Nous avons prélevé huit échantillons de moraines à au moins 50 cm de profondeur (talus de routes rafraichis, carrières, etc.) pour s'affranchir de l'altération superficielle. Des calcimétries ont été effectuées sur la fraction fine de ces échantillons (inférieure à 1mm), elles n'ont pas permis de détecter la présence de CaCO_3 ($\text{CaCO}_3 < 0,5 \%$). Cette particularité aura des conséquences assez importantes au niveau de l'hydrochimie des sources circulant dans ces formations, comme nous le verrons plus loin.

Deux analyses granulométriques que nous avons effectuées, l'une sur la moraine située au sud-ouest des Allards, l'autre sur la moraine de Petichet, nous indiquent les caractéristiques principales de ces moraines (voir figure n° 21).

Fig. 21 GRANULOMETRIE - COURBES DE FREQUENCE CUMULEE



	1 ^{er} quartile	médiane	3 ^{ème} quartile	% > 10 mm
Les Allards	3,8 mm	> 10 mm	>> 10 mm	60
Petichet	0,3 mm	2,5 mm	10 mm	25

Tableau n° 6 . Principales caractéristiques granulométriques de deux moraines matheysines.

Ces deux analyses confirment les observations de terrain à savoir que le matériel morainique est très hétérométrique, à tendance sablo-caillouteuse. Il semblerait d'autre part, qu'un certain lavage avec entraînement d'argile ait eu lieu, notamment dans les zones les plus élevées topographiquement, comme nous l'avons déjà souligné à propos de l'étude géophysique.

Les plus gros éléments apparaissent généralement sous forme de blocs erratiques dont le volume peut atteindre jusqu'à 30 m³ (Les Essards).

- Morphologie. Les moraines frontales les mieux conservées sont celles qui ferment vers le sud les lacs de Laffrey, Petichet et Pierre-Châtel. Leur forme générale est celle d'un demi-ovale à convexité tournée vers l'aval; elles sont fréquemment au nombre de deux ou trois, groupées en bourrelets parallèles successifs, dont la hauteur est faible, 10 à 30 mètres. Elles s'appuient souvent sur les verrous rocheux que nous avons décrits précédemment. Elles sont toutes rompues au milieu par un chenal radial qui permettait l'écoulement des eaux de fonte du glacier; ces chenaux ont été ensuite réaménagés par les cours d'eau actuels.

Nous avons ainsi pu détecter sur le secteur étudié , un certain nombre de moraines frontales:

- 3 au sud du lac de Pierre-Châtel,
- 2 au sud du lac de Petichet,
- 1 au milieu du lac de Petichet dont la butte sous-lacustre est le témoin,
- 2 au sud du lac de Laffrey,
- 3 au sud du lac Mort,
- 2 dans le vallon entre Cholonge et Villard St Christophe.

Ces vallums morainiques sont plus ou moins bien conservés mais leur existence est indubitable, et ils se raccordent fréquemment sur les versants aux moraines latérales.

2.3.3.1.2. Les moraines latérales

Lithologie. Nous ne reviendrons ici ni sur la nature pétrographique, ni sur la granulométrie de ces formations, qui sont identiques à celles des moraines frontales.

Nous noterons cependant qu'on observe parfois, à l'affleurement, sur les versants externes des vallums latéraux, une légère ébauche de stratification signe d'une certaine action de l'eau. On observe d'autre part dans la masse même de la moraine, la présence de lentilles de formes irrégulières dont les limites sont plus ou moins nettes, et dont le matériel très hétérométrique tranche sur la moraine typique. Nous pensons qu'il s'agit là des dépôts de petits chenaux s'écoulant entre la glace et la moraine, recouverts postérieurement par des dépôts morainiques typiques.

Ces quelques observations soulignent l'importance des circulations à la marge des glaciers soit sur le versant interne du vallum latéral sous forme de petits chenaux, soit sur le versant externe de la moraine où un chenal marginal plus important remanie les dépôts glaciaires.

Morphologie. On observe, sur les versants dominant les lacs matheysins, une série de vallums latéraux plus ou moins bien conservés selon la pente des versants sur lesquels ils sont appliqués; ils sont parfois réduits à un simple placage jalonné par un chaos de blocs erratiques qui n'ont pas été entraînés par le ruissellement.

Les moraines latérales sont plus développées sur les versants situés à l'est des lacs que sur ceux situés à l'ouest, où ils sont réduits à de minces placages argileux sujets à de fréquents glissements de terrains. Il est possible de voir dans cette différence un effet de la raideur du versant ouest. Néanmoins, nous pensons qu'elle est principalement originelle; en effet, la diffluence glaciaire aurait déposé sur la rive gauche la moraine latérale du glacier principal, alors que la glace qui longeait la rive droite de la diffluence ne possédait pas de moraine à déposer puisqu'elle provenait des zones médianes du glacier de la Romanche.

La moraine latérale la plus élevée est un placage recouvrant le sommet du drumlin du Canier (il s'agirait d'une moraine

rissienne comme nous le verrons plus loin). D'autres vallums latéraux bien conservés s'observent facilement tels : celui au nord de La Fayolle qui se raccorde au système frontal de Petichet et celui au nord de La Bergogne qui se rattache à un lambeau de moraine frontale à la Bergogne même. Quelques autres vallums latéraux sont encore visibles dans le secteur des Josserands, mais le plus bel ensemble de moraines latérales successives est celui qui se raccorde au système frontal de Pierre-Châtel. Il est possible d'observer en effet, trois vallums bien conservés qui se développent largement dans la dépression à l'ouest du Villard St Christophe. C'est à l'extérieur de chacun de ces vallums latéraux que s'observe le dispositif classique : chenal marginal - terrasse fluvioglaciaire.

2.3.3.1.3. Les terrasses fluvioglaciaires et les chenaux marginaux

Les terrasses fluvioglaciaires, les chenaux marginaux et les moraines latérales sont les trois éléments d'un dispositif, aujourd'hui classique, depuis les travaux de M. GIDON, G. MONJUVENT et E. STEINFATT en 1968 sur la région du seuil de Rives.

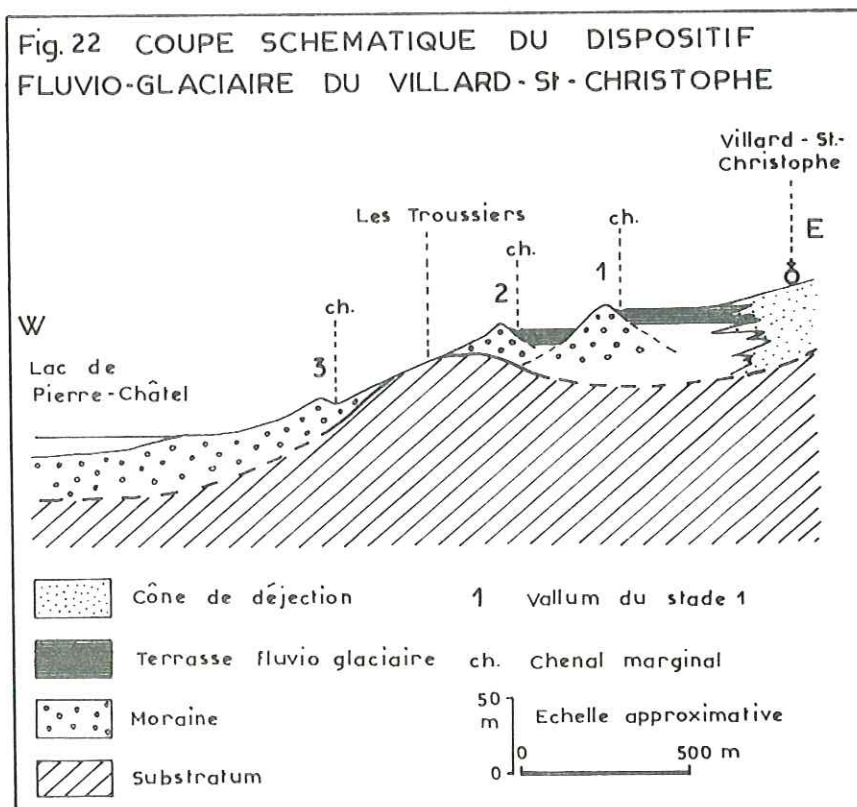
Ce système est parfois incomplet (absence de terrasse), c'est le cas des moraines de La Bergogne et de La Fayolle où on observe simplement un chenal marginal à l'extérieur du vallum.

Le système est par contre complet lorsque les conditions topographiques permettent au dispositif de s'étaler comme ce fut le cas à l'ouest du Villard St Christophe (voir figure n° 22).

En effet la moraine la plus externe, en venant buter contre la crête du Serre, a créé une dépression entre le vallum et Villard St Christophe; celle-ci s'est comblée par les apports conjugués de la Jonche et du chenal marginal dont on devine encore le tracé. La terrasse fluvioglaciaire ainsi constituée, se présente comme une surface plane légèrement pentée vers l'aval (sud).

Ce dispositif s'est produit une seconde fois à l'extérieur du deuxième arc morainique où s'est édifiée une seconde terrasse, en contrebas de la précédente d'une dizaine de mètres.

Le chenal marginal est bien visible surtout à l'aval où il s'est plus tard encaissé dans la terrasse.



Nous n'avons pas trouvé d'affleurement propice à une observation lithologique de ces terrasses, on peut néanmoins noter l'origine polygénique de ces éléments (cristallin et sédimentaire), ainsi que l'absence apparente de gros éléments.

2.3.3.2. Les dépôts quaternaires non glaciaires

Ces formations sont peu développées et ne présentent pas un grand intérêt du point de vue de la géologie; elles jouent cependant un rôle non négligeable au niveau des circulations souterraines.

2.3.3.2.1. Les cônes de déjection mixtes

Il s'agit de cônes issus de la combe de la Clapelle et de la combe de Chaupin. Ils résultent de l'épandage d'éboulis et de moraines par des ruissellements torrentiels plus ou moins temporaires et par des avalanches. Ils présentent par endroit un aspect de brèche de pente, des dépôts de CaCO_3 ayant cimenté ces lits régulièrement stratifiés.

Le cône issu de la combe de Chaupin, semble contemporain de la moraine frontale des Vorzes, ses dépôts s'intriquant avec celle-ci, mais il a dû continuer à fonctionner après le départ du glacier.

2.3.3.2.2. Les cônes de déjection torrentiels

Il s'agit du cône de déjection de la Jonche à Villard St Christophe, et de celui du ruisseau des Moulins à La Fayolle. Le dernier est sub-actuel alors que celui de la Jonche semble contemporain du stationnement du glacier de la Romanche sous le Villard St Christophe; après le retrait du glacier, la Jonche s'est légèrement encaissée dans ses propres alluvions.

2.3.3.2.3. Les éboulis

Il s'agit essentiellement de la nappe d'éboulis qui ceinture le flanc ouest du Grand Serre. Ils sont régulièrement lités, comportant une alternance de lits grossiers et de lits plus fins, ce qui est le signe d'une origine cryoclastique. Ils sont actuellement stabilisés et colonisés par la végétation.

2.3.3.2.4. Les dépôts lacustres et marécageux

Ces dépôts se sont constitués dans les dépressions laissées par le retrait du glacier. Ils sont lacustres dans les zones où le niveau des lacs est supérieur à ces dépressions, dans les autres cas il s'agit de tourbières.

Certaines de ces tourbières ont fait l'objet d'études palynologiques ou de datations au C_{14} (voir la figure N° 23 qui situe ces tourbières).

- La tourbe du lac Mort (coordonnées Lambert $x = 872,05$, $y = 309,20$, $z = 927$). Elle est située dans le lac Mort et ne fut découverte qu'à la faveur d'une vidange temporaire de celui-ci. Elle repose sur une moraine et est recouverte par du matériel ébouleux et morainique, glissé des hauteurs avoisinantes. La datation de l'échantillon au C_{14} donne un âge de $9\ 830 \pm 230$ ans BP (G. MONJUVENT 1969), ce qui fait remonter sa formation à l'époque pré-boréale (8 500 à 10 500 BP).

- La tourbière des Grandes Sagnes (coordonnées Lambert $x = 872,000$, $y = 303,350$, $z = 940$).

Elle se situe à quelques centaines de mètres au sud de Thénaux, à l'extérieur de l'arc morainique qui sépare le lac de Petichet du lac de Pierre-Châtel. Un sondage a rencontré 40 cm de tourbe brune fibreuse puis 40 cm d'argile grise micacée reposant sur la moraine caillouteuse de l'arc des Thénaux. Les argiles grises pourraient correspondre à un dépôt lacustre du lac de Pierre-Châtel à une époque où il s'étendait plus au nord. L'étude palynologique de cette tourbe (J.BECKER 1952) replacée dans une chronologie absolue, donne un âge de - 11 000 à - 12 000 ans BP, ce qui fait remonter sa formation à l'époque tardiglaciaire et plus précisément à l'époque sub-arctique.

- La tourbière de la ferme du lac (coordonnées Lambert $x = 871,450$, $y = 301,850$, $z = 931$ m).

Cette tourbière située en rive droite de l'exutoire du lac de Pierre-Châtel à 2,1 m d'épaisseur. Son étude palynologique (J.BECKER 1952) révèle une histoire plus récente que la précédente (- 4 500 ans.B.P.

SCHEMAS DE SITUATION DES TOURBIERES DATEES

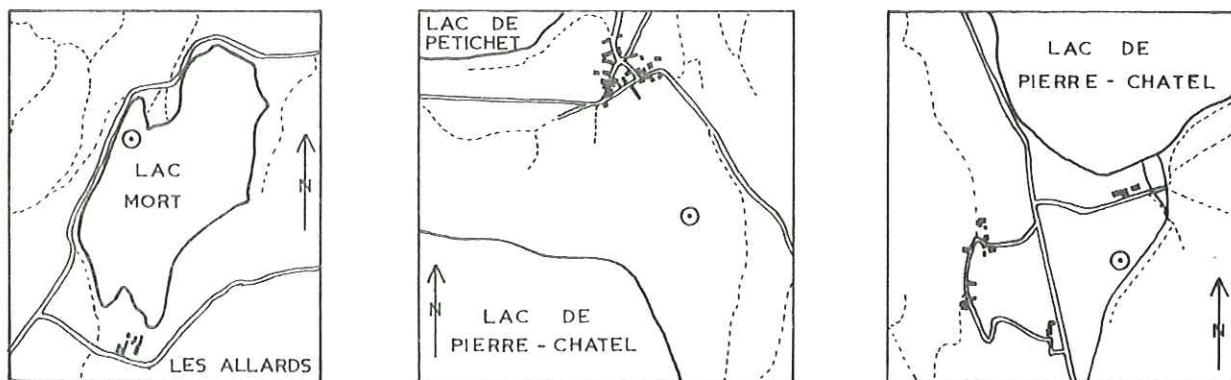


Fig. 23 Echelle: 1/25 000 ○ Tourbière

2.2.3.2.5. Les glissements de terrains

Le plus important est celui qui affecte le versant est du lac Mort, au nord des Allards. Il forme une vaste loupe, constituée de schistes du Houiller, de Calcaire de Laffrey et de matériel morainique, qui s'avance dans le lac Mort. Sa morphologie très fraîche semble indiquer qu'il est postérieur au retrait du glacier qui avait dû saper la base du versant, et provoquer ainsi le glissement après son retrait.

Un autre glissement affecte un panneau de calcaire liasique du Grand Serre dans la combe de Chaupin.

Enfin quelques glissements superficiels

s'observent sur les pentes autour de La Coirelle, affectant des placages morainiques argileux

2.3.3.3. Comportement hydrologique des formations quaternaires

- Les moraines latérales et frontales sont, comme nous l'avons vu, très hétérométriques et présentent en général une forte proportion sablo-caillouteuse; elles sont donc pour la plupart extrêmement perméables, ce qui explique le très faible développement du réseau hydrographique dans le secteur étudié.

La présence à l'intérieur de ce matériau morainique de lentilles, dont la granulométrie diffère de celle de la moraine, joue un rôle non négligeable dans les circulations, ces lentilles se comportent en effet comme des drains à l'intérieur des moraines lorsque leur perméabilité est supérieure à celle de ces dernières.

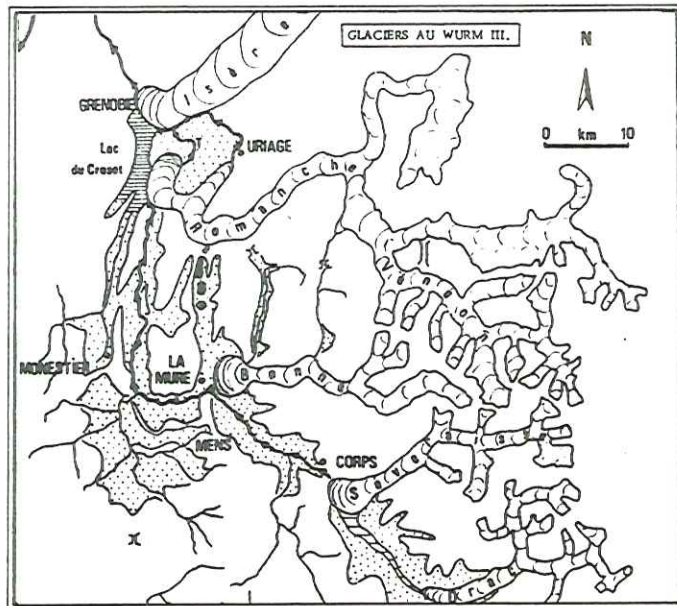
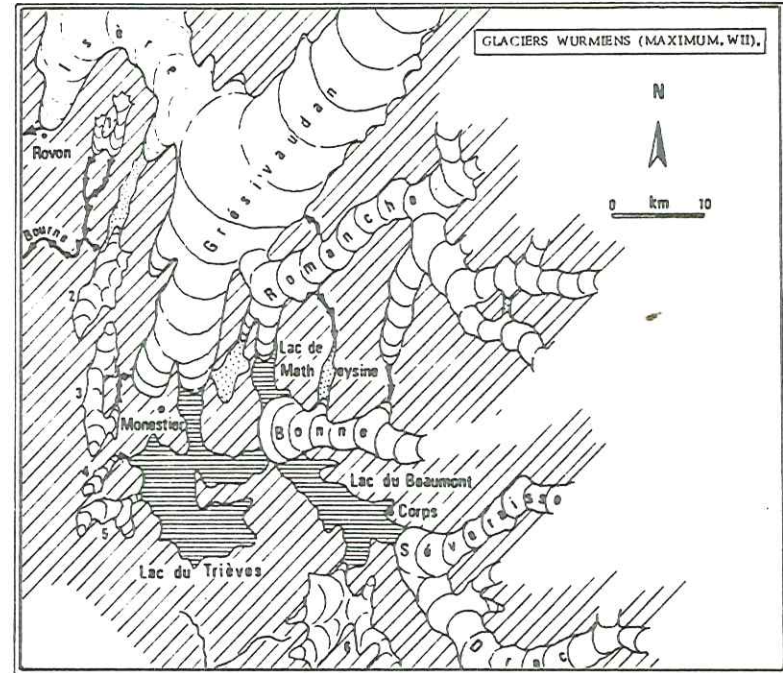
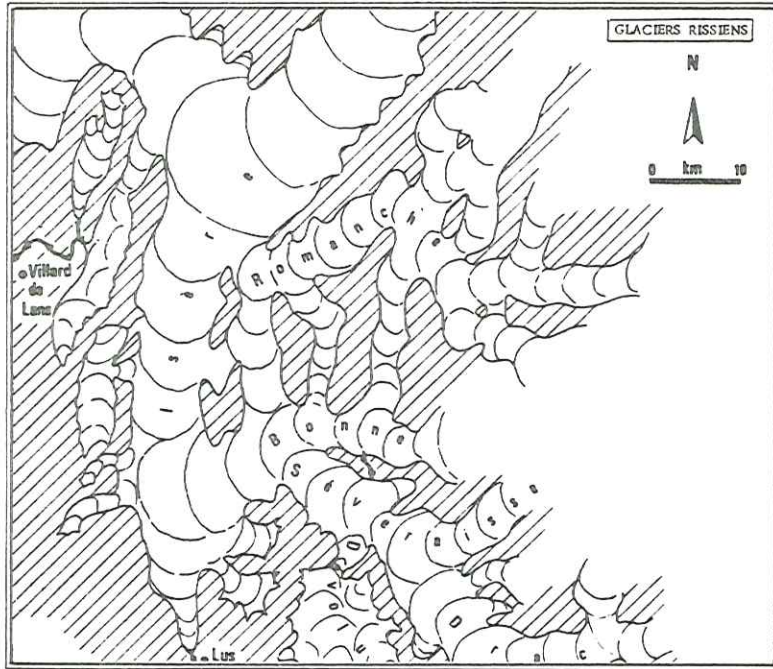
- Les terrasses fluvioglaciaires. Leur extension est faible et leur comportement hydrologique mal connu, cependant l'absence de ruissellement à leur surface nous incite à penser qu'elles sont assez perméables.

- Les cônes de déjection. Leur perméabilité est très hétérogène à cause de l'alternance de lits argileux et de lits plus grossiers. Les circulations souterraines empruntent un cheminement privilégié dans les zones les plus perméables.

- Les éboulis. Leur perméabilité semble élevée (peu de ruissellement en surface), néanmoins leur cimentation par des dépôts de CaCO_3 peut abaisser localement cette perméabilité en bouchant les vides.

- Les dépôts lacustres, de par leur nature très fine et argileuse, ont une perméabilité très faible.

- Les dépôts de marécages et les tourbières ne jouent pas, à proprement parler, un rôle dans les circulations souterraines du fait de leurs très faibles épaisseurs.



CARTES SCHEMATIQUES DES GLACIERS REGIONAUX. (D'après G. MONJUVENT 70)

Fig. 24

2.3.4. PLACE DE LA MORPHOLOGIE ETUDIEE DANS LE SCHEMA ACTUEL DU QUATERNAIRE REGIONAL

2.3.4.1. Histoire géologique régionale du Quaternaire

Nous présentons ici les résultats de l'étude de G. MONJUVENT qui, tout en tenant compte des travaux antérieurs, apporte des données nouvelles qui aboutissent à un schéma original de la géologie du Quaternaire.

Tout en ayant procédé à une étude géologique classique, cet auteur a utilisé une méthode originale pour reconstituer l'extension des glaciers à une époque donnée. Il utilise pour cela la propriété physique de toute masse de glace qui est d'atteindre un profil d'équilibre que l'on peut schématiser par la formule suivante : $h = \sqrt{20x}$ (L. LLIBOUTRY 1965).

h est l'épaisseur de la glace située à une distance x du front du glacier (h et x étant exprimés en mètres). A partir de cette formule, il est possible, en connaissant le front d'un appareil glaciaire et l'altitude du fond de l'auge, de déterminer l'extension du glacier en tout point de son bassin. Après avoir vérifié la bonne concordance de la théorie avec la réalité, il a pu appliquer sa méthode.

Sans détailler outre mesure le travail de cet auteur, nous présentons les conclusions qui intéressent notre région.

Au Riss, le glacier de la Romanche aurait eu, au niveau de Laffrey, une altitude de 1450 m environ; ce qui, compte tenu de la cote du substratum, permettait une langue glaciaire diffluente suffisamment longue pour rejoindre celle du Drac au niveau du col de La Festinière par où elles s'écoulaient (voir figure n° 24).

Au maximum d'extension du glacier würmien (WII) l'altitude du glacier romanchois au niveau de Laffrey n'aurait été que de 1310 m ce qui autorisait une langue glaciaire diffluente d'environ sept kilomètres, cette distance coïncide avec l'arc frontal externe de Pierre-Châtel décrit au paragraphe 2.3.3.1.1. Les eaux de fonte de cette diffluence se jetaient, vers le sud, dans le lac de la Matheysine, lac de barrage morainique qui occupait l'emplacement des marais de La Mure actuels, derrière la moraine du calvaire déposée par le glacier de la Bonne (Voir Figure n° 24).

Une diffluence moins importante empruntait la vallée de

Notre Dame de Vaux jusqu'à ce village, mais ne laissait pas de dépôts nettement identifiables.

A partir du Würm II, le plateau matheysin ne sera plus jamais envahi par les glaciers. En effet, durant la récurrence du Würm III le glacier de la Romanche avait une altitude qui n'excédait pas 800 m au niveau de Laffrey (voir figure n° 24).

Les datations des tourbières du plateau matheysin ne sont pas d'un grand secours pour vérifier cette chronologie des évènements puisque la plus ancienne est post-Würm ce qui n'apporte pas de précision quant à l'âge de la dernière diffluence glaciaire.

2.3.4.2. Les conséquences de ce schéma sur l'ensemble morphologique étudié

A partir du schéma décrit au paragraphe précédent, on peut tirer quelques conclusions quant aux datations des ensembles morainiques du nord du plateau matheysin.

Le glacier würmien à son maximum d'extension (WII), vu sa cote, ne pouvait déposer de moraine à une altitude supérieure à 1 300 m; par suite les moraines frontales et latérales entourant les lacs seraient à attribuer au Würm II. Les deux moraines frontales des Essards et des Vorzes seraient également de cette époque et appartiendraient à une digitation secondaire du glacier qui se serait introduit dans ce vallon à la faveur d'un abaissement local de la crête des drumlins du Canier et des Creys.

Ces deux derniers drumlins auraient d'ailleurs été quasiment submergés par le glacier würmien, la moraine sommitale du Canier serait peut-être cependant rissienne.

Les dépôts morainiques que l'on observe dans le vallon du Pré de l'Epaule et sur les pentes du Grand Serre jusqu'à plus de 1 300 mètres seraient donc uniquement rissiens.

Les moraines würmiennes que nous avons décrites précédemment seraient donc les témoins du retrait du glacier de la Romanche au Würm II; ce sont ces stades de retrait que nous allons détailler dans le chapitre suivant.

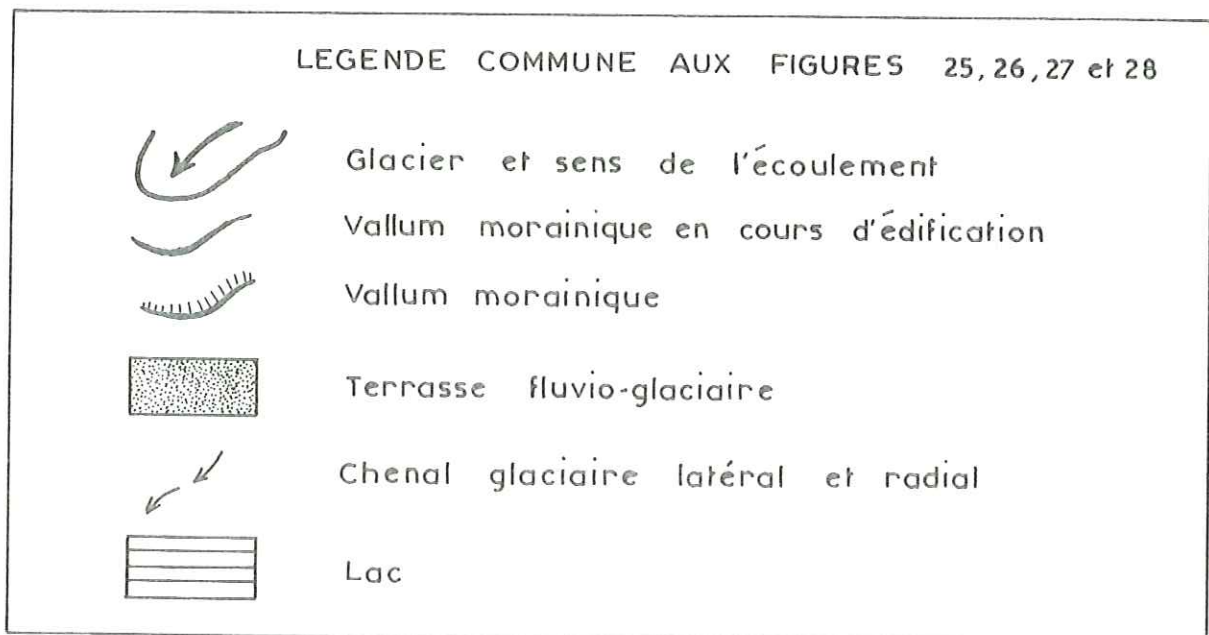
2.3.5. LES STADES DE RETRAIT DE LA DIFFLUENCE DU GLACIER WURMIEN DE
LA ROMANCHE EN MATHEYSINE

L'étude morphologique et lithologique a permis de décrire une série de vallums morainiques appartenant tous au maximum glaciaire du Würm (WII). Nous avons vu que ces arcs morainiques correspondaient chacun à un stade de retrait du glacier; nous allons ici étudier les modalités de ce retrait glaciaire.

Avant tout, il est nécessaire de définir le terme de stade que nous employons ici. Il ne s'agit pas d'un stade au sens généralement admis, c'est-à-dire séparé par un interstade avec un changement de climat net provoquant un recul très important du glacier. Le mot stade sera employé ici dans le sens de stationnement suffisamment prolongé du front du glacier pour permettre un dépôt morainique morphologiquement identifiable. Chaque stade est séparé par un épisode très court durant lequel les conditions climatiques ayant très légèrement changé (réchauffement ou diminution des précipitations) le glacier s'est retiré trop rapidement pour laisser un dépôt important.

Quatorze stades ont ainsi été identifiés dans le retrait de la diffluence glaciaire, il s'en suit que chacun de ces stades avait une durée très courte, probablement de l'ordre du siècle.

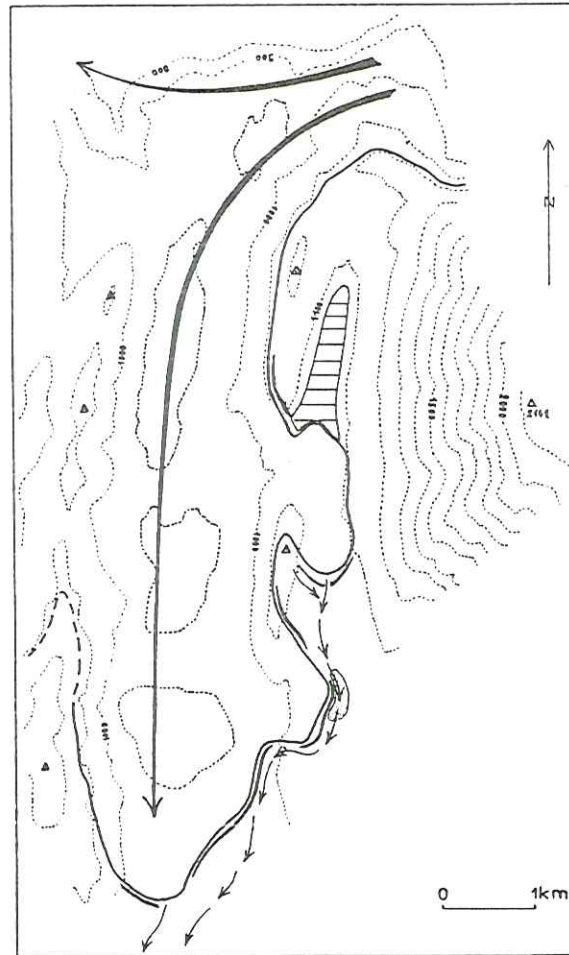
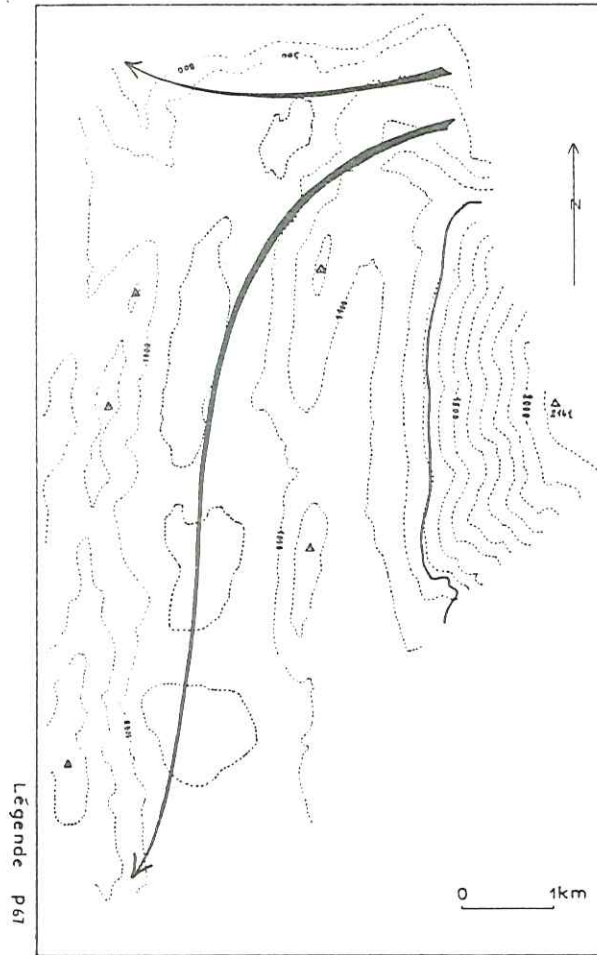
Les stades principaux ont été représentés sous forme de 4 figures dont la légende commune est présentée ci-dessous.



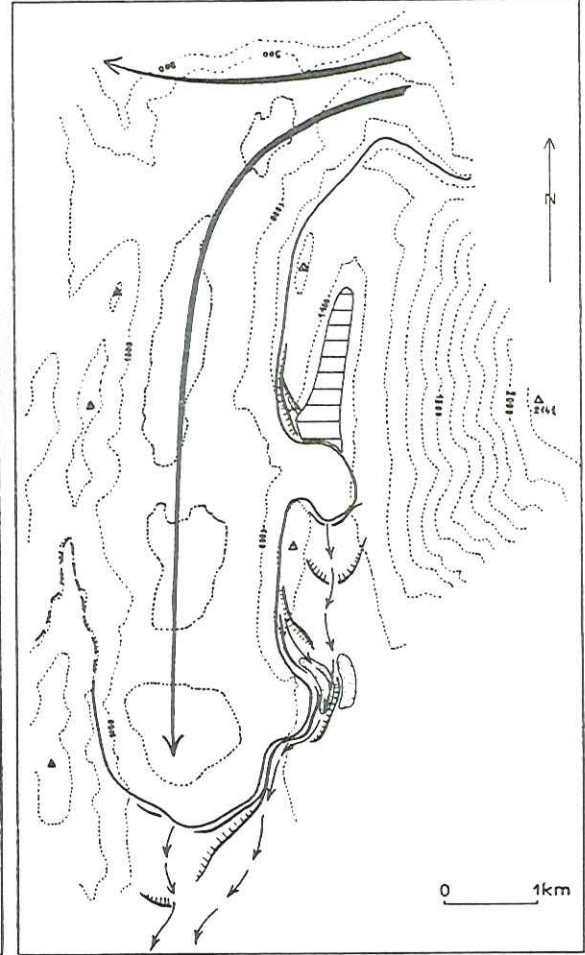
EXTENSION DU GLACIER RISSIEN
DE LA ROMANCHE

Fig. 25

STADES DE RETRAIT DE LA DIFFLUENCE DU GLACIER WÜRMIEN
DE LA ROMANCHE EN MATHEYSINE



STADE 1



STADE 2

- Stade 1 (Figure n° 25)

C'est celui qui correspond au maximum d'extension du glacier würmien de la Romanche. Il est représenté sur le terrain par le vallum morainique de Pierre-Châtel qui vient latéralement s'appuyer au sud-est sur le drumlin des Serres; le glacier s'invaginait alors, dans la dépression du Villard-St-Christophe en submergeant partiellement le drumlin des Creys. Derrière cette moraine latérale se déposait une terrasse fluvio-glaciaire alimentée partiellement par la Jonche.

Plus au nord, un diverticule du glacier se glissait dans la dépression de Cholonge et déposait la moraine frontale des Essards. Il est probable que le glacier retenait à cette époque un lac dans la dépression de La Coirelle à Cholonge, mais aucun sédiment lacustre ne vient confirmer cette hypothèse (l'existence très courte de ce lac n'aurait pas permis de dépôts suffisamment épais pour être conservés par la suite).

Les eaux de fonte du diverticule de Cholonge s'écoulaient par le chenal radial qui sectionne la moraine des Essards, elles aboutissaient à la terrasse du Villard St Christophe et longeaient la moraine latérale pour aller se jeter vers le sud dans le lac würmien du marais de La Mure.

- Stade 2 (Figure n° 25).

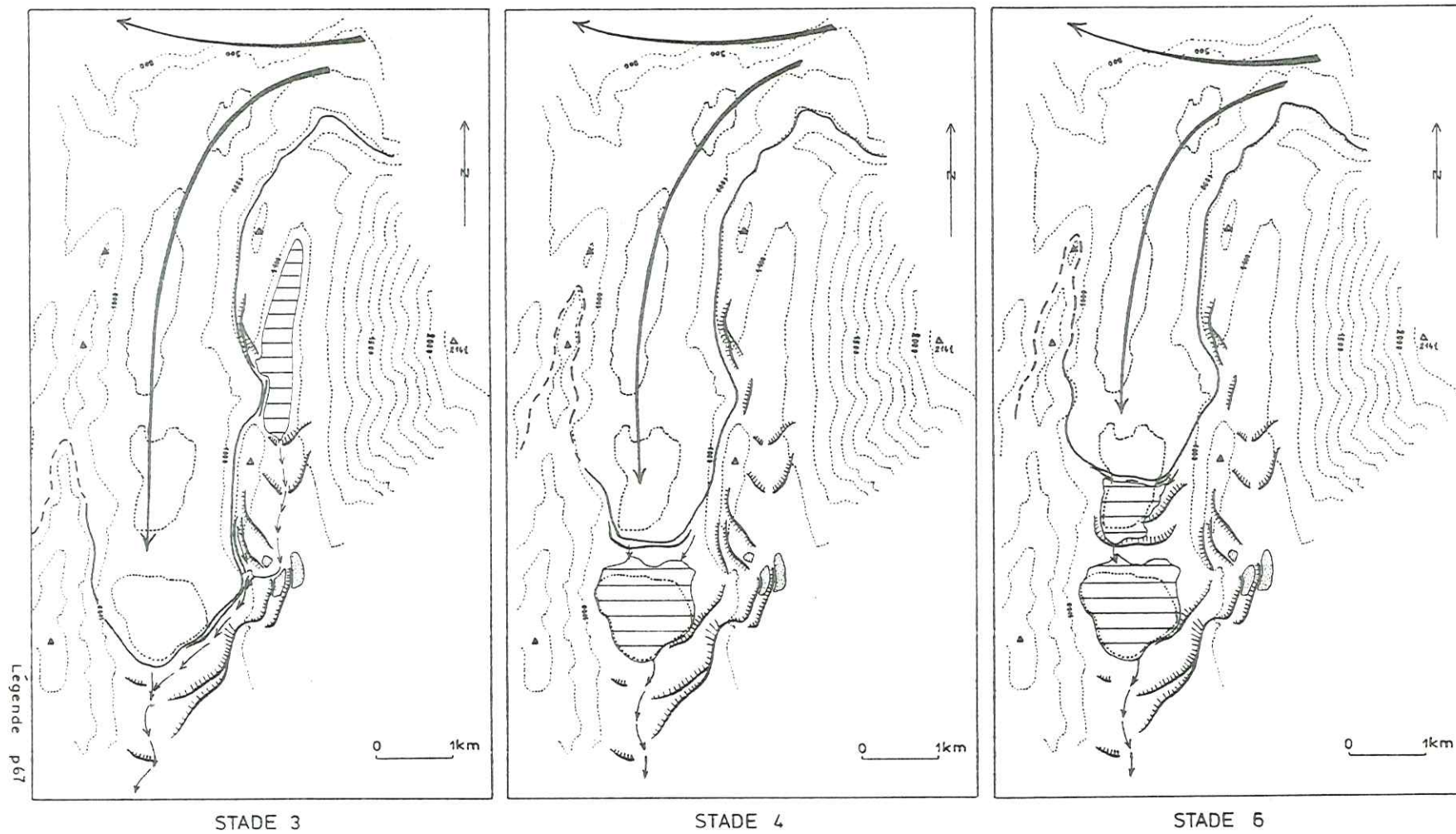
Le glacier a commencé à se retirer. Il dépose un second vallum frontal (Lespinasse) qui se confond localement avec le précédent au niveau des Serres. Le lobe latéral du Villard St Christophe subsiste encore mais légèrement en retrait, il dépose le vallum des Troussiers qui se prolonge au nord en direction du sommet des Creys. Le diverticule de Cholonge a reculé également et il dépose la moraine frontale des Vorzes; les eaux de fonte issues de ce lobe, s'écoulaient vers le sud et contribuent, avec les apports du chenal marginal descendant des Creys, à la construction d'une deuxième terrasse fluvioglaciaire entre les vallums des stades 1 et 2.

- Stade 3 (Figure n° 26).

Le glacier continue son recul. Il dépose la moraine frontale de la ferme du lac qui se prolonge latéralement par un vallum accroché au flanc du drumlin des Creys.

Le lobe de Cholonge est résorbé à cette époque et il constitue un barrage derrière lequel le lac continue probablement à exister; le trop plein de ce lac s'échappe par le chenal radial du vallum des Vorzes, il

Fig.26 STADES DE RETRAIT DE LA DIFFLUENCE DU GLACIER WÜRMIEN DE LA ROMANCHE EN MATHEYSINE



rompt l'arc morainique des Troussiers, s'encaisse dans la terrasse fluvio-glaciaire du stade 2 avant de rejoindre le chenal marginal du glacier qui s'écoule entre les vallums des stades 2 et 3.

- Stade 4 et 5 (Figure n° 26)

Le glacier a très nettement reculé puisqu'il stationne au nord du lac de Pierre-Châtel où il dépose deux arcs morainiques dont un très développé qui est rompu en son milieu par un chenal d'écoulement radial (stade 4).

On ne trouve aucune moraine latérale correspondant à ces stades. Le lac de Cholonge-La Coirelle avait probablement disparu à cette époque, le glacier ne constituant plus un barrage suffisant pour le retenir.

Le lac de Pierre-Châtel venait par contre de s'individualiser, légèrement plus étendu qu'actuellement vers le nord car il occupait l'actuel marais des grandes Sagnes, ce qui est confirmé par les dépôts lacustres sous les tourbières.

- Stade 6 (Figure n° 26)

Après un nouveau recul, le glacier stationne au milieu de l'actuel lac de Petichet où il dépose une moraine frontale submergée de nos jours.

C'est à cette époque que ce lac s'individualise en partie, à une cote supérieure à sa cote actuelle (939 m contre 924) puisqu'il s'écoulait vers le sud par le chenal radial du vallum du stade 4.

- Stade 7 et 8 (Figure n° 27).

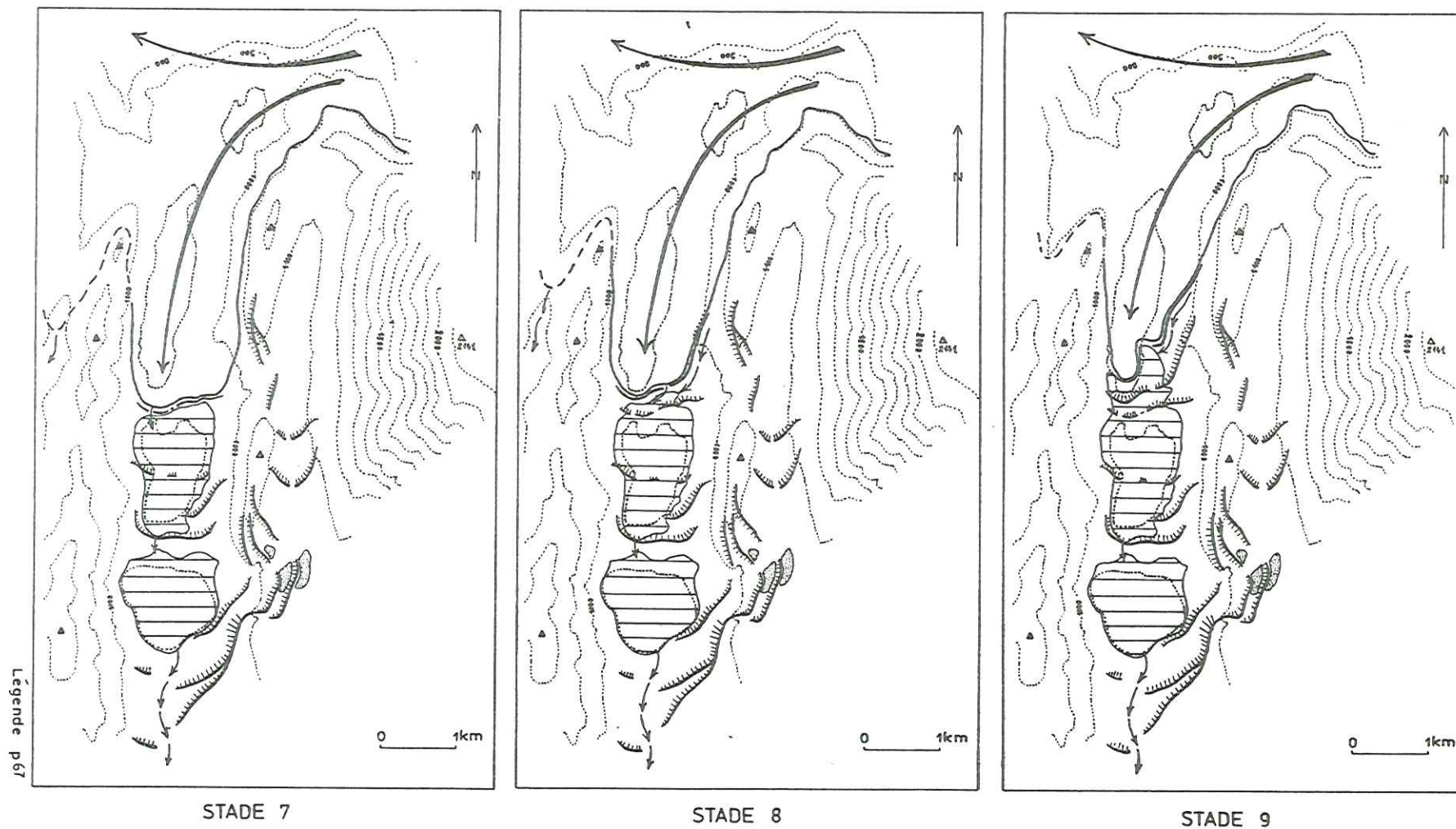
Le glacier qui a de nouveau reculé, se situe alors au nord du lac de Petichet.

Le stade 7 dépose une moraine frontale qui s'appuie sur la butte de micaschistes.

Le stade 8 dépose le vallum frontal de Petichet qui se prolonge au nord de La Fayolle par une moraine latérale bien individualisée. Un chenal marginal longe cette moraine et se jette dans le lac de Petichet dont la cote est toujours de 939 m puisqu'il continue à s'écouler vers le sud.

Aucun sédiment correspondant à ce lac surélevé n'a été découvert, ce qui s'explique par le fait que l'existence de ce lac a été très courte, quelques siècles tout au plus.

Fig. 27 STADES DE RETRAIT DE LA DIFFLUENCE DU GLACIER WÜRMIEN DE LA ROMANCHE EN MATHEYSINE



- Stade 9 (Figure n° 27)

Ce stade n'est marqué que par le dépôt d'un lambeau de moraine frontale sur la butte de Jurassique de La Bergogne qui se raccorde latéralement à un vallum latéral au nord de ce hameau; un chenal marginal bien conservé longe cette moraine.

A cette époque, le lac de Petichet était réuni avec un embryon du lac de Laffrey à la cote de 939 m, l'écoulement des eaux se faisant toujours vers le sud.

- Stade 10 (Figure n° 28)

C'est la présence d'un vallum latéral accompagné de son chenal marginal au sud des Josserands qui atteste l'existence de ce stade de retrait.

Nous pensons qu'à partir de ce stade le barrage glaciaire n'était plus suffisant pour retenir le lac unique à la cote de 939 mètres; c'est-à-dire que le lac de Petichet devait comme actuellement se déverser dans le lac de Laffrey et leurs eaux devaient rejoindre ensuite un torrent sous-glaciaire de la Romanche.

- Stade 11, 12 et 13 (Figure n° 28)

La diffluence glaciaire de la Romanche ne se réduisait plus alors qu'à une petite langue qui déposait successivement la moraine des Josserands, puis celle qui longe la départementale 115a, et enfin celle qui sépare le lac de Laffrey du Lac Mort. Le lac de Laffrey avait son aspect actuel à quelques détails près.

- Stade 14 (Figure n° 28)

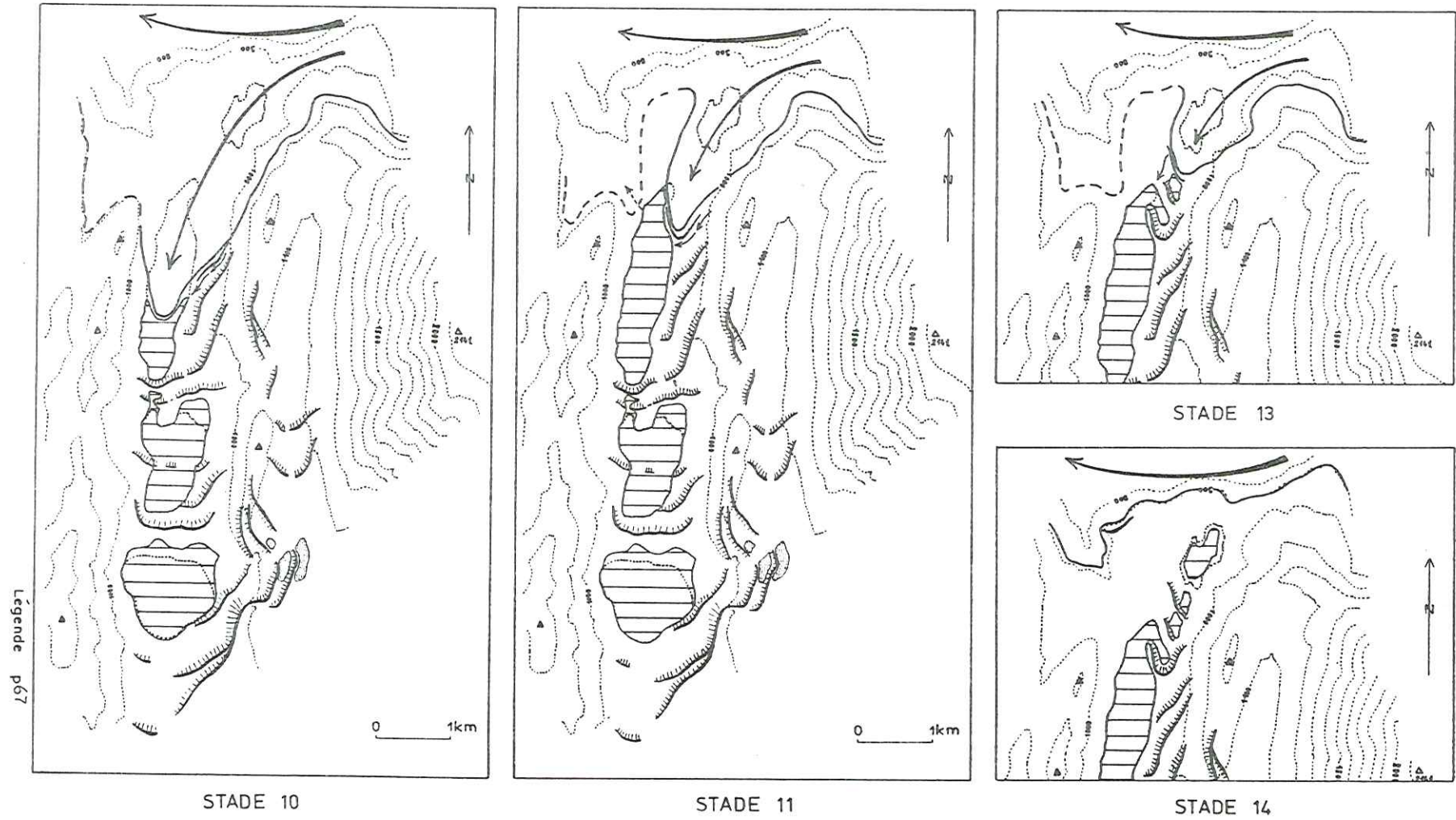
Le recul du glacier se poursuivant, celui-ci ne débordait plus sur le plateau matheysin, il déposait une moraine latérale au nord de Laffrey à une altitude d'environ 900 m. Cette moraine a été attribuée au Würm II car il semblerait que durant la récurrence du Würm III le glacier de la Romanche n'ait jamais atteint cette altitude (G.MONJUVENT).

2.3.6. CONCLUSION A L'ETUDE DU QUATERNAIRE

Le plateau matheysin, large vallée morte suspendue au-dessus du Drac et de la Romanche aurait une origine fluviale très ancienne, probablement oligocène; il fut envahi ensuite par les diffluences glaciaires des

Fig. 28

STADES DE RETRAIT DE LA DIFFLUENCE DU GLACIER WÜRMIEN DE LA ROMANCHE EN MATHEYSINE



glaciers du Drac et de la Romanche qui façonnèrent sa morphologie.

Le nord de la Matheysine se présente comme une vaste auge glaciaire dont la régularité transversale est rompue par des alignements de drumlins; longitudinalement on observe une série de verrous et d'ombilics.

C'est essentiellement le glacier rissien de la Romanche qui a modelé le substratum du nord de la Matheysine tel qu'il apparaît actuellement.

Les dépôts rissiens et würmiens du glacier de la Romanche ont conservé une morphologie très fraîche, ce qui a permis une étude assez fine des modalités de dépôts.

Le Würm II est représenté par des moraines et des terrasses fluvioglaciaires qui se sont déposées lors du retrait de la diffluence du glacier de la Romanche en Matheysine; 14 stades locaux de retrait glaciaire ont pu être mis en évidence.

2.4. CONCLUSION À L'ÉTUDE GÉOLOGIQUE

L'étude du substratum nous a montré que :

- *le dôme de La Mure, large bombement du socle hercynien et de sa couverture triasique et liasique, est situé dans le prolongement méridional du rameau externe de Belledonne;*

- *les dépôts sédimentaires vont du Westphalien D au Dogger;*

- *le Houiller est une épaisse série limnique déposée dans un bassin subsident en discordance sur les micaschistes du socle;*

- *le Trias et le Lias sont caractérisés par des variations de faciès et d'épaisseur très importantes, signes d'une sédimentation sur des hauts fonds parfois émergés et dans des sillons fortement subsidents qui seront définitivement comblés à l'Aalénien;*

- *les structures tectoniques sont conditionnées par les failles de socle méridiennes et transverses qui, héritées de l'orogénèse hercynienne, ont rejoué durant l'orogénèse alpine.*

L'étude géophysique nous a permis de déterminer la forme et la nature du substratum dans des zones où elles étaient masquées par le recouvrement quaternaire; des sillons glaciaires plus ou moins importants ont été mis en évidence entre certains des lacs matheysins.

L'étude du Quaternaire a montré que la morphologie actuelle était essentiellement due au passage du glacier rissien de la Romanche, et dans une moindre mesure aux dépôts glaciaires des stades de retrait du Würm II.

ETUDE HYDROCLIMATIQUE

3. ETUDE HYDROCLIMATIQUE

3.1. ETUDE DES PRINCIPAUX PARAMETRES CLIMATIQUES

3.1.1. ETUDE DES PRECIPITATIONS

3.1.1.1. Le réseau météorologique existant

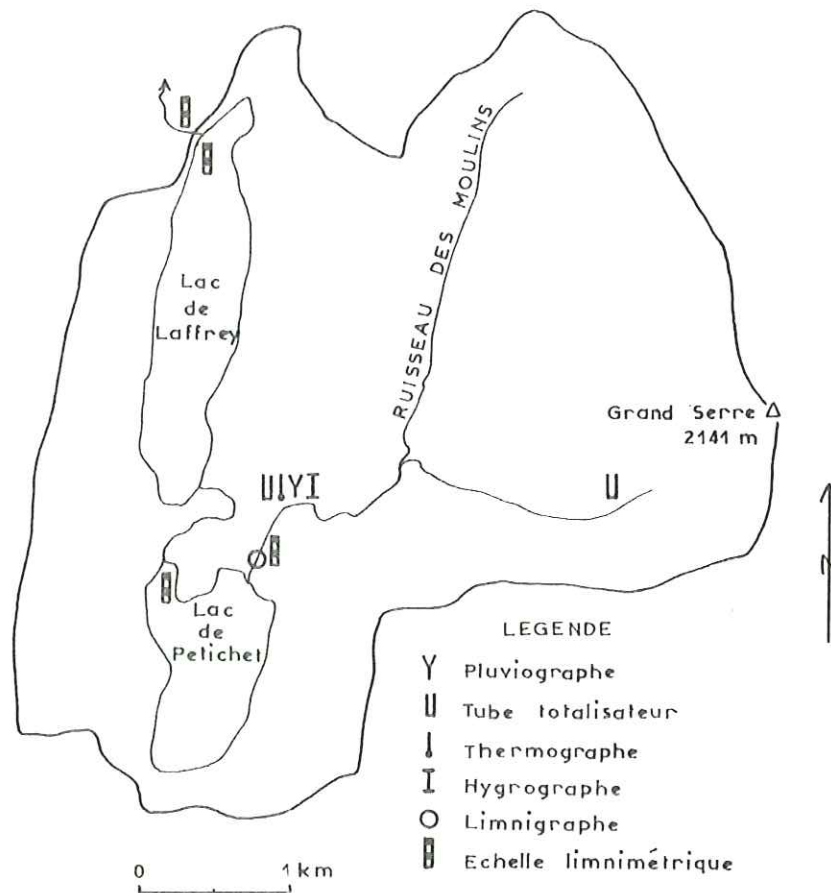
Le réseau est assez dense dans la région mais nous n'avons retenu pour notre étude que les mesures des stations qui nous semblaient les plus représentatives du terrain étudié, c'est-à-dire La Motte d'Aveillans, La Mure et St Martin d'Hères.

3.1.1.2. L'appareillage complémentaire

Le bassin versant, de par sa superficie réduite et ses versants régulièrement exposés vers l'ouest, n'a nécessité la mise en place que de trois appareils de mesure :

- A La Fayolle (altitude 940 m), coordonnées Lambert : $x = 871,8$; $y = 305,65$,
 - . un pluviographe enregistreur à augets basculants, d'une surface réceptrice de $2\ 000\ \text{cm}^2$,
 - . un pluviomètre totalisateur d'une surface réceptrice de $110\ \text{cm}^2$.
- Sur le Grand Serre (altitude 1 465 m), coordonnées Lambert : $x = 874$; $y = 305,81$,
 - . un pluviomètre totalisateur d'une surface réceptrice de $205\ \text{cm}^2$.

Fig. 29 EQUIPEMENT HYDRO-METEOROLOGIQUE
DU BASSIN VERSANT

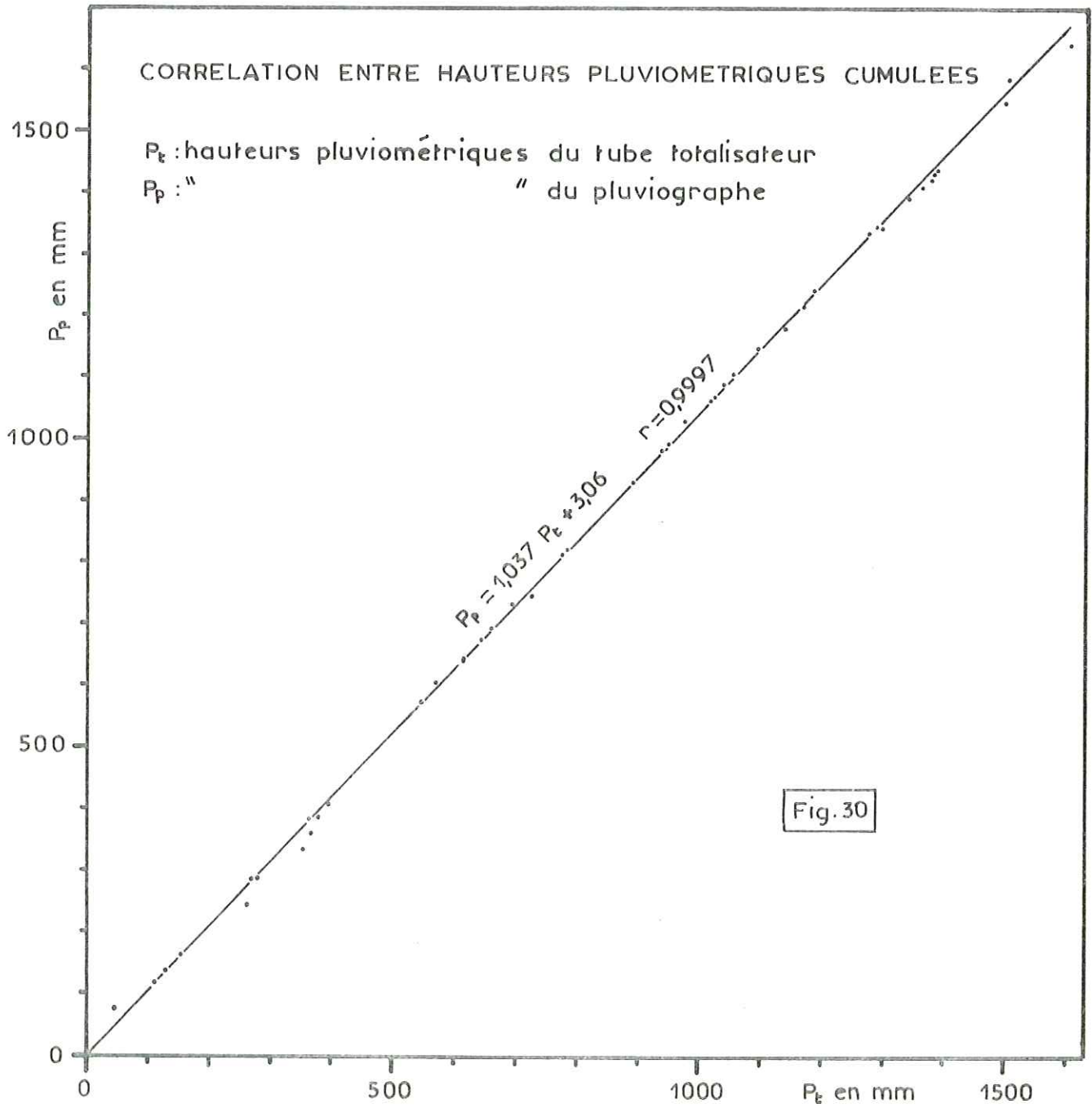


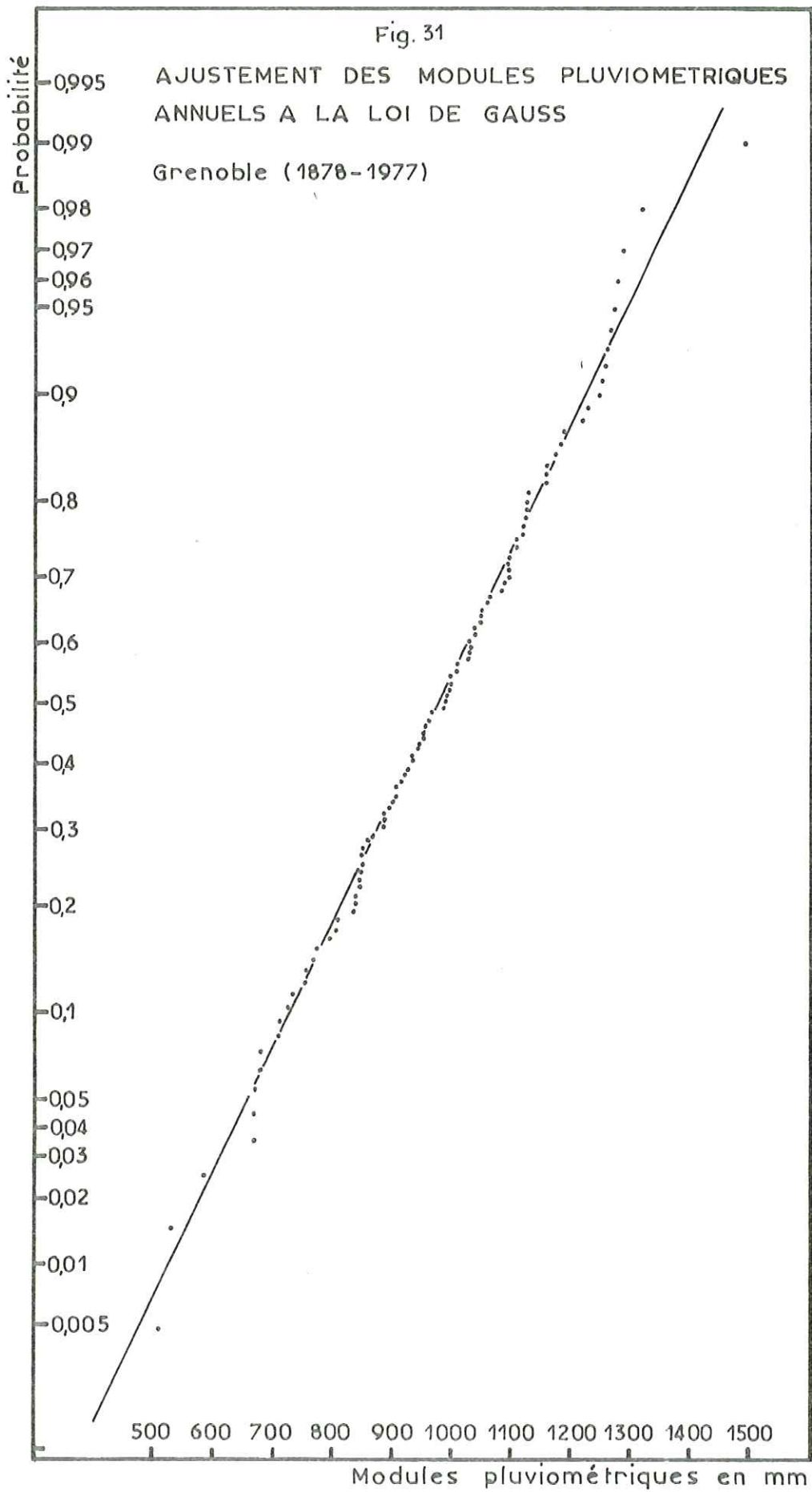
Le pluviographe et le pluviomètre de La Fayolle ont été placés à côté l'un de l'autre pour déterminer l'influence de la surface réceptrice sur les mesures de la pluviométrie. Un calcul de régression linéaire a été effectué entre les hauteurs pluviométriques cumulées des deux appareils (voir la fig.n° 30). La corrélation est très bonne : coefficient de corrélation $r = 0,999$ pour 49 couples de mesures. La relation liant les deux types de mesures est la suivante :

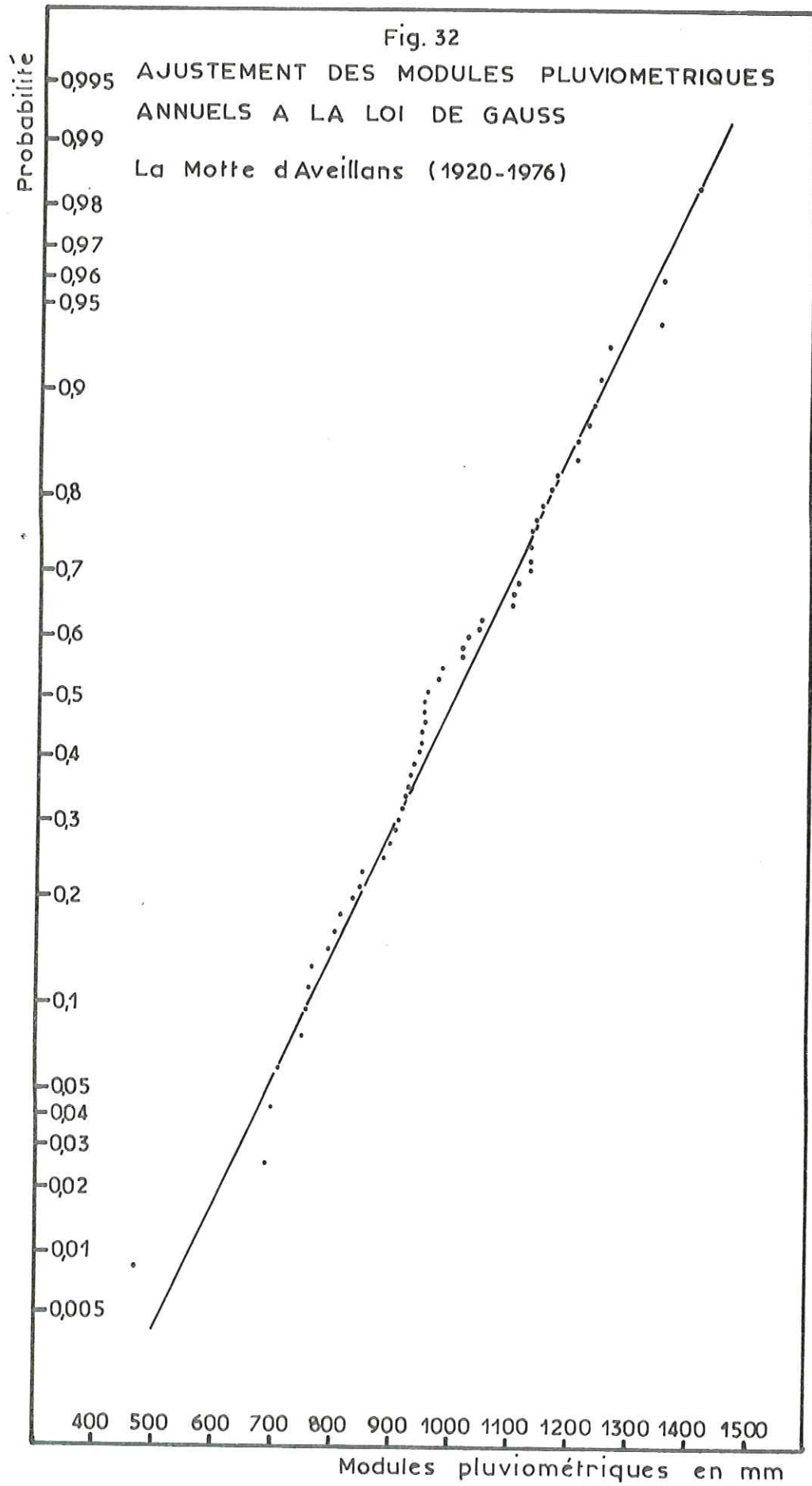
P pluviographe = $1,037 P$ pluviomètre + $3,1$ mm (avec P en mm). Le pluviomètre de 110 cm^2 ne capte donc que 96 % de la pluie captée par le pluviographe de 2000 cm^2 . Cette valeur est beaucoup plus forte que celles déterminées auparavant par G.NICOU (1973) et M.HAUBERT (1975); pour le premier auteur un pluviomètre de 113 cm^2 ne capte que 90 % de la pluie captée par un pluviomètre de 400 cm^2 , pour le second un pluviomètre de 240 cm^2 capte 94 % des précipitations mesurées avec un pluviographe de 2000 cm^2 .

Nous n'avons pas pu déterminer à quoi était due cette différence. Dans cette étude nous avons adopté un coefficient de captation

de 96 % pour une surface réceptrice de 110 cm² et 97 % pour une surface réceptrice de 205 cm².







3.1.1.3. Les précipitations à l'échelle régionale

Les mesures sur le bassin versant, très réduites dans le temps, ne permettaient pas d'études statistiques, aussi présentons nous les mesures régionales.

3.1.1.3.1. La pluviométrie annuelle

Nous avons calculé les moyennes annuelles en mm pour différentes périodes, pour les trois stations régionales :

Grenoble 1878-1977	974 mm	alt.212 m
La Motte d'Aveillans 1920-1976...	989 mm	alt.937 m
La Mure 1924-1976	882 mm	alt.854 m

Grâce à ces séries de mesures assez longues nous avons ajusté les données de Grenoble et La Motte d'Aveillans à la loi de Gauss (voir fig.n° 31 et n° 32). On peut en tirer les extrêmes des précipitations pour ces deux stations:

	Grenoble	La Motte d'Aveillans
Année décennale humide	1 220 mm	1 240 mm
Année centenaire humide	1 420 mm	1 440 mm
Année décennale sèche	740 mm	760 mm
Année centenaire sèche	530 mm	560 mm

L'année étudiée (Oct. 76 - Sept 77) est assez excédentaire puisque la pluviométrie s'est élevée à :

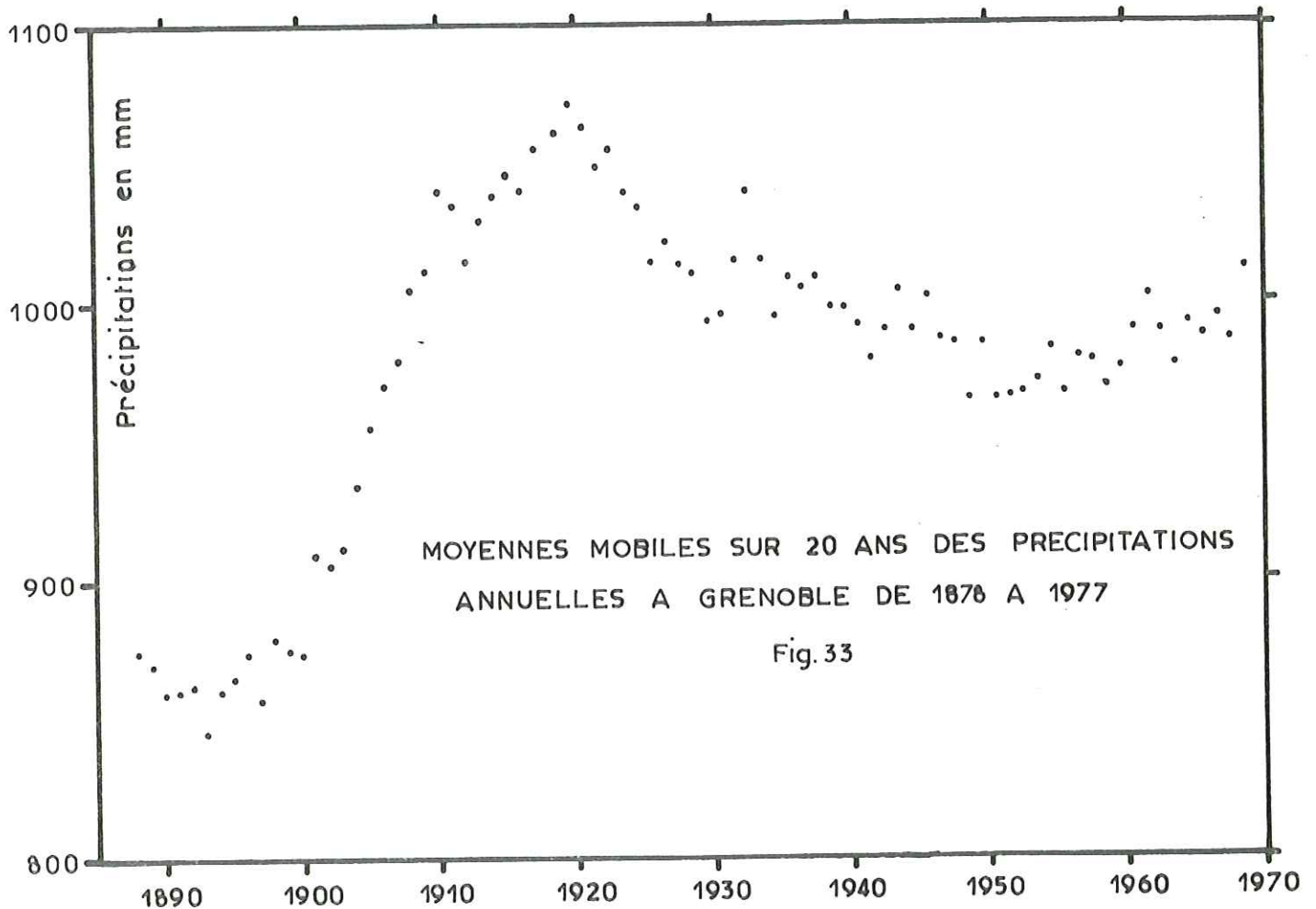
Grenoble 1 238 mm

La Motte d'Aveillans 1 179 mm.

Le temps de retour de cette année humide est de 10 ans pour Grenoble et 6 ans pour La Motte d'Aveillans.

Etant en possession d'un siècle de mesures pluviométriques à Grenoble (voir annexe n° 5), il nous a semblé intéressant

de rechercher s'il existait des fluctuations à grande échelle de la pluviosité. Pour ceci nous avons utilisé une méthode préconisée par J.J. JEREMIE et Ph. OLIVE (1976); ces auteurs utilisent les moyennes mobiles qui atténuent les fluctuations annuelles et mettent en évidence les fluctuations globales de la pluviosité, si elles existent. La figure n° 33 présente les moyennes mobiles de la pluviométrie annuelle calculées avec un pas de temps de 20 ans.



Cette figure met en évidence une augmentation très importante des précipitations de la fin du siècle dernier jusqu'aux

années 1920; celle-ci est suivie d'une diminution jusque vers 1955. De 1955 à nos jours la tendance semble être à l'augmentation.

La mise en évidence de ces fluctuations est extrêmement intéressante mais elles n'ont pu jusqu'à présent être expliquées, elles ne peuvent donc en aucun cas permettre une prévision de l'évolution de la pluviosité, du moins, dans l'état actuel des connaissances.

Les pluviométries annuelles moyennes à La Motte d'Aveillans et à Grenoble sont sensiblement égales, ceci malgré une différence d'altitude de plus de 700 m; cette anomalie est due à la présence de deux zones climatiques :

- au nord une zone subissant une influence océanique, avec des précipitations apportées par des vents du sud et du nord-ouest,
- au sud une zone subissant avec plus d'intensité une influence méditerranéenne, et où les vents humides sont essentiellement ceux du sud. Le bassin versant étudié se situe juste à la limite entre la zone nord et la zone sud comme nous le verrons plus loin.

3.1.1.3.2. La pluviométrie mensuelle

La figure n° 34 présente la pluviométrie mensuelle moyenne à La Motte d'Aveillans pour la période 1961-1976.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Pluviométrie moyenne	70	82	81	79	79	84	65	74	81	68	106	85
maxima absol.	135	163	183	143	134	172	182	166	200	167	150	207
minima absol.	1	12	8	41	14	29	13	13	9	5	39	7

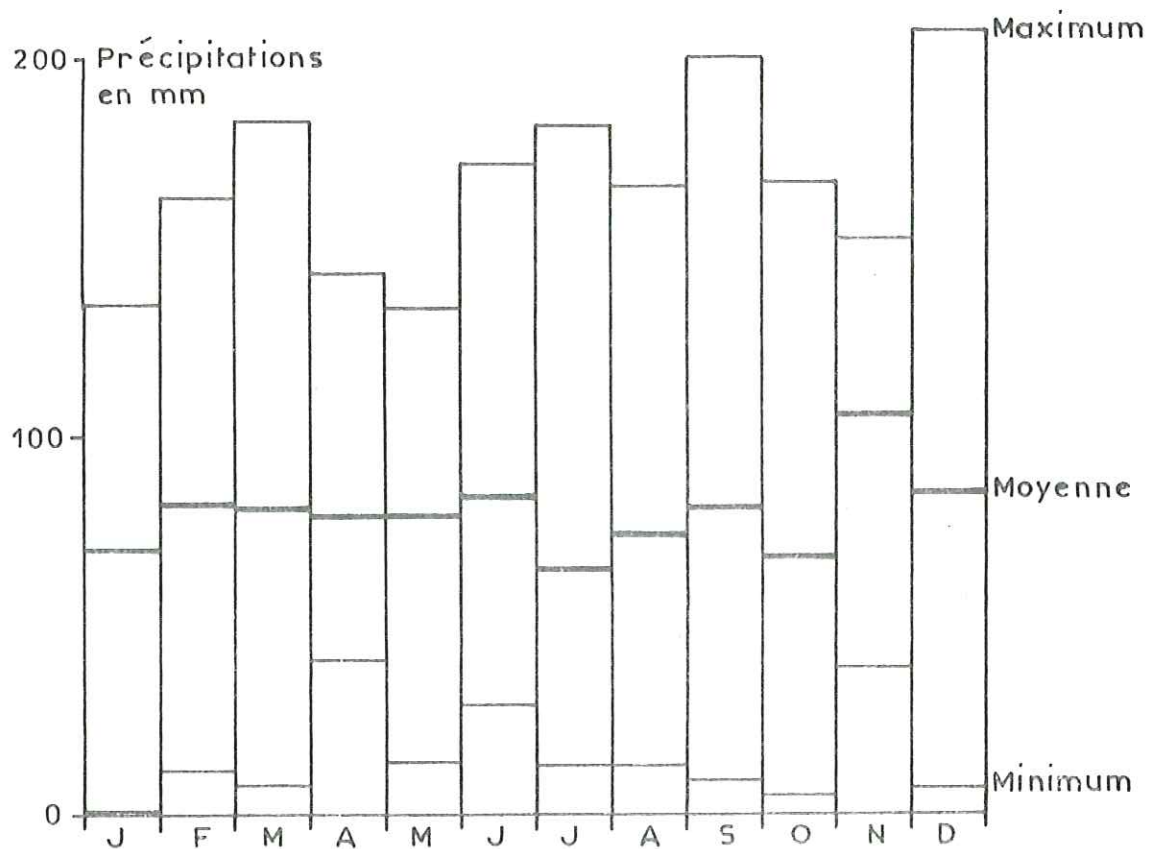
Tableau n° 7 . Précipitations à La Motte d'Aveillans en mm (1961-1976)

La répartition des précipitations est assez homogène sur l'année, ce qui se traduit par un indice saisonnier du type A.P.H.E. peu marqué

Hiver	233 mm	soit 24,4 %
Printemps	242 mm	soit 25,4 %

Eté	220 mm	soit 23,1 %
Automne	259 mm	soit 27,1 %

Le minimum de la pluviométrie s'observe en été, les maxima ont lieu au printemps et à l'automne.



PRÉCIPITATIONS MENSUELLES A LA MOTTE D'AVEILLANS
(1961-1976)

Fig. 34

3.1.1.4. Les précipitations sur le bassin versant étudié

La figure n° 35 présente les précipitations mensuelles mesurées au pluviographe de La Fayolle.

La période étudiée (oct.76-sept.77) a été très excédentaire 1 434,1 mm de pluie à La Fayolle. Le printemps et l'été ont été très pluvieux, le mois de septembre par contre fut très sec : 9,8 mm de pluie.

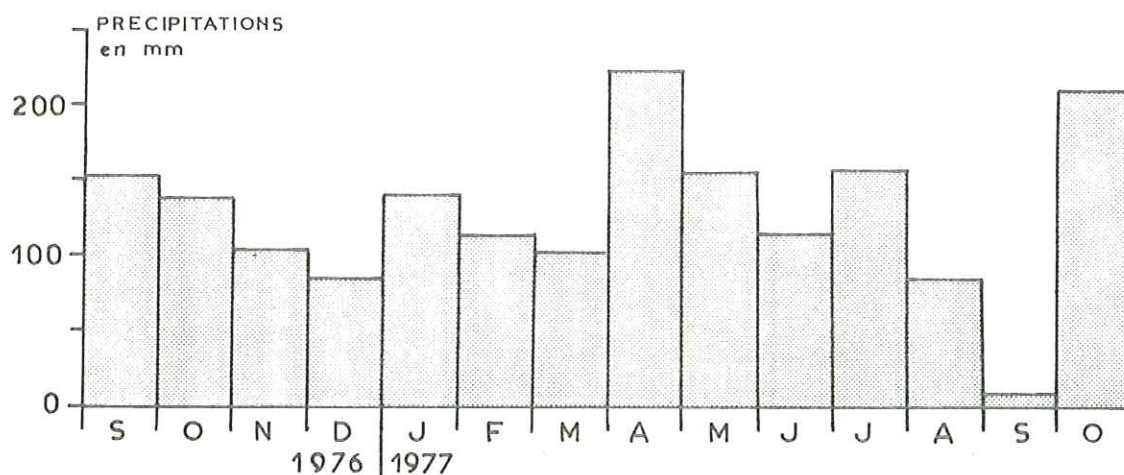
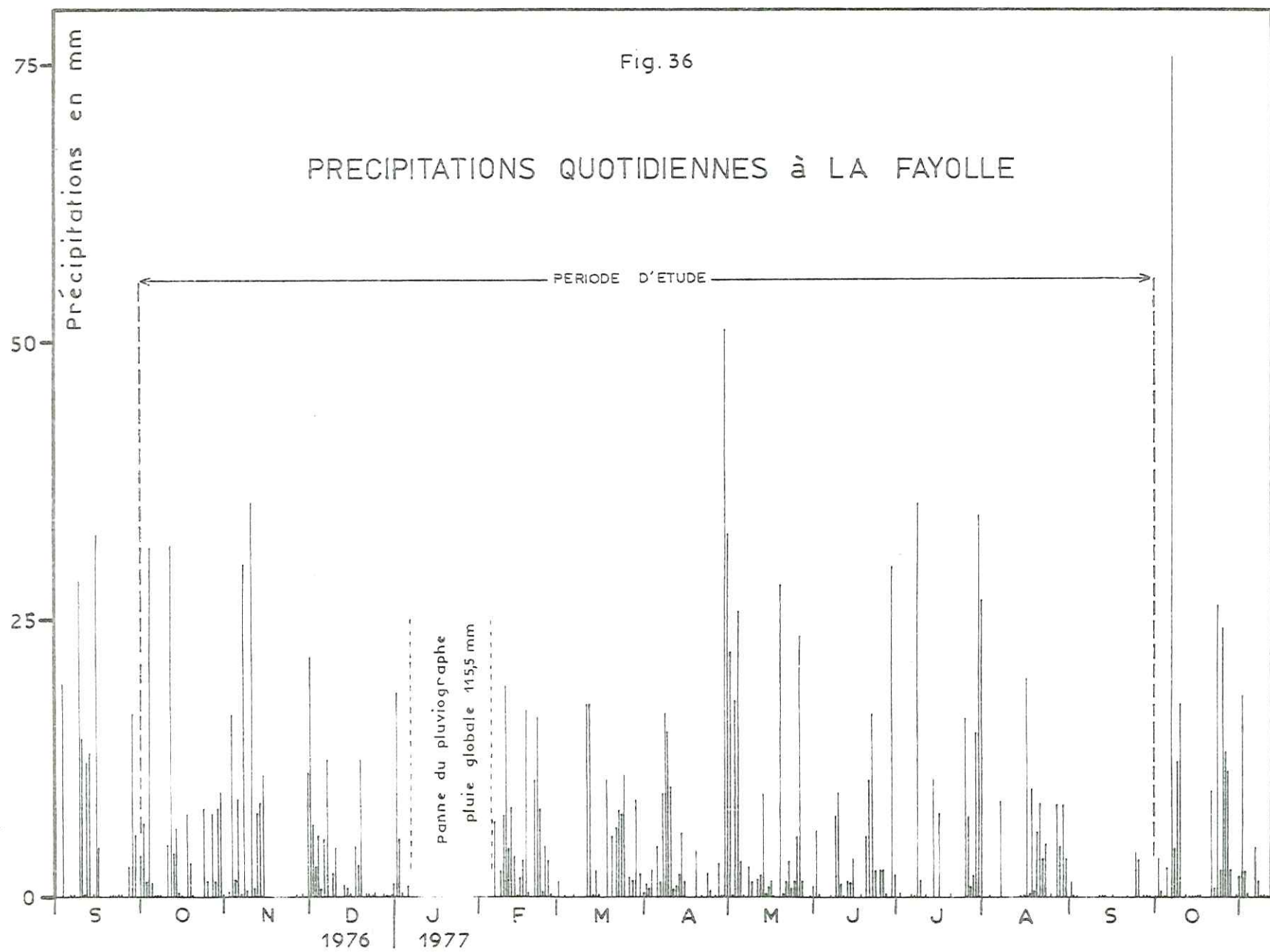


Fig. 35 PRECIPITATIONS MENSUELLES à LA FAYOLLE

3.1.1.4.1. Intensité des précipitations

L'intensité des précipitations est moyenne en général : 18 % seulement des jours de pluie ont dépassé 10 mm. Durant la période d'étude la hauteur de précipitation la plus forte tombée en une journée est 51,2 mm, et 12 jours ont dépassé 25 mm.

34 jours n'ont reçu que 0,1 mm de précipitations et 17 en ont reçu 0,2 mm; nous avons constaté que ces valeurs correspondaient presque toutes à la rosée, qui est très importante sur le plateau matheysin.



3.1.1.4.2. Les précipitations neigeuses

La neige est un facteur important en hydrologie dans la mesure où elle peut s'accumuler en altitude et représenter un stockage d'eau important, susceptible d'être mobilisé rapidement lors d'un redoux ou d'une chute de pluie.

Durant la période étudiée les précipitations neigeuses ont été assez faibles, représentant une hauteur de neige cumulée de l'ordre de 100 à 110 cm à La Fayolle.

Les chutes de neige se sont bien réparties de novembre à avril, séparées par des redoux bien marqués, permettant une fonte de chaque chute jusqu'à une altitude assez élevée (1600 à 2500 m). La première neige est tombée le 4 novembre 1976, suivie d'une chute le 13. Le 4 décembre une épaisseur de 30 cm se déposait puis fondait presque aussitôt. La plus forte épaisseur (35cm) est tombée le 11 et 12 janvier, elle fondait à partir du 20 janvier, un régime de vent du sud s'étant installé. Enfin, quelques chutes suivies de fontes eurent lieu fin mars et début avril, chaque chute excédant rarement 10 cm d'épaisseur.

3.1.1.4.3. Détermination du gradient altimétrique

Grâce au tube totalisateur installé sur le Grand Serre, il a été possible de calculer le gradient altimétrique de la pluviométrie pour la période étudiée.

La Fayolle	alt. 940 m	1 434,1 mm	} +47,4 mm/100 m
Grand Serre	alt. 1465 m	1 683 mm	

Cette valeur est comparable aux valeurs des gradients déterminés par différents auteurs dans les Alpes : M.MICHEL à Theys 47,2mm, G.PAPPINI à La Rochette 68 mm, V. LUPARINI dans le Dévoluy 55 mm.

Il est intéressant de comparer les gradients altimétriques calculés entre Grenoble-St Martin d'Hères et les trois stations de la Matheysine:

Grenoble - La Fayolle	+ 26,9 mm/100 m
Grenoble - La Motte d'Aveillans	- 8,1 mm/100 m
Grenoble - La Mure	-33,8 mm/100 m

Ces valeurs nous montrent très nettement la variation du climat entre Grenoble et La Mure dont nous avons parlé précédemment. Le bassin versant étudié se trouve donc à la limite entre les deux zones climatiques.

3.1.1.4.4. Calcul de la lame d'eau précipitée

De nombreuses méthodes de calcul existent :

- moyenne arithmétique,
- méthode des isohyètes,
- méthode de Thiessen.

Elles s'appliquent toutes à de grands bassins versants où les observations météorologiques sont nombreuses.

Le bassin versant étudié étant régulièrement exposé à l'ouest, nous avons utilisé une variante de la méthode des isohyètes en calculant grâce au gradient altimétrique de la pluviométrie, la lame d'eau précipitée aux altitudes moyennes des bassins versants.

	alt.moyenne	lame d'eau
B.V. total	1159 m	1538 mm
B.V. du ruisseau des Moulins	1348 m	1627,5 mm
B.V. total lacs exclus	1187 m	1551 mm

Tableau n° 8 . Lames d'eau précipitées (oct 76-sept. 77)

3.1.2. ETUDE DES TEMPERATURES

3.1.2.1. Données régionales

Les stations de mesures de la météorologie nationale utilisées dans cette étude sont celles déjà citées à propos de la pluviométrie. D'une manière générale dans la région, le mois le plus chaud est le mois de juillet, le plus froid étant janvier.

	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S
La Motte d'Aveillans (1959-1977)	9,8	4,4	0,5	0,35	1,8	4	7,5	11,6	14,8	17,2	16,9	14,2
La Motte d'Aveillans (oct.76-sept 77)	10	3,5	1,2	1,3	4,1	6,8	6,2	10,3	13,8	16,3	15,4	13,2

Tableau n° 9 . Températures moyennes mensuelles à La Motte d 'Aveillans
(en °C)

La période étudiée est très légèrement plus froide que l'année moyenne (8°5 contre 8°6) mais à l'échelle mensuelle on constate que les mois d'octobre 76 à mars 77 sont en général nettement plus chauds que la moyenne mensuelle calculée sur 19 ans, alors que d'avril à septembre 77 la température est très inférieure à la moyenne. La figure n° 37 illustre bien ce phénomène.

3.1.2.2. Les températures sur le bassin versant étudié

Les températures ont été mesurées à la station de La Fayolle avec un thermographe enregistreur placé dans un abri type météorologie nationale.

3.1.2.2.1. Les températures moyennes

La température moyenne quotidienne a été calculée de la manière suivante :

$$T_m = \frac{T_{\max.} + T_{\min.}}{2}$$

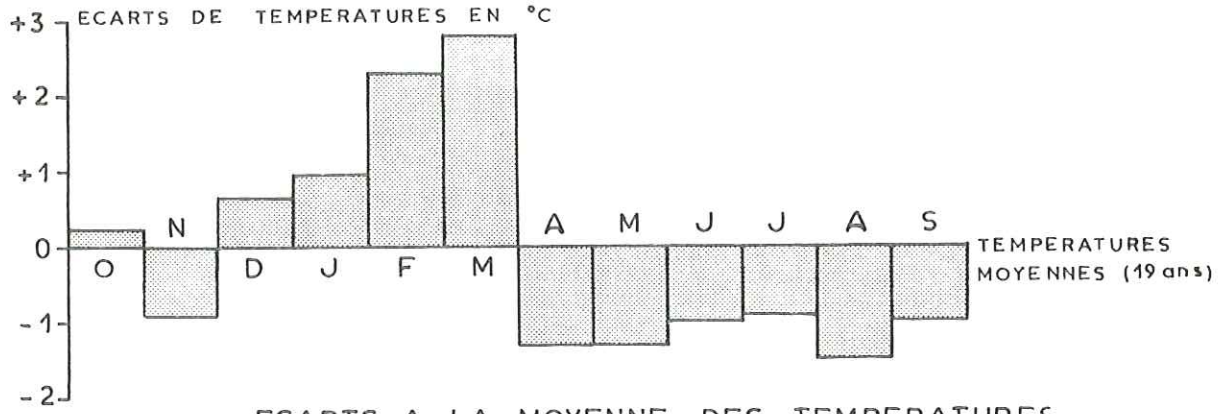


Fig. 37 ECARTS A LA MOYENNE DES TEMPERATURES MENSUELLES (La Motte d'Aveillans oct. 76-sept. 77)

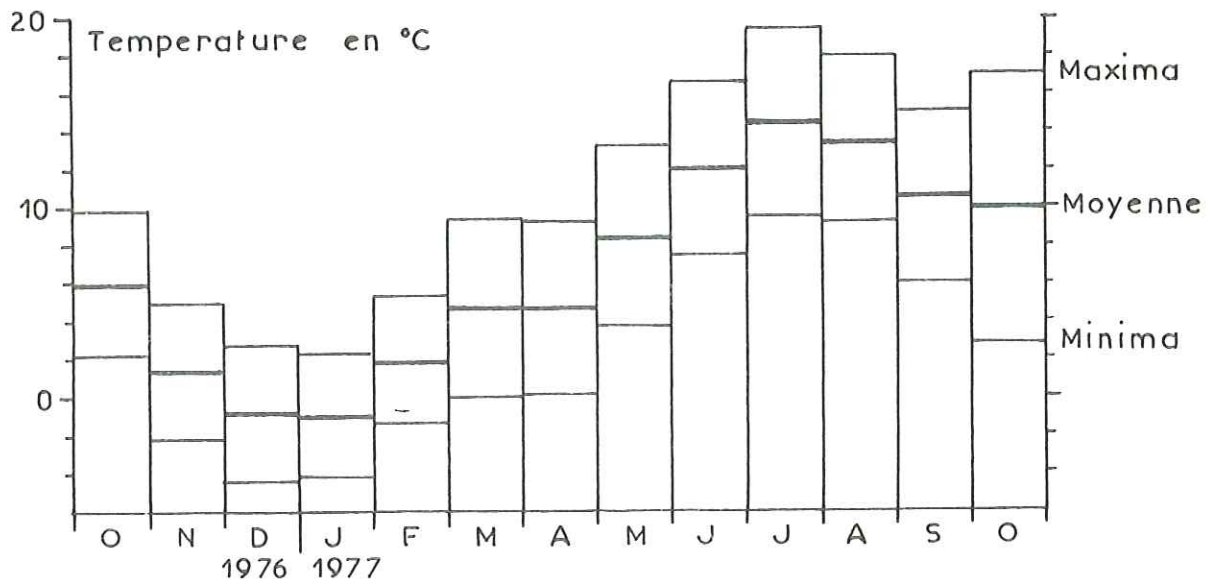


Fig. 38 TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES A LA FAYOLLE

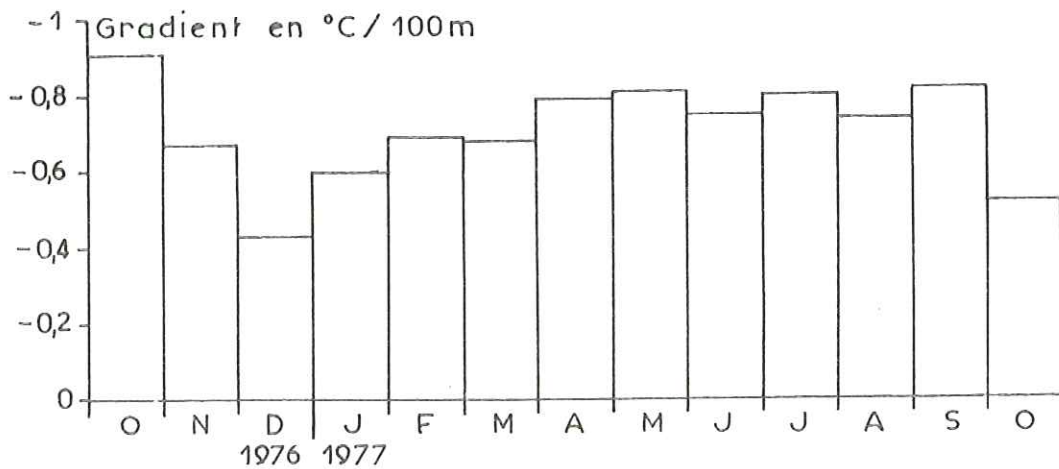


Fig. 39 GRADIENT ALTIMETRIQUE DE LA TEMPERATURE ENTRE SAINT MARTIN DHERES ET LA FAYOLLE

		1976			1977			
		O	N	D	J	F	M	A
La Fayolle	min.	2	-2,2	-4,4	-4,2	-1,5	0	0,1
	max.	9,85	5	2,8	2,3	5,3	9,4	9,2
	moy.	5,9	1,4	-0,8	-0,95	1,9	4,7	4,65
St Martin d'Hères		12,5	6,3	2,3	3,4	6,9	9,7	10,4

		M	J	J	A	S	O	oct. 76 sept. 77
La Fayolle	min.	3,6	7,4	9,4	9,25	6	2,7	2,1
	max.	13,2	16,6	19,6	17,95	15	17,1	10,5
	moy.	8,4	12	14,5	13,6	10,5	9,9	6,3
St Martin d'Hères		14,3	17,5	20,2	19	16,4	13,7	11,6

Tableau n° 10 . Moyennes mensuelles des températures minimales et maximales quotidiennes à La Fayolle, et températures moyennes à St Martin d'Hères.

3.1.2.2.2. Le gradient altimétrique de la température

A partir des températures moyennes du tableau n° 10 nous avons calculé le gradient altimétrique mensuel de la température entre St Martin d'Hères et La Fayolle.

	O	N	D	J	F	M	A	M	J
Gradient en °C/100 m	-0,91	-0,67	-0,43	-0,60	-0,69	-0,68	-0,79	-0,81	-0,75
	J	A	S	O	oct. 76 sept. 77				
	-0,80	-0,74	-0,82	-0,52	-0,72				

Tableau n° 10 a. Gradient altimétrique de la température entre St Martin d'Hères et La Fayolle.

Ce gradient varie au cours des saisons et présente un minimum en hiver et un maximum en été (voir la figure n° 39).

C'est en appliquant ce gradient que nous avons

calculé les températures moyennes mensuelles rapportées aux altitudes moyennes des bassins versants, qui seront utilisées pour la détermination de l'évapotranspiration.

3.1.2.2.3. Les températures extrêmes d'octobre 76 à septembre 77

Les températures extrêmes sont intéressantes à signaler dans la mesure où elles caractérisent bien le climat, et complètent les données moyennes. Les températures maximales et minimales mesurées ont été respectivement + 25°C et - 16°C, ce qui représente une amplitude de 41°C, assez faible à cause de l'hiver doux et de l'été peu marqué.

D'autre part, nous avons noté :

- 144 jours de gelée (température minimale sous abris $\leq 0^{\circ}\text{C}$) répartis de septembre à mai.

- 41 jours sans dégel (température maximale sous abris $\leq 0^{\circ}\text{C}$) répartis de novembre à avril.

- 9 jours de grands froids (température minimale sous abris $\leq -10^{\circ}\text{C}$) répartis en décembre et janvier.

- 4 jours chauds (température maximale sous abris $\geq 25^{\circ}\text{C}$) répartis en juillet et août.

Ces valeurs indiquent un climat peu contrasté quand aux températures (peu de jours chauds et très froids), néanmoins le nombre de jours de gelée est important. La rigueur de climat matheysin est donc plus due à l'action combinée du vent et du froid qu'aux températures minimales.

3.1.3. ETUDE DE L'HYGROMETRIE

Le bassin versant était équipé d'un enregistreur hygrométrique à cheveux, installé à La Fayolle. L'hygrométrie quotidienne a été déterminée par planimétrage.

	1976					1977								
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	O-S
Hygrométrie en % de sat.	82	82,6	84	85,7	81,5	74	83	83,4	82	83,1	86,1	89	75,8	83
Pression part. d'eau en mb.	7,6	5,6	4,8	4,9	5,7	6,4	7,1	9,2	11,5	13,6	13,5	11,3	9,3	8,4

Tableau n° 11 . Hygrométrie moyenne mensuelle et pression partielle d'eau à La Fayolle durant la période d'étude.

La pression partielle de vapeur d'eau dans l'air a été calculée de la manière suivante :

$$\xi = 100 \frac{P}{P_s} \quad \text{où}$$

ξ = hygrométrie relative en %

P_s = pression de vapeur saturante en mb, fonction de la température.

Nous nous sommes servis de ces mesures de l'humidité atmosphérique pour calculer l'évaporation à la surface des lacs.

L'humidité atmosphérique durant la période étudiée est élevée ce qui explique l'importance et la fréquence de la rosée matinale.

3.1.4. L' INSOLATION

En l'absence de mesures de l'insolation sur le bassin versant nous présentons les mesures effectuées au solarigraphe de St Martin d'Hères.

Durée de	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	Oct.Sept.76
l'insolation	103	78	78	46	81	147	138	165	176	251	201	197	1661
en heures	1976			1977									

Tableau n° 12 . Durée de l'insolation mensuelle à St Martin-d'Hères.

L'insolation moyenne annuelle calculée sur la période 1948-75 est de 2 006 heures; la période étudiée est donc nettement déficitaire quant à l'insolation, ce que laissait d'ailleurs prévoir la forte pluviosité. Les valeurs de l'insolation mensuelle seront utilisées pour calculer l'évapotranspiration.

3.1.5. LES VENTS

Le bassin n'étant pas équipé d'un anémomètre nous présentons ici les vitesses moyennes mensuelles du vent à St Martin d'Hères.

	1976			1977									
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O
Vitesse moy. du vent m/s	0,9	1,2	1,05	1,1	1,2	1,15	1	1,35	1,2	0,9	0,75	0,65	1,05

Tableau n° 13 . Vitesse moyenne mensuelle du vent à
St Martin d'Hères.

Il est important de noter que ces valeurs ne donnent qu'un ordre de grandeur de la vitesse du vent sur la Matheysine, en effet des conditions orographiques particulières (couloir orienté N-S), sont susceptibles de faire subir à ces valeurs des variations en intensité très importantes.

Ceci est d'ailleurs vérifié par la réputation de pays très venté appliquée à la Matheysine par ses habitants.

Les vents dominants sont :

- le vent du nord qui souffle de façon quasi permanente sur la plateau, par sa présence il accentue la rigueur du climat en hiver, c'est la " bise ",
- le vent du sud qui peut être très violent , il apporte en général les précipitations,
- le foehn qui vient du sud- sud ouest, il est rare et apporte des masses d'air très chaud et sec, susceptibles d'accélérer de façon spectaculaire la fonte de la neige.

3.2. ETUDE DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION

L'estimation de l'évapotranspiration, grâce à différentes formules a nécessité l'utilisation de paramètres météorologiques ramenés à l'altitude moyenne des bassins versants; nous avons donc déterminé l'évapotranspiration à partir des mesures fournies par la station météorologique de La Fayolle (alt. 940 m), en tenant compte des variations avec l'altitude des paramètres climatiques. L'évapotranspiration a été calculée pour le bassin versant du Ruisseau des Moulins (alt.moyenne 1 348 m), et pour le bassin versant total, lacs exclus (alt.moyenne 1 187 m).

Nous avons utilisé les formules établies par les auteurs suivants :

- L. TURC - 1961 - (ETP mensuelle),
- C.W. THORNTON - 1944 - (ETP mensuelle),

- B. PRIMAULT - 1963 - (ETP mensuelle),
- L. TURC - 1954 - (Déficit d'écoulement annuel),
- COUTAGNE (Déficit d'écoulement annuel).

3.2.1. L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE. MENSUELLE

3.2.1.1. Calcul de l'évapotranspiration selon la formule de L. TURC (61)

Cette formule s'énonce ainsi :

$$ETP = 0,4 \frac{t}{t + 15} = (I_g + 50) \text{ où}$$

ETP s'exprime en mm/mois

t est la température moyenne mensuelle en °C

I_g est la radiation solaire globale en cal/cm²/jour

I_g a été calculé à partir des valeurs de l'insolation mensuelle mesurée à St Martin d'Hères grâce à la formule suivante, établie également par L. TURC:

$$I_g = I_gA (0,18 + 0,62 h/H) \text{ où}$$

I_{gA} est la radiation solaire sans atmosphère

H est la durée astronomique du jour

h durée réelle de l'insolation

	1976			1977									
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O
I _g en cal/cm ² /j	173	111	90	82	151	263	312	374	406	482	386	332	202

Tableau n° 14 . Radiation solaire globale à St Martin d'Hères

t a été déterminé à partir des mesures de la station de La Fayolle en y appliquant le gradient altimétrique de la température pour les rapporter aux altitudes moyennes des bassins versants.

Les évapotranspirations mensuelles, qu'on obtient en appliquant cette formule, sont présentées dans le tableau page suivante.

	1976			1977										oct.76 sept.77
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	
B.V. alt.moy.1348m	11	0	0	0	0	14	12	43	68	91	72	49	34	360
B.V. alt.moy.1187m	17	0	0	0	1	21	22	51	74	96	77	55	37	414

Tableau n° 15 . Evapotranspiration mensuelle selon L.TURC en mm/mois

L'évapotranspiration, d'après cette formule, serait nulle pour les mois où la température est inférieure ou égale à 0°C, ce qui n'est pas le cas dans la réalité.

3.2.1.2. Calcul de l'évapotranspiration selon C.W. THORNTHWAITE

Cette formule s'énonce ainsi :

$$ETP = 1,6 \left(\frac{10 t}{TE} \right)^a \cdot c \quad \text{où}$$

ETP s'exprime en cm par mois

$$a = 675 \cdot 10^{-9} TE^3 - 771 \cdot 10^{-7} TE^2 + 1792 \cdot 10^{-5} TE + 49239 \cdot 10^{-5}$$

$$TE = \sum_{i=1}^{12} i$$

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514}$$

t est la température moyenne mensuelle en °C

c est un facteur de correction fonction de la latitude et du mois

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
C	0,79	0,81	1,02	1,13	1,29	1,31	1,32	1,22	1,04	0,94	0,79	0,74

Tableau n° 16 . Facteur de correction c de la formule de C.W. THORNTHWAITE.

Les évapotranspirations mensuelles ainsi calculées sont présentées page suivante.

	1976			1977									oct.76 sept.77
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	
B.V.alt.moy.1348 m	22	0	0	0	0	23	20	57	85	100	89	58	454
B.V.alt.moy.1187 m	28	0	0	0	2	27	27	60	86	101	90	59	480

Tableau n° 17 . Evapotranspiration mensuelle selon C.W. THORNTHWAITE en mm/mois.

3.2.1.3. Calcul de l'évapotranspiration selon B. PRIMAULT

Cette formule s'énonce ainsi :

$$ETP = j.c. \left(1,03 - \frac{\xi}{100} \right) (h + 2n) \text{ où}$$

ETP s'exprime en mm par mois de n jours

h est la durée de l'insolation mensuelle en heures

ξ est l'humidité relative en %

c est un coefficient fonction de l'altitude :

$$c = 1.75 \cdot 10^{-4} \text{ alt (m) } + 0,88$$

j sont des coefficients mensuels donnés par

B.PRIMAULT

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
j	0,11	0,17	0,45	0,75	0,93	1,05	1,11	1,02	0,8	0,56	0,36	0,22

Tableau n° 18 . Coefficient mensuel j de la formule de B.PRIMAULT

Les valeurs mensuelles de l'humidité relative utilisées sont celles mesurées à la station de La Fayolle.

Après avoir appliqué la formule de B.PRIMAULT, nous obtenons les résultats suivants :

	1976			1977									oct.76 sept77	
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S		O
B.V.alt.moy.1348 m	22	11	6,5	2	5,5	30	33	46	77	77	51	32	34	393
B.V.alt.moy.1187m	21	11	6,5	2	5,5	29	32	45	75	75	49	31	33	382

Tableau n° 19 . Evapotranspiration mensuelle selon B.PRIMAULT en mm/mois.

3.2.2. DEFICIT D'ÉCOULEMENT ANNUEL

3.2.2.1. Calcul du déficit d'écoulement annuel selon L.TURC (1954)

Cette formule s'énonce ainsi :

$$D = \frac{P}{\left(0,9 \frac{P^2}{L^2}\right)^{1/2}} \quad \text{où}$$

D est le déficit d'écoulement annuel en mm

P est la hauteur des précipitations annuelles en mm

$$L = 300 + 25 t + 0,05 t^3$$

t est la température moyenne annuelle en °C

Les déficits d'écoulement ainsi calculés sont de 404 mm pour le bassin versant total, lacs exclus, et 375 mm pour le bassin versant du Ruisseau des Moulins.

3.2.2.2. Calcul du déficit d'écoulement annuel selon COUTAGNE

COUTAGNE propose la formule suivante pour les zones à pluviométrie supérieure à 1 000 mm par an :

$$D = 0,20 + 0,035 T \quad \text{où}$$

D est le déficit d'écoulement exprimé en m

T est la température moyenne annuelle en °C

Les déficits d'écoulement ainsi calculés sont de 357 mm pour le bassin versant total et de 316 mm pour le bassin versant du Ruisseau des Moulins.

3.2.3. CONCLUSION

Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle sont égales à l'évapotranspiration réelle car l'E.T.P. a toujours été inférieure aux précipitations durant la période étudiée.

Les différentes valeurs de l'évapotranspiration sont présentées dans le tableau ci-dessous

	TURC 61	THORNTHWAITE	PRIMAULT	TURC 54	COUTAGNE
B.V.alt.moy. 1 348 m	360	454	393	376	316
B.V.alt.moy. 1 187 m	414	480	382	404	357

Tableau n° 20 . Evapotranspirations réelles et déficits d'écoulement en mm calculés pour la période oct.76-sept.77.

Nous pensons pour notre part, que dans le cas étudié ces méthodes sous-estiment l'évapotranspiration pour plusieurs raisons :

- elles s'appliquent à des conditions météorologiques moyennes (en effet les études statistiques qui ont permis leur établissement ne comportaient nécessairement que peu d'années extrêmes quant aux précipitations, or l'année étudiée a été très pluvieuse),

- la répartition des précipitations a été très régulière, et leur intensité très faible (seulement 18 % des jours de pluie ont reçu plus de 10 mm de précipitations), ce qui favorise l'évaporation grâce à l'interception de l'eau par le feuillage,

- le vent souffle presque sans arrêt sur la plateau matheysin ce qui, en renouvelant perpétuellement les masses d'air augmente leur pouvoir évaporant,

- la nappe est subaffleurante sur une assez grande partie du bassin versant (plaine de Cholonge à La Coirelle, zones marécageuses),

- le ruissellement direct est faible à cause d'une infiltration importante dans les terrains superficiels perméables.

Pour ces multiples raisons, nous adopterons comme valeurs assez vraisemblables de l'évapotranspiration celles de la formule de THORNTHWAITE :

B.V. total	480 mm
B.V. du Ruisseau des Moulins...	454 mm

L'incertitude relative sur ces valeurs est estimée à $\pm 20 \%$

3.3. ÉTUDE DE L'ÉVAPORATION À LA SURFACE DES LACS

La quantité d'eau s'évaporant de la surface des lacs a été déterminée grâce à différentes formules s'appliquant à une surface d'eau libre:

- formule de LUGEON et SKYENKIEWICZ (in DUSSART 1966),
- formule de A.MEYER (1915).

3.3.1. CALCUL DE L'EVAPORATION SELON LA FORMULE DE LUGEON ET SKYENKIEWICZ

Cette formule s'énonce ainsi :

$$E = A.n (e_s - e_a) . \frac{273 + t}{273} . \frac{760}{B - e_s} \quad \text{où}$$

E est l'évaporation en mm par mois

A est un coefficient égal à 0,398 en zone tempérée

n est le nombre de jours du mois considéré

t est la température moyenne mensuelle des maxima journaliers en °C

B est la pression atmosphérique moyenne mensuelle en mm de mercure

e_s est la pression de vapeur saturante à la température moyenne mensuelle de l'eau du lac en mm de mercure

e_a est la pression de vapeur d'eau de l'air en mm de mercure

e_a a été déterminé à partir de la température moyenne mensuelle de l'eau de surface des lacs.

	1976			1977									
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O
T moy.mens. lac Laffrey	12,4	7,5	3,6	0,7	1,6	4,7	8	11,6	14	16,4	16,8	16,4	11,8
e_s (mm Hg)	10,81	7,78	5,93	4,82	5,14	6,41	8,05	10,26	11,98	13,99	14,35	13,99	10,38
T moy.mens. lac Petichet	12,2	7,5	1,5	<0°	2,4	6,6	9,5	13	16,8	17,2	17	16	11,8
e_s (mm Hg)	10,66	7,78	5,11	3,9	5,44	7,32	8,88	11,25	14,35	14,72	14,53	13,62	10,38

Tableau n° 21 . Températures moyennes mensuelles de l'eau des lacs et pressions de vapeur saturante à ces températures.

ea a été déterminé à partir de la température et de l'humidité relative de l'air mesurées à La Fayolle.

	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O
ea en mm Hg	5,68	4,19	3,63	3,66	4,27	4,79	5,31	6,91	8,64	10,21	10,09	8,44	6,94
	1976			1977									

Tableau n° 22 . Pression de vapeur d'eau de l'air en mm de mercure

Les variations de la moyenne mensuelle de la pression atmosphérique étant extrêmement faibles (de l'ordre de $\pm 2\%$ de la pression standard pour la station météorologique de St Martin d'Hères), nous avons adopté dans nos calculs la pression atmosphérique standard à l'altitude des lacs. Pour le lac de Laffrey B est égal à 681 mm de mercure, il est égal à 680 mm de mercure, pour le lac de Petichet.

Les évaporations que l'on obtient en appliquant cette formule seraient donc :

	1976			1977									
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O
Lac de Laffrey	74	49	32	16	11	30	38	49	48	57	64	80	51
Lac de Petichet	72	49	21	3	15	36	50	64	83	68	67	51	51

Tableau n° 23 Evaporation de la surface des lacs d'après la formule de LUGEON et SKYENKIEWICZ, en mm par mois.

L'évaporation pour la période étudiée (oct.76-sept77) serait donc égale à 548 mm pour le lac de Laffrey et 578 mm pour celui de Petichet.

3.3.2. CALCUL DE L'EVAPORATION SELON LA FORMULE DE A.MEYER (1915)

Cette formule s'énonce ainsi :

$$E = 11 (P_e - P_a) (1 + 0,1 V) \quad \text{où}$$

E est l'évaporation en pouces par mois

P_a est la pression de vapeur de l'air en pouces de mercure prise à 25 pieds au-dessus de la surface

Pe est la pression de vapeur saturante en pouces de mercure à la température moyenne mensuelle de l'eau

V est la vitesse moyenne mensuelle du vent en mph mesurée à 25 pieds au-dessus de la surface

Pa a été calculé à partir des mesures d'hygrométrie et de températures effectuées à La Fayolle

V est le facteur le plus délicat à déterminer car nous ne disposons pas d'anémomètre, aussi avons-nous utilisé les données de la station météorologique de St Martin d'Hères, tout en ayant conscience que ces valeurs sont très inférieures à celles que l'on observerait sur le plateau matheysin, où les vents sont beaucoup plus violents. L'évaporation réelle serait donc légèrement supérieure à celle que nous allons calculer.

Les évaporations ainsi calculées (et converties en mm/mois) seraient donc égales à :

	1976			1977									
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O
Lac de Laffrey	60	42	27	13	10	19	30	37	40	44	49	64	40
Lac de Petichet	58	42	17	3	14	30	42	52	68	53	51	59	40

Tableau n° 24 . Evaporation de la surface des lacs d'après la formule de A. MEYER, en mm par mois.

3.3.3. CONCLUSION

En l'absence de mesures de l'évaporation avec un bac colorado, il nous est difficile de déterminer quelle est la formule dont les résultats se rapprochent le plus de la réalité, nous avons donc adopté une évaporation égale à la moyenne arithmétique des valeurs données par chaque formule.

L'évaporation pour la période octobre 1976 - septembre 1977 serait donc de :

511 mm pour le lac de Laffrey	soit	649.000 m ³
533 mm pour le lac de Petichet	soit	458.000 m ³

3.4. CONCLUSION À L'ÉTUDE HYDROCLIMATIQUE

Cette étude a permis de constater et de préciser certains phénomènes hydroclimatiques pour le bassin versant étudié d'octobre 1976 à septembre 1977.

- *la lame d'eau précipitée est égale à 1 538 mm,*
- *la température moyenne est de 4,5 °C,*
- *l'hygrométrie moyenne est élevée 83 %,*
- *l'évapotranspiration s'élève à 480 mm,*
- *l'évaporation sur le lac de Laffrey est de 511 mm alors qu'elle atteint 533 mm sur le lac de Petichet,*
- *le gradient altimétrique de la pluviosité est égal à + 47,4 mm/100 m*
- *le gradient altimétrique de la température est de - 0,72 °C/100 m.*

D'autre part, nous avons montré que :

- *la période étudiée était très excédentaire quant aux précipitations puisqu'il s'agissait de l'année décennale humide pour St Martin d'Hères, et de l'année humide de temps de retour 6 ans à La Motte d'Aveillans,*
- *à l'échelle du siècle la région étudiée présente des fluctuations de la pluviosité très nettes, mais dont la cause est encore inconnue.*

4

HYDROLOGIE

4. HYDROLOGIE

4.1. LES EAUX DE SURFACE

4.1.1. LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Le réseau hydrographique est peu développé sur le bassin versant. Cette faible densité est essentiellement due à la grande extension des formations morainiques perméables.

La caractéristique principale du réseau hydrographique est de posséder deux lacs : le lac de Petichet et le lac de Laffrey, ce dernier recevant les eaux du premier.

Le lac de Petichet est alimenté principalement par le ruisseau des Moulins; celui-ci prend sa source au nord du hameau de La Coirelle, puis environ 1 km plus au sud il s'infiltré dans le remplissage quaternaire du vallon du Pré Epaulé pour réapparaître à quelques centaines de mètres au nord de Cholonge. Après avoir traversé ce village, il reçoit en rive droite un ruisseau important qui descend du Grand Serre, puis son cours, nord-sud jusqu'ici, se dirige vers l'ouest; il s'encaisse alors pour traverser la ligne de drumlins à ossature d'Aalénien qui sépare Cholonge des lacs. En amont de La Fayolle le ruisseau perd une partie de son débit (environ 13 %) en direction du lac de Laffrey, il se jette enfin dans le lac de Petichet.

Le lac de Petichet reçoit d'autre part les eaux de trois petits ruisseaux dont le débit total excède rarement 20 l/s.

Le lac de Petichet est utilisé par l'E.D.F. qui peut au moyen d'une vanne située à l'exutoire faire varier son niveau de trois mètres environ. L'exutoire de Petichet se jette dans le lac de Laffrey dont il constitue le principal affluent, les autres ruisseaux se jettant dans ce lac ne totalisant qu'un débit rarement supérieur à 40 l/s.

Le lac de Laffrey est également utilisé par l'E.D.F. qui peut faire varier son niveau d'environ 2,5 mètres grâce à une vanne à l'exutoire. L'exutoire de ce lac est canalisé et son eau turbinée à l'aval dans les usines de Loula et Jouchy situées dans la vallée de la Romanche.

4.1.2. MESURES DES DEBITS

Le bassin versant était équipé avant notre étude d'une seule échelle limnimétrique située sur l'exutoire du lac de Laffrey. La superficie du bassin versant géographique au niveau de cette échelle est de 17,37 km². La lecture de cette échelle a été effectuée en moyenne tous les trois jours, ce qui est suffisant le débit étant réglé par une vanne et par la cote du lac.

La Direction Départementale de l'Agriculture a ajouté pour notre étude un limnigraphe OTT à l'aval du ruisseau des Moulins. Afin d'obtenir une précision suffisante aux faibles débits, la section choisie a été équipée d'un seuil triangulaire pour la partie basse, surmonté d'un seuil rectangulaire.

L'enregistrement limnigraphique était relevé toutes les deux semaines.

Les coordonnées LAMBERT de cette station sont :

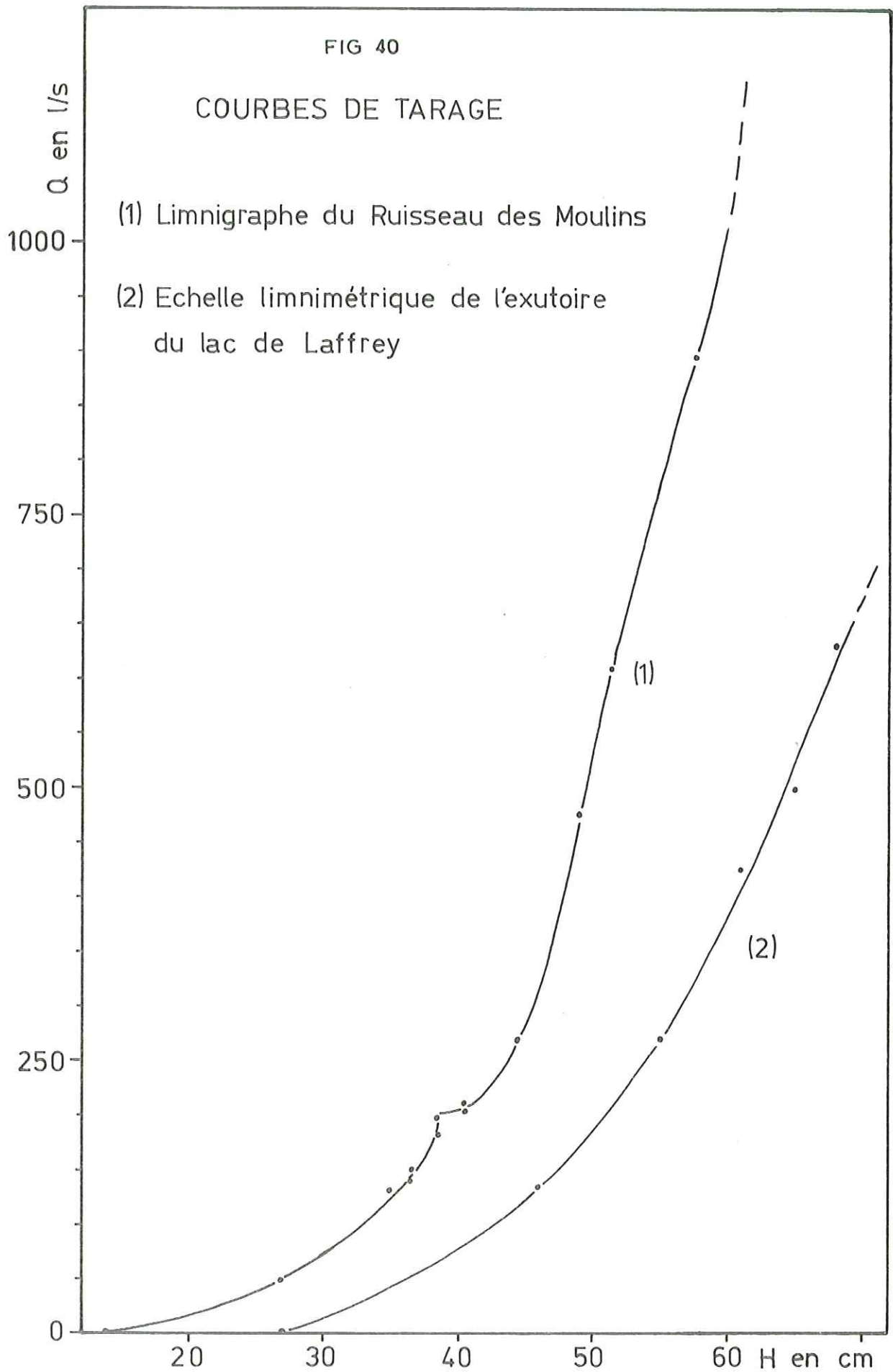
$$x = 871,62 \qquad y = 305,19 \qquad z = 925 \text{ m}$$

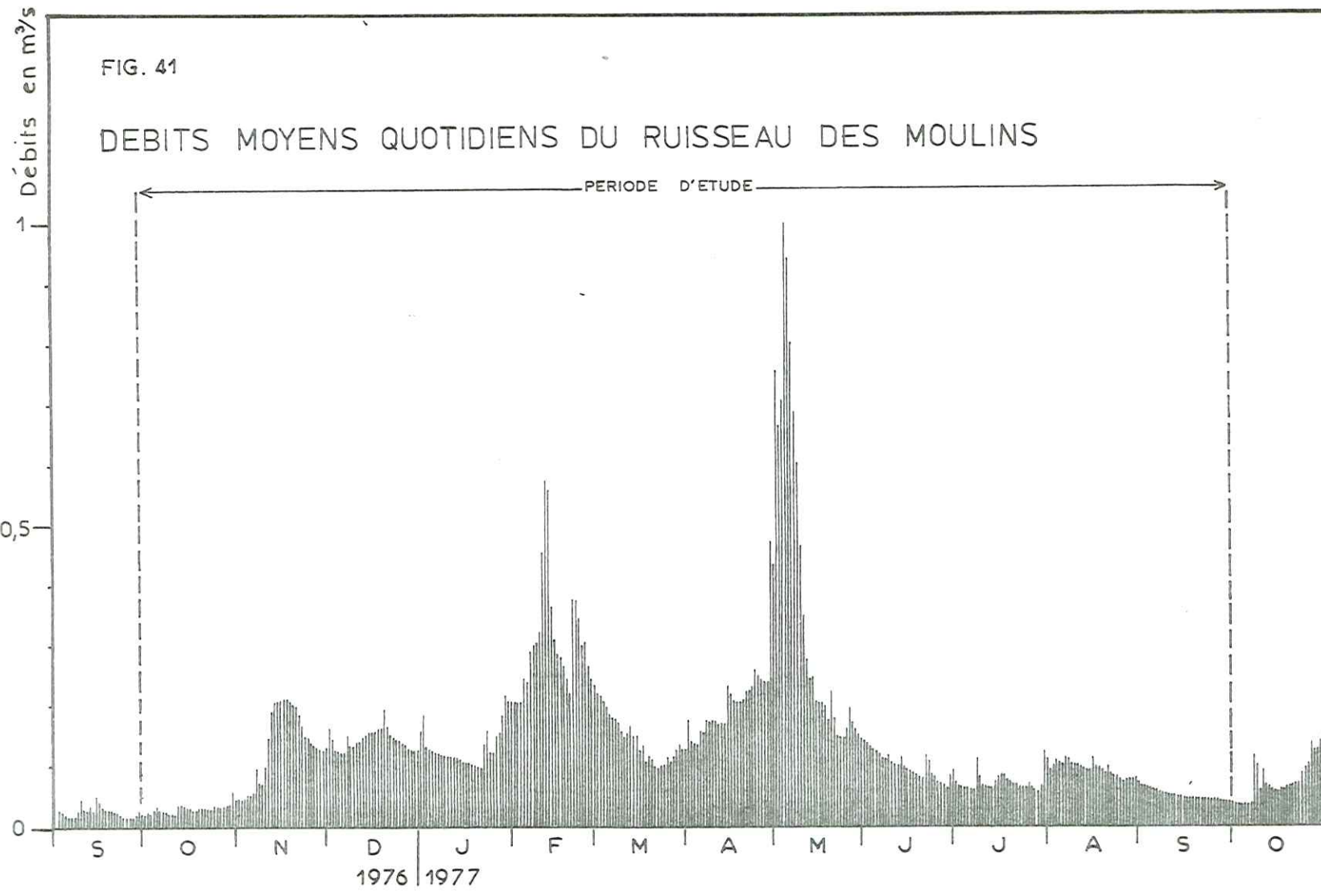
La superficie du bassin versant géographique au niveau du limnigraphe est de 8,16 km².

Le tarage des différentes sections a été effectué au micro-moulinet, les résultats étant obtenus par dépouillement au planimètre.

Un seul jaugeage a été effectué par méthode chimique, la hauteur d'eau étant trop faible pour que le micro-moulinet puisse être utilisé.

Les courbes de tarage sont présentées sur la figure N° 40 (la forme complexe de la courbe de tarage du ruisseau des Moulins est normale: elle est due au seuil dont la forme en triangle surmonté d'un rectangle crée un point singulier dans la loi hauteur-débit).





Nous avons d'autre part effectué le tarage sommaire d'une section située sur l'exutoire du lac de Petichet où nous mesurons la hauteur d'eau par rapport à un repère fixe. La précision de chaque jaugeage est de l'ordre de $\pm 10 \%$, néanmoins le " lissage " de la courbe de tarage permet d'atteindre une précision d'environ $\pm 5 \%$ sur les débits écoulés.

Les courbes de tarage ainsi obtenues permettent de déterminer les débits instantanés; une intégration quotidienne nous donne alors les débits moyens quotidiens, transitant à travers chaque section.

4.1.3. DEBITS QUOTIDIENS DU RUISSEAU DES MOULINS

La figure n° 41 présente les débits moyens quotidiens mesurés au limnigraphe (pour avoir le débit total provenant du bassin versant, il convient de rajouter environ 15 % en plus, dus aux pertes du ruisseau des Moulins en direction du lac de Laffrey).

Les mois de septembre et octobre venant immédiatement après la sécheresse de l'été 1976, sont marqués par des précipitations fortes, mais le sol desséché et les réserves souterraines nulles absorbent chaque averse; c'est pourquoi les débits sont très faibles et les crues peu importantes.

La première quinzaine de novembre, très pluvieuse, reconstitue les réserves souterraines et le ruisseau des Moulins voit son débit augmenter de façon nette. Les débits restent à ce niveau durant le mois de décembre et janvier où quelques pluies et fontes de neige occasionnent cependant quelques crues.

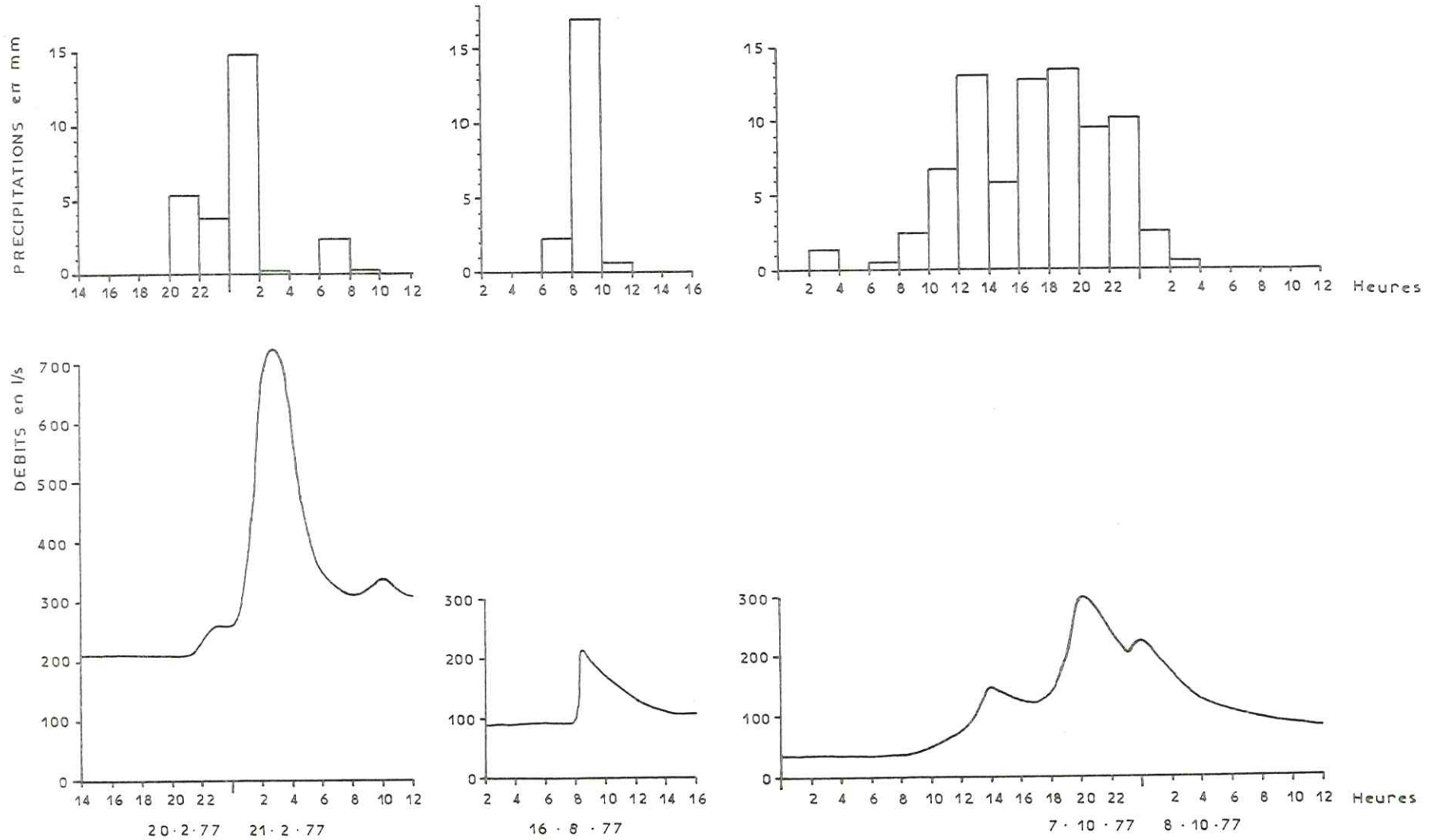
En février, on observe des crues plus importantes dues à des pluies sur un sol saturé et parfois gelé, induisant un ruissellement important.

Les débits décroissent régulièrement début mai où la pluviosité est faible, puis augmentent régulièrement jusqu'à la fin avril à cause de fréquentes petites chutes de neige suivies de fontes. Début mai, de très fortes pluies (149,5 mm en 6 jours) occasionnent des crues très importantes et le débit instantané atteint 1 300 l/s. Fin mai, juin, juillet, août, les débits ne sont plus influencés que de façon faible par les épisodes pluvieux, les crues sont faibles, le sol n'atteignant que rarement la saturation.

Durant le mois de septembre, seules les réserves souterraines alimentent le ruisseau, la pluviométrie étant inférieure à 10 mm.

FIG. 42

RUISSEAU DES MOULINS - 3 CRUES CARACTERISTIQUES



En octobre, les débits augmentent en même temps que les réserves se reconstituent.

Les débits instantanés appellent d'autre part quelques commentaires. La " réponse " du ruisseau aux épisodes pluvieux est très diverse suivant le niveau de saturation du sol. Ainsi le 20 et 21 février 1977 un orage totalisant 24 mm de pluie fit passer le débit instantané du ruisseau de 212 l/s à 725 l/s, alors que l'orage du 16 août 1977 où il tomba 19,8 mm de pluie ne fit que passer le débit du ruisseau de 90 l/s à 215 l/s (voir figure n° 42). Dans le premier cas le sol était saturé par la fonte de la neige qui avait eu lieu juste avant l'épisode pluvieux, dans le second cas la pluie est tombée sur un sol desséché par huit jours chauds et sans précipitations.

L'orage exceptionnel du 7 octobre 1977 totalisant 78,4 mm de pluie occasionna une crue qu'il est intéressant d'étudier. Cet orage est tombé sur un sol desséché par l'absence totale de pluie durant le mois de septembre et le début du mois d'octobre. Après un étiage de 35 l/s, la première pointe de crue n'atteignit que 150 l/s, la plus grande partie de la pluie étant absorbée par le sol; l'efficacité de la seconde pluie (de 16 à 20 h) fut meilleure, le sol étant mouillé le débit atteignit 300 l/s.

4.1.4. DEBITS CARACTERISTIQUES DU RUISSEAU DES MOULINS

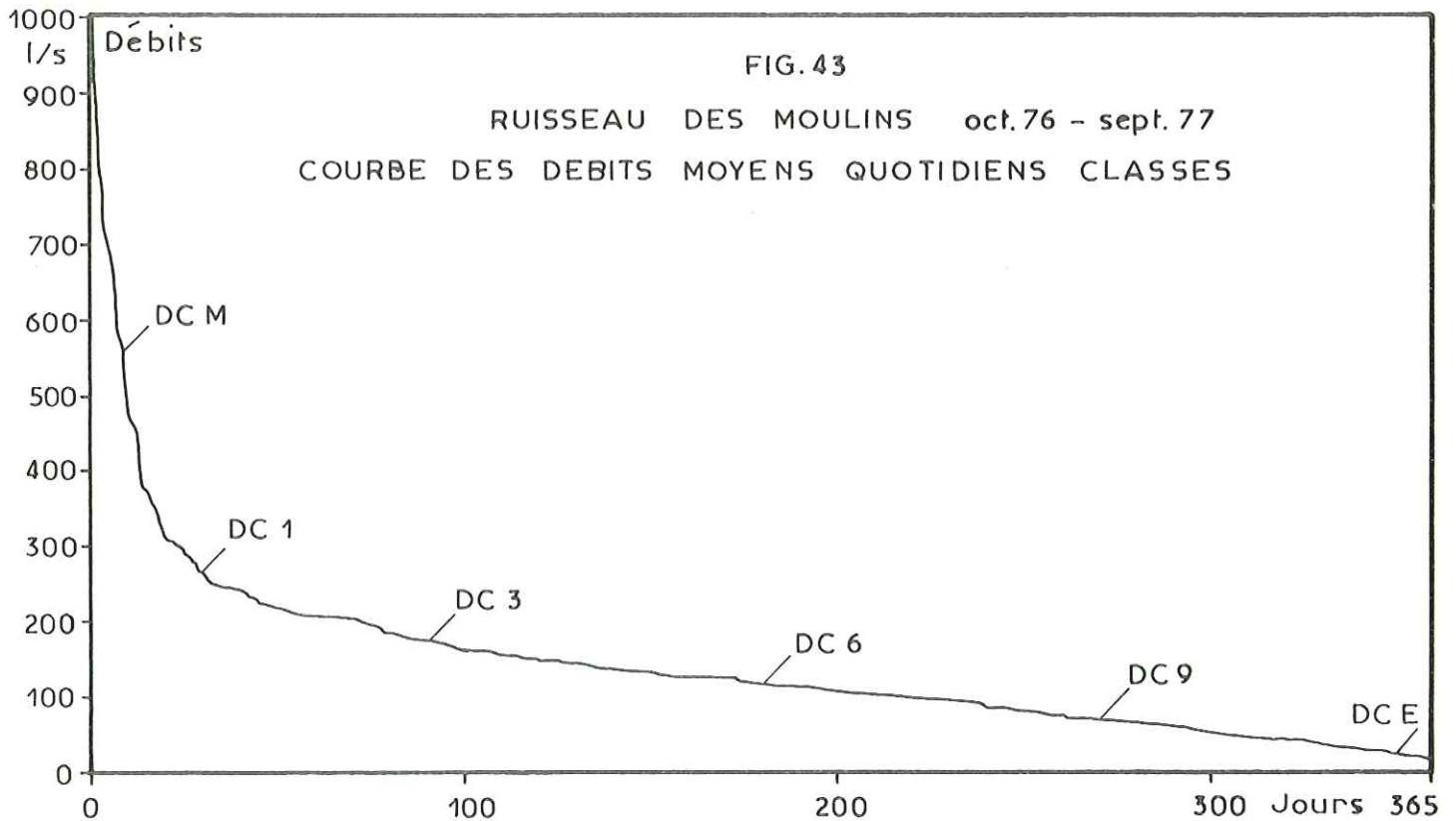
Sur la figure N° 43 nous avons classé les débits moyens quotidiens par ordre décroissant en fonction du temps. Ceci nous permet de définir les valeurs caractéristiques de l'écoulement:

- le débit caractéristique maximum qui est le débit dépassé 10 jours par an D.C.M. = 558 l/s,
 - le débit caractéristique moyen qui est le débit dépassé 6 mois par an D.C.6. = 119 l/s,
 - le débit caractéristique d'étiage est le débit dépassé 355 jours par an D.C.E. = 26 l/s (ce dernier est supérieur au débit d'étiage absolu constaté durant la période d'étude égal à 19 l/s),
 - d'autre part les débits caractéristiques dépassés 1,3 et 9 mois par an sont les suivants :
- D.C.1. = 266 l/s,
 - D.C.3. = 175 l/s,
 - D.C.9. = 70 l/s.

		S	O	1976		1977									
				N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O
Débits moyens mensuels (l/s).	1	24	29	134	141	133	317	149	215	367	100	73	92	48	79
	2		56	60	159	276	246	220	370	747	213	182	180	165	2
	3	128	119	164	181	457	580	590	591	1045	519	374	457	228	149
Volumes écoulés (10^3 m^3).	1	63	79	347	380	355	767	399	558	983	260	196	248	123	212
	2		150	155	426	738	595	589	959	2000	553	487	482	428	5,4
	3	331	318	425	486	1225	1403	1581	1532	2800	1344	1003	1224	592	400
% de l'écoulement annuel (oct-sept).	1		1,7	7,4	8,1	7,6	16,3	8,5	11,9	20,9	5,5	4,2	5,3	2,6	
	2		2,0	2,0	5,6	9,2	7,9	7,8	12,7	26,5	7,3	6,4	6,4	5,7	
	3		2,3	3,1	3,5	8,8	10,1	11,4	11,0	20,1	9,7	7,2	8,8	4,3	
Débits spécifiques ($1/\text{s}/\text{km}^2$).	1	2,9	3,5	16,4	17,3	16,3	38,9	18,3	26,4	45	12,3	8,9	11,3	5,9	9,7
	2		4,7	5,1	13,4	23,3	20,7	18,6	31,2	63	18	15,4	15,2	13,9	0,17
	3	7,4	6,8	9,4	10,4	26,3	33,4	34	34	60,2	29,9	21,5	26,3	13,1	8,6
Lame d'eau écoulée (mm).	1	8	10	43	47	44	94	49	68	120	32	24	30	15	26
	2		13	13	36	62	50	50	81	169	47	41	41	36	0,5
	3	19	18	24	28	71	81	91	88	161	135	58	70	34	23

1 : Ruisseau des Moulins (limnigraphe). 2 : Exutoire du lac de Petichet. 3 : Exutoire du lac de Laffrey.

Tableau N° 25 Paramètres hydrologiques mensuels des trois points de mesures des débits.



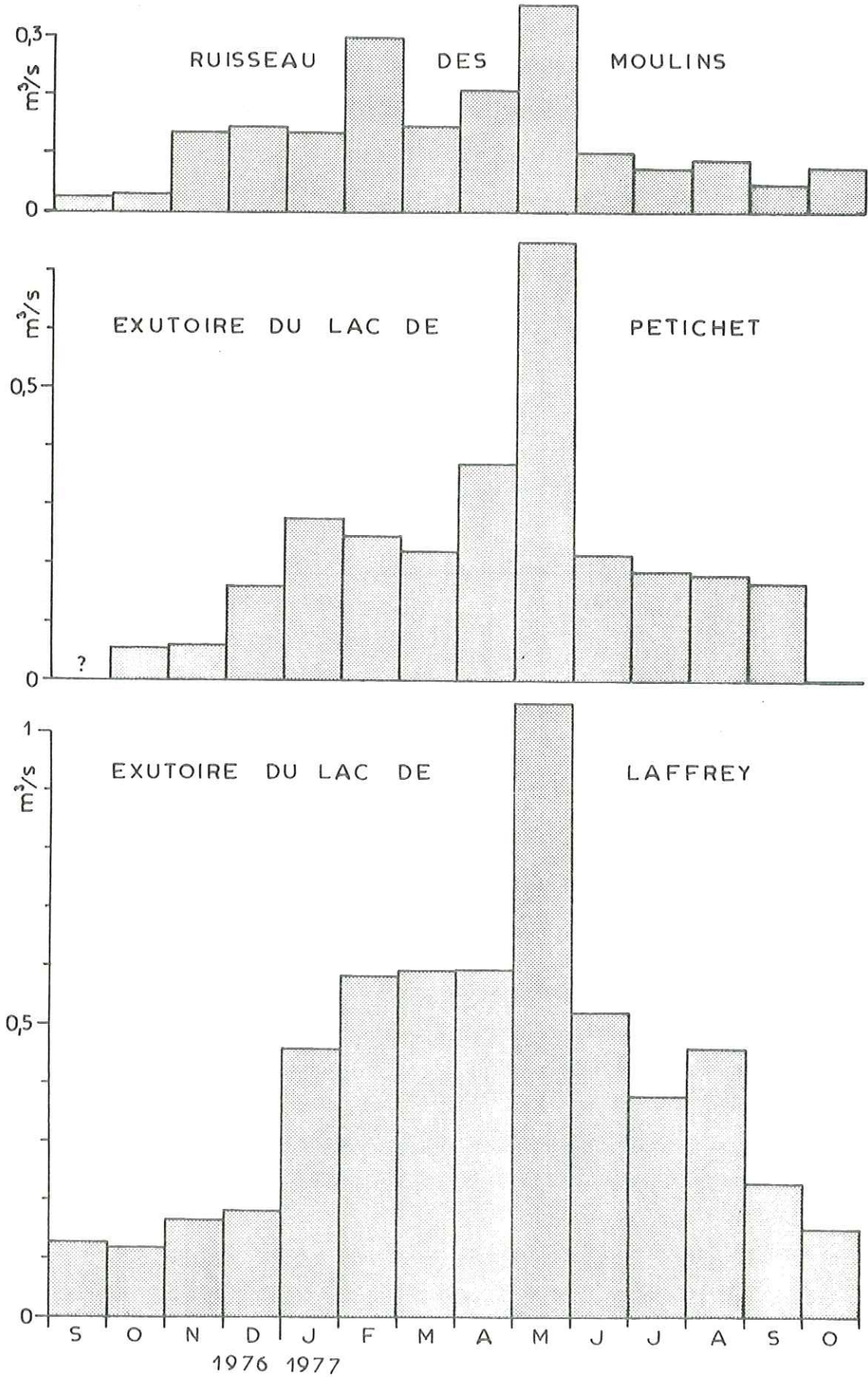
4.1.5. DEBITS MOYENS MENSUELS DU RUISSEAU DES MOULINS, DE L'EXUTOIRE DE PETICHET ET DE L'EXUTOIRE DE LAFFREY

La figure n° 44 présente les débits moyens mensuels constatés aux trois points de mesures. Le mois présentant l'écoulement maximum est le mois de mai ce qui est dû aux précipitations très importantes en avril et mai.

Le tableau N° 25 résume les différents paramètres mensuels caractéristiques se rapportant aux trois points de mesure.

FIG.44

DEBITS MOYENS MENSUELS



La position des hautes eaux en mai et des basses eaux en septembre est peu significative du régime d'écoulement, l'année ayant été assez exceptionnelle quant aux précipitations (peu de neige et une pluviosité déficitaire en automne).

Néanmoins nous pensons que le régime normal est du type pluvio-nival avec deux maxima, un en mai l'autre en novembre.

4.1.6. LAME D'EAU ECOULEE ET AUTRES PARAMETRES ANNUELS CONCERNANT LES ECOULEMENTS DE SURFACE

Le tableau n° 26 résume les différents paramètres annuels caractéristiques se rapportant aux trois points de mesures durant la période octobre 76 - septembre 77.

	Ruisseau des Moulins Limnigraphe	Ruisseau des Moulins + per- tes vers Laffrey	Exutoire de Petichet	Exutoire de Laffrey
Lame d'eau écoulee	576 mm	662 mm	638 mm	802 mm
Débits moyens annuels	149 l/s.	171 l/s.	239 l/s.	442 l/s.
Volumes écoulés(m ³)	4698 x 10 ³	5403 x 10 ³	7562 x 10 ³	13933 x 10 ³
Débits spécifiques l/s/km ²	18,3	20,9	20,2	25,4

Tableau n° 26 . Paramètres hydrologiques annuels caractéristiques.

Nous avons d'autre part calculé le débit spécifique de l'exutoire du lac de Laffrey pour la période 1948-1970 pour laquelle nous possédons les données de l'E.D.F. Il est égal à 16,8 l/s/km², l'année étudiée est donc très excédentaire quant aux débits écoulés ce qui était prévisible d'après les données météorologiques.

4.2. LES EAUX SOUTERRAINES

4.2.1. EVALUATION DU VOLUME DES RESERVES SOUTERRAINES

Pour déterminer ce volume nous avons étudié les courbes de tarissement du ruisseau des Moulins en régime non influencé. Nous avons utilisé la formule de Maillet qui s'applique aux régimes d'écoulements laminaires, celle-ci admet une décroissance exponentielle du débit en fonction du temps :

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad \text{où}$$

Q_t est le débit à l'instant t en m^3/s

Q_0 est le débit au début du tarissement en m^3/s

α est le coefficient de tarissement

t est le temps écoulé depuis le début du tarissement en jours.

En utilisant les logarithmes décimaux, il est possible d'exprimer la formule de Maillet de la manière suivante :

$$\log Q_t = \log Q_0 - 0,4343 \alpha t$$

Le volume des réserves W en m^3 à l'instant t_0 est :

$$W = \int_{t_0}^{\infty} Q_t dt = \frac{Q_0}{\alpha} \quad (\text{avec } t \text{ exprimé en secondes})$$

α étant déterminé à partir de jours, l'équation précédente devient alors :

$$W = \frac{86400 \cdot Q_0}{\alpha}$$

La figure n° 45 présente les courbes de tarissement que nous avons pu établir de septembre 1976 à septembre 1977. Certains tarissements n'ont pu être étudiés que durant des périodes non influencées courtes (5 jours) ce qui augmente évidemment les incertitudes quant aux réserves, nous les avons cependant conservés car ils donnent un ordre de grandeur du volume des réserves.

Les valeurs de α , W , Q_0 et la lame d'eau stockée équivalente sont consignées dans le tableau ci-dessous.

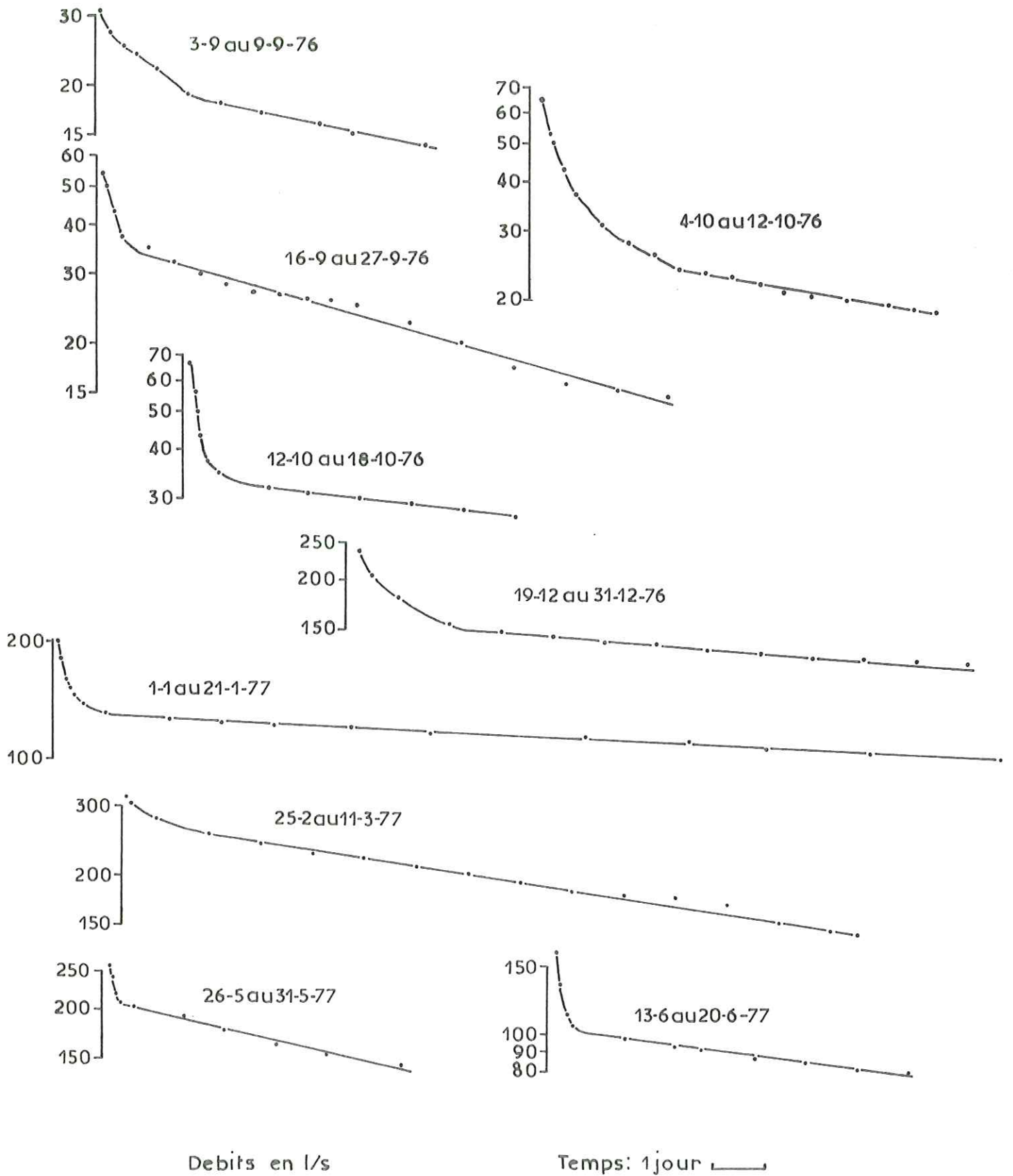
Période étudiée	α	W (m^3)	Lame d'eau équivalente en mm	Q_0 l/s
3.9 au 9.9. 76	0,063	24 750	3	18
16.9 au 27.9. 76	0,085	33 700	4	34
4.10 au 12.10.76	0,052	39 900	5	24
12.10 au 18.10.76	0,037	75 850	9	32
19.12 au 31.12.76	0,022	579 100	71	150
1.1 au 21. 1.77	0,017	685 600	84	131
25.2 au 11. 3.77	0,048	462 700	57	255
26.5 au 31. 5.77	0,069	255 450	31	205
13.6 au 20. 6.77	0,037	234 150	29	100
29.6 au 8. 7.77	0,015	356 200	44	65
8.7 au 14. 7.77	0,016	364 800	45	66
16.7 au 24. 7.77	0,021	290 500	36	72
7.8 au 15. 8.77	0,020	462 800	57	105
30.8 au 18. 9.77	0,025	219 900	27	63

Tableau N° 27 . Paramètres hydrologiques des courbes de tarissement du ruisseau des Moulins.

Nous présentons d'autre part les variations concomitantes du volume des réserves et du coefficient de tarissement sur la figure n° 46

On remarque que le maximum des réserves se situe en hiver et le minimum vers la fin de l'été et le début de l'automne. Les effets de la sécheresse de 1976 se retrouvent au niveau des réserves de l'automne 1976 qui sont encore extrêmement faibles.

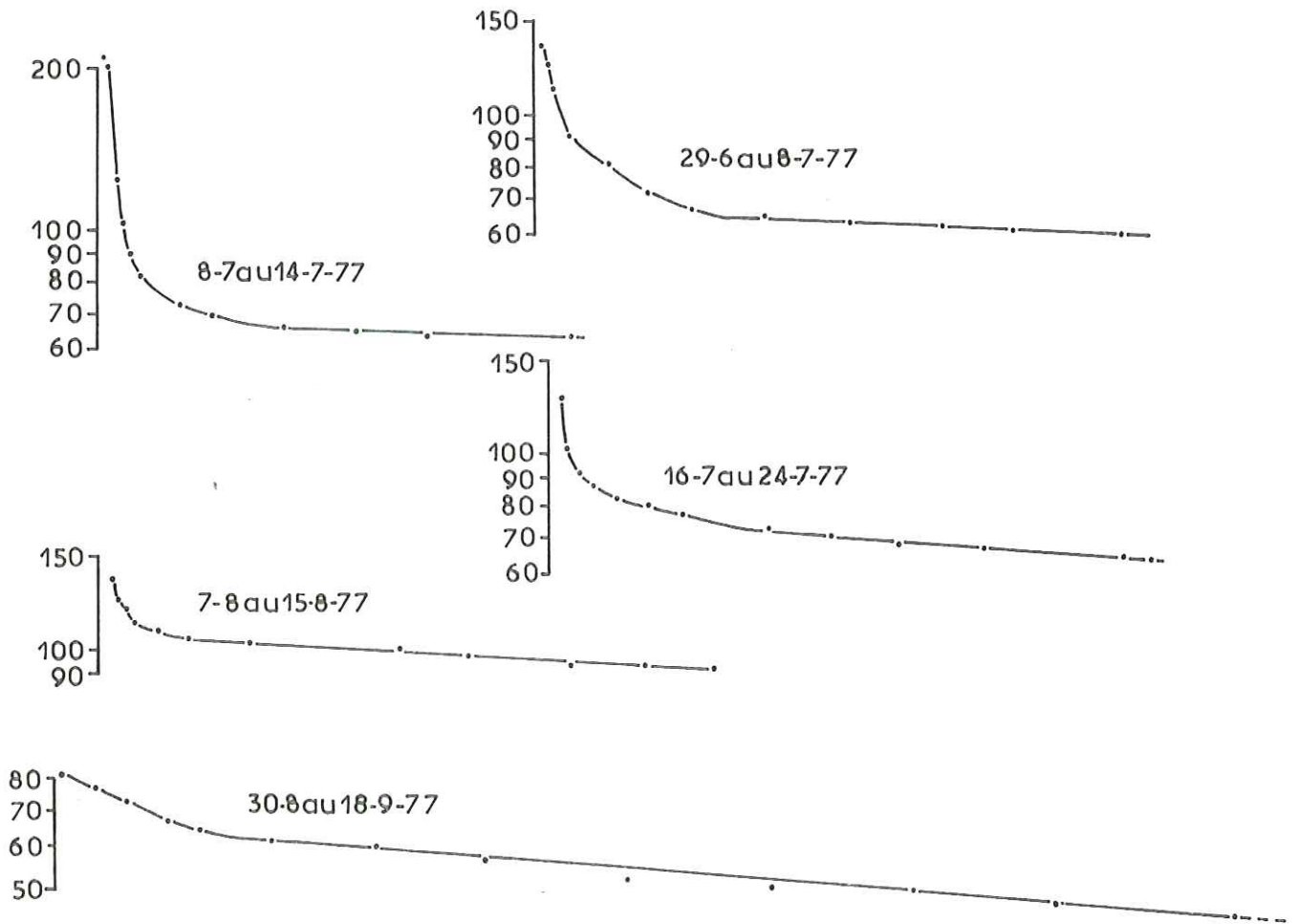
Cette estimation des réserves souterraines se fait par défaut car elle ne tient pas compte de l'évapotranspiration et des pertes vers l'extérieur du bassin versant qui augmentent la vitesse du tarissement (donc α) et diminuent ainsi l'évaluation du volume des réserves (voir le schéma n° 47 ci-après).

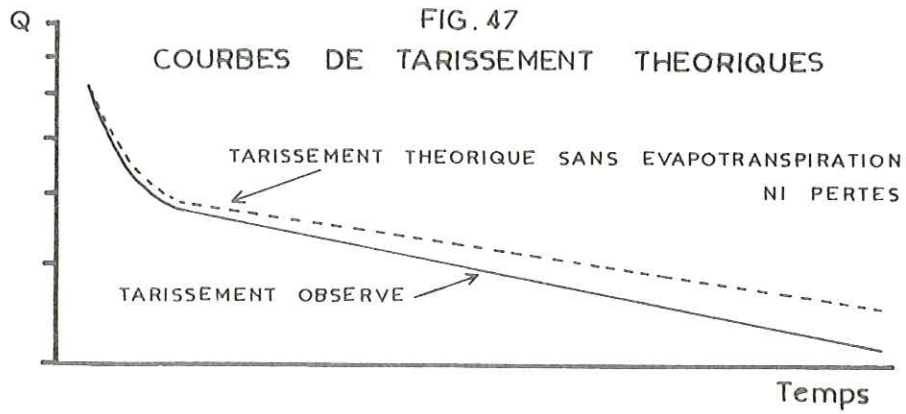
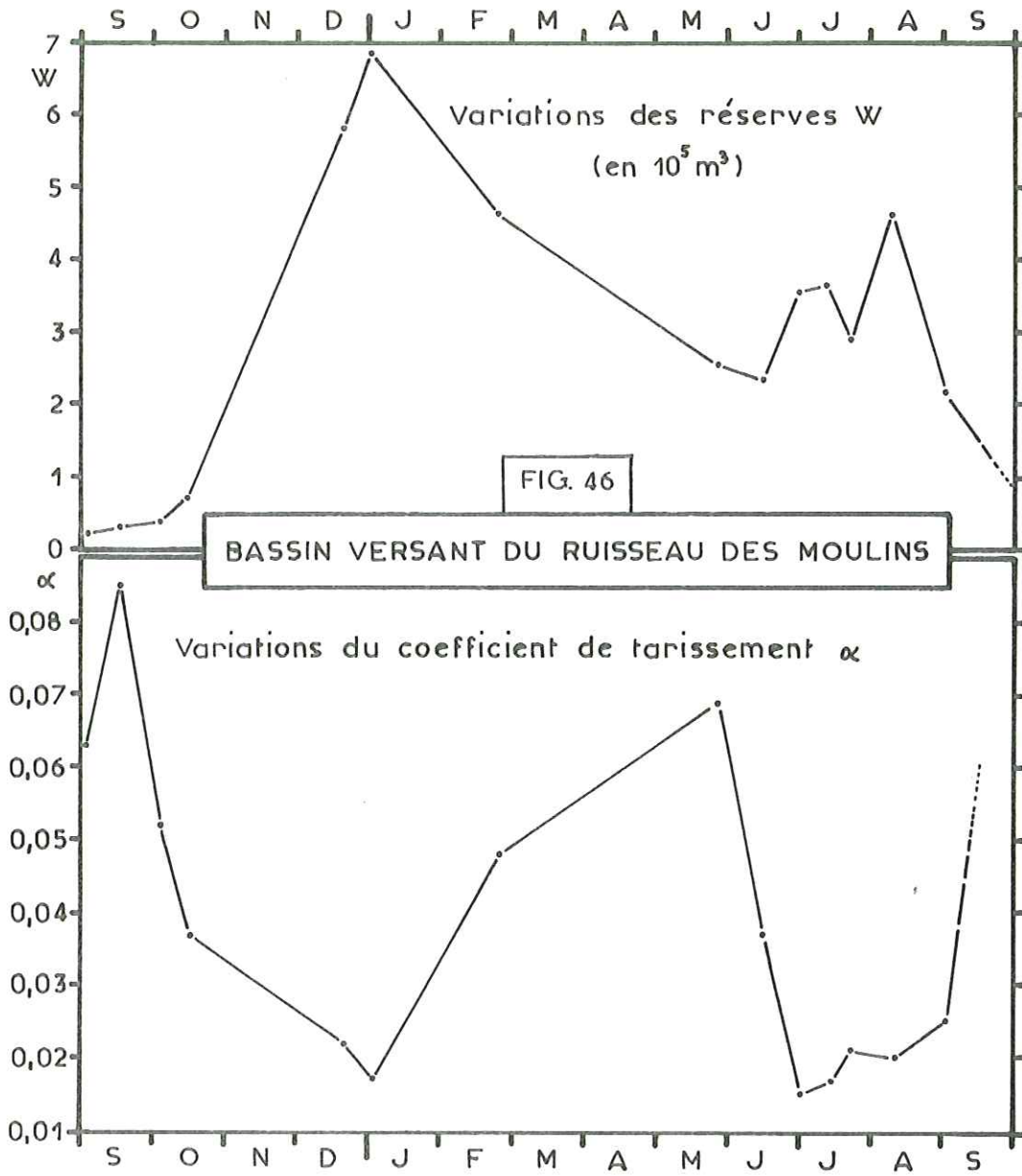


COURBES DE TARISSEMENT
 DU RUISSEAU DES MOULINS

FIG. 45

FIG. 45 suite





Cependant les prélèvements de l'évapotranspiration sur les réserves n'expliquent pas, dans le cas présent, la totalité des variations observées de α . En effet α est minimal en novembre, décembre, janvier et juin, juillet, août, septembre, deux périodes où l'évapotranspiration est respectivement faible à nulle et très forte. Nous n'avons pas trouvé d'explication cohérente à ce phénomène.

Le volume des réserves susceptible d'être emmagasiné indique qu'il existe un aquifère assez important sur le bassin versant du ruisseau des Moulins; celui-ci est à notre avis constitué principalement par le remplissage quaternaire de la petite plaine située entre Cholonge et La Coirelle. L'étude géophysique par sondages électriques que nous avons entreprise dans cette zone confirme d'ailleurs cette hypothèse (voir chapitre n° 2.2).

Néanmoins en l'absence de données sur la perméabilité du remplissage, il est difficile de dire si son exploitation éventuelle est possible.

4.2.2. LES CIRCULATIONS SOUTERRAINES

Le rôle des circulations souterraines est non négligeable sur le bassin versant; elles sont de deux types : celles qui sont internes au bassin versant et celles qui mettent le bassin versant en communication avec l'extérieur.

4.2.2.1. Les circulations souterraines internes au bassin versant

La grande extension des formations morainiques sablo-graveleuses très perméables a réduit le ruissellement direct dans de très larges proportions, et il existe ainsi de grandes surfaces non drainées par un écoulement superficiel. Ces " panneaux " non drainés se situent essentiellement sur le pourtour des lacs, à l'alimentation desquels ils contribuent.

Ils se trouvent à l'ouest et à l'est des lacs, ce sont les versants des deux lignes de collines nord-sud à ossature d'Aalénien et recouvertes de Quaternaire.

Ces circulations souterraines rejoignent les lacs soit directement au niveau de la berge, soit par l'intermédiaire de sources

sous-lacustres du type de celles du lac de Petichet (voir chapitre n° 7). Nous avons essayé de mettre en évidence des apports sous-lacustres dans les deux lacs par des mesures simultanées de la résistivité et de la température de l'eau du fond des lacs à proximité des berges. Il nous est vite apparu, que ce type de recherche n'avait que peu de chance d'aboutir : en effet vu le faible débit de ces sources, leur influence sur le chimisme de l'eau lacustre ne se fait sentir que dans une zone très réduite autour de l'émergence (le rayon d'influence détectable de la source sous-lacustre du lac de Petichet est inférieur à 1 mètre). Une prospection ayant quelques chances d'aboutir aurait donc nécessité un quadrillage métrique, ce qui n'était pas possible vu les moyens et le temps dont nous disposions.

D'autres circulations souterraines internes au bassin versant sont à signaler : il s'agit de celles qui vont du lac de Petichet vers le lac de Laffrey à travers le remplissage quaternaire des deux sillons glaciaires que nous avons mis en évidence par une étude géophysique (voir chap. N° 2.2). La section cumulée de ces deux sillons glaciaires est de l'ordre de $10\ 000\ m^2$ ce qui peut permettre un débit souterrain assez important. Le gradient hydraulique est compris entre 25 et 40 pour mille, mais le débit ne peut cependant être déterminé en l'absence de données précises sur la perméabilité.

4.2.2.2. Les circulations souterraines avec l'extérieur du bassin versant

Les zones de communications avec l'extérieur sont au nombre de trois :

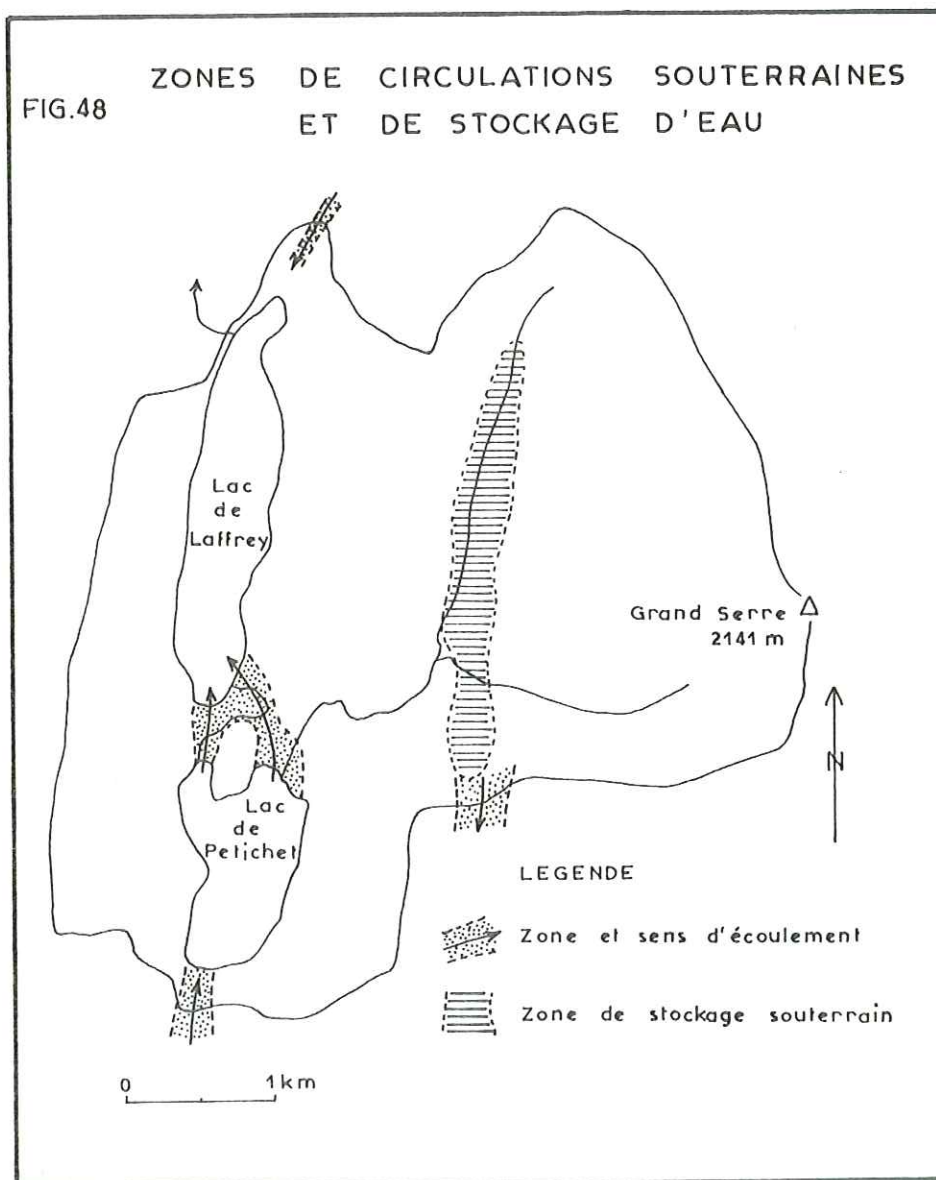
- le sillon entre le lac Mort et le lac de Laffrey,
- le sillon entre le lac de Pierre-Châtel et le lac de Petichet,
- le sillon entre Cholonge et le Villard St Christophe.

Seules les deux premières zones seront abordées ici la troisième étant étudiée au chapitre sur le bilan hydrologique.

Circulations entre le lac Mort et le lac de Laffrey
L'étude géophysique a montré qu'il existait peut-être un petit sillon glaciaire entre les deux lacs, sa section est de l'ordre de $800\ m^2$ ce qui est

très faible; en conséquence, l'écoulement souterrain entre le lac Mort et le lac de Laffrey est très peu important.

Circulations du lac de Pierre-Châtel vers le lac de Petichet. Ces circulations sont très faibles également; en effet à cause de l'altitude du lac de Pierre-Châtel les circulations ne peuvent avoir lieu que dans la partie ouest du remplissage quaternaire, la section de circulation est alors très réduite comme le montre la coupe géologique 5 établie à partir de l'étude géophysique. D'autre part la zone de circulation se situe dans des terrains de faible résistivité, donc de faible perméabilité.



4.3. BILANS HYDROLOGIQUES

Deux bilans hydrologiques ont été établis, l'un pour le bassin versant du ruisseau des Moulins, l'autre pour le bassin versant total.

4.3.1. BILAN DU BASSIN VERSANT DU RUISSEAU DES MOULINS OCT.76-SEPT.77

Les termes du bilan hydrologique peuvent s'exprimer sous la forme de l'équation suivante :

$$P = ETR + Q + \Delta W + QE \quad \text{où :}$$

entrées = sorties

P sont les précipitations

ETR est l'évapotranspiration réelle

Q est l'écoulement de surface vers l'extérieur du bassin versant

ΔW est la variation du volume des réserves du bassin versant

QE est l'écoulement souterrain inapparent vers l'extérieur du bassin versant

L'écoulement de surface Q tient compte du débit mesuré au limnigraphe de La Fayolle, mais également des pertes du ruisseau des Moulins vers le lac de Laffrey en amont de La Fayolle.

Grâce à deux épisodes de tarissement, l'un au début, l'autre à la fin du cycle hydrologique nous avons pu évaluer par différence, la variation du volume des réserves pendant la période étudiée : $W = +50\,000\text{ m}^3$.

Les termes du bilan pour la période étudiée sont :

P	ETR	Q	ΔW		QE
1627,5 mm	454 mm	662 mm	6 mm	d'où	505 mm

Le terme QE est assez important : 505 mm soit $4,12 \times 10^6\text{ m}^3$ ou encore 131 l/s. Il correspond aux pertes du bassin versant par écoulement souterrain vers l'extérieur.

Le substratum du bassin versant étant essentiellement composé des calcaires argileux de l'Aalénien, qui sont imperméables, c'est donc dans le matériel morainique que se feront les écoulements souterrains.

Les écoulements circulent à notre avis dans le remplissage

morainique du vallon situé entre Cholonge et le Villard St Christophe; un sondage électrique (S 58) a été implanté dans ce vallon, mais il n'a pas permis de lever l'incertitude concernant l'épaisseur du remplissage qui peut être de 5,8 m ou de 36 m, selon les hypothèses choisies quand à la résistivité du substratum. Ces écoulements souterrains alimenteraient en partie du moins, le ruisseau de l'Oche qui se jette dans le lac de Pierre Châtel et dont le débit est trop important par rapport à son bassin versant géographique.

4.3.2. BILAN DU BASSIN VERSANT TOTAL D'OCTOBRE 76 à SEPTEMBRE 77

Le bilan hydrologique dans ce cas ci est légèrement plus complexe du fait de la présence des lacs où l'évaporation est différente de l'évapotranspiration. En exprimant tous les termes du bilan en volume l'équation est la suivante :

$$P = ETR + E + Q + \Delta W + QE \quad \text{où}$$

E est l'évaporation de la surface des lacs.

La variation du volume des réserves ΔW est principalement due aux variations du niveau des lacs .

Les termes du bilan pour la période étudiée sont :

P (10^6 m^3)	ETR (10^6 m^3)	E (10^6 m^3)	Q (10^6 m^3)	ΔW (10^6 m^3)	d'où	QE (10^6 m^3)
26,72	7,36	1,1	13,93	1,02		3,31

A l'échelle du bassin versant total, on constate donc également l'existence de pertes qui s'élèvent à $3,31 \times 10^6 \text{ m}^3$ soit 191 mm ou encore 105 l/s.

Malgré la légère différence entre les valeurs trouvées selon qu'on s'intéresse au bassin versant total ou au bassin versant du ruisseau des Moulins, il est tentant d'attribuer les pertes uniquement à ce dernier, le reste du bassin versant étant étanche par ailleurs. Cette hypothèse est à notre avis assez conforme à la réalité et en accord avec les résultats de la prospection géophysique.

Néanmoins il ne faut pas se leurrer quant à la précision avec laquelle le volume des pertes est connu, en effet un calcul d'erreur donne

les valeurs extrêmes des pertes QE :

bassin versant du ruisseau des Moulins

$$1,77 \times 10^6 \text{ m}^3 < \text{QE} < 6,47 \times 10^6 \text{ m}^3$$

bassin versant total.....

$$- 1,8 \times 10^6 \text{ m}^3 < \text{QE} < 8,5 \times 10^6 \text{ m}^3$$

(Les incertitudes relatives retenues pour ce calcul sont :

pluie $\pm 10 \%$, ETR $\pm 20 \%$, débits $\pm 5 \%$, réserves $\pm 10 \%$,
évaporation $\pm 20 \%$).

4.3.3. BILAN HYDROLOGIQUE APPROCHE POUR LA PERIODE 1948-1970

Pour vérifier les résultats des bilans calculés sur une année qui mettent en évidence des pertes souterraines du bassin versant, nous avons tenté de calculer le bilan hydrologique sur la période 1948-1970, pour laquelle nous possédons les débits annuels de l'exutoire du lac de Laffrey (données EDF). En l'absence de données pluviométriques pour le bassin versant nous avons utilisé la pluviométrie de La Motte d'Aveillans à laquelle nous avons appliqué le facteur de correction suivant :

pluviométrie à La Motte d'Aveillans + 30,4 % = pluviométrie annuelle sur le B.V. (cette relation a été calculée sur la période oct 76-sept 77. En théorie, il n'est évidemment pas rigoureux de l'appliquer à une autre période, néanmoins cette approximation est suffisante pour donner un ordre de grandeur de la pluviométrie annuelle durant la période 1948-1970 sur le bassin versant étudié).

La corrélation entre la pluviométrie annuelle calculée et la lame d'eau écoulée est bonne (coefficient de corrélation $r = 0,879$), on peut en déduire la relation suivante (voir fig. n° 49):

$$\text{LE} = 0,588 \text{ P} - 226 \quad \text{ou encore}$$

$$\text{DE} = 0,412 \text{ P} + 226$$

(avec LE, DE et P exprimés en mm).

La validité de cette relation a été vérifiée en l'appliquant à la période étudiée : le déficit d'écoulement obtenu est de 859 mm, ce qui est une assez bonne approximation du déficit d'écoulement constaté

($E_{TR}+E+\Delta W$ +pertes) égal à 736 mm, vu les incertitudes des deux méthodes de calcul. Pour la période 1948-1970, il est possible de calculer le déficit d'écoulement moyen interannuel :

$$DE = 1\,285 \text{ mm} \times 0,412 + 226 = 755 \text{ mm}$$

Le déficit d'écoulement est très nettement supérieur à l'évapotranspiration potentielle, ce qui confirme la présence de pertes vers l'extérieur du bassin versant qui seraient supérieures à 250 mm par an.

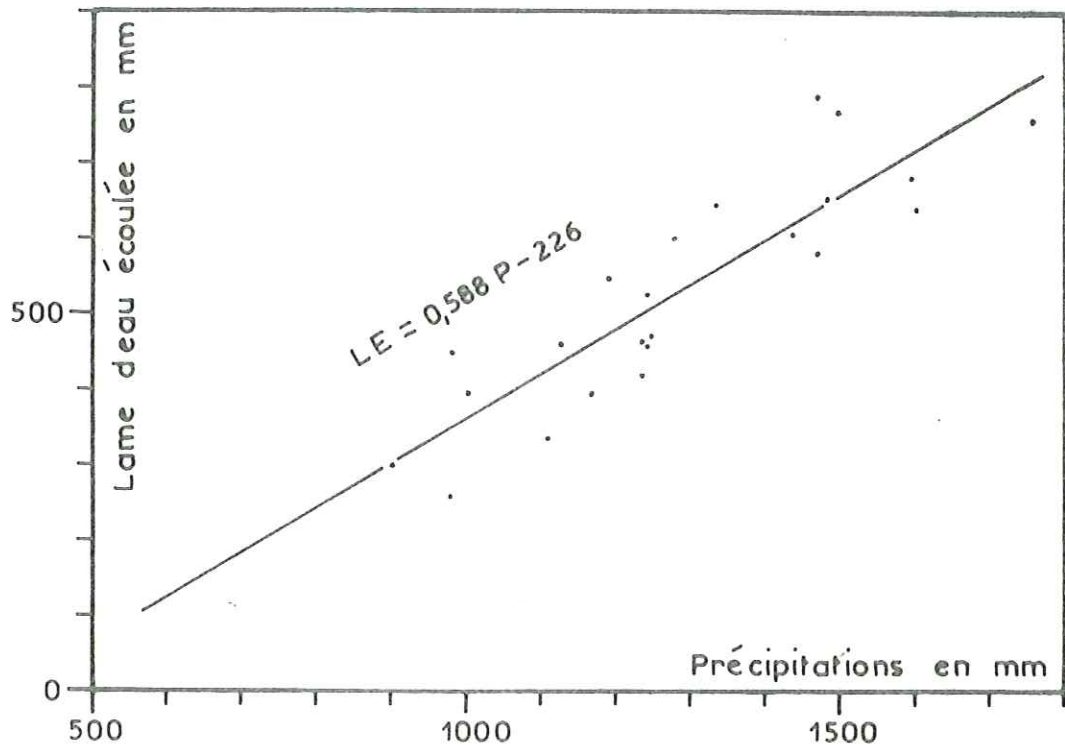


FIG. 49 CORRELATION PRÉCIPITATIONS-LAME D'EAU ECOULEE
BASSIN VERSANT TOTAL DE 1948 A 1970

4.3.4. CONCLUSION

Les bilans hydrologiques calculés tant à l'échelle pluriannuelle que pour l'année étudiée, mettent en évidence les pertes que subit le bassin versant.

Ces pertes seraient en moyenne supérieures à 250 mm d'eau par an (soit $4,3 \times 10^6 \text{ m}^3$).

Il semble que ces pertes se font par écoulements souterrains dans le remplissage quaternaire du vallon situé entre Cholonge et le Villard St Christophe.

4.4. CONCLUSION À L'ÉTUDE HYDROLOGIQUE

L'étude que nous présentons a permis de connaître et de préciser certains paramètres hydrologiques concernant le bassin versant:

- *le régime du ruisseau des Moulins est de type pluvionival,*
- *la réponse du ruisseau des Moulins aux épisodes pluvieux est étroitement dépendante de l'état de saturation du sol,*
- *l'étiage absolu du ruisseau des Moulins constaté d'octobre 76 à septembre 77 est de 19 l/s , le débit maximal est 1 300 l/s ,*
- *le débit spécifique de l'exutoire de Laffrey pour la période 1948-1970 est de 16,8 l/s/km² ; l'année étudiée est donc très excédentaire (débit spécifique de 25,4 l/s/km²),*
- *les possibilités de stockage souterrain d'eau, sur le bassin versant du ruisseau des Moulins sont assez importantes : au moins 700 000 m³,*
- *le bilan hydrologique met en évidence un écoulement souterrain vers l'extérieur du bassin versant supérieur à 135 l/s. Les pertes s'écouleraient vers le lac de Pierre-Châtel par l'intermédiaire du vallon situé entre Cholonge et le Villard St Christophe.*

LE MILIEU LACUSTRE

5. LE MILIEU LACUSTRE

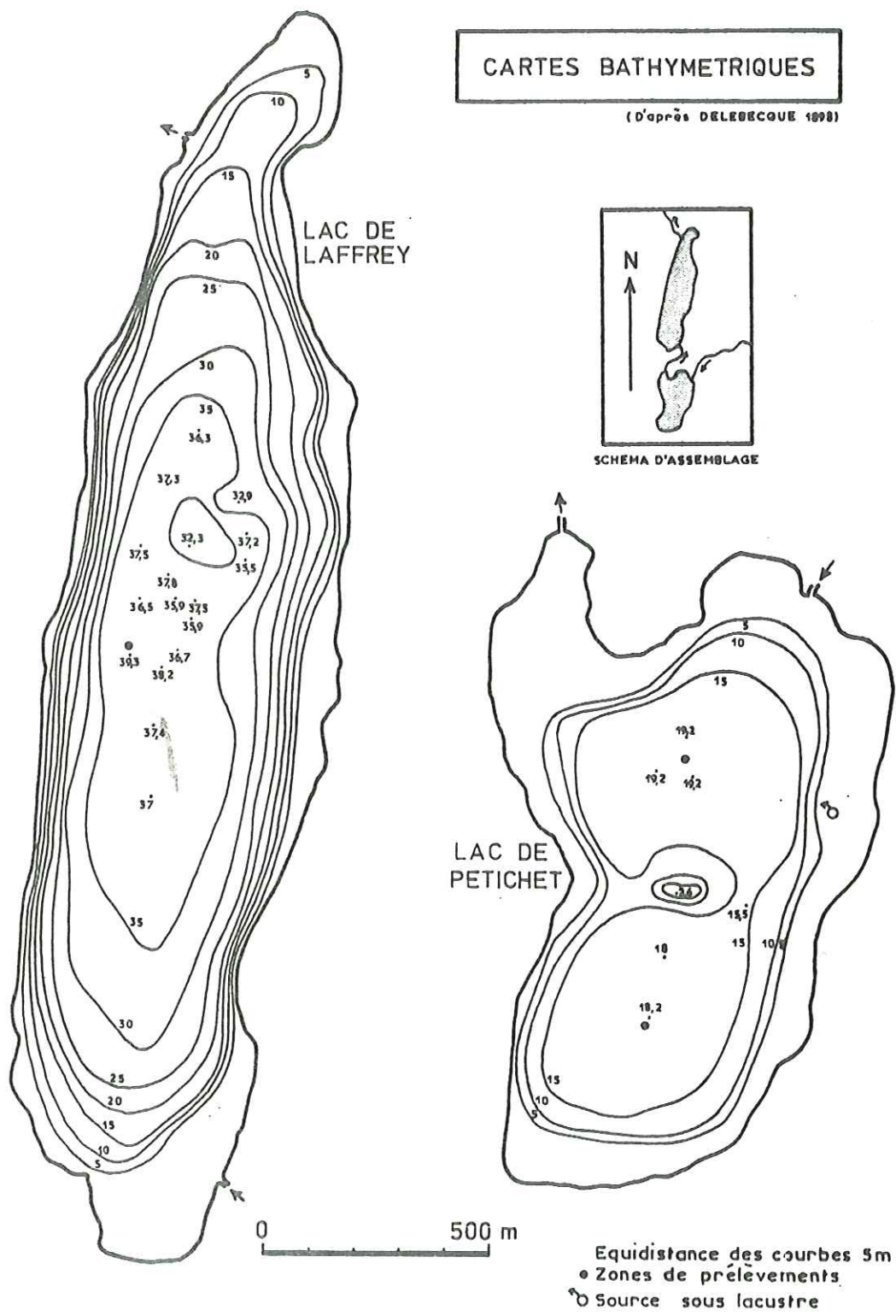
Les lacs du plateau matheysin sont au nombre de quatre : au nord le lac Mort (superficie 31 ha), au sud le lac de Pierre-Châtel (superficie 100 ha, profondeur maximale 10,8 m) qui a une forme presque circulaire. Entre ces deux lacs sont situés les lacs de Petichet et de Laffrey, objets de notre étude, le premier déversant ses eaux dans le second.

5.1. ORIGINE DES LACS

Dès 1893 , A.DELEBECQUE reconnaissait l'origine glaciaire des lacs du plateau Matheysin en ces termes : " Les lacs du plateau de La Mure sont en grande partie dans le terrain glaciaire, dans ces conditions il semble probable que les anciens glaciers ont contribué à la formation de ces lacs en permettant aux eaux de s'accumuler dans un enchevêtrement de leurs moraines ". Plus tard les géologues alpins précisèrent que seuls les lacs de Laffrey , Petichet et Pierre-Châtel étaient retenus derrière des arcs morainiques, le lac Mort étant retenu au nord par un verrou glaciaire constitué de micaschistes.

Pour notre part, nous pensons qu'il y a lieu de minimiser le rôle des arcs morainiques, en effet les études géologiques et géophysiques ont montré que la cote du substratum entre chaque lac est supérieure à la cote du fond des lacs. On se trouve donc en présence d'une série de verrous et d'ombilics, et les moraines n'ont fait que colmater les sillons glaciaires qui entaillent ces verrous. Seul le lac de Pierre-Châtel est entièrement retenu par des arcs morainiques.

FIG. 50



5.2. MORPHOMÉTRIE ET BATHYMÉTRIE

La figure n° 50 présente les cartes bathymétriques des deux lacs, établies par A.DELEBECQUE dès avant 1893; leur exactitude n'a jamais été mise en défaut par les mesures de profondeur que nous avons eu l'occasion d'effectuer. Les paramètres morphométriques concernant le lac de Laffrey et le lac de Petichet ont été consignés dans le tableau ci-dessous :

	Lac de Laffrey	Lac de Petichet
Cote maximale (m)	908,85	923,12
Superficie (ha)	127	86
Profondeur maximale (m)	39,3	19,2 (N) 18,2 (S)
Longueur maximale (m)	2760	1440
Largeur maximale (m)	600	880
Volume maximum (m ³)	28,3 x 10 ⁶	8,7 x 10 ⁶
Profondeur moyenne (m)	22,28	10,11
Fluctuation du niveau (m)	2,5	2,91
Périmètre (m)	6200	4400
Indice de Compacité $K = \frac{P}{2 \sqrt{\pi \cdot S}}$	1,55	1,34

Tableau n° 28 . Paramètres morphométriques des lacs de Laffrey et Petichet.

Le lac de Laffrey est composé d'un seul bassin de forme allongée dont le fond est constitué d'une vaste plaine située à une profondeur supérieure à 35 m, cette plaine est formée dans le détail par une " série de petites cuvettes et de petits monticules " (A.DELEBECQUE). Au-dessus de cette plaine fait suite un talus très raide sur la rive ouest, moins accentué à l'est. Le talus se raccorde au nord, au sud et à l'est à une beine assez réduite, alors qu'à l'ouest la beine est inexistante.

Le lac de Petichet est formé de deux bassins dont les profondeurs maximales sont 19,2 m au nord et 18,2 m au sud. Les deux bassins sont séparés par une barre comportant elle-même deux cols où la profondeur est 14,1 m et 15,5 m. Entre ces deux cols, s'élève un monticule bien visible des hauteurs avoisinantes, sa profondeur n'étant que de 2,6 m. La beine est très

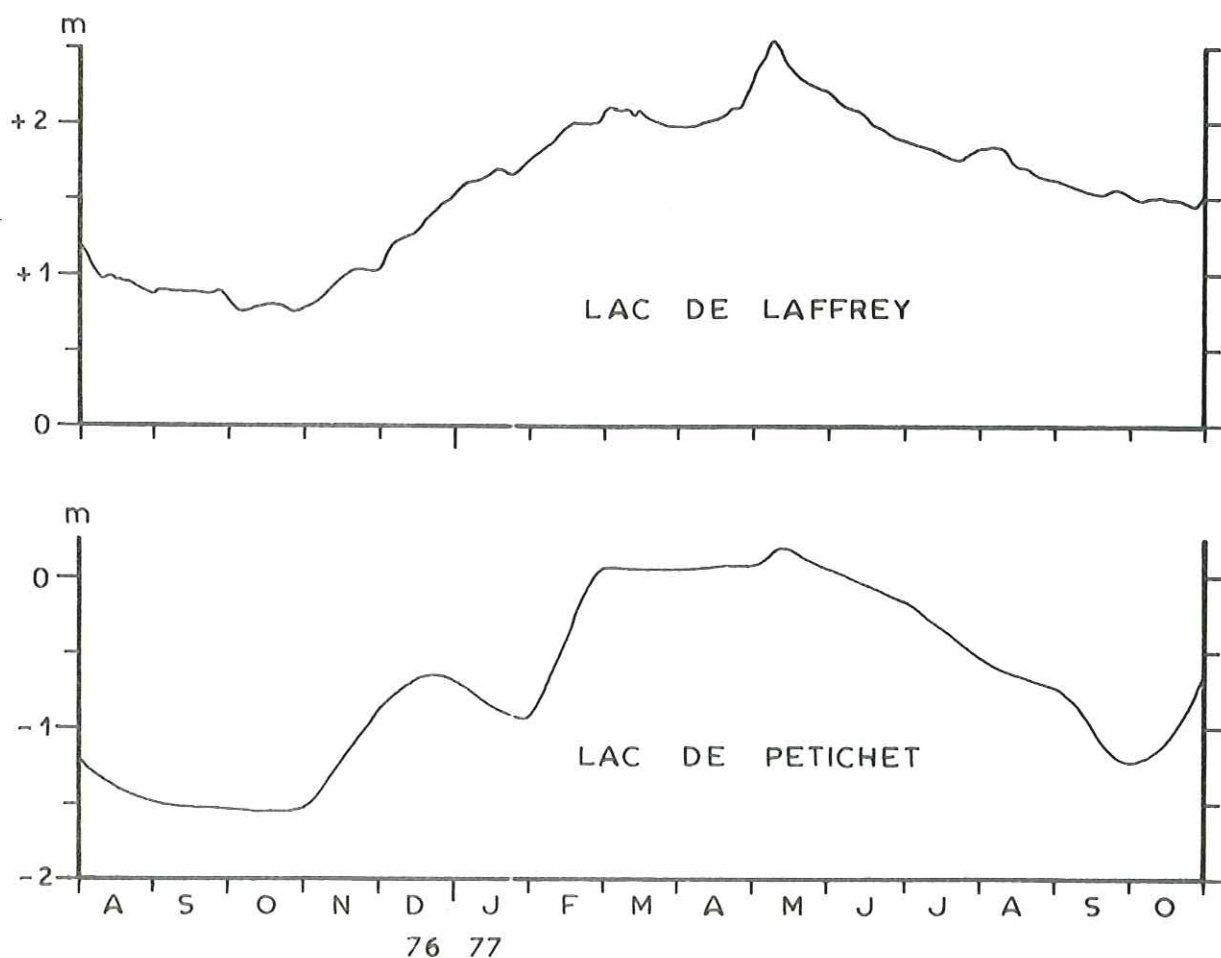
développée sur tout le pourtour du lac de Petichet, elle se raccorde au fond par un talus assez raide.

5.3. FLUCTUATIONS DE NIVEAU

Les deux lacs étant utilisés par l'Electricité de France comme lacs réservoirs, leur cote est réglée par des vannes situées à leur exutoire. Les variations maximales que permettent ces vannes sont de 2,5 m pour le lac de Laffrey et 2,91 m pour le lac de Petichet. Chaque lac est équipé d'une échelle limnimétrique appartenant à l'EDF. Nous avons relevé celle du lac de Laffrey tous les trois jours en moyenne. L'échelle du lac de Petichet était relevée par l'EDF tous les mois.

La figure n° 51 présente les fluctuations de niveau des deux lacs durant la période étudiée.

FIG. 51 VARIATIONS DE NIVEAU DES LACS



5.4. TEMPS DE RENOUVELLEMENT

Le temps de renouvellement moyen des eaux d'un lac est le rapport entre le volume du lac et le volume d'eau sortant du lac en un an (débit à l'exutoire + évaporation). En utilisant les valeurs mesurées durant la période oct.76 - sept.77 on obtient un temps de renouvellement légèrement supérieur à un an pour le lac de Petichet, et un peu moins de deux ans pour le lac de Laffrey.

Il faut cependant noter que ces temps, calculés pour une période de pluviosité très excédentaire, doivent être légèrement augmentés pour obtenir le temps de renouvellement moyen ; nous retiendrons donc les valeurs suivantes :

Lac de Laffrey	28 mois
Lac de Petichet.....	14 mois

5.5. LES PRÉLÈVEMENTS

Ils ont été effectués à l'aide d'une bouteille à renversement d'une contenance de deux litres descendue à la profondeur voulue à l'aide d'un câble entraînant un compteur de profondeur. Le nombre et la profondeur des prélèvements étaient généralement choisis en fonction du profil thermique de la colonne d'eau, mesuré préalablement.

Les points de prélèvements sont situés au droit des points les plus profonds de chaque lac : 1 sur le lac de Laffrey, 2 sur le lac de Petichet (voir la figure n° 50). Les résultats d'analyses de la première campagne de prélèvements ayant montré une grande similitude physicochimique entre les eaux des deux cuvettes du lac de Petichet, seul le point situé dans la cuvette nord fut conservé lors des campagnes suivantes.

5.6. LE RÉGIME THERMIQUE DES DEUX LACS

La répartition verticale de la température dans l'eau d'un lac est très importante à connaître. En effet, par suite des variations de la densité de l'eau en fonction de la température (densité maximum à 4°C), il se crée dans les lacs une stratification de l'eau.

A la saison chaude sous l'effet du rayonnement solaire la partie superficielle du lac s'échauffe, cette eau, étant plus légère que l'eau froide, reste en surface. Il s'établit alors une stratification thermique

où on distingue : une couche superficielle chaude ou épilimnion, une couche profonde froide atteignant le fond ou hypolimnion; entre les deux se situe le métalimnion caractérisé par un gradient thermique élevé ($-2,5$ °C/m à Petichet le 3/8/76). Cette stratification thermique provoque une séparation physique des deux masses d'eau, froides et chaudes qui ne peuvent alors se mélanger et vont évoluer d'une manière différente au point de vue chimique.

A l'automne cette stratification est rompue par refroidissement de l'épilimnion, une période de mélange peut alors s'installer pendant un temps plus ou moins long suivant les conditions climatiques. En hiver une nouvelle stratification, dite inverse, peut s'instaurer, la couche froide ($< 4^{\circ}\text{C}$) restant en surface et la couche " chaude " (4°C) au fond.

Les mesures de la température de l'eau des lacs en surface et en profondeur ont été effectuées au moyen d'une sonde à thermistance de 40 m, qui permet de détecter des différences de températures avec une précision de $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$. De manière à ne pas fausser les résultats par une perturbation quelconque du milieu, les mesures étaient effectuées en premier et pendant la descente de la sonde.

Les valeurs mesurées durant la période d'étude sont reportées sur les figures n° 52 et 53 .

D'une manière générale les deux lacs présentent une stratification thermique directe qui s'installe à partir du mois d'avril et se stabilise durant les mois de juin, juillet et août. Dès le mois de septembre, la stratification thermique évolue vers sa destruction de la manière suivante : l'eau des lacs se refroidit très sensiblement en surface, sa densité augmentant ainsi, elle descend vers les couches inférieures, traverse l'épilimnion et se mélange au métalimnion en lui apportant de la chaleur. L'épilimnion augmente ainsi très rapidement d'épaisseur, ce phénomène se poursuit jusqu'à ce que la thermocline atteigne le fond des lacs. Ceux-ci deviennent alors isothermes et un brassage des eaux a lieu. L'isothermie est atteinte dès le mois d'octobre pour le lac de Petichet, et en novembre pour le lac de Laffrey.

A cette période d'isothermie fait suite une stratification thermique inverse durant les mois de décembre, janvier et février, la température de l'eau de surface étant inférieure à 4°C et pouvant même geler.

Début mars, une seconde période d'isothermie a lieu, accompagnée d'un brassage des eaux. La stratification thermique directe du cycle suivant s'installe ensuite.

FIG. 52

LAC DE LAFFREY

VARIATIONS DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR

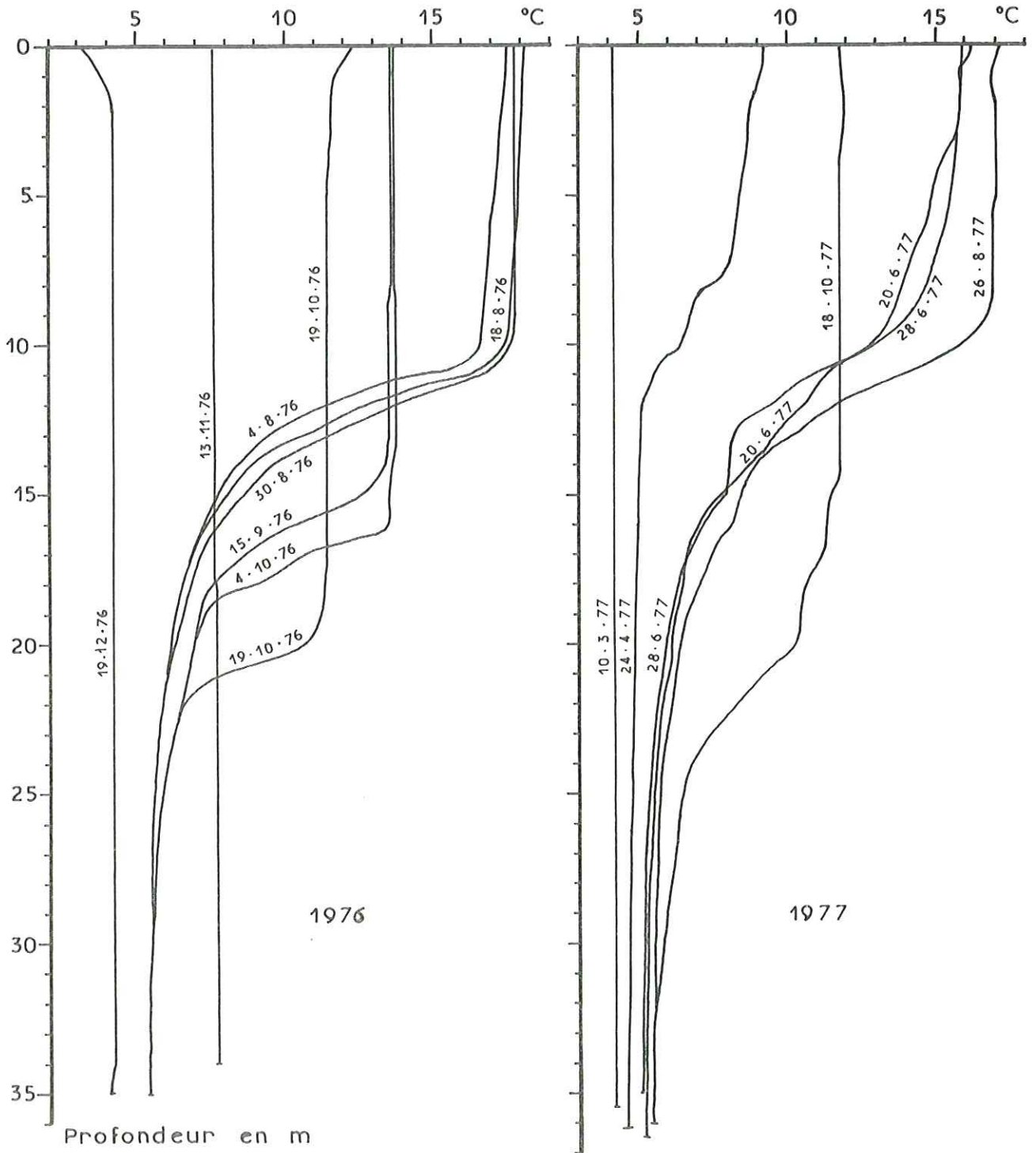


FIG. 53

LAC DE PETICHET

VARIATIONS DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR

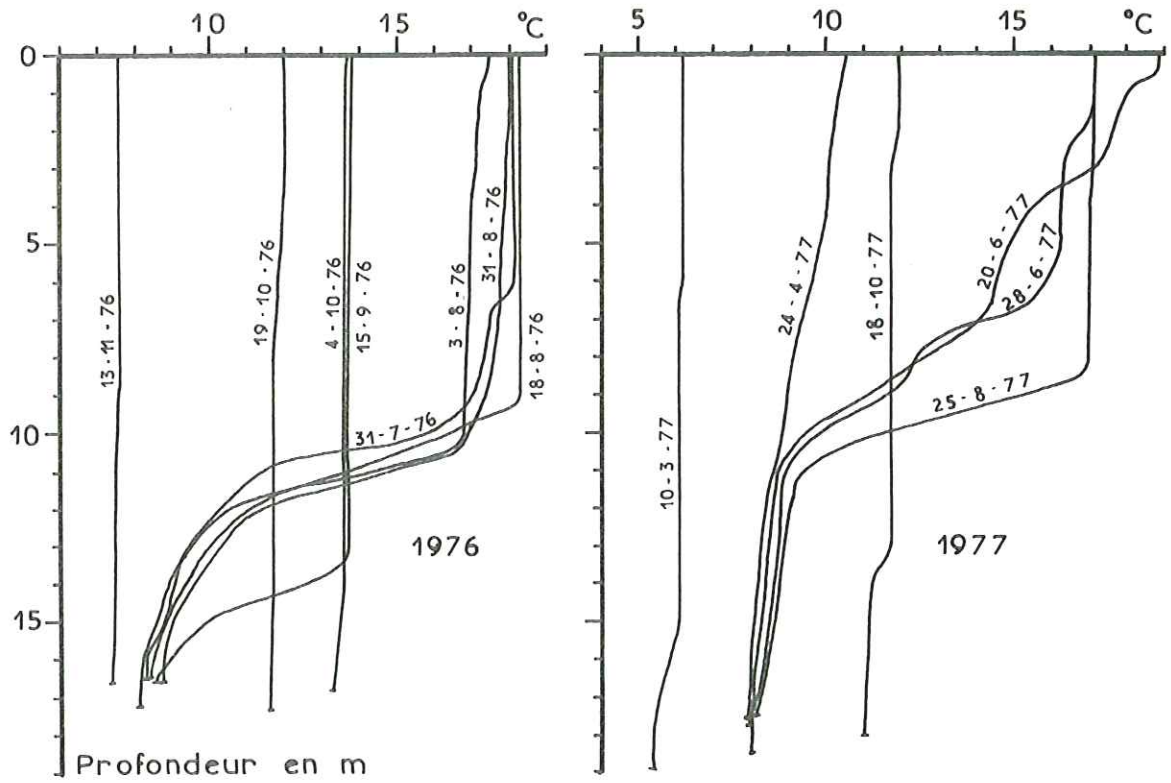
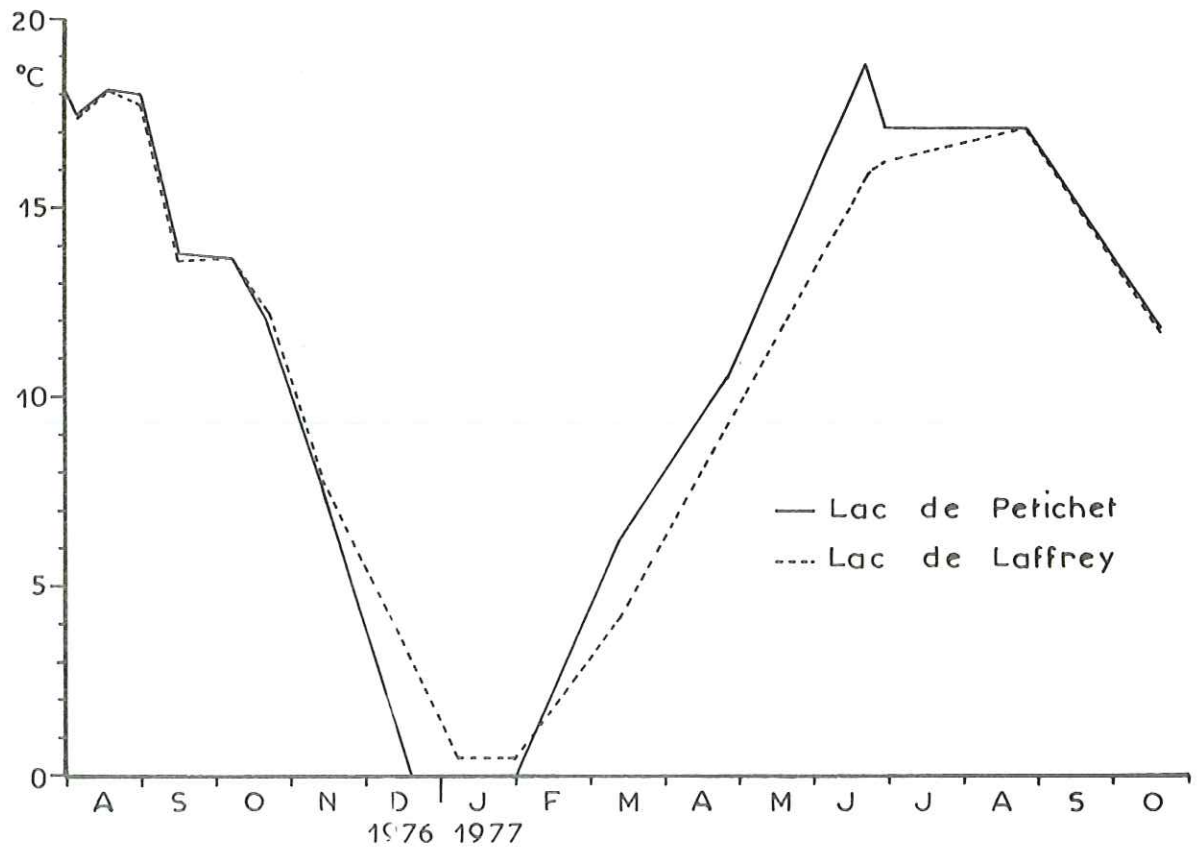


FIG. 54

VARIATIONS DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DES LACS



La figure n° 54 présente les variations de température de l'eau de la surface des lacs. Elle met en évidence le fait que grâce à son volume d'eau plus important le lac de Laffrey se refroidit moins vite et se réchauffe moins vite que le lac de Petichet. Ce phénomène explique les différences des valeurs de l'évaporation que nous avons calculées au chapitre n° 3.3 .

En utilisant la classification des lacs de HUTCHINSON et LOFFLER (1956) nous pouvons dire que les lacs de Petichet et de Laffrey sont des lacs dimictiques, c'est-à-dire qu'ils présentent deux périodes de stratification séparées par deux périodes de circulation, une courte au printemps et une longue en automne.

Leur température en profondeur variant largement autour de 4°C nous pouvons préciser avec WHIPPLE (1927) qu'ils sont du second ordre.

5.7. TRANSPARENCE DES EAUX LACUSTRES

La transparence des eaux d'un lac se mesure au moyen d'un disque de 30 cm de diamètre, peint en blanc : disque de SECCHI. La profondeur à laquelle le disque n'est plus visible est dite transparence au disque de SECCHI; cette transparence est inversement proportionnelle à la quantité de matières en suspension dans l'eau (plancton et particules inorganiques).

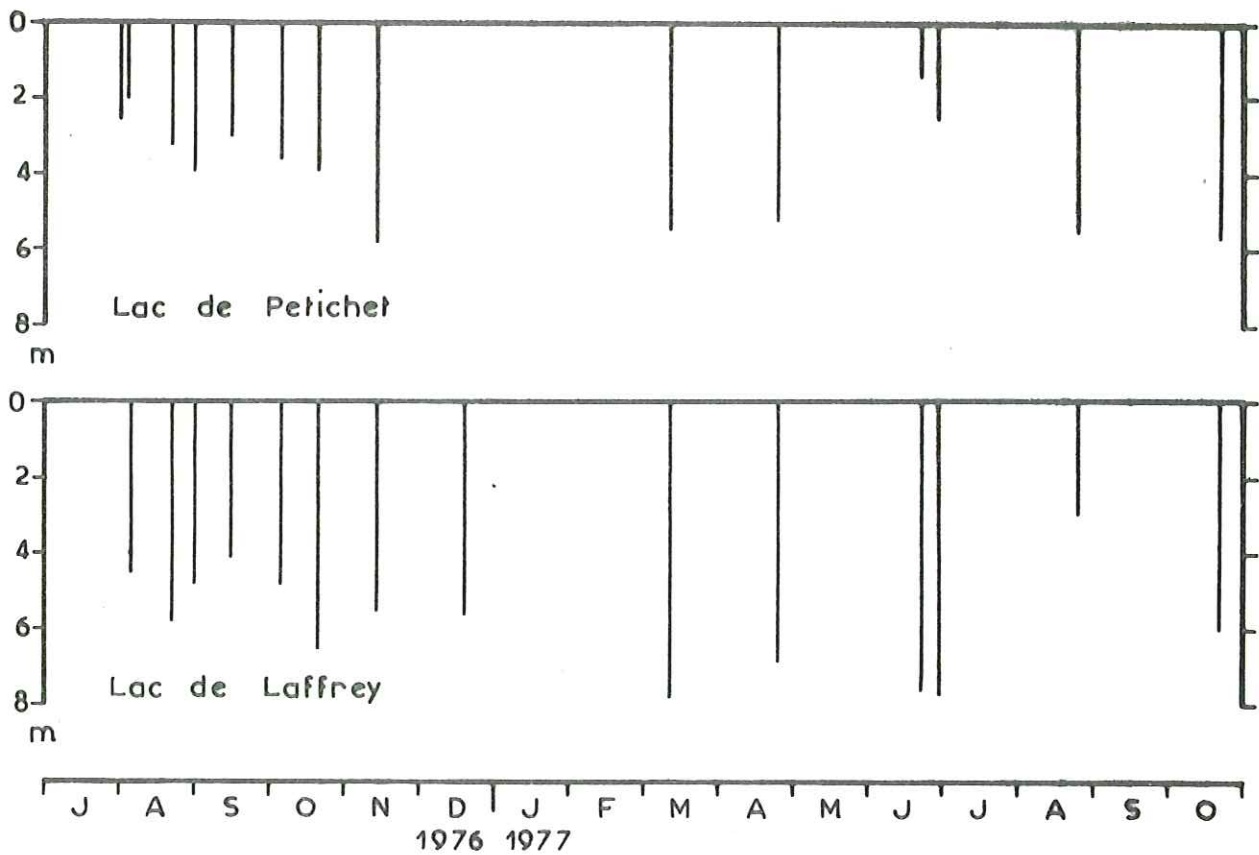
La figure n° 55 présente les résultats des mesures de transparence sur les deux lacs.

La transparence du lac de Petichet est faible de juillet à octobre 1976 et durant les mois de juin et juillet 77.

Le minimum de transparence du lac de Laffrey se situe durant les mois d'août à octobre.

La transparence moyenne du lac de Petichet (3,8 m) est plus faible que celle du lac de Laffrey (5,8 m), la quantité de matières en suspension est donc plus faible dans ce dernier.

FIG. 55 VARIATIONS DE LA TRANSPARENCE



5.8. L'OXYGÈNE DISSOUS

La concentration en oxygène dissous d'une eau lacustre est un paramètre dont la connaissance est primordiale .

La figure n° 56 présente le résultat des analyses effectuées à l'occasion des quatre campagnes de prélèvements dans les deux lacs.

5.8.1. REPARTITION DE L'OXYGÈNE DISSOUS DANS LE LAC DE LAFFREY

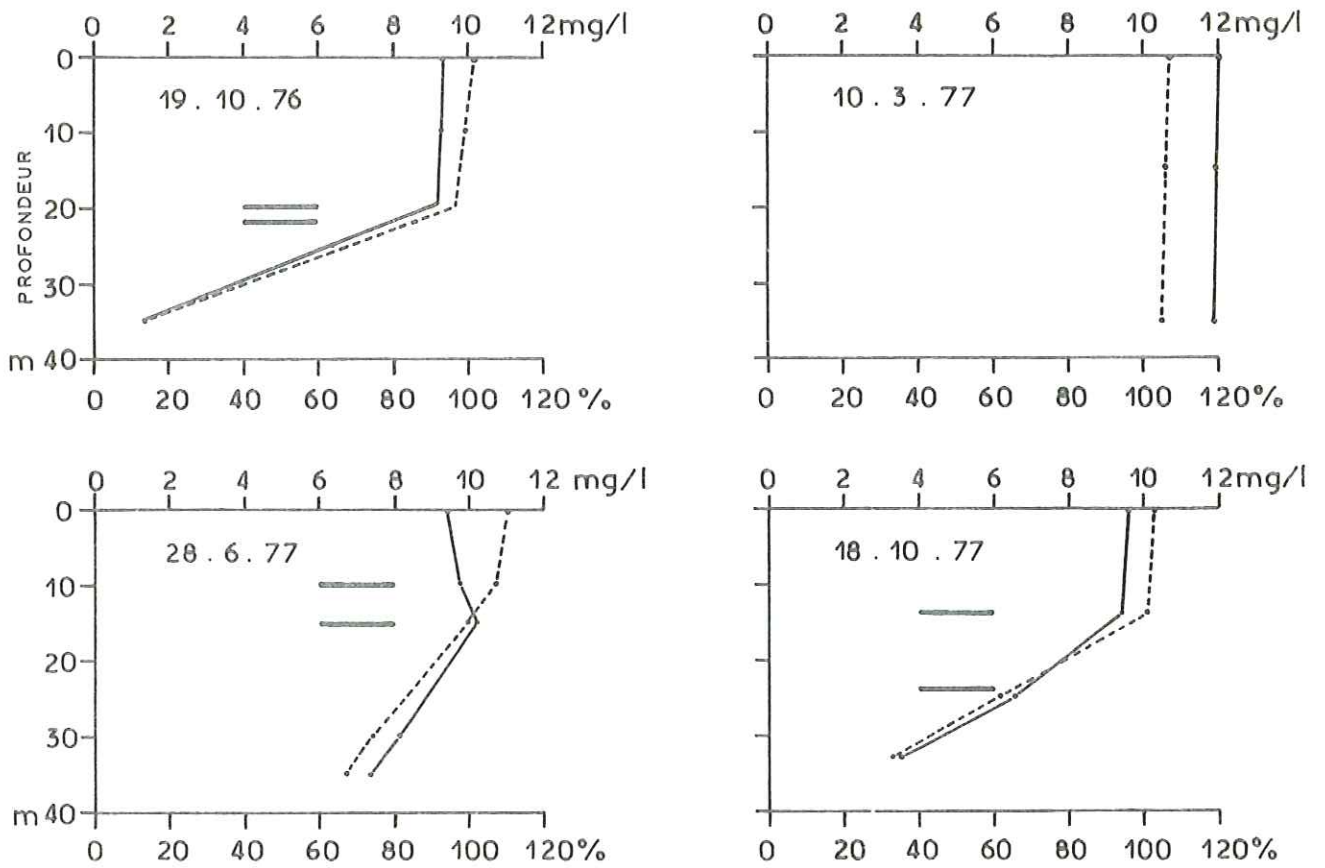
Tous les prélèvements de surface ont montré une sursaturation de l'eau en oxygène (102 à 110 %). Par contre, en profondeur la teneur en oxygène dissous varie suivant l'époque de prélèvement:

- en mars 1977, il n'y a pas de variation sensible entre la surface et le fond, l'eau est sursaturée en oxygène (107 à 105 %) ce qui est normal le lac étant alors en période d'isothermie avec brassage des eaux.

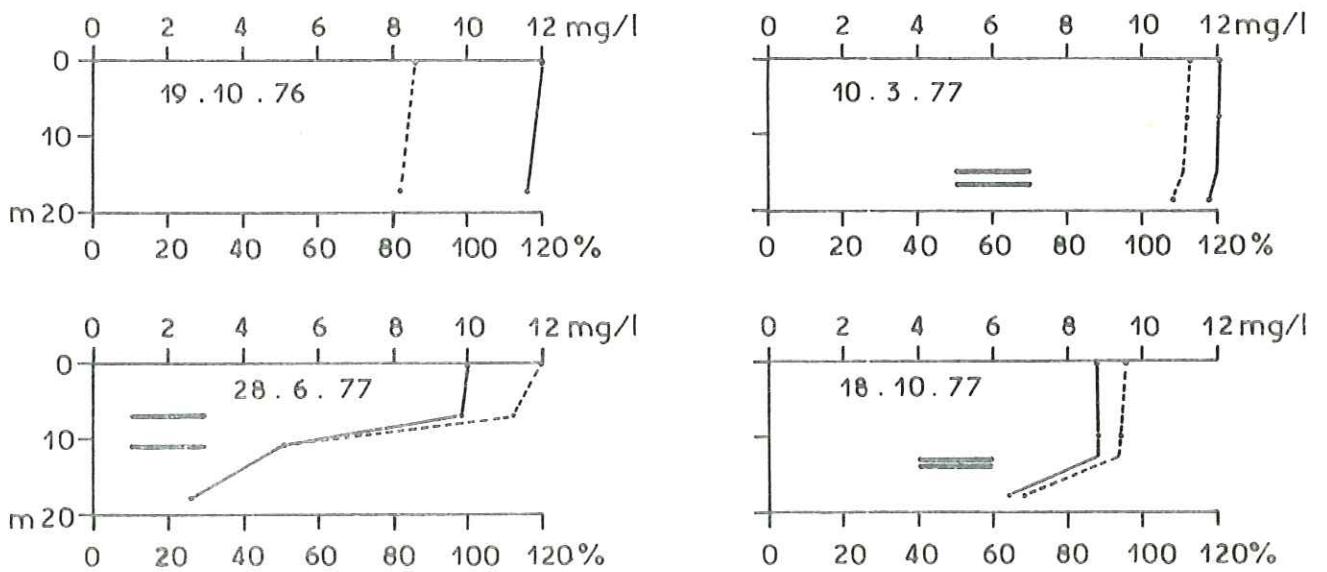
FIG. 56

VARIATIONS DES CONCENTRATIONS EN OXYGENE DISSOUS

LAC DE LAFFREY



LAC DE PETICHET



— TENEUR EN OXYGENE DISSOUS EN mg/l
 - - - - - POURCENTAGE DE SATURATION EN OXYGENE DISSOUS
 = = = = = THERMOCLINE

- fin juin 1977, le fond présente une sous-saturation nette (67%); cette sous-saturation semble persister dans tout l'hypolimnion mais à un degré moindre (74 % à -30 m).

Le métalimnion et l'épilimnion sont sursaturés en oxygène, ce qui est dû à la fois au brassage des eaux sous l'action du vent et à la libération d'oxygène par le phytoplancton lors de la photosynthèse.

- mi-octobre 1977, la sous-saturation en oxygène du fond, s'accroît (33 %), celle de tout l'hypolimnion également (62 % à -25 m), alors que l'eau de l'épilimnion est légèrement sursaturée en oxygène (103 à 101 %). Il faut noter que l'état de sous-saturation atteint par l'eau du fond du lac a été pire à l'automne 1976 où le taux de saturation descendit à 13,5 % soit 1,46 mg/l d'oxygène. Les études de M. GACHET, B.SERRA-TOSIO et J.TETART de 1970 à 1973 n'ont jamais rencontré une sous-saturation aussi accentuée que celle de l'automne 1976.

5.8.2. REPARTITION DE L'OXYGENE DISSOUS DANS LE LAC DE PETICHET

- Le 19 octobre 1976, la stratification thermique est juste détruite et il y a isothermie. On constate une légère sous-saturation en oxygène (86 % en surface à 82 % au fond).

Cette sous-saturation est due, à notre avis, au fait qu'à cette époque les eaux de l'épilimnion se refroidissent et descendent se mélanger avec celles du métalimnion et de l'hypolimnion, or l'oxygène emmagasiné dans l'épilimnion ne suffit pas à compenser le déficit du métalimnion et de l'hypolimnion. Au moment du prélèvement, bien que l'isothermie soit réalisée, le déficit en oxygène n'est pas encore compensé. Néanmoins ce léger déficit en oxygène sera vite comblé par le brassage des périodes d'isothermies.

- En mars 1977, l'eau est sursaturée en oxygène (113 à 108 %), la stratification thermique estivale est déjà installée ce qui explique la légère baisse de la teneur en oxygène de l'eau du fond.

- Fin juin 1977, la sous-saturation en oxygène de l'hypolimnion est très nette (26 % au fond et 50 % à - 11 m), l'épilimnion présente, par contre, une sursaturation forte (120 % en surface, 112 % à -7m) qui est due à l'activité intense du phytoplancton.

- Le 18 octobre 1977, le phénomène déjà décrit pour le prélèvement d'octobre 1976 se reproduit mais l'hypolimnion n'est pas encore entièrement mélangé aux couches susjacentes, et son taux de saturation n'est que de 68 %.

Il faut noter que le taux de saturation minimal que nous avons constaté ne semble pas être le minimum absolu, en effet C.GAY a mesuré le 17.9.74 un taux de saturation de 6 % soit 0,6 mg/l au fond du lac de Petichet.

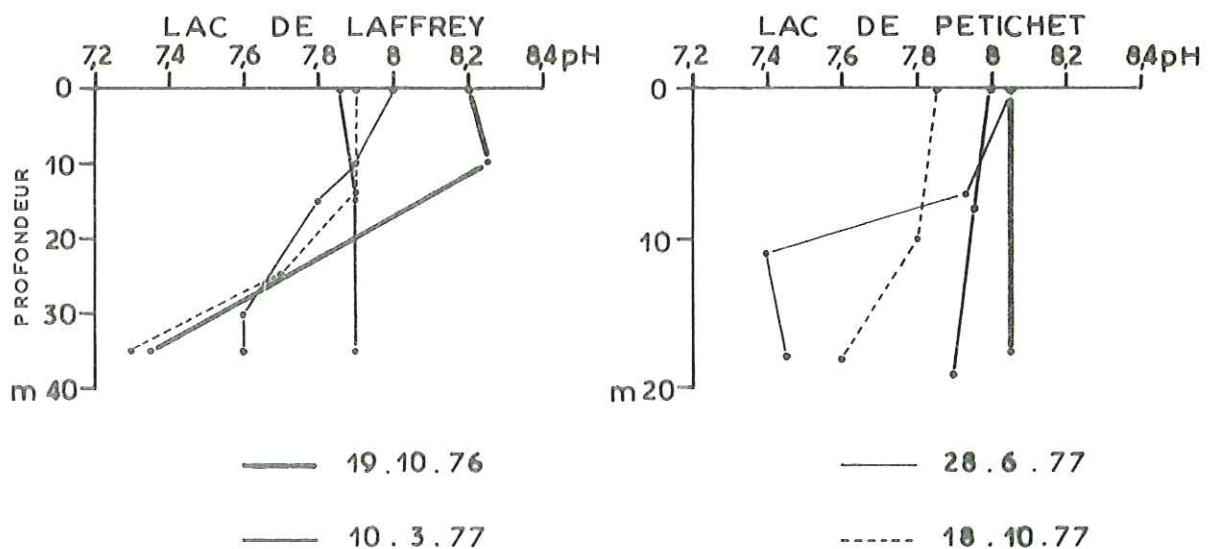
5.9. LE pH

Les mesures du pH ont été effectuées sur le terrain au moyen d'un comparateur " HELLIGE " dont la précision est de $\pm 0,1$ unité pH (toutefois la reproductibilité est meilleure, ce qui permet de différencier deux analyses à 0,05 unité près).

La figure n° 57 présente les variations du pH en fonction de la profondeur pour les quatre séries de prélèvements effectués dans les deux lacs au cours de l'année d'étude.

En période de stratification thermique, le pH est nettement basique en surface (pH de 8 à 8,2) alors qu'en profondeur les eaux sont plus acides (pH de 7,3 à 7,5).

FIG.57 VARIATIONS DU pH EN FONCTION DE LA PROFONDEUR



L'acidité en profondeur est d'autant plus accentuée que la stratification thermique est installée depuis plus longtemps, ainsi le fond du lac de Laffrey passe d'un pH de 7,6 le 28.6.77 à 7,3 le 18.10.77 .

	Lac de Lafrey									Lac de Petichet									
	19.10.76		10.3.77		28.6.77		18.10.77		Moy.	19.10.76		10.3.77		28.6.77		18.10.77		Moy.	
	M	C	M	C	M	C	M	C	C	M	C	M	C	M	C	M	C	C	
Ca ⁺⁺	1056	37,3	1092	38,6	1049	37,1	1090	38,5	37,9	321	36,9	347	39,9	292	33,6	338	38,8	37,3	M en t, C en mg/l
Mg ⁺⁺	94	3,32	77,5	2,74	91,5	3,23	93,4	3,3	3,14	27,3	3,14	22	2,53	24,9	2,86	25,3	2,91	2,86	
Na ⁺	94	3,32	97	3,43	94,6	3,34	92,7	3,28	3,34	23,3	2,68	24,6	2,83	22,9	2,63	22,9	2,63	2,69	
K ⁺	31	1,09	31,7	1,12	30,6	1,08	30,1	1,06	1,09	11,4	1,31	10,4	1,19	9,7	1,11	9,9	1,13	1,18	
SiO ₂	46,6	1,65	59,4	2,10	37,8	1,33	51,3	1,81	1,72	18,3	2,1	15,2	1,75	13	1,5	11	1,26	1,65	
Cl ⁻	142	5,02	132	4,66	102	3,6	138	4,87	4,54	32,9	3,78	28,9	3,32	35	4,02	31,3	3,60	3,68	
SO ₄ ⁻⁻	445	15,7	497	17,6	413	14,6	431	15,2	15,8	114	13,1	143	16,4	109	12,5	109,4	12,6	13,7	
HCO ₃ ⁻	3184	112,5	3283	116	3300	116,6	3280	115,9	115,2	970	111,5	1057	121,5	913	104,9	1076	123,7	115,4	
Corg. Total	61,7	2,18	47,6	1,68	47,2	1,67	49,5	1,75	1,82	19,6	2,25	17,1	1,97	19,4	2,23	16,5	1,89	2,09	
NH ₄ ⁺ (N)	974	0,034	348	0,012	552	0,019	538	0,019	0,021	1940	0,22	793	0,091	1300	0,15	1997	0,23	0,17	M en kg, C en mg/l
NO ₃ ⁻ (N)	4330	0,15	9340	0,33	5800	0,2	4448	0,15	0,21	435	0,05	4100	0,47	1342	0,15	840	0,097	0,19	
NO ₂ ⁻ (N)	152	0,0054	113	0,004	75	0,0026	85	0,003	0,0037	30,4	0,0035	52	0,0059	52,6	0,006	55	0,0063	0,0054	
ortho-P(P)	0	0	49,2	0,0017	54,4	0,0019	146	0,005	0,0022	0	0	8,7	0,001	6,4	0,0007	48,7	0,0056	0,0018	
PTotal(P)	493	0,017	226	0,0079	81	0,0028	208	0,0073	0,0088	69,6	0,008	84,4	0,0097	90	0,0034	66,7	0,0077	0,0072	

Tableau n° 29 . Concentrations moyennes et masses d'éléments dissous dans les deux lacs.

La période de circulation suivant la destruction de la stratification thermique estivale, provoque un mélange des eaux superficielles basiques avec les eaux profondes acides, le pH se stabilise alors sur toute la colonne d'eau à une valeur intermédiaire.

Ces variations du pH sont en liaison étroite avec l'activité photosynthétique qui en absorbant du CO_2 " basifie " les eaux superficielles, et avec les phénomènes de décomposition de la matière organique qui libèrent du CO_2 et abaissent ainsi le pH des eaux profondes.

5.10 CHIMIE DES EAUX LACUSTRES, CARACTÈRES PRINCIPAUX, ÉVOLUTION DANS LE TEMPS

Les variations des concentrations en éléments dissous en fonction de la profondeur sont présentées sur les figures n° 58, 59, 60, 61.

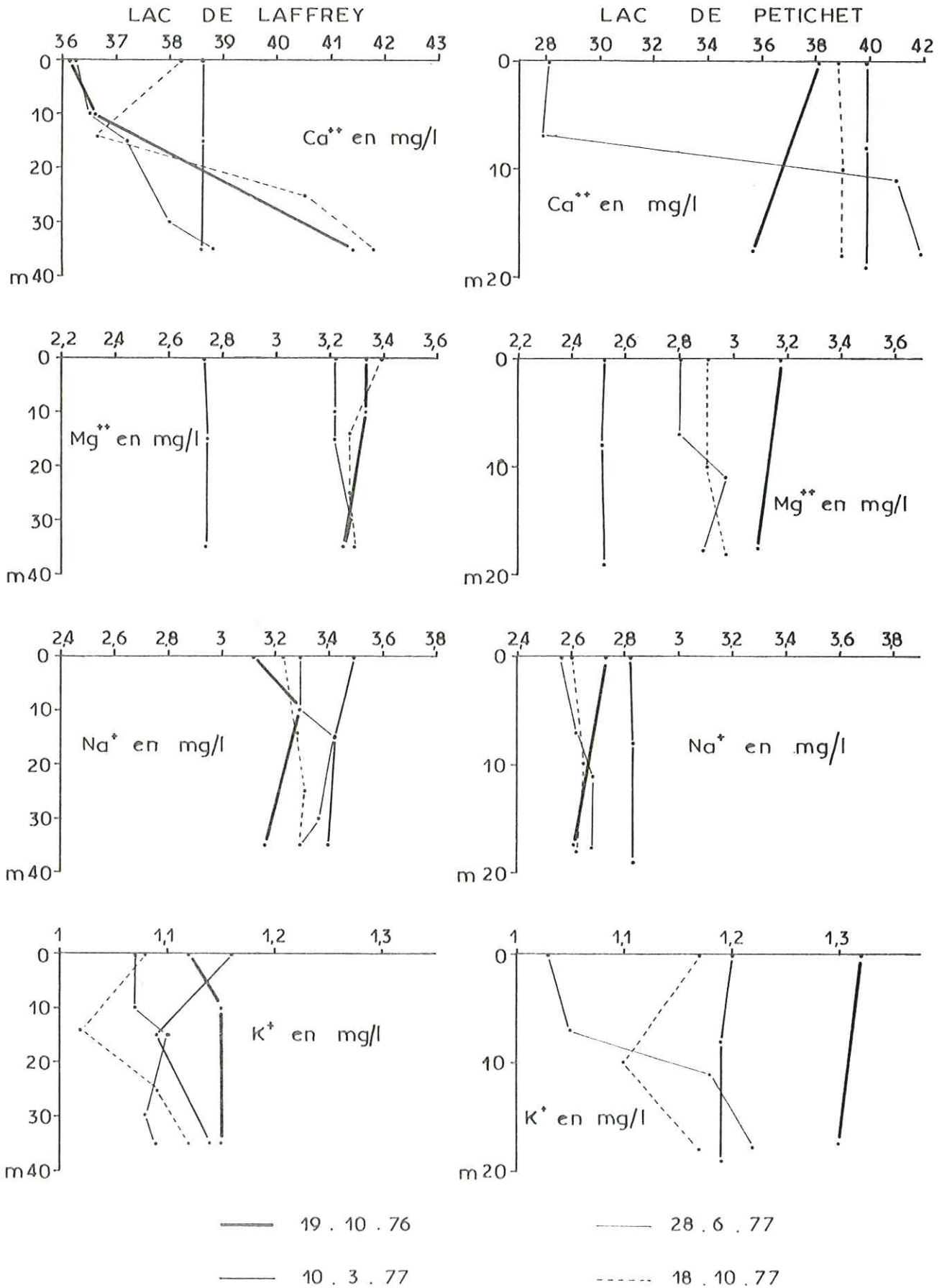
D'autre part en pondérant les concentrations ponctuelles par le volume des tranches d'eau correspondantes, il a été possible d'établir le tableau n° 29 qui présente les concentrations moyennes et les masses d'éléments dissous dans les deux lacs ainsi que les concentrations moyennes ~~mens~~^{ann}uelles.

5.10.1. LE CALCIUM

Les eaux des lacs de Laffrey et Petichet sont essentiellement bicarbonatées calciques, le calcium est donc le cation prépondérant. Les teneurs moyennes en calcium des deux lacs sont voisines (37,9 mg/l pour le lac de Laffrey et 37,3 mg/l pour le lac de Petichet), néanmoins des fluctuations importantes ont été mises en évidence au cours de l'année.

Durant les périodes d'isothermie, les teneurs en calcium sont sensiblement identiques sur toute la colonne d'eau grâce au brassage de celles-ci. Par contre, pendant la période de stratification estivale, on observe des variations très nettes de la teneur en calcium : en surface l'activité photosynthétique du phytoplancton provoque une diminution très nette des bicarbonates, donc du calcium : ce dernier précipite sous forme de carbonate de calcium et tombe au fond où des teneurs élevées en CO_2 libre permettent une nouvelle mise en solution d'une partie des carbonates sous forme de bicarbonates. Il est intéressant de noter que cette différence de concentration en calcium, entre la surface et le fond, est beaucoup plus

FIG. 58 VARIATIONS DES CONCENTRATIONS EN ELEMENTS DISSOUS EN FONCTION DE LA PROFONDEUR



nette dans le lac de Petichet (28 à 42 mg/l) que dans le lac de Laffrey (36 à 41 mg/l). Cette particularité est le signe que l'activité photosynthétique est beaucoup plus importante dans le lac de Petichet.

5.10.2. LE MAGNESIUM

Le magnésium est présent dans les deux lacs à des teneurs relativement faibles. La teneur du lac de Laffrey est légèrement supérieure à celle du lac de Petichet, ce qui s'explique par la présence des dolomies triasiques sur presque tout le pourtour du premier.

Les variations du magnésium semblent suivre celles du calcium mais d'une manière beaucoup plus atténuée.

5.10.3. LE SODIUM ET LE POTASSIUM

Les teneurs de ces deux éléments dans les eaux sont assez faibles et voisines dans les deux lacs.

Les variations du sodium sont irrégulières, très faibles et difficilement interprétables. Les variations du potassium sont également faibles et irrégulières, il semblerait cependant qu'il y ait une consommation de celui-ci par le phytoplancton les teneurs étant plus faibles en surface qu'en profondeur le 28.6.77 notamment.

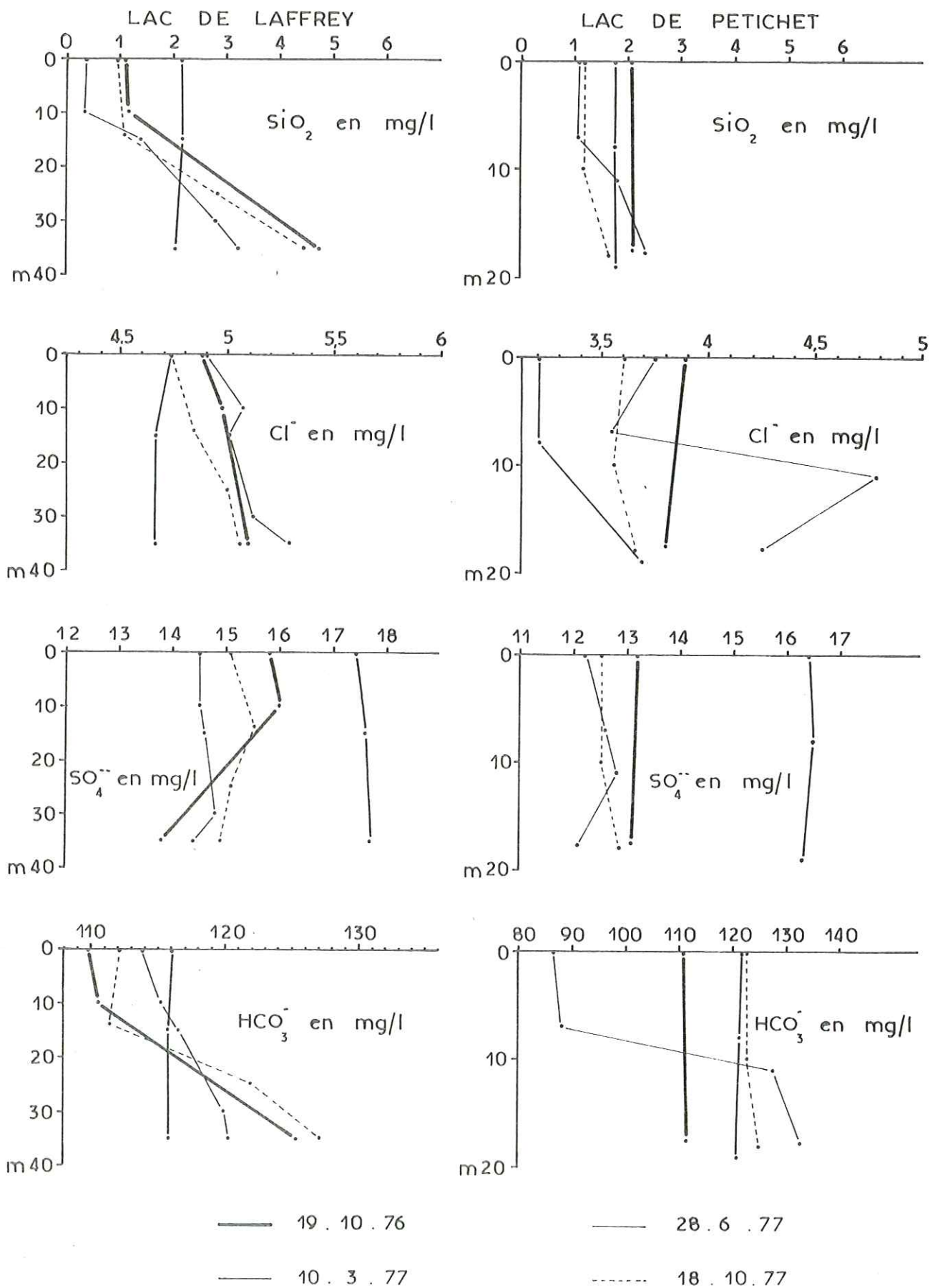
5.10.4. LA SILICE

La silice qui constitue le squelette (ou frustule) des diatomées est un des facteurs important à étudier dans un lac.

Les teneurs en silice sont voisines dans les deux lacs (1,72 mg/l pour le lac de Laffrey et 1,65 mg/l pour le lac de Petichet). Il est intéressant de remarquer que la teneur en silice du lac de Petichet est environ trois fois plus faible que celle de ses apports, le ruisseau des Moulins ayant une teneur toujours supérieure à 5 mg/l; ceci suppose un stockage important de la silice par le lac.

En période d'isothermie la répartition de la silice est homogène dans les deux lacs. Durant la période de stratification estivale on observe une diminution de la teneur en silice dans la zone superficielle productrice, vers le fond les teneurs sont plus fortes. Ce phénomène est peu

FIG. 59 VARIATIONS DES CONCENTRATIONS EN ELEMENTS DISSOUS EN FONCTION DE LA PROFONDEUR



marqué dans le lac de Petichet, les apports du ruisseau des Moulins compensant en partie le déficit en silice (surface 1,1 mg/l, fond 2,4 mg/l). Dans le lac de Laffrey par contre la teneur en silice de l'eau de surface baisse jusqu'à 0,34 mg/l, or d'après LUND (in DUSSART 66), une teneur en silice de 0,5 mg/l est un facteur limitant pour la croissance des diatomées du genre Asterionella, genre assez important quantitativement dans ce lac (M.GACHET, B.SERRA-TOSIO, J. TETART 1974).

D'autre part, il est intéressant de noter que les teneurs en silice du fond du lac de Laffrey sont très élevées en période de stratification (3,2-4,4-4,75 mg/l), ces teneurs élevées sont probablement dues à une baisse du nombre de diatomées avec la profondeur. Cette baisse avec la profondeur se fait moins sentir dans le lac de Petichet qui est moins profond.

5.10.5. LES CHLORURES

La teneur en chlorures est plus élevée que la normale régionale dans les deux lacs, ce qui est l'indice d'une pollution.

La source de cette pollution est à rechercher dans les épandages de sels sur les routes en hiver. Le lac de Petichet a une teneur en chlorures moins élevée que le lac de Laffrey (3,68 mg/l contre 4,54 mg/l) ceci est normal, le second étant à l'aval du premier.

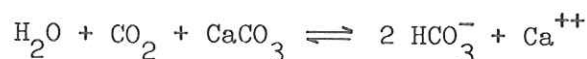
Les variations des teneurs en fonction de la profondeur ne sont pas, à notre avis, dues à une activité biologique, mais plutôt à la température de l'eau chargée en chlorures qui étant froide (fonte de neige) est descendue au fond des lacs.

5.10.6. LES SULFATES

La teneur des eaux en sulfates est moyenne; elle est légèrement plus élevée dans le lac de Laffrey que dans le lac de Petichet (15,3 mg/l contre 13,7 mg/l). Durant la période de brassage des eaux, la répartition des sulfates est relativement homogène. Par contre en période de stratification thermique on note une diminution des teneurs en sulfates vers le fond des lacs, ce qui est le signe d'une certaine réduction des sulfates en sulfures dans cette zone déficitaire en oxygène. C.GAY avait d'ailleurs mis en évidence la présence d'hydrogène sulfuré au fond du lac de Petichet en septembre 1974 (3 mg/l).

5.10.7. LES BICARBONATES

Les variations des teneurs en bicarbonates ont déjà été abordées à propos du calcium; elles sont régies par l'équation suivante :



En été, la consommation de CO_2 par la photosynthèse déplace l'équilibre de l'équation vers une formation de CaCO_3 par diminution des teneurs en bicarbonates. Le carbonate précipite vers le fond du lac où le CO_2 libéré par la décomposition des matières organiques est susceptible de transformer une partie de ces carbonates en bicarbonates.

Les différences de teneurs ainsi créées sont importantes dans le lac de Petichet (86 mg/l en surface à 133 mg/l en profondeur), plus faibles dans le lac de Laffrey (110 mg/l en surface et 125 mg/l au fond); ceci est le signe d'une production primaire plus faible dans le lac de Laffrey que dans le lac de Petichet.

5.10.8. L'AZOTE MINERAL

L'azote est un des constituants essentiels de la matière organique, il est indispensable à la croissance des organismes photosynthétiques, c'est pourquoi son étude est des plus importantes.

Il est présent dans l'eau sous différentes formes : soit comme azote organique dissous ou en suspension, soit comme azote minéral : nitrates (NO_3^-), nitrites (NO_2^-), ammonium (NH_4^+). Ces différentes formes de l'azote ne sont pas toutes utilisées par les végétaux, G.C. WEBSTER en 1959 résume d'une manière schématique la Capacité d'utilisation des différentes formes de l'azote par les végétaux (in VOLLENWEIDER 68) :

	N organique	N (NH_3)	N (NO_3^-)	N_2
Certaines bactéries et champignons quelques espèces d'Euglena	X			
Quelques bactéries et champignons	X	X		
La plupart des bactéries, algues champignons et végétaux supérieurs	X	X	X	
Quelques bactéries et algues bleues	X	X	X	X

Seuls les nitrates, les nitrites et l'ammonium ont été dosés et seront étudiés ici. Nous étudierons séparément les deux lacs qui ne présentent par les mêmes caractéristiques quant aux teneurs en azote minéral.

5.10.8.1. L'azote dans le lac de Petichet

- Le 19.10.76, le brassage des eaux de la circulation automnale a réparti les ions uniformément sur toute la colonne d'eau. Les teneurs en ammonium sont fortes (0,22 mg N/l); il provient à la fois des apports importants du ruisseau des Moulins et de la décomposition et minéralisation de la matière organique qui s'était fortement développée au début de l'automne.

Les teneurs en nitrates au contraire sont faibles (0,05 mg N/l) ce qui est dû à la forte consommation de celui-ci par le phytoplancton durant l'automne. Les teneurs en nitrites sont faibles (0,0035 mg N/l). La concentration en azote minéral est à cette époque de 0,27 mg/l.

- Le 10.3.77, la concentration en ammonium a fortement baissé par oxydation (0,09 mg N/l) l'eau étant sursaturée en oxygène. La teneur en nitrates a décuplé (0,47 mg N/l), ils proviennent pour une part de l'oxydation de l'ammonium et pour le reste des apports du ruisseau des Moulins.

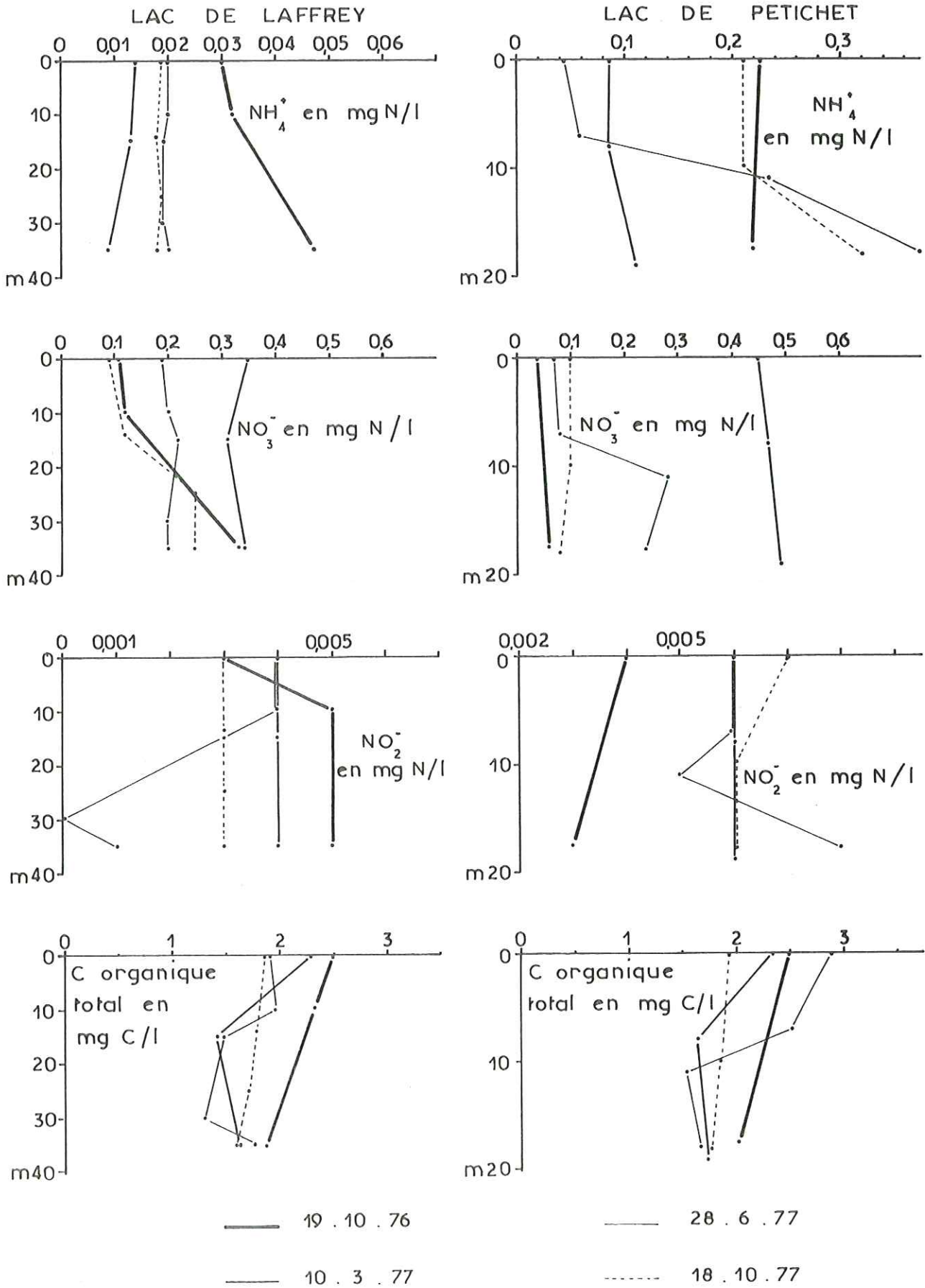
La teneur en nitrites a augmenté (0,006 mgN/l), signe d'une intense nitrification (production de nitrates) dans laquelle ils jouent le rôle d'intermédiaire entre l'ammonium et les nitrates. La concentration en azote minéral est à cette époque de 0,57 mg/l.

- Le 28.6.77, la concentration en ammonium baisse en surface (0,05 mgN/l) par consommation par les végétaux, par contre dans l'hypolimnion sous-saturé en oxygène on observe une ammonification intense, la concentration en ammonium atteint alors 0,35 mg N/l. La teneur en nitrates baisse également en surface à cause de la poussée du phytoplancton, elle est plus forte en profondeur. La concentration en nitrites est assez élevée vers le fond du lac (0,008 mg N/l).

La concentration en azote minéral est à cette époque de 0,31 mg/l.

- Le 18.10.77, la décomposition du phytoplancton ainsi que le mélange des eaux superficielles avec l'hypolimnion chargé en ammonium, augmentent considérablement la teneur en ammonium de l'eau de surface (0,22 mgN/l). La concentration en nitrates est faible sur toute la colonne d'eau (0,09mgN/l)

FIG. 60 VARIATIONS DES CONCENTRATIONS EN ELEMENTS DISSOUS EN FONCTION DE LA PROFONDEUR



après sa consommation par le phytoplancton. Les teneurs en nitrites restent élevées (0,006 mg N/l).

La concentration en azote minéral est à cette époque de 0,33 mg/l. L'azote est présent tout au long de l'année dans le lac de Petichet et ne semble être à aucun moment un facteur limitant pour la production primaire. La teneur élevée en azote ammoniacal est due, d'une part à une pollution directe par apport d'ammonium dans le milieu, d'autre part à la décomposition et à la minéralisation de la matière organique dans des conditions de sous-saturation en oxygène. De plus, en période de stratification thermique il est certain que la diffusion à partir de la vase joue un rôle non négligeable bien que difficilement chiffrable.

5.10.8.2. L'azote dans le lac de Laffrey

- Le 19.10.76, la stratification thermique n'est pas encore détruite, on observe donc une certaine stratification chimique : les teneurs en ammonium, nitrates et nitrites sont faibles en surface du fait de leur consommation par le phytoplancton (NH_4^+ 0,03 mgN/l, NO_3^- 0,11mgN/l, NO_2^- 0,003 mgN/l), au fond les nitrates sont présents à des teneurs supérieures (0,34 mg N/l); il en est de même de l'ammonium, résultat de la décomposition des matières organiques dans un milieu très déficitaire en oxygène. Les nitrites sont présents au fond à la concentration de 0,005 mgN/l. La concentration en azote minéral est à cette époque de 0,19 mg/l.

- Le 10.3.77, la répartition des différentes formes de l'azote est homogène sur toute la colonne d'eau. La teneur en ammonium est faible (0,012 mg N/l), la teneur en nitrates est assez forte (0,33 mg N/l), les nitrites sont présents à une teneur de 0,004 mgN/l. La concentration en azote minéral est à cette époque de 0,35 mg/l.

- Le 28.5.77, la répartition des nitrates et de l'ammonium est encore assez homogène : ammonium 0,019 mg N/l, nitrates 0,2 mgN/l, il semblerait donc que la consommation de nitrates par le phytoplancton soit répartie uniformément sur toute la hauteur d'eau. Les nitrites présentent une concentration forte en surface (0,004 mg N/l) et faible en profondeur avec un minimum à - 30 m où ils sont absents.

La concentration en azote minéral est à cette époque de 0,22 mg/l.

- Le 18.10.77, l'ammonium est réparti uniformément à une concentration faible de 0,019 mg N/l. Par contre les nitrates présentent un minimum en surface (0,09 mg N/l) dû au développement du phytoplancton qui a lieu plus tard dans le lac de Laffrey que dans le lac de Petichet (probablement à cause de la température des eaux). En profondeur les nitrates sont présents à une teneur plus élevée (0,25 mgN/l). Les nitrites sont présents sur toute la colonne d'eau à une teneur de 0,003 mg N/l.

La concentration en azote minéral est à cette époque de 0,17 mg /l.

L'azote ne semble pas être, dans le lac de Laffrey, un facteur limitant puisqu'il est présent tout au long de l'année. D'autre part les processus de nitrification l'emportent sur la production d'ammonium par décomposition de matière organique.

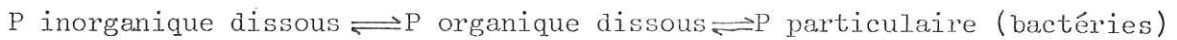
5.10.9. LE PHOSPHORE

C'est un des éléments indispensables à la vie, présent en général dans l'eau à des teneurs infimes (1 à 10 ppb). Il se présente dans la nature sous différentes formes que l'on peut schématiser de la manière suivante :

P dissous		P en suspension		
orthophosphates PO_4^{---}	P organique en solution colloïdale et/ou combiné avec un colloïde adsorbant	P minéral particulaire (apatite) et/ou adsorbé sur des complexes inorganiques tel: $Fe(OH)_3$	organismes	P adsorbé sur des détritues et/ou présents dans un composé organique
—P inorganique—				
—P total sur eau filtrée—				
—p total sur eau non filtrée—				

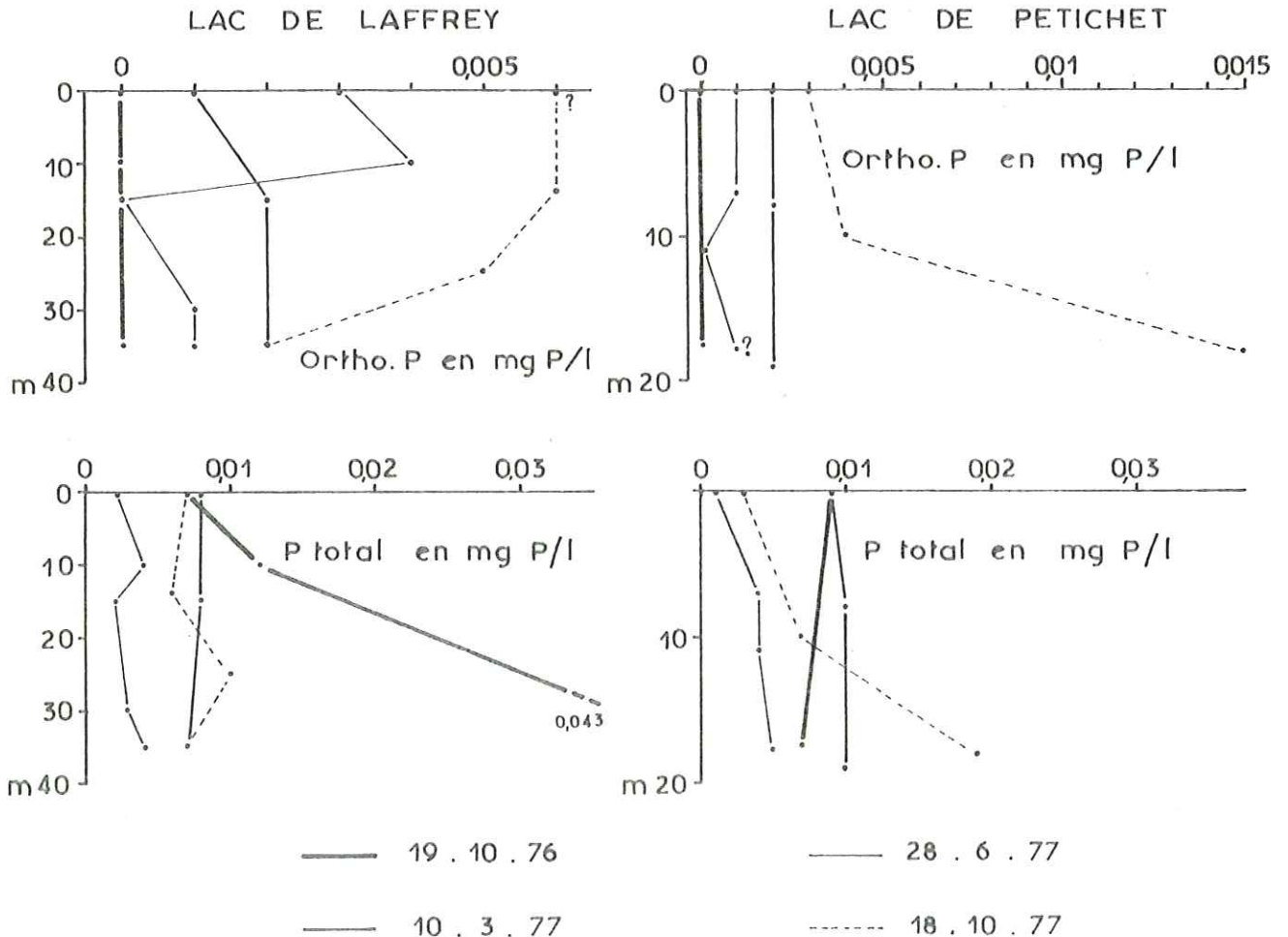
Tableau n° 30. Les différentes formes du phosphore présent dans l'eau (d'après VOLLENWEIDER 1968).

La plupart des végétaux utilisent le phosphore sous forme d'orthophosphates. Au cours de la décomposition des organismes, seule une fraction du phosphore est libéré dans l'eau sous forme d'orthophosphates, le reste étant sous forme de phosphore organique. Néanmoins WATT et HAYES 63 (in VOLLENWEIDER 68) ont montré qu'un équilibre tendait à s'instaurer entre les orthophosphates et le phosphore organique grâce à l'action de bactéries :



Seuls les orthophosphates et le phosphore total ont été dosés sur les eaux après une filtration à $0,45 \mu$. Il est important de noter que pour les concentrations inférieures à $0,01 \text{ mg P/l}$, la précision du dosage est très faible ($\pm 100 \%$).

FIG.61 VARIATIONS DES CONCENTRATIONS EN ELEMENTS DISSOUS EN FONCTION DE LA PROFONDEUR



- Le 19.10.76, les orthophosphates n'ont été détectés ni dans un lac, ni dans l'autre, ils apparaissent donc comme un facteur limitant à la production primaire du moins pour l'été 76. Les teneurs en phosphore total par contre sont très élevées, régulièrement distribuées dans le lac de Petichet, alors que le lac de Laffrey présente des concentrations maximales au fond (0,043 mg P/l) qui proviennent probablement d'une diffusion à partir de la vase.

- Le 10.3.77, les orthophosphates et le phosphore total sont répartis de façon homogène dans les deux lacs. La concentration en phosphore total a diminué de moitié dans le lac de Laffrey alors qu'elle n'a que légèrement augmenté dans le lac de Petichet.

- Le 28.6.77, les orthophosphates présents à des teneurs assez faibles sont même absents à 15 m de profondeur dans le lac de Laffrey et à - 11 m dans le lac de Petichet, le phosphore serait donc un facteur limitant à ces profondeurs. Le phosphore total est présent sur toute la hauteur d'eau à une concentration très faible.

- Le 18.10.77, dans le lac de Petichet la teneur en orthophosphates de l'eau de surface est supérieure à celle du mois de juin. Au fond les teneurs sont assez fortes et peuvent provenir d'une diffusion des orthophosphates à partir de la vase. La répartition du phosphore total suit celle des orthophosphates. Dans le lac de Laffrey, au contraire, les fortes concentrations en orthophosphates se rencontrent en surface, alors qu'au fond les teneurs sont très faibles. Le phosphore total présente une répartition homogène sur toute la colonne d'eau.

- Les variations du phosphore dans les deux lacs sont importantes mais ne présentent pas un caractère cyclique marqué; il semble cependant qu'il puisse jouer le rôle de facteur limitant à la production primaire à certaines époques. D'autre part les faibles teneurs rencontrées (< 0,01 mg/l) introduisent des erreurs énormes, dues aux analyses qui rendent les interprétations très délicates et hasardeuses.

5.10.10 LE CARBONE ORGANIQUE TOTAL

Le carbone est présent dans les eaux sous différentes formes minérales (CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{--}) et organiques (organismes vivants, matière organique particulaire et matière organique dissoute). Le carbone organique total (C.O.T.) donne une bonne image de la quantité de matière organique présente

dans l'eau. Le dosage du carbone organique total s'effectuant sur un échantillon d'eau non filtrée, le C.O.T. comprend le carbone organique dissous et le carbone organique particulaire, ce dernier représentant en moyenne 20 % du C.O.T. dans les eaux lacustres (G.SERRA-BERTRAL 76).

La première constatation que l'on fait en étudiant les analyses de C.O.T. dans les deux lacs est que la moyenne des teneurs (pondérées en fonction des variations de la concentration avec la profondeur) est plus élevée dans le lac de Petichet : 2,09 mg C/l contre 1,82 mg C/l pour le lac de Laffrey. Ceci est le signe d'une activité biologique plus intense dans le lac de Petichet que dans le lac de Laffrey, mais également de l'incapacité du lac de Petichet à consommer ou évacuer le produit de son activité biologique. D'autre part, bien que le nombre de campagnes de prélèvements soit faible, il est possible de mettre en évidence des variations cycliques dans la répartition verticale du C.O.T. Ces variations sont similaires dans les deux lacs aux valeurs des concentrations près, aussi seront-elles étudiées ensemble.

- Le 19.10.76, la concentration en C.O.T. diminue régulièrement de la surface vers le fond.

- Le 10.3.77, les concentrations globales sont plus faibles qu'en octobre. Les teneurs en C.O.T. sont élevées en surface et au fond des deux lacs, entre les deux les concentrations présentent un minimum dont la profondeur exacte ne peut cependant être précisée.

- Le 28.6.77, la concentration globale n'a pas varié dans le lac de Laffrey depuis le mois de mars, elle a par contre beaucoup augmenté dans le lac de Petichet. Les concentrations en C.O.T. sont très fortes de la surface jusqu'à la thermocline, elles sont en revanche nettement plus faibles dans l'hypolimnion bien qu'elles augmentent sensiblement vers le fond.

- Le 18.10.77, les concentrations globales augmentent légèrement dans le lac de Laffrey alors qu'elles diminuent nettement dans le lac de Petichet. Dans les deux lacs la concentration en C.O.T. diminue régulièrement de la surface vers le fond.

Comme on le voit les zones à fortes concentrations en C.O.T. représentent assez fidèlement les zones d'exaltation de l'activité biologique à la fois dans le temps et dans l'espace.

5.11. ÉTUDE DES SÉDIMENTS ET DU MILIEU INTERSTITIEL

5.11.1. LES SEDIMENTS

Les prélèvements de sédiments ont été effectués le 19.10.76 au moyen d'une benne " EKMAN " aux trois points de prélèvements (voir chapitre 5.5), l'analyse des sédiments et de l'eau interstitielle a été effectuée au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon.

Les teneurs en eau des sédiments sont assez élevées et peu différentes :

Petichet Nord	81,5
Petichet Sud	79,5
Laffrey	83

Tableau n° 31 . Teneurs en eau des sédiments lacustres (résultats exprimés en pourcentage du sédiment humide).

Le tableau N° 32 présente les résultats des analyses effectuées sur les trois échantillons. Les résultats sont exprimés d'une part en pourcentage par rapport au sédiment séché à 105°C, d'autre part en pourcentage de la fraction minérale c'est-à-dire après élimination de la perte à 600°C qui représente essentiellement la matière organique.

	% / sédiment séché à 105°C			% / à la fraction minérale		
	PetichetN	PetichetS	Laffrey	PetichetN	PetichetS	Laffrey
CaO	36,98	39,70	21,97	41,22	44	24,65
MgO	0,69	0,55	0,83	0,77	0,62	0,93
Na ₂ O	0,15	0,11	0,39	0,17	0,12	0,44
K ₂ O	0,54	0,42	1,13	0,60	0,47	1,27
Fe ₂ O ₃	1,59	1,55	4,78	1,77	1,73	5,36
MnO	0,13	0,14	0,36	0,14	0,16	0,40
Al ₂ O ₃	3,23	2,61	6,80	3,60	2,89	7,63
SiO ₂	19,09	15,45	35,72	21,28	17,12	40,08
TiO ₂	0,18	0,15	0,40	0,20	0,17	0,45

(suite)

P ₂ O ₅	0,23	0,16	0,21	0,25	0,18	0,24
Perte à 600°C	10,35	9,80	10,90			
Perte à 1000°C	37,85	39,40	27,60	30,65	32,81	18,74
Total	100,66	100,26	100,19	100,66	100,26	100,19
Fraction <40 μ	95,89	97,61	91,96			

Tableau n° 32 . Composition chimique et granulométrique des sédiments des lacs de Laffrey et Petichet (prélèvements du 19.10.76).

Ces résultats d'analyses appellent quelques commentaires.

- L'analyse granulométrique met en évidence la finesse des sédiments. La fraction <40 μ représente 95 à 97 % dans le lac de Petichet, elle n'est que de 92 % dans le lac de Laffrey mais le point de prélèvement est à proximité d'un talus abrupt ce qui explique cette particularité.

- La perte à 600°C représente essentiellement la matière organique. Les teneurs en matière organique des sédiments sont sensiblement égales dans les deux lacs. On constate cependant que les sédiments de la cuvette nord du lac de Petichet sont légèrement plus chargés que ceux de la cuvette sud, ce qui est le signe que cette dernière présente des conditions de décomposition et minéralisation de la matière organique meilleures que celles de la cuvette nord.

Les teneurs en matière organique sont relativement faibles, mais nous pensons que cela est dû en partie à la technique de prélèvements qui mélange la partie superficielle de la vase avec celle plus profonde généralement moins chargée en matière organique, les teneurs en matière organique des sédiments sont donc probablement plus fortes en surface que celles trouvées.

- La différence entre la perte à 1 000°C et celle à 600°C représente principalement le CO₂ provenant de la dissociation des carbonates. Il est légitime, vues les faibles teneurs en magnésium, de supposer que tout le CO₂ provient de carbonate de calcium, on peut alors estimer les teneurs en CaCO₃ des sédiments :

$$\% \text{ CaCO}_3 = \frac{(\text{perte à } 1\ 000^\circ\text{C} - \text{perte à } 600^\circ\text{C})}{44} \cdot 100$$

	% de CaCO ₃ par rapport au poids sec
Petichet Nord	62,5
Petichet Sud	67
Laffrey	38

Tableau N° 33 . Teneurs en CaCO₃ des sédiments lacustres.

Les caractéristiques géologiques des bassins versants des deux lacs étant les mêmes, on ne peut expliquer les fortes teneurs en CaCO₃ des sédiments du lac de Petichet que comme le produit d'une intense activité photosynthétique (précipitation de CaCO₃ en provenance du bicarbonate de calcium).

- Le reste des sédiments est constitué de silice probablement d'origine organique (frustules de diatomées) et d'alumino-silicates. Les teneurs en silice sont deux fois plus fortes dans les sédiments du lac de Laffrey que dans ceux du lac de Petichet.

- En résumé les sédiments des deux lacs sont constitués de : 65 % de CaCO₃, 20 % d'alumino-silicates et de silice, 10 % de matière organique dans le lac de Petichet et 42 % d'aluminosilicates et silice, 38 % de CaCO₃, 10 % de matière organique dans le lac de Laffrey.

5.11.2. LES EAUX INTERSTITIELLES

Les analyses des eaux interstitielles ont été effectuées par le Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon, sur les trois échantillons de sédiments .

	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	N(NH ₄ ⁺)	Sr ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	N(NO ₃ ⁻)	N(NO ₂ ⁻)	ortho P	P total
Petichet N	48,2	70,4	4,18	4,09	3,44	12,5	0,35	4,68	44,6	243,5	0,02	0,005	0,000	0,019
Petichet S	51,4	64,2	3,85	4,03	2,84	10,08	0,33	4,67	24,4	247,4	0,03	0,003	0,000	0,012
Laffrey	49,2	62,5	3,79	3,41	1,83	5,14	0,28	5,1	47	187,4	0,03	0,004	0,000	0,012

Tableau n° 34 . Analyses chimiques des eaux interstitielles des sédiments lacustres (résultats exprimés en mg/l)

Ces analyses montrent que d'une manière générale les concentrations en Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺, SO₄⁻⁻ et HCO₃⁻ sont doubles de celles des eaux

lacustres; ce phénomène semble être général dans les lacs (G.SERRA-BERTRAL 76).

Par contre les éléments nutritifs (N et P) sont présents dans les eaux interstitielles à des concentrations très différentes de celles des eaux lacustres. L'azote est essentiellement sous forme d'ammonium à des concentrations très élevées dans les eaux interstitielles; ces concentrations sont beaucoup plus fortes dans le lac de Petichet (10 à 12 mg N (NH_4^+)/l) que dans le lac de Laffrey (5 mg N (NH_4^+)/l).

Les teneurs en nitrates et nitrites sont très faibles. Il n'y a pas d'orthophosphates, mais le phosphore total est présent à une concentration double de celle des eaux lacustres (0,019 à 0,012 mg P/l) ce qui est cependant assez faible.

Ces fortes teneurs en éléments nutritifs (ici principalement azote ammoniacal) sont inquiétantes, en effet W.EINSELE 36 et C.H. MORTIMER 41-42 (in VOLLENWEIDER 68) ont mis en évidence l'importance des échanges vase-eau dans des conditions anaérobies, il est donc probable que les ions ammonium soient libérés en grande quantité dans l'eau durant les périodes de stratification estivales, participant ainsi à l'augmentation de la charge des lacs en éléments nutritifs.

5.12. ÉTAT TROPHIQUE DES LACS DE LAFFREY ET PETICHET

On dit d'un lac qu'il est dans une phase d'eutrophisation quand les processus de production deviennent supérieurs aux possibilités de décomposition et minéralisation de celui-ci. Il existe évidemment différents niveaux trophiques : oligotrophie, mésotrophie, eutrophie, chacun de ces niveaux trophiques peut être caractérisé par différents critères et symptômes biologiques et physicochimiques.

Les lacs oligotrophes sont caractérisés par : une production faible par suite de la pauvreté en substances nutritives, une teneur en oxygène dissous élevée sur toute la colonne d'eau, une transparence élevée, l'absence de prédominance d'une espèce par rapport aux autres. A l'opposé, les lacs eutrophes sont caractérisés par une production élevée à caractère explosif, par la richesse de ses eaux en éléments nutritifs, par la pauvreté voire l'absence d'oxygène dissous dans l'hypolimnion et par la réduction du nombre d'espèces. Les lacs mésotrophes présentent des caractères intermédiaires.

D'autre part différents auteurs ont proposé des classifications basées sur des critères quantitatifs, nous en avons retenu deux.

- La première est basée sur l'alcalinité des eaux (E.A THOMAS 53 in VOLLENWEIDER 68). Cette classification est basée sur la différence d'alcalinité (teneur en bicarbonates) de l'eau de surface entre l'hiver et l'été.

Différence d'alcalinité en °f	Type du lac
inférieure à 3 Comprise entre 3 et 5 supérieure à 5	oligotrophe, mésotrophe mésotrophe, eutrophe polytrophe

Tableau n° 35 . Classification des niveaux trophiques des lacs d'après l'alcalinité des eaux d'après E.A.THOMAS 53 in VOLLENWEIDER 68

- La seconde méthode est basée sur les concentrations en phosphore total et en azote minéral des eaux lacustres en hiver (E.A THOMAS 53, in VOLLENWEIDER 68).

P total mg/m ³	N inorganique mg/m ³	niveau trophique
< 5	< 200	ultra-oligotrophique
5 à 10	200 à 400	oligotrophe, mésotrophe
10 à 30	300 à 650	mésotrophe, eutrophe
30 à 100	500 à 1500	eu trophe, polytrophe
> 100	> 1500	polytrophe

Tableau n° 36 Classification des niveaux trophiques des lacs d'après leurs teneurs en N et P d'après E.A. THOMAS 53 in VOLLENWEIDER.

Dans le cas du lac de Petichet la différence d'alcalinité qui est de 3 °f (19.12.76 et 28.6.77) nous indiquerait que le lac est moyennement mésotrophe, alors que le critère des concentrations en azote et phosphore nous indique un stade mésotrophe avancé (N = 567 mg/m³, P = 9,7 mg/m³).

Par ailleurs :

- le taux de saturation en oxygène qui atteint 26 et même 6 % (C.GAY 74) au fond du lac ,
- la transparence moyenne assez faible (3,8 m),
- l'ambiance réductrice du fond du lac (sulfures, ammonium),
- la teneur moyennement élevée des vases en matières organiques (10%)

nous confirme que le lac de Petichet est à notre avis dans un stade d'eutrophisation qu'on peut qualifier de mésotrophe assez avancé.

Dans le cas du lac de Laffrey la différence d'alcalinité qui est de 1,15 °f nous indique un lac à la limite entre l'oligotrophie et la mésotrophie. Le critère de concentration en azote et phosphore nous indique un stade mésotrophe peu avancé (N = 346 mg/m³, P = 7,9 mg/m³).

D'autre part :

- le taux de saturation en oxygène minimal de 13,5 % au lieu de 6 % pour le lac de Petichet ,
- la transparence moyenne supérieure à celle du lac de Petichet (5,8 m contre 3,8 m),
- l'ambiance réductrice du fond plus faible que celle du lac de Petichet (teneur en NH₄⁺ 10 fois plus faible),
- la teneur des eaux interstitielles en ammonium deux fois plus faible qu'à Petichet,

nous confirment que le lac de Laffrey est à un niveau d'eutrophisation moins avancé que celui de Petichet, que nous qualifierons de mésotrophe peu avancé.

Cette différence de niveau trophique est due d'une part au fait que le lac de Laffrey est deux fois plus profond que le lac de Petichet, mais surtout au fait que la majeure partie des apports en éléments nutritifs arrive dans le lac de Petichet qui joue le rôle de station d'épuration naturelle.

Nous allons essayer au chapitre 6 de quantifier, sous forme d'un bilan chimique, la masse des apports aux lacs en éléments chimiques dissous.

5.13 CONCLUSION À L'ÉTUDE DU MILIEU LACUSTRE

Les lacs de Petichet et Laffrey sont des lacs d'origine glaciaire, ils occupent des ombilics séparés par un verrou glaciaire et des arcs morainiques.

L'affluent principal des lacs est le ruisseau des Moulins qui se jette dans le lac de Petichet, ce dernier se déversant à son tour dans le lac de Laffrey.

Les lacs de Petichet et Laffrey ont un régime thermique du type dimictique du second ordre caractérisé par une période de stratification estivale nette (thermocline vers 10-14 m). Leur temps de renouvellement moyen est de 28 mois pour le lac de Laffrey et 14 mois pour celui de Petichet.

La transparence moyenne du lac de Laffrey est supérieure à celle du lac de Petichet (5,8 m contre 3,8 m). Le pH des eaux est alcalin en surface (pH de 8 à 8,2), plus acide au fond (pH de 7,3 à 7,4).

L'épilimnion des deux lacs est presque constamment sursaturé en oxygène, alors qu'au fond, durant les périodes de stratification estivales, l'eau est sous-saturée en oxygène, cette sous-saturation est plus accentuée dans le lac de Petichet que dans celui de Laffrey (6 % contre 13,5 % de saturation en oxygène).

Les eaux des deux lacs sont bicarbonatées calciques; la minéralisation totale est très légèrement supérieure dans le lac de Laffrey à celle des eaux du lac de Petichet (181 mg/l contre 177 mg/l). Les concentrations présentent des variations dans le temps et dans l'espace qui sont en général le reflet de l'activité biologique. L'étude plus fine de ces variations de concentrations a montré que l'activité biologique est plus intense dans le lac de Petichet que dans celui de Laffrey.

Les teneurs en éléments nutritifs (N et P) en hiver sont plus élevées dans le lac de Petichet; néanmoins il semble que le phosphore soit un facteur limitant à la production primaire dans les deux lacs.

L'ensemble de l'étude physicochimique nous a permis de déterminer le niveau trophique des deux lacs : le lac de Petichet est à un stade mésotrophe assez avancé alors que celui de Laffrey n'en est qu'à un stade mésotrophe peu avancé.

BILAN CHIMIQUE DES LACS DE PETICHET ET LAFFREY

6. BILAN CHIMIQUE DES LACS DE PETICHET ET LAFFREY

Après avoir étudié le milieu lacustre et plus particulièrement les variations du chimisme, il était nécessaire de déterminer la provenance des différents éléments chimiques et de quantifier sous forme d'un bilan les apports chimiques dissous, en attachant une attention particulière aux éléments nutritifs (nitrates, nitrites, ammonium, phosphore) qui sont les principaux responsables de l'eutrophisation des lacs.

Les éléments chimiques arrivent aux lacs par différentes voies. Pour le lac de Petichet, les apports proviennent du ruisseau des Moulins, du ruissellement sur les versants ceinturant le lac et des apports atmosphériques directs sur le lac. Pour le lac de Laffrey, ces apports viennent de l'exutoire du lac de Petichet (augmenté des pertes du ruisseau des Moulins), du ruissellement sur les versants et des apports atmosphériques directs. Le bilan chimique du lac de Petichet sera abordé en premier.

6.1. BILAN CHIMIQUE DU LAC DE PETICHET

Nous étudierons, dans un premier temps, les différentes sources d'apports au lac , puis la charge sortant de celui-ci, un bilan chimique global sera enfin établi.

6.1.1. APPORTS DU RUISSEAU DES MOULINS

6.1.1.1. Origine des apports

Le ruisseau des Moulins, principal affluent du lac de Petichet, prend sa source vers le hameau de La Coirelle puis traverse le village de Cholonge; il se jette ensuite 2,5 km plus loin, dans le lac de Petichet.

Les eaux du ruisseau sont bicarbonatées calciques,

les autres éléments ne représentant qu'environ 8 % de la minéralisation totale. Le tableau n° 37 présente les teneurs moyennes en éléments dissous du ruisseau des Moulins au niveau du limnigraphe (moyenne pour chaque élément des 48 analyses hebdomadaires).

SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	N(NH ₄ ⁺)	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	N(NO ₃ ⁻)	N(NO ₂ ⁻)	ortho P
5,76	49,66	2,00	1,56	1,20	0,106	1,77	8,38	149,2	0,68	0,006	0,047

Tableau n° 37 . Ruisseau des Moulins - Analyse chimique moyenne en mg/l.

Les éléments nutritifs sont présents à des concentrations assez importantes; ils proviennent essentiellement du rejet des eaux vannes des exploitations agricoles (porcherie , laiterie, fermes) et des résidences, directement dans le ruisseau au niveau de Cholonge comme l'a montré C.GAY en 1975. Nos analyses confirment cet état de chose :

	Na ⁺	K ⁺	N(NH ₄ ⁺)	Cl ⁻	N(NO ₃ ⁻)	N(NO ₂ ⁻)	ortho P
Prélèvement avant Cholonge	1,25	0,78	0,03	1,18	0,52	0,002	0,001
Prélèvement après Cholonge	1,65	2,32	0,23	2,08	0,72	0,023	0,087

Tableau n°38 . Ruisseau des Moulins - Analyses chimiques du 21.8.77 en mg/l

6.1.1.2. Echantillonnage

Pour déterminer la charge du ruisseau des Moulins il y avait lieu d'effectuer des prélèvements et des analyses régulières de l'eau. Le choix de la fréquence de prélèvement est fondamental car de lui dépendra la précision de l'évaluation de la charge. La méthode la plus précise serait évidemment l'analyse en continu de l'eau ce qui n'est matériellement pas possible, un compromis doit donc être trouvé entre les possibilités matérielles et la précision recherchée.

La fréquence de prélèvements doit tenir compte de la période de variation du chimisme.

Les variations de la concentration sont en premier lieu fonction du débit: une augmentation du débit faisant généralement diminuer les concentrations par un effet de dilution; la fréquence de prélèvement devrait donc être fonction de la variabilité des débits c'est-à-dire très serrée en période de crue.

Les variations de la concentration peuvent, d'autre part, avoir un caractère saisonnier lié à des facteurs biologiques ou climatiques, pour tenir compte de ce type de variations un prélèvement trimestriel serait suffisant.

A ces variations naturelles de la concentration se surajoutent des variations artificielles dues à l'activité humaine, ces variations sont parfois très brusques (la concentration en orthophosphates a été multipliée par 30 en l'espace d'une demi-heure le 22.5.77). La fréquence de prélèvements devrait donc, pour tenir compte de ces " bouffées de pollution ", être d'un prélèvement toutes les 5 minutes.

Compte tenu des moyens dont nous disposons nous avons effectué un prélèvement par semaine, d'autre part pour essayer d'estimer les apports dus aux " bouffées de pollution " nous avons à deux reprises effectué des prélèvements très rapprochés dans le temps (2 à 15 mn durant une à deux heures). En tout , 71 analyses ont été effectuées, dont 4 par le C.R.G. (voir annexe 3).

6.1.1.3. Les méthodes de calcul des bilans

De très nombreuses méthodes existent pour calculer les bilans, certaines très simples, d'autres plus sophistiquées, la précision des résultats étant évidemment très différente.

Les méthodes les plus primitives sont de simples moyennes qui ne font généralement pas intervenir les débits ce qui fausse les résultats. Les méthodes plus élaborées font généralement intervenir un modèle concentration-débit. On détermine, à partir des résultats analytiques, la relation mathématique schématisant au mieux les variations de la concentration en fonction du débit; cette relation permet alors une simulation des concentrations. On ne peut évidemment appliquer cette méthode que si la relation concentration-débit existe, elle ne peut donc être employée pour les éléments dont la variation en fonction du débit est aléatoire ou fonction uniquement des saisons.

Pour ces éléments une méthode simple peut être appliquée, qui consiste à associer à chaque échantillon analysé un intervalle de temps durant lequel la concentration sera considérée comme constante, le bilan se résume alors à une somme de bilans partiels.

6.1.1.4. Les modèles concentration-débit

La recherche des lois $C = f(Q)$, à partir des analyses hebdomadaires (48 analyses), a été mesurée en effectuant un calcul de régression linéaire par la méthode des moindres carrés, plusieurs types de relations mathématiques ont été essayées, celle présentant le meilleur coefficient de corrélation a été retenue.

Trois types de lois ont été testées :

- une relation linéaire $C = aQ + b$
- une relation logarithmique $C = a \log Q + b$
- une relation bilogarithmique $C = a Q^b$ (ou $\log C = A + b \log Q$ avec $A = \log a$).

Les deux dernières relations sont classiques et ont été utilisées par de très nombreux auteurs.

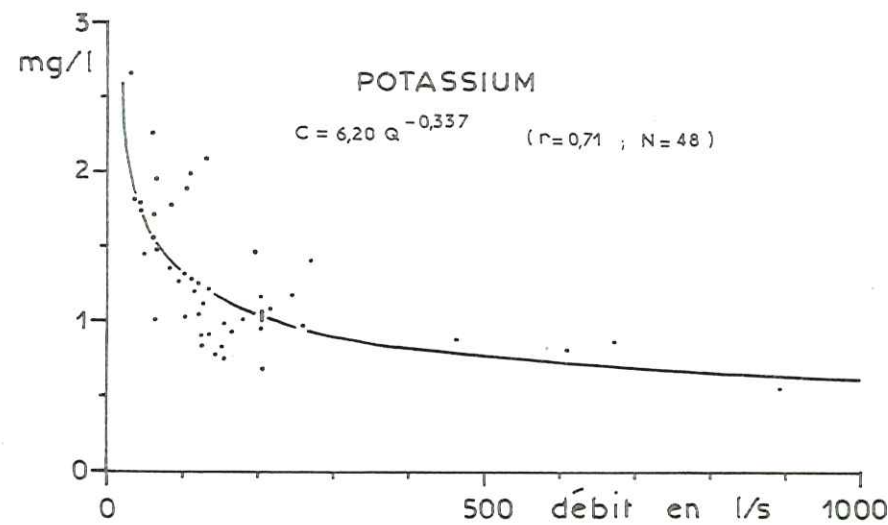
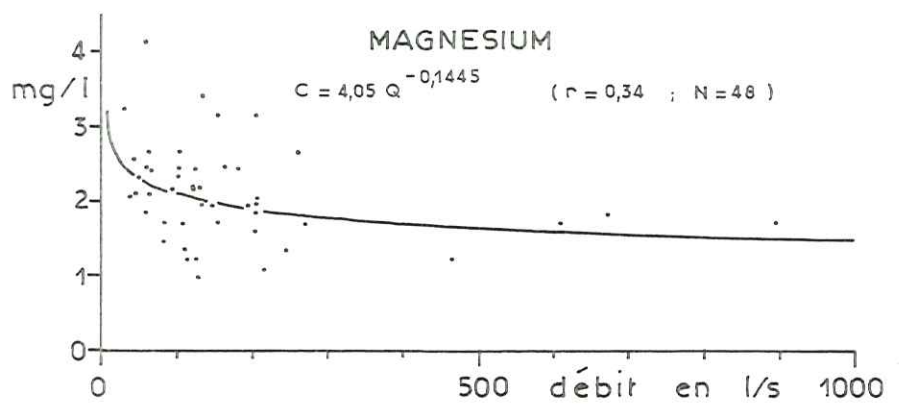
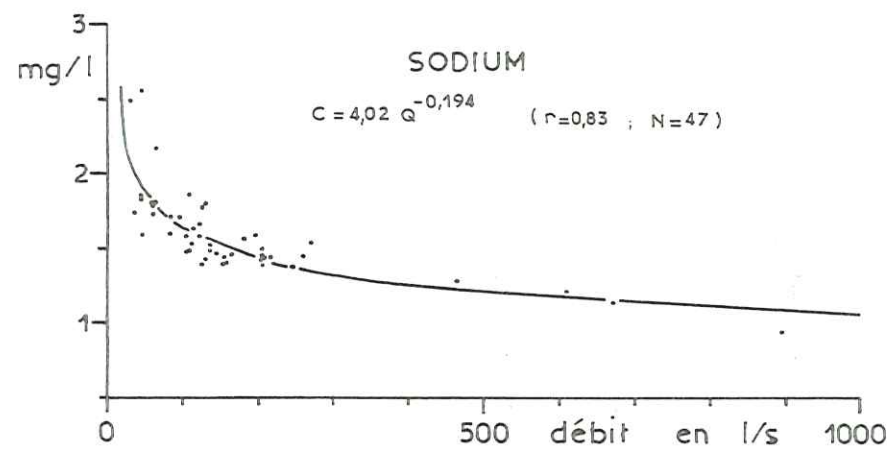
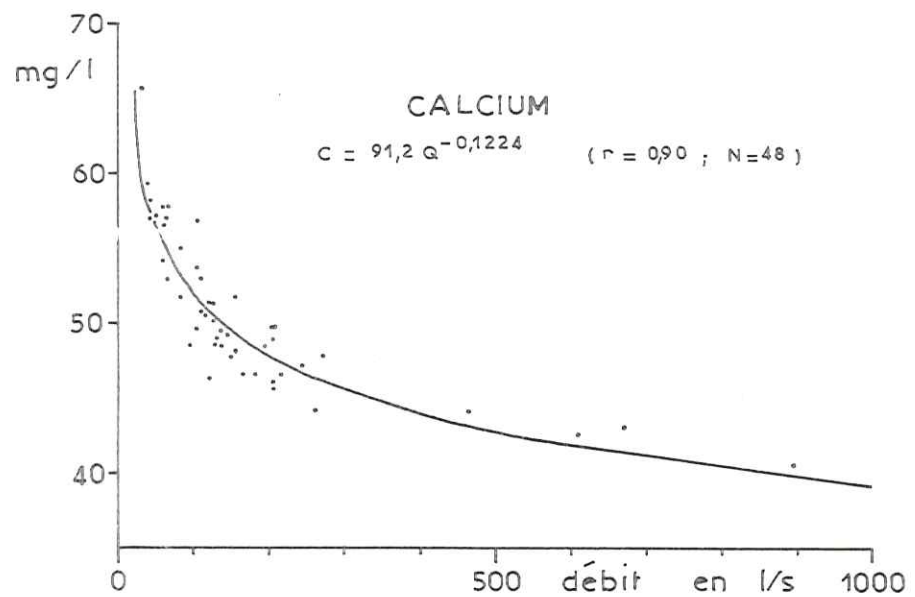
Les régressions linéaires ainsi calculées sont résumées dans le tableau N° 39 , elles sont toutes (sauf pour les sulfates) du type $C = a Q^b$ qui est la relation classique représentant avec le plus de précision les variations concentration-débit.

D'autres modèles, plus complexes, faisant intervenir les concentrations des eaux souterraines et des eaux de surface, permettent une meilleure modélisation du phénomène (M. HAUBERT 75). Toutefois le gain de précision obtenu ne justifie pas à notre avis l'utilisation d'un tel modèle, plus complexe à l'emploi.

Elément	Nombre de couples	Relation concentration-débit	Coefficient de corrélation
Ca ⁺⁺	48	$C = 91,2 Q^{-0,1224}$	0,90
Mg ⁺⁺	48	$C = 4,05 Q^{-0,1445}$	0,34
Na ⁺	47	$C = 4,02 Q^{-0,194}$	0,83
K ⁺	48	$C = 6,20 Q^{-0,337}$	0,71
N(NH ₄ ⁺)	44	$C = 0,146 Q^{-0,169}$	0,17
Cl ⁻	48	$C = 4,28 Q^{-0,181}$	0,47
HCO ₃ ⁻	48	$C = 261,1 Q^{-0,1118}$	0,84
SO ₄ ⁻	48	$C = 0,0019 Q + 8,71$	0,09
N(NO ₃ ⁻)	48	$C = 2,2 Q^{-0,241}$	0,47
N(NO ₂ ⁻)	48	$C = 0,324 Q^{-0,805}$	0,40
Ortho.P. (Q < 3001/s)	27	$C = 28,58 Q^{-1,42}$	0,65
Min.totale	48	$C = 387,9 Q^{-0,1163}$	0,86

Tableau n° 39 . Relations concentration - débit pour les principaux éléments dissous du ruisseau des Moulins (en mg/l et Q en l/s.).

(aucun calcul de régression n'a été tenté pour la silice, les variations de sa concentration étant totalement indépendantes du débit).



— COURBE DE REGRESSION

RUISSEAU DES MOULINS (AVAL)
 VARIATIONS DES CONCENTRATIONS EN FONCTION DU DEBIT

FIG. 62

6.1.1.5. Variations des concentrations en éléments dissous

Les figures n° 62 , 63 et 64 présentent les variations des concentrations en fonction du débit du ruisseau des Moulins et la courbe de régression la plus satisfaisante.

6.1.1.5.1. Les éléments principaux : Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, HCO₃⁻.

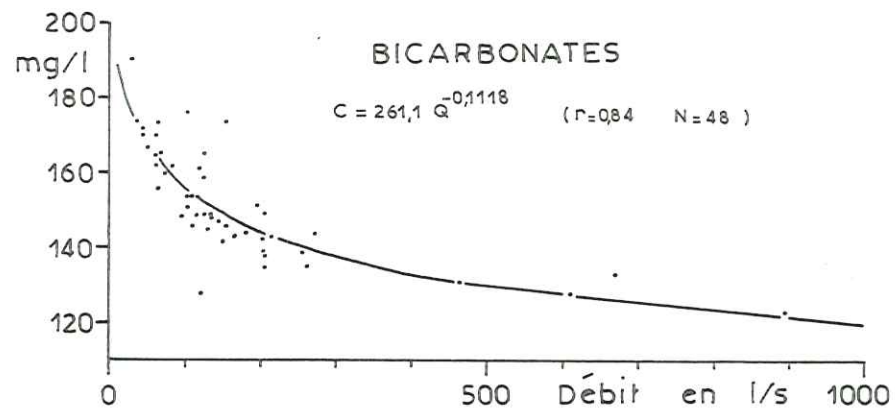
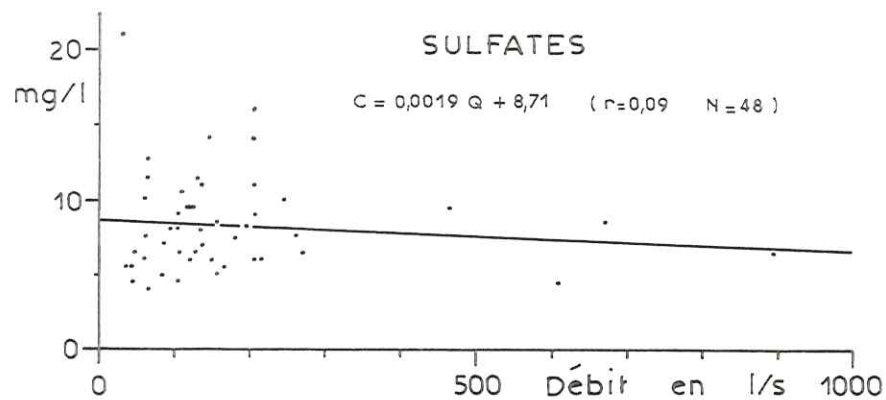
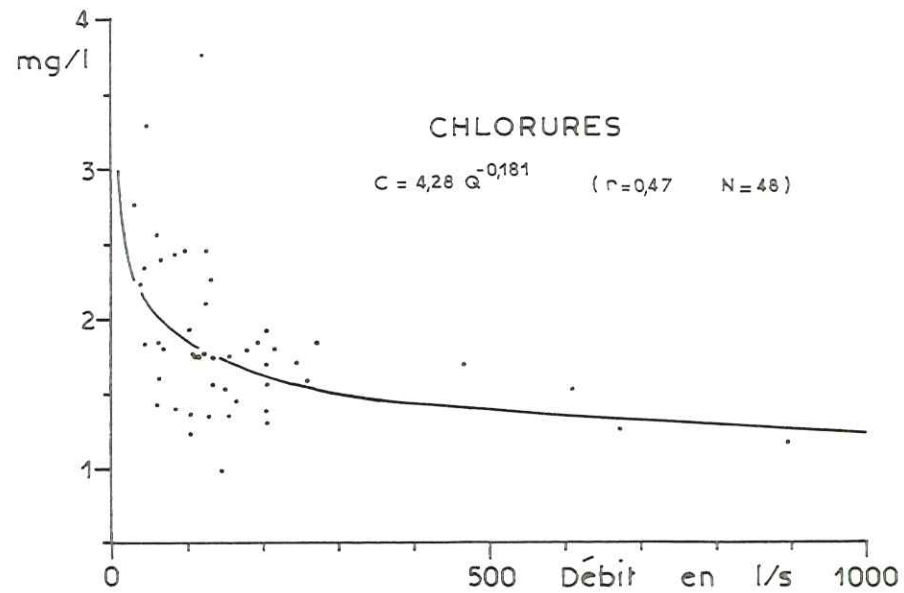
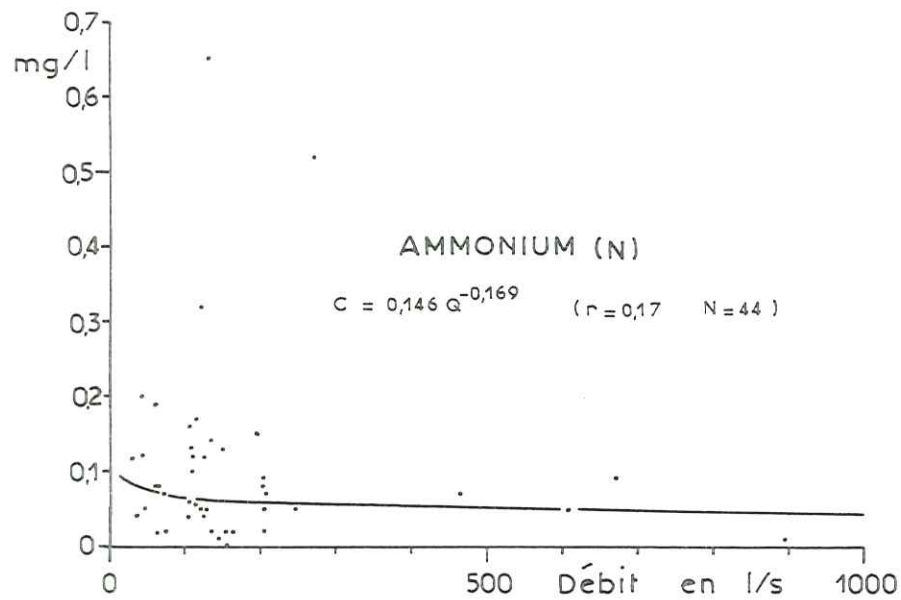
Les concentrations de ces éléments sont en relation plus ou moins étroite avec le débit comme le montrent les coefficients de corrélation ($r = 0,34$ à $0,90$).

Leurs concentrations diminuent avec le débit, très rapidement entre 30 et 150-200 l/s, puis plus lentement au-delà de 200 l/s. Les concentrations à l'étiage correspondant à celles des eaux souterraines puisqu'elles sont alors les seules à alimenter le ruisseau; à partir des modèles concentration-débit nous avons calculé la composition chimique des eaux souterraines pour l'étiage absolu constaté (19 l/s).

Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
63,6	2,65	2,27	2,5	188

Tableau n° 39a Composition moyenne théorique des eaux souterraines du bassin versant du ruisseau des Moulins (résultats exprimés en mg/l).

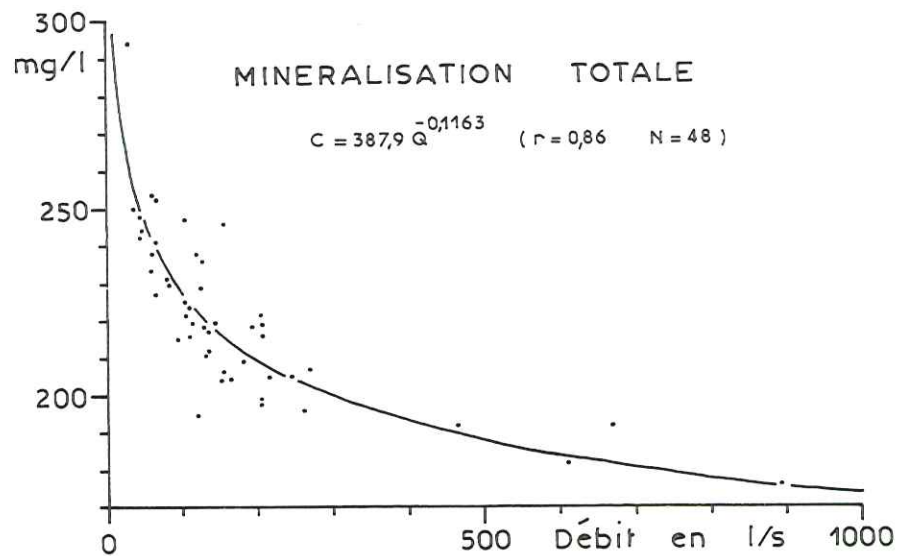
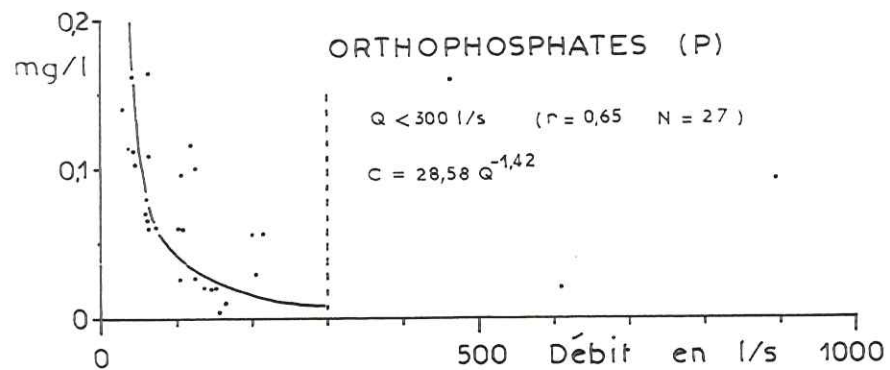
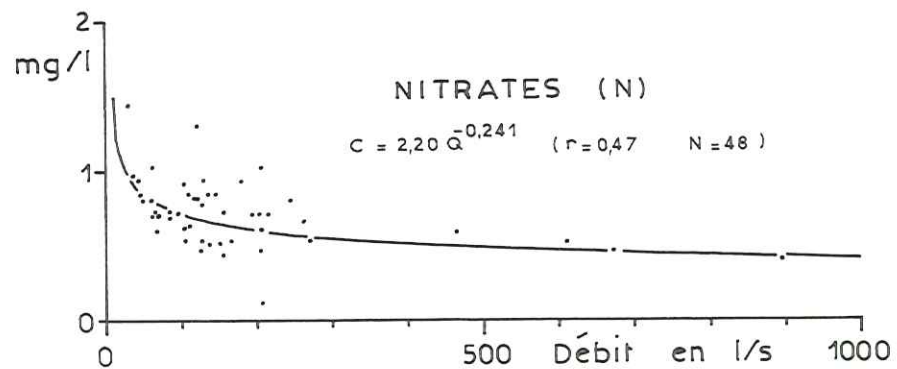
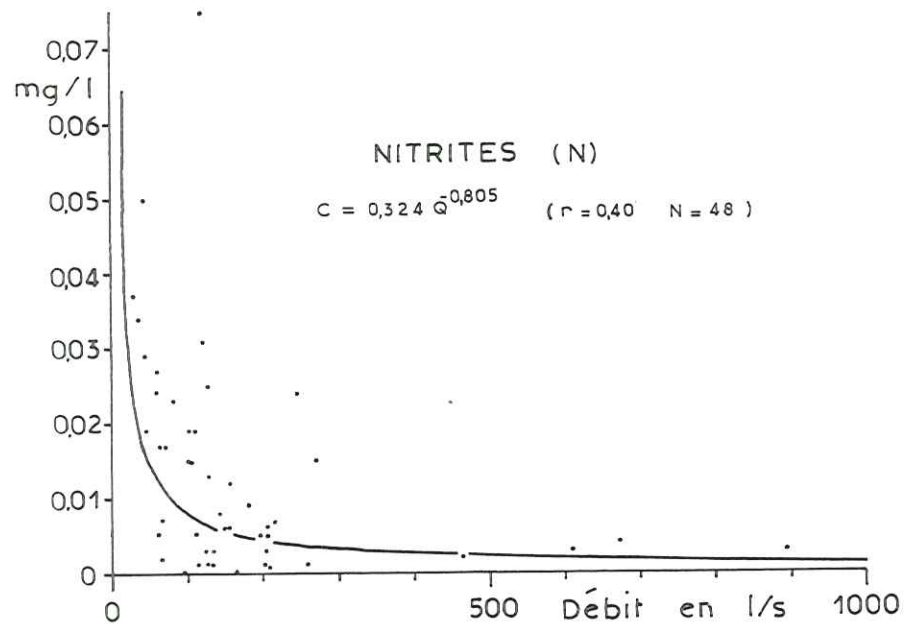
Les concentrations en calcium, sodium et bicarbonates dépendent étroitement du débit comme l'attestent les coefficients de corrélation supérieurs à 0,83; les concentrations en chlorures et potassium semblent par contre moins tributaires du débit, ceci est la conséquence des apports par pollution qui augmentent parfois artificiellement les teneurs indépendamment de tout épisode hydrologique particulier. La dispersion assez grande du magnésium en fonction du débit est due à notre avis aux erreurs assez importantes qui entachent son dosage par titrimétrie.



— COURBE DE REGRESSION

RUISSEAU DES MOULINS (AVAL)
 VARIATIONS DES CONCENTRATIONS EN FONCTION DU DEBIT

FIG. 63



— COURBE DE REGRESSION

RUISSEAU DES MOULINS (AVAL)
 VARIATIONS DES CONCENTRATIONS EN FONCTION DU DEBIT

FIG. 64

6.1.1.5.2. Les éléments mineurs: SO_4^{--} , SiO_2 , N, P

- Les sulfates et la silice.

Leurs teneurs ne varient pas avec le débit (voir fig. n°63).

- L'azote minéral (ammonium, nitrates et nitrites). Ces ions présentent tous une dispersion assez forte, conséquence des pollutions agricoles et humaines au niveau de Cholonge.

- Les orthophosphates. Ils présentent, pour les débits inférieurs à 300 l/s, des variations liées de façon assez étroite avec celui-ci ($r = 0,65$). En fait cette relation est essentiellement mathématique et elle ne traduit qu'en partie la réalité génétique du phénomène. Les orthophosphates présentent en effet un cycle saisonnier lié à l'activité biologique : les concentrations sont minimales au printemps où ces ions sont prélevés par les plantes pour leur croissance ; inversement en automne la chute des feuilles, suivie de leur décomposition libère le phosphore et les concentrations augmentent alors fortement; or ce cycle se superpose au cycle hydrologique où les débits sont maximaux au printemps et minimaux en automne. La relation concentration-débit est donc renforcée artificiellement avec des concentrations d'étiage plus fortes que la normale et des concentrations aux forts débits encore plus faibles que la normale.

Pour les très forts débits (supérieurs à 300 l/s) la concentration présente des valeurs apparemment aberrantes qui sont dues à un effet de lessivage arrivant à largement compenser l'effet de dilution.

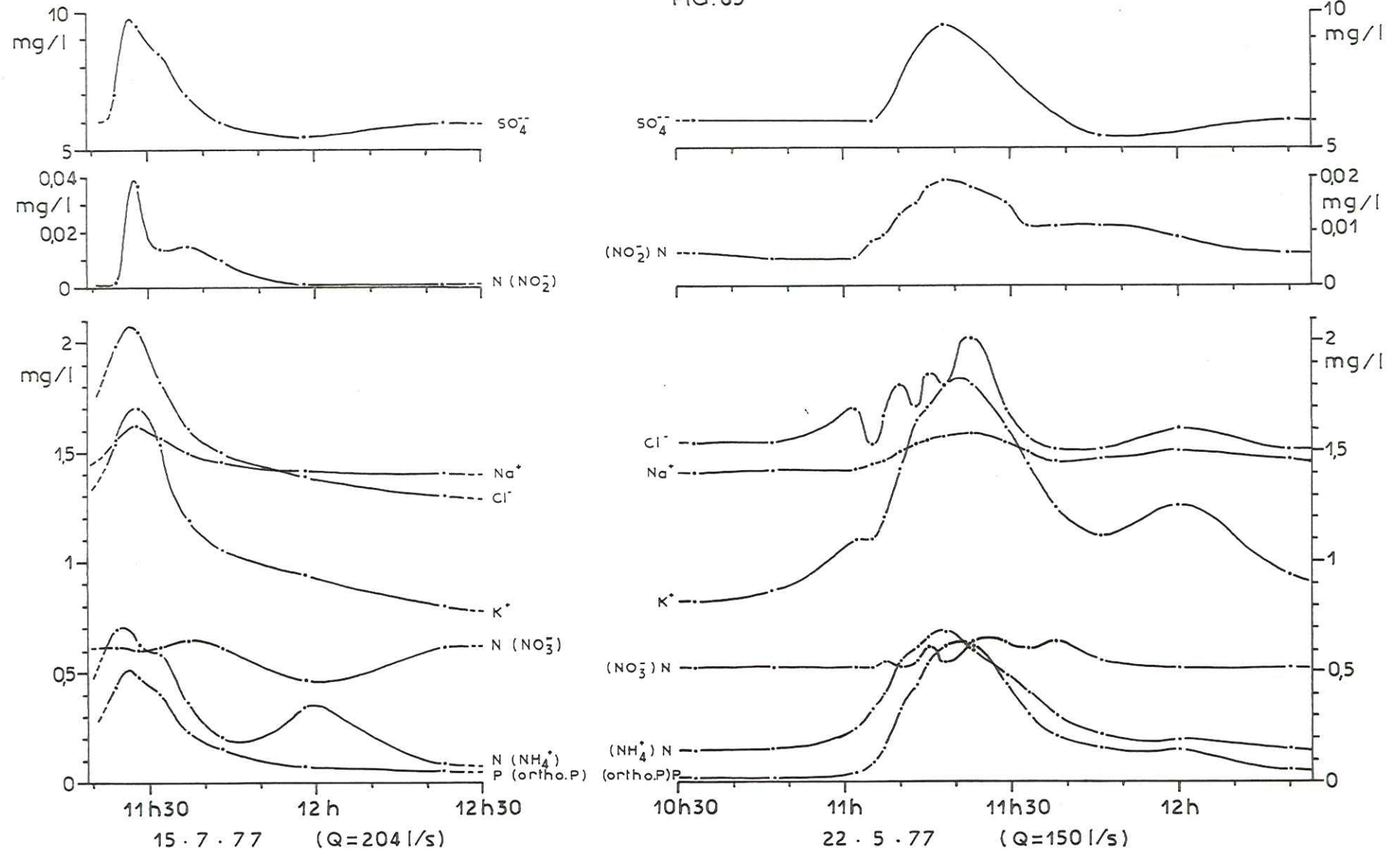
6.1.1.6. Bilan des éléments dissous transportés par le ruisseau des Moulins

La détermination des lois de variations de la concentration va permettre de procéder à un calcul de la charge annuelle du ruisseau des Moulins (ce bilan partiel ne tient pas compte des apports dus aux " bouffées de pollution").

Nous avons considéré que la modélisation des concentrations pouvait être utilisée pour les éléments dont la relation concentration-débit présentait une corrélation suffisamment significative; en

RUISSEAU DES MOULINS (AVAL)
 DEUX EXEMPLES DE POLLUTIONS

FIG. 65



pratique, seules les lois dont le coefficient de corrélation est supérieur à 0,4 seront utilisées. Grâce aux modèles définis précédemment nous avons calculé les concentrations de chaque élément, jour par jour, en posant Q égal au débit moyen quotidien. La masse transitant quotidiennement s'obtient alors par l'expression suivante :

$$M = 0,0864 \cdot Q_M \cdot a Q_M^b \quad \text{soit}$$

$$M = 0,0864 \cdot a Q_M^{(b+1)} \quad \text{avec}$$

M en kg/ jours et Q en l/s.

Pour les éléments dont la relation concentration-débit était mal définie (SiO_2 , Mg^{++} , NH_4^+ , SO_4^{--} , orthophosphates quand $Q > 300$ l/s), des bilans partiels ont été calculés; l'analyse hebdomadaire étant considérée comme représentative d'un intervalle de temps de 7 jours durant lequel un volume d'eau V transitait dans le ruisseau.

Les résultats de ces calculs sont présentés dans la tableau N° 40.

Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+	$\text{N}(\text{NH}_4^+)$	Cl^-	SO_4^{--}	HCO_3^-	$\text{N}(\text{NO}_3^-)$	$\text{N}(\text{NO}_2^-)$	orthoP (P)	SiO_2	Ntotal
225,5	9,1	6,8	5	0,35	7,7	39,2	672	2,9	0,026	0,234	26,5	3,28

Tableau n° 40 . Eléments dissous apportés par le ruisseau des Moulins au lac de Petichet d'octobre 1976 à septembre 77 (résultats exprimés en t).

6.1.1.7. " Les bouffées de pollution "

Nous avons constaté des variations du chimisme des eaux en dehors de tout épisode hydrologique particulier. Elles consistent en une augmentation très nette et brutale des concentrations des éléments chimiques dissous suivants : Na^+ , K^+ , NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , Cl^- , SO_4^{--} , orthoP. Après avoir atteint un maximum, les concentrations diminuent régulièrement pour rejoindre sensiblement les teneurs constatées avant la pollution, la durée totale du phénomène est d'environ une heure (parfois moins si le débit est élevé).

Ces augmentations brutales de la concentration sont dues au rejet directement dans le ruisseau des Moulins des eaux vannes d'exploitations agricoles; ces " crues chimiques " ont lieu quasiment quotidiennement et le matin en général. Il était nécessaire d'évaluer la charge supplémentaire que ces " bouffées de pollution " apportent au lac de Petichet, dans ce but nous avons effectué des prélèvements très rapprochés dans le temps durant deux épisodes (voir la figure n° 65 et l'annexe 3). La charge supplémentaire apportée par ces pollutions (par rapport aux concentrations normales) a été calculée par planimétrage (tableau n° 41).

	Na ⁺	K ⁺	N(NH ₄ ⁺)	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	N(NO ₃ ⁻)	N(NO ₂ ⁻)	P(ortho.P)
15.7.77	43	297	130	193	401	#0	4,7	94
22.5.77	72	375	130	100	610	30	4,2	204

Tableau n° 41 . Charge supplémentaire apportée par deux épisodes de pollution (résultats exprimés en g)

Ces apports étant dus à des pollutions agricoles, nous avons supposé que toutes ces " crues chimiques " quotidiennes apportaient en moyenne la même quantité d'éléments dissous. Les apports annuels supplémentaires seraient donc de l'ordre de :

Na ⁺	K ⁺	N(NH ₄ ⁺)	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	N(NO ₃ ⁻)	N(NO ₂ ⁻)	(orthoP.) P
21	122	47	53	182	5,5	1,6	55

Tableau n° 42 . Charge annuelle apportée par les pollutions quotidiennes résultats exprimés en kg.

Ces apports supplémentaires sont négligeables pour la plupart des éléments, mais ils représentent une part assez importante des apports en ammonium et en orthophosphates.

6.1.2. APPORTS DES VERSANTS DU LAC

Les apports chimiques dissous en provenance des versants du lac sont difficiles à estimer. En effet, le ruissellement sur les pourtours

du lac est presque inexistant, ce qui n'a pas permis de réaliser un bilan chimique de la même façon que pour le ruisseau des Moulins. Nous avons été amenés à procéder à une approximation en supposant que les concentrations des eaux parvenant au lac étaient sensiblement égales à la moyenne des concentrations des sources et petits ruisseaux situés sur ces versants. Les analyses utilisées correspondent aux points de prélèvements suivants: ruisseau des Gonthéaumes, ruisseau de la baie N.E., source du camping des Théniaux, source sous-lacustre, source de Fontaine Pelouze. La composition chimique des eaux des versants du lac serait donc approximativement la suivante :

Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	N(NH ₄ ⁺)	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻⁻	N(NO ₃ ⁻)	N(NO ₂ ⁻)	P(orthoP)	SiO ₂
47,7	3,2	2,27	1	0,046	2,69	13	137	0,96	0,005	0,008	8,18

Tableau n° 43. Composition chimique moyenne des apports des versants du lac de Petichet (exprimée en mg/l).

Cette méthode de calcul ne permet pas malheureusement de tenir compte des apports dus au village de Petichet et au camping des Théniaux qui parviennent au lac d'une manière diffuse.

Le volume d'eau apporté par les versants du lac a été estimé de la façon suivante :

$$V = Q_{\text{exut}} - (P_{\text{sur le lac}} - E_{\text{sur le lac}} + Q_{\text{ruisseau des Moulins}} + \Delta W)$$

$$V = 1\,620 \cdot 10^3 \text{ m}^3.$$

En multipliant les concentrations par ce volume on obtient alors, la masse des éléments dissous provenant des versants du lac.

Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	N(NH ₄ ⁺)	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	N(NO ₃ ⁻)	N(NO ₂ ⁻)	P(ortho P)	SiO ₂
77,3	5,2	3,7	1,6	0,074	4,4	21	222	1,6	0,008	0,013	13,3

Tableau n° 44. Masse d'éléments dissous apportés par les versants du lac de Petichet (résultats exprimés en t).

6.1.3. LES APPORTS ATMOSPHERIQUES DIRECTS SUR LE LAC6.1.3.1. Importance de ces apports

L'atmosphère transporte soit sous forme dissoute dans la pluie, soit sous forme particulaire, de très nombreux éléments dont la quantité est parfois tellement importante qu'il n'est pas possible de les négliger dans un bilan chimique.

Il est important de noter que la méthode de prélèvements joue un rôle prépondérant sur les résultats, en effet des prélèvements effectués au cours d'un épisode pluvieux ne présenteront que les éléments dissous. Par contre des prélèvements effectués dans un pluviomètre toutes les semaines ou tous les mois enregistreront l'ensemble des retombées atmosphériques: apports des pluies et des poussières. La participation des poussières dans les apports atmosphériques est loin d'être négligeable : M.HAUBERT (1975) a montré qu'elle atteignait jusqu'à 50 % des apports totaux pour certains éléments. Les teneurs varient également suivant la situation géographique de la station de prélèvement, suivant le degré d'urbanisation (M.HAUBERT 75) et d'industrialisation de la région (ERIKSSON 1966 in VOLLENWEIDER 68). Le tableau N° 45 présente les analyses des apports atmosphériques dans diverses régions du monde.

Lieu de mesure	Date	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	NNO ₃ ⁻	NNO ₂ ⁻	NNH ₄ ⁺	P(orthoP)	Auteur
Moyenne U.S.A.	-	1,5	-	0,40	0,20	0,30	2,15	-	-	-	-	Junge et Werby 68
Moyenne Europe	-	1,42	0,39	2,05	0,35	3,47	2,19	0,27	-	-	-	Caroll 62
Océan Pacifique	1961	1,9	-	28	1,8	51	11	-	-	-	-	Gambell 66
Mojave désert Californie	65-66	35	4,5	132	18	90	108	0,3	-	-	-	Feth 67
Amazonie	-	1,4	1,22	-	-	1,9	-	1,1	-	-	-	Ungemach 72
Neige Chamrousse	-	0,75	-	0,10	0,30	0,80	-	-	-	-	-	Pontikis 72
Neige Antarctique	-	0,002	0,008	0,042	0,002	0,14	-	-	-	-	-	Boutron 72
Jura Neuchatelois	1972	2,95	0,08	0,17	0,21	0,50	3,4	0,32	-	-	-	Miserez 73
Versailles	1974	7,5	0,35	0,87	0,01	0,56	8,9	0,54	0,019	0,765	0,007	Haubert 75
Terramont(1090m)	1973	2,5	0,20	0,45	0,60	0,60	4,4	0,18	0,003	2,7	0,007	Haubert 75
Le Revard(1365m)	9.75	5,9	0,025	0,035	0,10	0,35	-	-	-	-	-	Lemordant 77
Annemasse	76-77	1,77	0,17	0,20	0,24	0,60	0,5	0,56	-	-	-	Armand 78

Tableau n° 45 .Analyses des apports atmosphériques (en mg/l) dans différentes régions du monde (d'après M.HAUBERT 1975 et autres auteurs)

6.1.3.2. Les prélèvements et les analyses

Les prélèvements ont été effectués au pluviographe de La Fayolle , les eaux reçues par celui-ci étaient stockées dans un bidon à col très étroit pour limiter au maximum la reprise des précipitations par l'évaporation. Les échantillons étaient recueillis chaque semaine si la quantité de pluie tombée était suffisante pour effectuer l'analyse (>8 mm), dans le cas contraire la pluie était laissée dans le récipient jusqu'à la semaine suivante . 35 prélèvements ont ainsi été réalisés du 28 novembre 76 au 25 septembre 77 (voir figure N° 66 et analyses en annexe).

Le tableau N° 46 présente la composition chimique moyenne de ces 35 analyses de précipitations (moyenne arithmétique).

Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	N(NH ₄ ⁺)	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	N(NO ₃ ⁻)	N(NO ₂ ⁻)
1,28	0,097	0,155	0,298	0,343	0,71	3,17	0,35	0,011

Tableau n° 46 . Composition chimique moyenne des apports atmosphériques à La Fayolle de décembre 76 à octobre 77 (résultats exprimés en mg/l).

Remarque : Il est possible que les analyses des diverses formes de l'azote minéral aient été perturbées par l'activité microbologique dans le bidon de stockage, notamment durant les périodes chaudes de l'année.

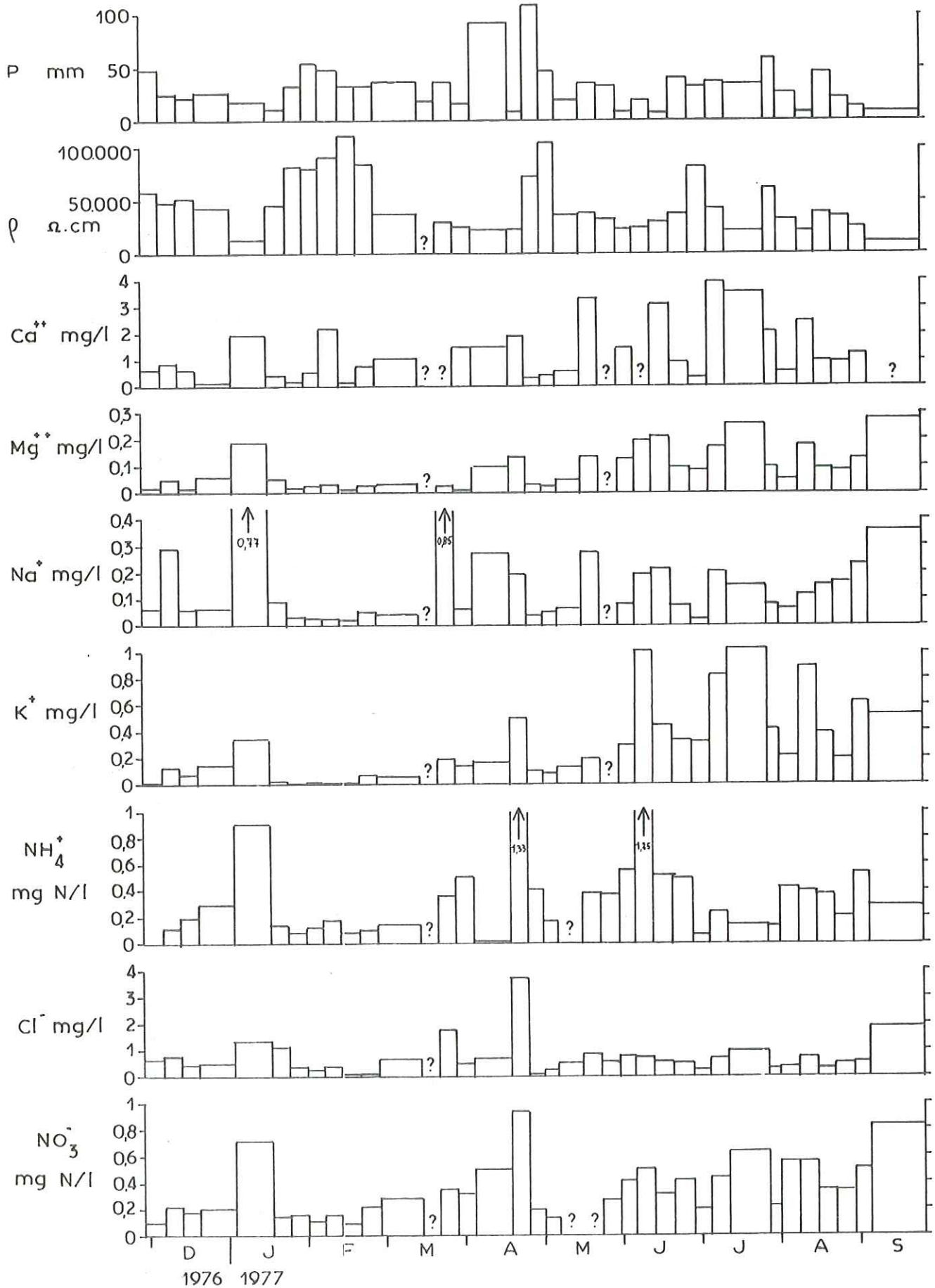
6.1.3.3. Origine des éléments contenus dans les précipitations atmosphériques

- Le calcium, le magnésium, le potassium. Ils proviennent essentiellement des poussières du sol, néanmoins les analyses de M.HAUBERT à Versailles mettent en évidence l'influence du degré d'urbanisation sur les teneurs en calcium.

- Le sodium et les chlorures. Ils ont, pour la majeure partie, une origine marine (MACKERETH 1957 in DUSSART) mais les fortes valeurs constatées lors de certains prélèvements sont dues au sel épandu sur les routes puis repris par le vent.

LA FAYOLLE

VARIATIONS PHYSICO-CHIMIQUES DES PRECIPITATIONS ATMOSPHERIQUES



- Les sulfates. Ils semblerait que l'origine de cet élément soit essentiellement l'activité humaine (principalement la combustion du fuel et du charbon).

- L'azote minéral. L'origine des diverses formes de l'azote minéral est mal connue. Certains auteurs (REITER et al 70 in HAUBERT) pensent que les nitrites seraient le produit de l'action des éclairs sur l'azote atmosphérique, une oxydation des nitrites en nitrates aurait lieu ensuite. L'azote minéral pourrait, d'autre part, provenir de l'activité humaine (fumées industrielles, épandages d'engrais azotés, VOLLENWEIDER 68).

La quantité de nitrites est assez faible en général; d'autre part le rapport $N(\text{NH}_4^+) / N(\text{NO}_3^-)$ varie considérablement dans le temps et dans l'espace, les concentrations en ammonium étant très variables alors que celles des nitrates sont plus stables.

- Le phosphore qui provient essentiellement des résidus de combustion et des engrais épandus sur le sol et remobilisés par le vent, n'a pas été dosé, les concentrations étant trop faibles vu la technique d'analyse. L'apport annuel en orthophosphates pourrait être de l'ordre de $60 \text{ kg/km}^2/\text{an}$ (valeur calculée par M. HAUBERT sur le bassin versant du Brévon de 1969 à 1973).

6.1.3.4. Bilan des apports atmosphériques sur le bassin versant des lacs de Laffrey

A partir des hauteurs de pluie correspondant à chaque prélèvement nous avons pu calculer les apports totaux durant la période octobre 76- septembre 77 (les périodes non analysées ont été affectées de la concentration moyenne).

	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	N(NH ₄ ⁺)	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	N(NO ₃ ⁻)	N(NO ₂ ⁻)	N total
Apports spécifiques t/km ² /an	1,86	0,13	0,22	0,39	0,44	0,9	3,82	0,46	0,015	0,915
B.V. Total en t	32,1	2,26	3,8	6,8	7,6	15,6	66,3	8	0,26	15,9
Lac de Petichet en t	1,6	0,11	0,19	0,34	0,38	0,77	3,3	0,40	0,01	0,79

Tableau n° 47 . Apports atmosphériques sur le bassin versant des lacs de Petichet et Laffrey d'octobre 76 à septembre 77.

D'autre part, en considérant que 45 % des apports atmosphériques sont sous forme de bicarbonates (M.HAUBERT 75), on peut estimer leurs apports à environ $8,5 \text{ t/km}^2/\text{an}$ sur le bassin versant étudié.

Le bassin versant des lacs de Petichet et Laffrey reçoit donc ainsi environ 290 t d'éléments solubles par an, soit une charge spécifique de l'ordre de $16,8 \text{ t/km}^2/\text{an}$. Cette charge est environ trois fois plus faible que celle calculée par M.HAUBERT sur le bassin du Brévon.

6.1.4. CHARGE DISSOUE SORTANT DU LAC DE PETICHET

Pour déterminer la charge dissoute transitant par l'exutoire, des analyses chimiques de ce dernier ont été effectuées. Les concentrations présentent des variations lentes qui sont le reflet des fluctuations du chimisme des eaux lacustres, aussi un nombre restreint de prélèvements (six) a été suffisant. Nous avons attribué à chaque analyse un intervalle de temps durant lequel les concentrations ont été considérées comme constantes. Les résultats de ces calculs sont présentés au tableau n° 48.

Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	N(NH ₄ ⁺)	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	N(NO ₃ ⁻)	N(NO ₂ ⁻)	P(orthoP)	SiO ₂	Ntotal
263	20,6	20,4	8,8	0,8	29	95,7	822	1,66	0,042	0,058	9,4	2,5

Tableau n° 48 Charge dissoute sortant du lac de Petichet (oct.76-sept 77)
(résultats exprimés en t).

6.1.5. BILAN CHIMIQUE DU LAC DE PETICHET

Les divers calculs des paragraphes précédents nous ont permis d'établir le bilan chimique du lac de Petichet, les différents termes de ce bilan sont résumés dans le tableau n° 49.

		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	N(NH ₄ ⁺)	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻⁻	HCO ₃ ⁻	N(NO ₃ ⁻)	N(NO ₂ ⁻)	P(orthoP)	SiO ₂	N total
Ruisseau des Moulins	t	222,5	9,1	6,8	5	0,35	7,7	39,2	672	2,9	0,026	0,234	26,5	3,28
	%	73,9	63,2	63,6	70,4	41,1	59,7	61,5	74,7	59,2	56,5	64,6	66,6	56,5
Bouffées de pollution	t	-	-	0,021	0,122	0,047	0,053	0,182	-	0,005	0,002	0,055	-	0,054
	%	-	-	0,2	1,7	5,5	0,4	0,3	-	0,1	4,3	15,2	-	0,93
Versants du lac	t	77,3	5,2	3,7	1,6	0,074	4,4	21	222	1,6	0,008	0,013	13,3	1,68
	%	25,7	36,1	34,6	22,5	8,7	34,1	33	24,7	32,7	17,4	3,6	33,4	28,9
Apports atmosphériques	t	1,6	0,11	0,19	0,34	0,38	0,77	3,3	5,8	0,40	0,01	0,06	-	0,79
	%	0,5	0,76	1,8	4,8	44,7	6	5,2	0,6	8,2	21,7	16,6	-	13,6
Entrées totales	1	301	14,4	10,7	7,1	0,851	12,9	63,7	900	4,9	0,046	0,362	39,8	5,8
Sorties	2	263	20,6	20,4	8,8	0,8	29	95,7	822	1,66	0,042	0,058	9,4	2,5
Bilan global(1-2)		+38	-6,2	-9,7	-1,7		-16,1	-3,2	+78			+0,20	+30,4	+3,3

Tableau n° 49 . Bilan chimique du lac de Petichet et pourcentage de participation aux apports.

Quelques remarques concernant la participation de chaque source d'apport dans la charge globale s'imposent.

- Le Ruisseau des Moulins contribue pour 50 à 75 % aux apports.

- Les " bouffées de pollution " sont responsables de 5 % des apports en ammonium et 15 % des apports en orthophosphates, leur participation pour les autres éléments est négligeable à nulle.

- Les versants du lac participent à environ 25-30 % des apports totaux sauf pour l'ammonium et les orthophosphates pour lesquels leur participation est plus faible.

- Les apports atmosphériques participent à la charge globale dans des proportions variables :

5 à 8 % pour K⁺, Cl⁻, SO₄⁻⁻⁻ et NO₃⁻,

15 à 20 % pour les orthophosphates et les nitrites,

45 % pour l'ammonium

14 % des apports totaux en azote minéral.

Le bilan fait ^{par} ailleurs apparaît qu'en un an le lac a stocké :

38 t de calcium,
 78 t de bicarbonates,
 30 t de silice,
 300 ~~240~~ kg d'orthophosphates (en P),
 3300 kg d'azote minéral.

Remarque : Il est nécessaire de noter que les valeurs présentées dans ce bilan sont plus des ordres de grandeur que des valeurs rigoureusement exactes, compte tenu des approximations parfois importantes qui ont été nécessaires à son établissement.

Les bicarbonates et le calcium sont stockés dans le lac sous forme de carbonate de calcium insoluble qui a précipité au fond (ce phénomène est dû au déplacement de l'équilibre carbonates-bicarbonates dans les eaux lacustres pour l'activité photosynthétique).

La silice utilisée par les diatomées pour la construction de leur squelette tombe au fond du lac où elle sédimente après leur mort.

L'azote et le phosphore sont utilisés pour la construction de la matière vivante. A la mort des organismes ils retournent au milieu lacustre par décomposition de la matière organique, une partie est stockée dans les sédiments mais est susceptible d'être remobilisée dans certaines conditions, une autre partie quitte le lac sous forme d'orthophosphates et d'azote minéral, une dernière partie enfin quitte également le lac sous forme de phosphore et d'azote organique (qui n'ont pas été dosés ici). Le stockage de l'azote et du phosphore par le lac de Petichet est très favorable au lac de Laffrey qui reçoit ainsi une charge en éléments nutritifs plus faible;

le lac de Petichet joue donc le rôle de " station d'épuration naturelle " .

Certains éléments sont déficitaires dans le lac durant la période étudiée (sorties supérieures aux apports).

Le potassium présente par exemple des sorties supérieures aux entrées de 1,7 t, en fait en tenant compte des variations de concentrations dans le lac on constate un équilibre entre sorties et entrées.

Il n'en est pas de même pour les autres éléments : les sorties en sodium et chlorures sont très supérieures aux entrées, ce qui est , à notre avis, dû au sel déversé sur les routes qui atteint le lac sans être pris en compte par nos analyses. Les sorties de magnésium et de sulfates sont également supérieures aux entrées, il est possible que cette anomalie soit la conséquence d'apports inapparents mais aussi de la précision assez médiocre du dosage de ces deux éléments.

6.2. BILAN CHIMIQUE DU LAC DE LAFFREY

Dans un premier temps nous calculerons les charges dues à chaque source d'apports, une évaluation des sorties sous forme dissoute sera abordée ensuite, enfin un bilan chimique global du lac de Laffrey sera établi.

6.2.1. APPORTS DES COURS D'EAU

Les cours d'eau se jetant dans le lac de Laffrey sont peu nombreux; il s'agit principalement de l'exutoire du lac de Petichet qui reçoit les pertes du ruisseau des Moulins avant d'atteindre le lac. La charge apportée par l'exutoire d'octobre 76 à septembre 77 a été évaluée à :

Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	N(NH ₄ ⁺)	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	N(NO ₃ ⁻)	N(NO ₂ ⁻)	P(orthoP)	SiO ₂	Ntotal
296	22	21,4	9,57	0,86	30,2	101,6	923	2,09	0,046	0,101	13,4	3

Tableau n° 50 . Apports de l'exutoire du lac de Petichet au lac de Laffrey (résultats exprimés en t).

Les autres ruisseaux parvenant au lac de Laffrey n'ont pas été analysés, leurs débits étant trop faibles pour permettre d'établir un bilan chimique.

6.2.2. APPORTS DES VERSANTS DU LAC

La méthode de calcul de ces apports est la même que celle utilisée pour le lac de Petichet. Les sources que nous avons considérées comme représentatives des écoulements provenant des versants au lac sont : la source des Josserands (aval), la source de Pré Court, la source des Nizets et les deux sources du bois du Chanet.

La composition chimique moyenne des eaux des versants, et la charge qui leur est due seraient donc les suivantes :

	Ca ⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	N(NO ₃ ⁻)	SiO ₂
Concentration moyenne des apports (mg/l)	57,4	3,39	1,49	0,37	1,82	12,6	167	0,43	7,25
Apports (t)	299	17,7	7,8	1,9	9,5	65,7	871	2,24	37,8

Tableau n° 51 . Apports des versants du lac de Laffrey et composition chimique moyenne de ceux-ci.

D'autre part les apports en orthophosphates et en ammonium ont été estimés respectivement à 0,042 t et 0,24 t.

6.2.3. APPORTS ATMOSPHERIQUES DIRECTS

En tenant compte des charges spécifiques dues aux apports atmosphériques, et de la superficie du lac on peut calculer la masse d'éléments apportés par l'atmosphère.

Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	N(NH ₄ ⁺)	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃	N(NO ₃ ⁻)	N(NO ₂ ⁻)	P(ortho P)
2,3	0,16	0,28	0,49	0,56	1,14	4,8	8,5	0,58	0,019	0,076

Tableau n° 52 . Apports atmosphériques sur le lac de Laffrey (résultats exprimés en t).

6.2.4. CHARGE DISSOUE SORTANT DU LAC DE LAFFREY

La charge de l'exutoire du lac de Laffrey a été calculée de la même manière que pour l'exutoire du lac de Petichet et cela pour les mêmes raisons. Huit séries d'analyses ont été effectuées, réparties sur toute la période d'étude. La charge dissoute sortant du lac de Laffrey est présentée dans le tableau n° 53 .

Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	N(NH ₄ ⁺)	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	N(NO ₃ ⁻)	N(NO ₂ ⁻)	P(orthoP)	SiO ₂	NTotal
520	42,9	45	16,3	0,357	68,5	192,6	1605	1,87	0,036	0,077	17,3	2,3

Tableau n° 53 . Charge dissoute sortant du lac de Laffrey (résultats exprimés en t).

6.2.5. BILAN CHIMIQUE DU LAC DE LAFFREY

Au travers des divers paragraphes précédents nous avons précisé les différents termes du bilan chimique du lac de Laffrey, le bilan global sera abordé dans ce chapitre. Le tableau N° 54 résume ce bilan chimique global.

La participation des différentes sources d'apports à la charge totale est variable suivant l'élément considéré.

- L'exutoire du lac de Petichet participe aux apports dans des proportions variant de 40 à 80 % pour tous les éléments, sauf la silice pour laquelle ses apports ne représentent que 25 % du total.

- La contribution des versants du lac est variable, elle représente de 15 à 70 % des apports suivant l'élément considéré.

- Les apports atmosphériques sont négligeables pour de nombreux éléments, néanmoins ils représentent 35 % des apports en ammonium et ortho-phosphates, 30 % des apports en nitrites, 12 % des apports en nitrates et 4 % des apports en potassium.

		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	N(NH ₄ ⁺)	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	N(NO ₃ ⁻)	N(NO ₂ ⁻)	P(orthoP)SiO ₂	N total	
Exutoire de Petichet	t	296	22	21,4	9,6	0,86	30,2	101,6	923	2,09	0,046	0,101	13,4	2,99
	%	49,6	55,1	72,5	80	52	74	59	51,2	42,6	70,8	46,2	26,2	45
Apports des versants	t	299	17,7	7,8	1,9	0,24	9,5	65,7	871	2,24	-	0,042	37,8	2,5
	%	50,1	44,4	26,4	15,8	14	23,3	38,2	48,3	45,6	-	19,2	73,8	37,6
Apports atmosphériques	t	2,3	0,16	0,28	0,49	0,56	1,14	4,8	8,5	0,58	0,019	0,076	-	1,16
	%	0,4	0,4	1	4,1	34	2,8	2,8	0,5	11,8	29,2	34,7	-	17,4
Total entrées	1	597	39,9	29,5	12	1,66	40,8	172,1	1802	4,91	0,065	0,219	51,2	6,65
Total sorties	2	520	42,9	45	16,3	0,357	68,5	192,6	1605	1,87	0,036	0,077	17,3	2,3
Bilan (1-2)		+ 77	-3	-15,5	-4,3		-27,7	-20,5	+197			+0,143	+33,9	+4,35

Tableau n° 54 . Bilan chimique du lac de Laffrey et pourcentage de participation aux apports.

A partir du bilan chimique du lac on peut estimer que le lac a stocké : 197 t de bicarbonates,

77 t de calcium,

34 t de silice,

4,3 t d'azote minéral,

143 kg d'orthophosphates.

D'autre part on peut estimer que, aux erreurs de mesures près, le bilan est équilibré pour le magnésium, le potassium et les sulfates. L'excédent de sodium et de chlorures est à notre avis, comme pour le lac de Petichet, dû aux épandages de sel sur les routes en hiver, qui ne sont pas pris en compte dans les calculs d'apports.

6.3. EVALUATION DE L'ÉROSION CHIMIQUE

Nous avons essayé de chiffrer l'érosion chimique sur le bassin versant à deux niveaux : avant et après les lacs de Laffrey et Petichet. Nous avons pris en compte les apports calculés dans les bilans, augmentés des pertes du bassin versant auxquelles nous avons affecté une concentration de 220 mg/l. Les apports atmosphériques ont été soustraits à ces valeurs. L'érosion chimique ainsi calculée est de 233 t/km²/an pour le bassin versant du ruisseau des Moulins, elle n'est plus que de 179 t/km²/an pour le bassin versant total (fermé à l'exutoire du lac de Laffrey).

Nous présentons, à titre indicatif, les érosions chimiques spécifiques (ou les transports chimiques spécifiques) calculés par différents auteurs dans les Alpes.

B.V. ou cours d'eau étudié	Erosion spécifique t/km ² /an	Auteur de l'étude
Dranse Chablais	470	M MEYBECK 1971
Bassin d'alimentation du lac d'Annecy	345	E.BENEDETTI-CROUZET 1972
Rhône alpestre	210	
Rhin alpestre	235	
B.V. karstique de l'Areuse (Jura suisse)	274 à 324	J.J. MISEREZ 1973
B.V. karstique de la Noiraigne (Jura suisse)	230 à 252	J.J. MISEREZ 1973
Le Brevon à Bioge	190	M.HAUBERT 1975
Exutoire du lac d'Annecy	237	E.BENEDETTI- CROUZET 1972
Exutoire du Léman	190	M.MEYBECK 1971
Exutoire du lac de Bodense	190	M.MEYBECK 1971

Tableau n° 55 . L'érosion chimique dans les Alpes

Les valeurs trouvées par ces différents auteurs sont assez homogènes; les fortes valeurs proviennent généralement de rivières à débits spécifiques élevés.

L'érosion chimique que nous avons calculé pour le bassin versant du ruisseau des Moulins est assez proche des résultats de la littérature régionale.

L'érosion chimique calculée pour le bassin versant total qui est plus faible du fait des phénomènes de stockage dans les lacs, est tout à fait comparable aux valeurs déterminées par les différents auteurs sur des exutoires de lacs.

A partir de l'érosion chimique du bassin versant du ruisseau des Moulins, on peut calculer l'épaisseur de terrain enlevé chaque année : avec une densité de l'ordre de 2,3 à 2,6 on obtient une ablation superficielle de l'ordre de 0,1 à 0,09 mm/an. Cette valeur est très proche des valeurs déterminées par de nombreux auteurs dans les régions sédimentaires françaises et suisses :

B.V. de l'Areuse (Jura Suisse)	0,077 à 0,091 mm/an	J.J. MISEREZ 1973
B.V. de la Noiraigue " "	0,066 à 0,072 mm/an	J.J. MISEREZ 1973
Causses du Quercy	0,1 à 0,065 mm/an	BIROT et CAVAILLE
VERCORS	0,12 à 0,24 mm/an	CORBEL
VERCORS	0,106 mm/an	MUXART et al. 1969
VERCORS	0,070 mm/an	PULINA 1974
Karst du désert de Platé	0,092 mm/an	MAPRE 1976

6.4. LES APPORTS EN ÉLÉMENTS NUTRITIFS ET LEUR IMPACT SUR LES LACS, L'EFFICACITE DES SOLUTIONS D'ASSAINISSEMENT ENVISAGÉES

Il a été établi à l'heure actuelle que les deux principaux responsables des processus d'eutrophisation des lacs sont l'azote et le phosphore, bien que d'autres éléments puissent jouer un rôle non négligeable dans certains cas particuliers.

L'approche usuelle d'une étude sur l'eutrophisation a longtemps été basée essentiellement sur la connaissance des facteurs biologiques et biochimiques du milieu lacustre lui-même, depuis quelques décennies une autre voie d'étude s'est ouverte, qui se propose d'étudier quantitativement les apports en éléments nutritifs (N et P) en relation avec le niveau trophique des lacs. C'est à partir de travaux de ce type, sur une trentaine de lacs d'Europe et d'Amérique du nord que VOLLENWEIDER a pu établir une norme des charges en éléments nutritifs susceptibles d'être acceptées par des lacs

sans danger. Cette norme fait intervenir d'une part la charge spécifique annuelle exprimée en g/m^2 de surface lacustre, et d'autre part la profondeur moyenne du lac.

Le tableau n° 56 résume cette norme pour différentes valeurs de la profondeur moyenne du lac.

Profondeur moyenne du lac	Charge admissible jusqu'à		Charge dangereuse au delà de	
	N	P	N	P
5 m	1,0	0,07	2,0	0,13
10 m (Petichet)	1,5	0,10	3,0	0,20
20 m (Laffrey)	2,3	0,15	4,7	0,32
50 m	4,0	0,25	8,0	0,50
100 m	6,0	0,40	12,0	0,80
150 m	7,5	0,50	15,0	1,00

Tableau n° 56 . Charges admissibles et dangereuses en azote total et en phosphore total exprimées en $g/m^2/an$ (d'après VOLLENWEIDER 68).

On peut essayer de comparer ces valeurs aux charges spécifiques annuelles des lacs de Petichet et Laffrey.

Le lac de Petichet reçoit $6,7 g/m^2/an$ d'azote minéral et $0,42 g/m^2/an$ d'orthophosphates (enP). Ces valeurs brutes montrent déjà que le lac de Petichet est en danger très net d'eutrophisation (nous n'avons pourtant dosé que la fraction minérale de l'azote total et seulement les orthophosphates; les teneurs en azote total et phosphore total sont probablement égales au double de nos valeurs).

Le lac de Laffrey reçoit $5,2 g/m^2/an$ d'azote minéral et $0,17 g/m^2/an$ d'orthophosphates (enP). Ces valeurs, en tenant compte de la remarque précédente, sont légèrement plus optimistes en ce qui concerne l'état du lac; en effet si les charges en azote sont trop fortes, les charges en phosphore sont à la limite de la charge dangereuse.

Ces diagnostics, concernant les deux lacs, confirment donc entièrement les conclusions que nous avons pu tirer de l'étude du milieu lacustre. Les mesures d'assainissements devront donc tenter de diminuer les apports en éléments nutritifs aux lacs.

W.RODHE en 1948 a pu montrer que la meilleure façon de combattre l'eutrophisation est de diminuer les apports de l'élément (N ou P) qui est le facteur limitant en été. Le principe est très favorable au lac de Petichet où le facteur limitant est le phosphore, or 80 % du phosphore atteignant ce lac provient du ruisseau des Moulins et plus particulièrement de Cholonge; il sera donc facile grâce au réseau d'égouts dans ce village d'éliminer ces apports à la condition de recueillir les déversements directs des exploitations agricoles dans le ruisseau (résidus de laiterie et de porcherie ainsi que les eaux de nettoyage des bâtiments abritant les animaux). Ces mesures devraient ramener la charge en phosphore à un niveau admissible, la charge en azote sera également réduite mais les sources diffuses (versants du lac et apports atmosphériques) en apporteront encore une quantité assez importante, sans toutefois mettre le lac en danger, le phosphore jouant le rôle de facteur limitant.

Ces mesures concernant essentiellement le lac de Petichet auront une répercussion très favorable sur le lac de Laffrey, celui-ci étant à l'aval du premier, les apports en phosphore et en azote seront également diminués dans des proportions qui devraient le ramener au stade oligotrophe.

Remarque : Ces résultats de l'assainissement concernent le bassin versant dans l'état actuel de population, or cette population étant amenée à augmenter très sensiblement dans les prochaines années, il est impératif de prévoir un raccordement au collecteur du maximum d'habitations pour diminuer ou au moins stabiliser les apports plus ou moins diffus parvenant aux lacs.

6.5. CONCLUSION À L'ÉTUDE DU BILAN CHIMIQUE DES LACS DE PETICHET ET LAFFREY

Nous avons , au cours de cette étude, déterminé la charge en éléments dissous que reçoivent les lacs de Petichet et Laffrey. Ces apports proviennent de différentes sources (ruisseaux , versants des lacs, atmosphère). Nous avons chiffré la participation de chacun de ces modes d'apports à la charge totale, ce qui nous a permis de constater que les apports en éléments nutritifs (N et P) provenaient essentiellement du ruisseau des Moulins (et donc de Cholonge). Nous pensons que ces apports excessifs en éléments nutritifs qui mettent actuellement en danger le lac de Petichet et à un degré moindre le lac de Laffrey, peuvent être réduits à un taux admissible par les travaux d'assainissements entrepris.

D'autre part nous avons montré que les apports atmosphériques (pluie et poussières) déposent sur le bassin versant environ 17 t d'éléments chimiques divers.

Une estimation de l'ablation chimique sur le bassin versant donne une valeur proche de 0,1 mm par an ce qui est comparable aux résultats de la littérature.

7

LES SOURCES

7. LES SOURCES

Toute source, émergence localisée d'eau ayant circulé dans le sous-sol, présente des caractères physiques et chimiques qui lui sont propres, et qui sont liés principalement à la nature lithologique et pétrographique du terrain dans lequel l'eau a circulé.

Nous nous proposons ici, d'étudier les caractères physiques (débit, température, résistivité, pH) et chimiques des eaux de sources, en liaison avec les conditions géologiques de circulation et d'émergence, puis d'établir une classification des eaux de sources, en recherchant les paramètres physico-chimiques les plus significatifs pour cette classification.

Cette classification des sources selon la nature de la formation dans laquelle l'eau a circulé, peut présenter un intérêt pratique certain, lors d'un projet de captage, les débits ainsi que la qualité chimique et sanitaire étant liés au mode de circulation et à la nature des terrains traversés.

7.1. MÉTHODE D'ÉTUDE

7.1.1. LES POINTS DE PRÉLEVEMENTS

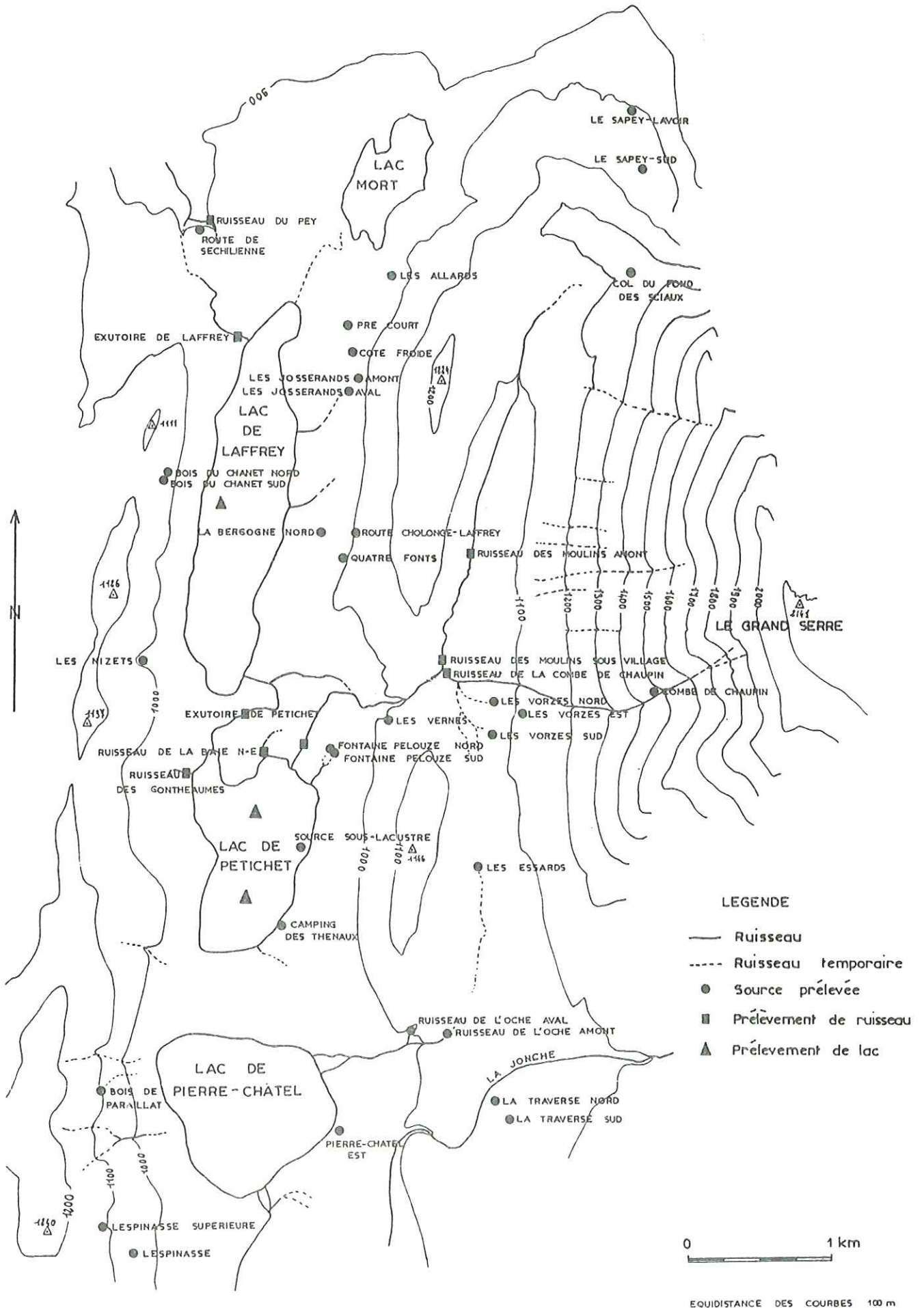
Nous avons prélevé des échantillons d'eau de source de la région des lacs de Laffrey; les sources sont assez nombreuses dans ce secteur et nous n'avons pu, pour des raisons matérielles évidentes, toutes les prélever.

Un choix a donc été effectué, et nous avons prélevé :

- les sources les plus importantes par leurs débits (les sources captées n'ont cependant pas toutes été prélevées, d'une part parce que leur nature est en général bien connue, et d'autre part à cause des difficultés d'accès aux captages).

- les sources présentant un intérêt scientifique soit à cause de leur appartenance supposée à une des grandes familles de sources, soit à cause de leur minéralisation particulière.

Fig. 67 CARTE DE SITUATION DES POINTS DE PRELEVEMENT



- la source sous-lacustre du lac de Petichet à cause de l'originalité de son émergence.

Les 35 sources, ayant fait l'objet de prélèvements, sont situées sur la carte de la figure n° 67 où sont également reportés les points de prélèvements sur les ruisseaux et sur les lacs.

Certaines sources ont été suivies assez régulièrement tout au cours de l'étude, alors que d'autres n'ont été prélevées qu'une fois.

7.1.2. LES MESURES EFFECTUEES SUR LE TERRAIN

7.1.2.1. Les débits

Ils ont été mesurés à l'aide d'une capacité jaugée chaque fois que cela était possible (émergence captée ou facilement aménageable pour collecter l'eau). Il était parfois impossible d'effectuer un jaugeage, l'émergence étant plus ou moins diffuse sur une vaste zone encombrée de blocs, ce qui nous a conduit à estimer les débits de ces sources.

7.1.2.2. La température

Elle a été mesurée lors de chaque prélèvement avec un thermomètre à mercure permettant une précision de $\pm 0,05$ °C. La température de la source sous-lacustre de Petichet était mesurée avec la sonde à thermistance qui servait également aux mesures de la température des eaux lacustres (voir chapitre 5.6.).

7.1.3. LES MESURES EFFECTUEES AU LABORATOIRE

7.1.3.1. La résistivité

C'est la résistance électrique d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes de 1 cm^2 de surface et distantes l'une de l'autre de 1 cm, elle s'exprime en $\Omega \cdot \text{cm}$. Nous avons préféré la mesurer au laboratoire, en effet les appareils de terrains sont très peu précis (± 5 % d'après C.ARMAND 1978), et il est apparu qu'une mesure au laboratoire dans les 24 heures qui suivent le prélèvement n'était pas significativement différente (M. BAKALOWICZ 1974). L'appareil dont est équipé le laboratoire permet d'atteindre une précision de ± 2 %.

La résistivité varie avec la température; la température de référence étant 18°C, pour une température de mesure différente nous avons utilisé le facteur de correction de J.RODIER (1960). Nous avons cependant cherché à effectuer la mesure à une température la plus proche de 18°C, car M. BAKALOWICZ a montré en 1975 que ce facteur de correction de température n'est qu'une approximation puisqu'il est en réalité, lui-même fonction de la composition chimique de l'eau.

7.1.3.2. Le pH

C'est le cologarithme de la concentration en ion H^+ ; nous l'avons mesuré au laboratoire dans les 24 heures qui suivaient le prélèvement. Il est mesuré à 0,05 unité pH près, par la méthode électrométrique.

7.1.4. LES ANALYSES CHIMIQUES

Nous avons effectué environ 140 analyses chimiques d'eaux de sources au laboratoire d'hydrogéologie de l'Institut Dolomieu. Toutes les analyses étaient effectuées dans les trois jours suivant le prélèvement, sauf pour le sodium et le potassium qui étaient dosés dans les deux mois. Les méthodes d'analyses sont indiquées à l'annexe 2, les résultats analytiques exprimés en mg/l sont regroupés à l'annexe 3.

Les principaux ions dosés sont :

<u>Cations</u>	<u>Anions</u>
calcium Ca ⁺⁺	bicarbonates HCO_3^-
magnésium Mg ⁺⁺	chlorures Cl^-
sodium Na ⁺	sulfates SO_4^{--}
potassium K ⁺	nitrates NO_3^-

Le fer total (ferreux + ferrique) a été dosé pour certaines eaux très particulières. La silice a également été dosée pour la plupart des sources mais l'absence de corrélation entre les teneurs et la nature pétrographique des terrains traversés nous a conduit à abandonner ce dosage.

7.1.5. PRESENTATION DES RESULTATS

- Les résultats sont présentés sous forme de tableaux, exprimés soit en mg/l, soit en milliéquivalents/l (noté r Ca, r Mg etc.). La concentration en milliéquivalent d'un ion donné se calcule en divisant sa concentration en mg/l par le rapport de sa masse atomique à son électrovalence.

- Cette présentation en tableaux est peu parlante aussi nous avons calculé, pour essayer de caractériser le chimisme des sources, les rapports ioniques suivants :

$$r \text{ Ca} / r \text{ Mg}, r \text{ Na} / r \text{ Cl}, r \text{ SO}_4 / r \text{ Cl}, r \text{ HCO}_3 / r \text{ SO}_4$$

- Ces divers types de présentation sont intéressants, mais lourds à l'emploi dès qu'il s'agit de comparer les compositions chimiques de 35 sources, c'est pourquoi nous avons utilisé la représentation graphique de SCHOELLER et BERKALOFF. Leur diagramme est composé de 7 échelles logarithmiques verticales sur lesquelles sont reportées les concentrations des principaux ions (Ca^{++} , Mg^{++} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- , NO_3^-). Ces échelles sont décalées les unes par rapport aux autres de manière à ce qu'une horizontale représente des concentrations égales en milliéquivalents. Nous avons rajouté une huitième échelle, arbitrairement graduée en résistivité, qui est à nos yeux une caractéristique importante de chaque type de source. Les points reportés sont reliés par une ligne brisée qui donne une " image " de la minéralisation et facilite les comparaisons.

- Nous avons d'autre part, mis au point un nouveau type de diagramme que nous présenterons plus loin et qui discrimine très bien les grandes familles de sources de la région.

7.2. CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES SOURCES ÉTUDIÉES

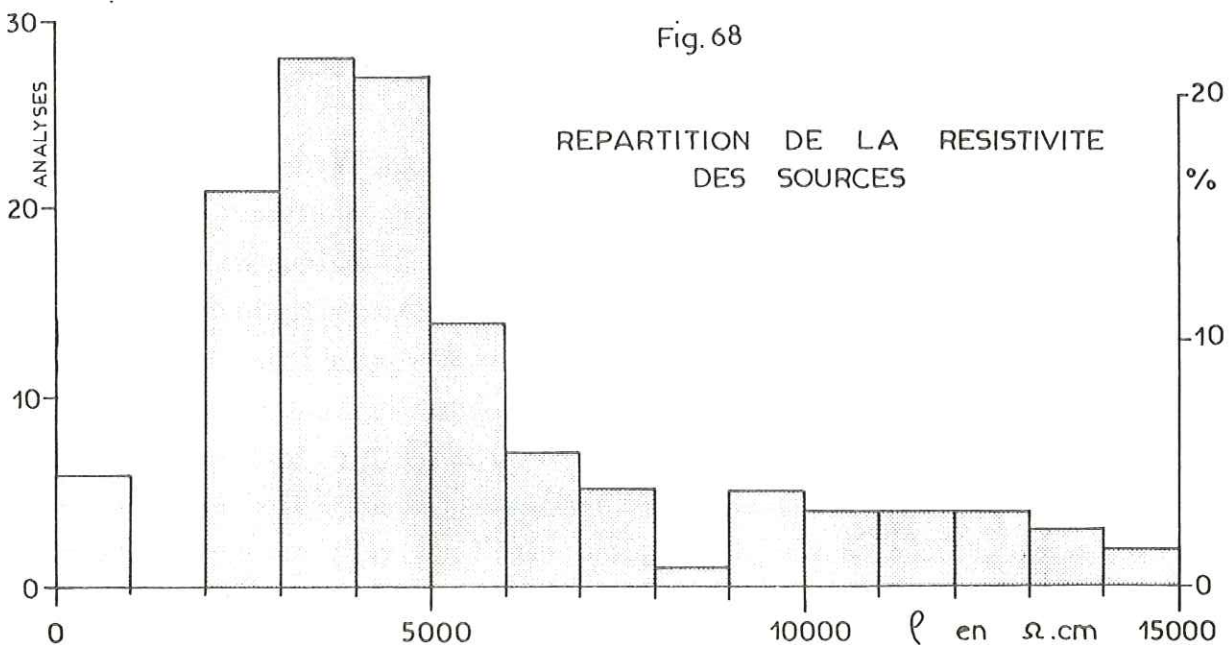
7.2.1. RESISTIVITE DES EAUX DE SOURCES

7.2.1.1. Gamme de résistivité des eaux de sources

La figure n° 68 présente sous forme d'un histogramme les résistivités de tous les prélèvements que nous avons effectué; cette figure n'a pas une valeur statistique réelle, certaines sources ayant fait l'objet

de plus d'analyses que d'autres. Néanmoins elle permet de distinguer trois groupes principaux :

- un premier groupe de résistivité inférieure à 1 000 Ω .cm,
- un second groupe, très important, dont la résistivité est comprise entre 2 000 et 8 000 Ω .cm,
- un troisième groupe dont la résistivité est comprise entre 9 000 et 15 000 Ω .cm.



Nous verrons plus loin que certains de ces groupes correspondent à plusieurs familles de sources. La résistivité ne peut donc, à elle seule, servir à une classification des sources.

7.2.1.2. Relation minéralisation totale-résistivité

La résistivité d'une solution est directement liée à la concentration des ions contenus par celle-ci; c'est ainsi qu'une eau fortement minéralisée possède une résistivité très faible et inversement. Nous avons recherché la relation qui existe entre la minéralisation totale et la résistivité, la formule classique de DOROSCHEWSKI (in RODIER 1966) ne nous donnant pas Pleinement satisfaction.

Formule de DOROSCHEWSKI :

$$\text{min. totale en mg/l} = \frac{720\ 000}{\rho_{18^\circ\text{C}} \text{ en } \Omega.\text{cm.}}$$

La minéralisation totale est calculée en faisant la somme des ions majeurs en mg/l (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{--}); la silice n'est pas prise en compte dans le calcul de la minéralisation totale car elle se présente généralement dans les eaux sous une forme non ionisée.

La figure N° 69 présente la relation minéralisation totale-résistivité pour les 139 analyses d'eau de source. De nombreux auteurs ayant montré que la conductivité (inverse de la résistivité) est une fonction linéaire de la minéralisation, nous avons procédé à un calcul de régression linéaire entre la minéralisation totale et $1/\rho$, qui nous donne l'équation suivante :

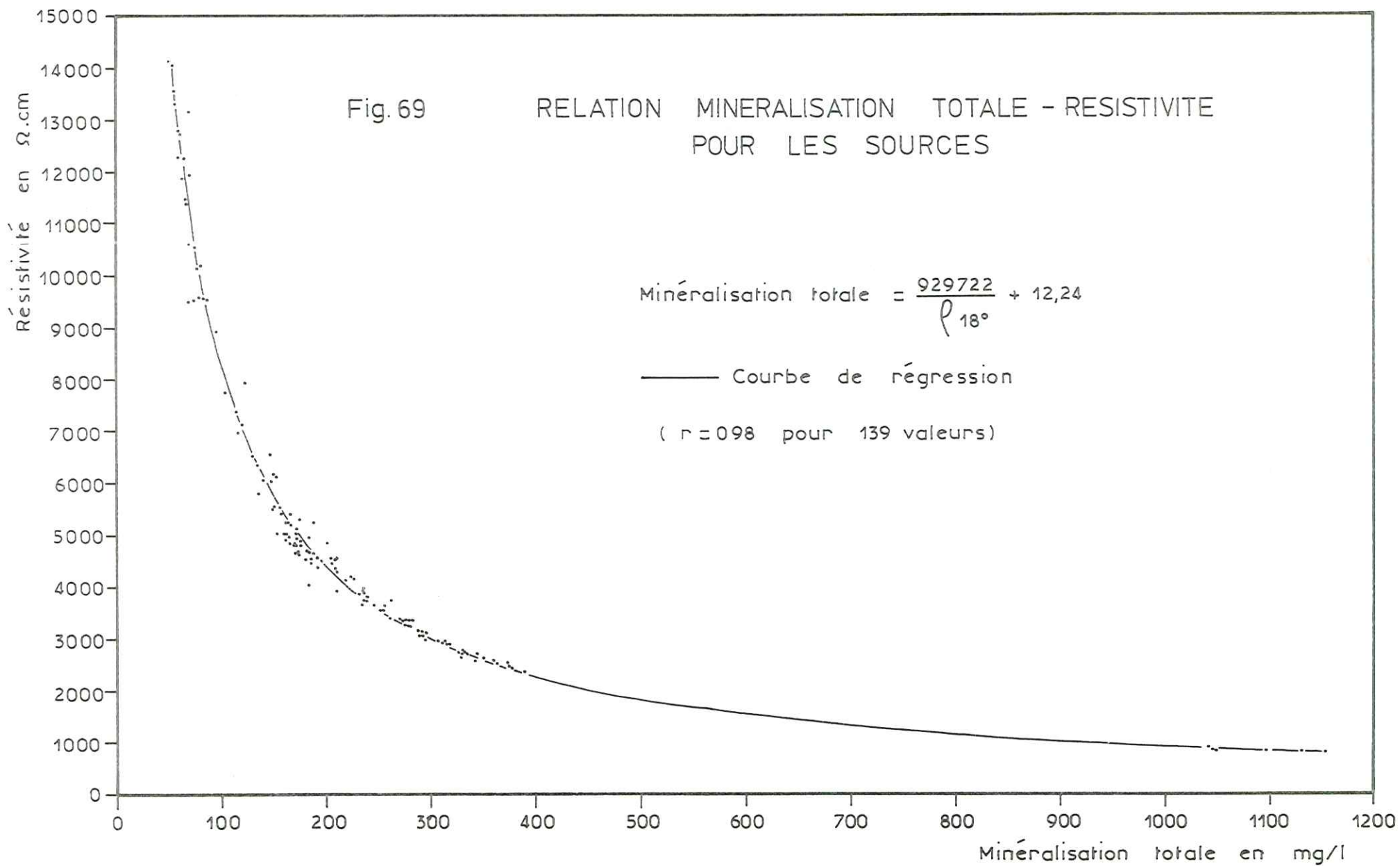
$$\text{minéralisation totale en mg/l} = \frac{929722 + 12,2}{\rho_{18^\circ\text{C}} (\Omega.\text{cm})}$$

avec un coefficient de corrélation $r = 0,98$ hautement significatif; cette relation est très différente de la formule de DOROSCHEWSKI.

Mais cette relation n'est en fait qu'une approximation, car la résistivité d'une solution est également fonction de la nature des ions présents et donc de sa composition chimique globale. Chaque famille de sources possédant sa propre composition chimique, la relation minéralisation totale-résistivité sera différente pour chaque groupe.

Les relations que nous avons calculées pour chaque groupe de sources sont très différentes puisqu'elles varient de $\frac{1013126}{\rho} - 3,62$ à $\frac{776426}{\rho} + 0,6$, mais chacune d'elles n'est utilisable que dans le domaine de résistivité de chaque famille (voir tableau N° 64 p.240).

En conclusion, l'équation générale est une approximation des divers tronçons de courbes relatifs aux différentes familles de sources, qui permet une estimation satisfaisante de la minéralisation totale à partir de la résistivité.



7.2.2. TEMPERATURE DES EMERGENCES

DAUBREE a montré qu'il existait une très bonne concordance entre la température moyenne annuelle de l'air et la température moyenne d'une eau de source. D'autre part R. MICHEL en 1960 a montré que cette concordance est valable à $\pm 1^{\circ}$ C près et jusqu'à 1 200 mètres environ; au-delà de 1 200 m la température des sources est supérieure à celle de l'air, ce qui est dû à la protection du sous-sol des rigueurs hivernales par la couverture nivale.

Dans le secteur que nous avons étudié, il est difficile de mettre en évidence une relation température des sources-altitude, la plupart des sources étant situées à des altitudes voisines (950 à 1 100m). Néanmoins, pour autant qu'on puisse en juger d'après nos mesures assez espacées dans le temps, il semble que les températures des eaux de sources soient légèrement plus élevées que la température moyenne de l'air; l'influence de la couverture nivale se ferait donc déjà sentir.

Quelques eaux de sources présentent des températures nettement plus élevées que la température moyenne de l'air (9 à 11°C); il s'agit de sources circulant dans le Houiller et nous reviendrons plus loin sur cette particularité intéressante.

D'autre part, le domaine de variation de la température de chaque source, qui apporte des renseignements sur le mode de circulation et d'alimentation, sera étudié pour chaque cas.

7.2.3 . COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE SOURCES

7.2.3.1. Faciès chimique

La plupart des eaux de sources de la région des lacs de Laffrey ont des compositions chimiques très voisines.

Ce sont des eaux bicarbonatées calciques, seules les eaux du Houiller étant sulfatées magnésiennes.

La distinction des différentes familles de sources d'après leur chimisme est cependant possible en utilisant les rapports caractéristiques et la minéralisation globale.

7.2.3.2. Gammes de teneurs des principaux constituants chimiques

- La teneur moyenne en calcium des eaux de sources est de l'ordre de 50 mg/l avec des extrêmes allant de 6 mg/l à 150 mg/l.

- Les concentrations en magnésium sont généralement faibles (de 0,5 à 15 mg/l), un seul groupe se distingue nettement avec des teneurs très fortes (100 mg/l).

- Les concentrations en chlorures, sodium et potassium sont très faibles : de 0,5 à 10 mg/l de chlorures (les plus fortes valeurs étant un signe de pollution), de 0,7 à 4 mg/l de sodium (une source se distingue cependant avec 20 mg/l), de 0,1 à 2 mg/l de potassium.

- Les concentrations en sulfates sont faibles également (de 2 à 20 mg/l), sauf pour le groupe des eaux sulfatées où les teneurs atteignent 500 mg/l.

- Les concentrations en bicarbonates sont en moyenne de 130mg/l avec des extrêmes allant de 20 à 400 mg/l.

- Les nitrates sont présents à des concentrations assez faibles, avec cependant des maxima atteignant 20 mg/l signes de pollutions soit organiques soit par engrais.

7.2.3.3. Classification des sources

En utilisant les données géologiques, complétées par une étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux de sources, il est possible de proposer la classification suivante des sources en familles :

- les sources du Houiller parmi lesquelles il est possible de distinguer celles du conglomérat et celles des schistes gréseux,

- les sources du Lias qui regroupent celles du Calcaire de Laffrey et celles du Lias dauphinois,

- les sources de l'Aalénien,

- les sources du Quaternaire morainique,

- les sources du Quaternaire à éléments sédimentaires (cônes de déjections, éboulis),

- les sources mixtes alimentées à la fois par les formations quaternaires et par le substratum.

Les sources liées au Trias sont quasiment inexistantes dans le secteur étudié, ce qui s'explique par le fait que le Trias a une épaisseur très réduite.

Nous allons dans le paragraphe suivant présenter ces familles en décrivant quelques sources typiques de chaque famille.

7.3. HYDROGEOLOGIE DESCRIPTIVE DES SOURCES

7.3.1. LES SOURCES DU HOULLER

Le Houiller, de par sa nature schisto-gréseuse, est un terrain imperméable, cependant les dislocations tectoniques peuvent permettre des circulations souterraines importantes; le rôle de drain joué par les galeries d'exploitation est d'autre part non négligeable.

Nous avons choisi de présenter trois sources dont l'émergence est située dans le Houiller : une ayant circulé dans le conglomérat de base et deux dans les schistes gréseux.

7.3.1.1. Source du conglomérat de base du Houiller

7.3.1.1.1. Localisation et condition d'émergence

Il s'agit de la source du bois de Paraillet située sur les hauteurs à l'ouest du lac de Pierre-Châtel. Ses coordonnées Lambert sont :

$$x = 870,37 \text{ , } y = 802,82 \text{ et } z = 1\ 000 \text{ m}$$

La source se situe dans une combe matérialisant un petit accident N 70 E, qui affecte le conglomérat houiller. L'émergence, masquée par des éboulis, est localisée à l'intersection de cet accident et d'une faille nord-sud. Le conglomérat est, dans ce secteur, constitué d'éléments de micaschistes dans une pâte très micacée, non carbonatée.

7.3.1.1.2. Les débits

Le débit est faible, de l'ordre de 10 l/mn, il semble assez constant, mais il est susceptible d'augmenter sensiblement au printemps (30 l/ mn) par apport d'eau de fonte de neige qui est stockée dans les éboulis et se mélange à celle provenant du substratum. Le coefficient de variabilité est faible, de l'ordre de 3.

7.3.1.1.3. Les températures

Les températures, pour autant qu'on puisse en juger sur les trois mesures effectuées d'avril à septembre, sont assez élevées pour l'altitude de la source; elles varient peu, mais sont cependant légèrement influencées par la fonte des neiges.

7.3.1.1.4. La résistivité

La résistivité, très élevée (9 500 $\Omega \cdot \text{cm}$), est constante; elle subit une hausse notable au printemps (14 000 $\Omega \cdot \text{cm}$) avec l'apport d'eaux très peu minéralisées de la fonte des neiges. La résistivité, très élevée de cette source, même à l'été, est caractéristique d'une eau ayant circulé dans un terrain à nature essentiellement cristalline.

7.3.1.1.5. Chimie

	ρ	pH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	N(NO ₃ ⁻)
mg/l	11060	6,8	7,3	6,12	2,32	0,61	1,88	18,7	26,4	0,24
milliéquivalent / l			0,36	0,50	0,10	0,016	0,053	0,39	0,43	0,017

Tableau n° 57 . Composition chimique moyenne de la source du bois de Paraillet.

Le pH constant, est voisin de 6,8.

La minéralisation totale est très faible, de l'ordre de 70 mg/l à l'été.

La teneur en calcium est extrêmement faible (8 mg/l à l'été), celle du magnésium est faible également, mais comparable à celle en calcium en conséquence le rapport r Ca/ r Mg est inférieur à 1 (il varie de 0,7 à 0,8 selon la proportion d'eau superficielle). Ces faibles teneurs sont dues à l'absence de carbonates de calcium et de magnésium dans le conglomérat houiller.

Les teneurs en sodium, potassium et chlorures sont moyennes (respectivement 2,4 - 0,6 et 1,8 mg/l) et peu variables.

Les teneurs en bicarbonates et sulfates sont équivalentes, le rapport r HCO₃/ r SO₄ est donc faible (il varie entre 1 et 1,3).

Le rapport $r \text{SO}_4 / r \text{Cl}$ voisin de 9 à l'étiage, peut descendre jusqu'à 4 lorsque les apports d'eaux superficielles font baisser la teneur en sulfates.

Le rapport $r \text{Na} / r \text{Cl}$ est stable et proche de 2.

Le fer total a été dosé sur cette source qui laisse des dépôts rouges à son émergence. La teneur élevée 1 mg/l, probablement due à une mobilisation de la limonite visible dans les diaclases, rend cette eau impropre à la consommation.

En résumé, les eaux issues du conglomérat houiller sont bicarbonato-sulfatées magnésiennes (voir le diagramme de SCHOELLER sur lequel sont reportées les valeurs moyennes des analyses chimiques de la source du bois de Paraillat , fig. n° 70).

Les formules chimiques caractéristiques sont les suivantes :

$r \text{Mg} > r \text{Ca} > r \text{Na} > r \text{K}$ pour les cations et
 $r \text{HCO}_3 \geq r \text{SO}_4 > r \text{Cl} > r \text{NO}_3$ pour les anions.

7.3.1.1.5. Conclusion

Nous n'avons pu étudier qu'une source circulant dans le conglomérat houiller qui semble assez imperméable, il est donc difficile de déterminer les caractères généraux communs aux eaux de ce conglomérat. Néanmoins on peut dire que :

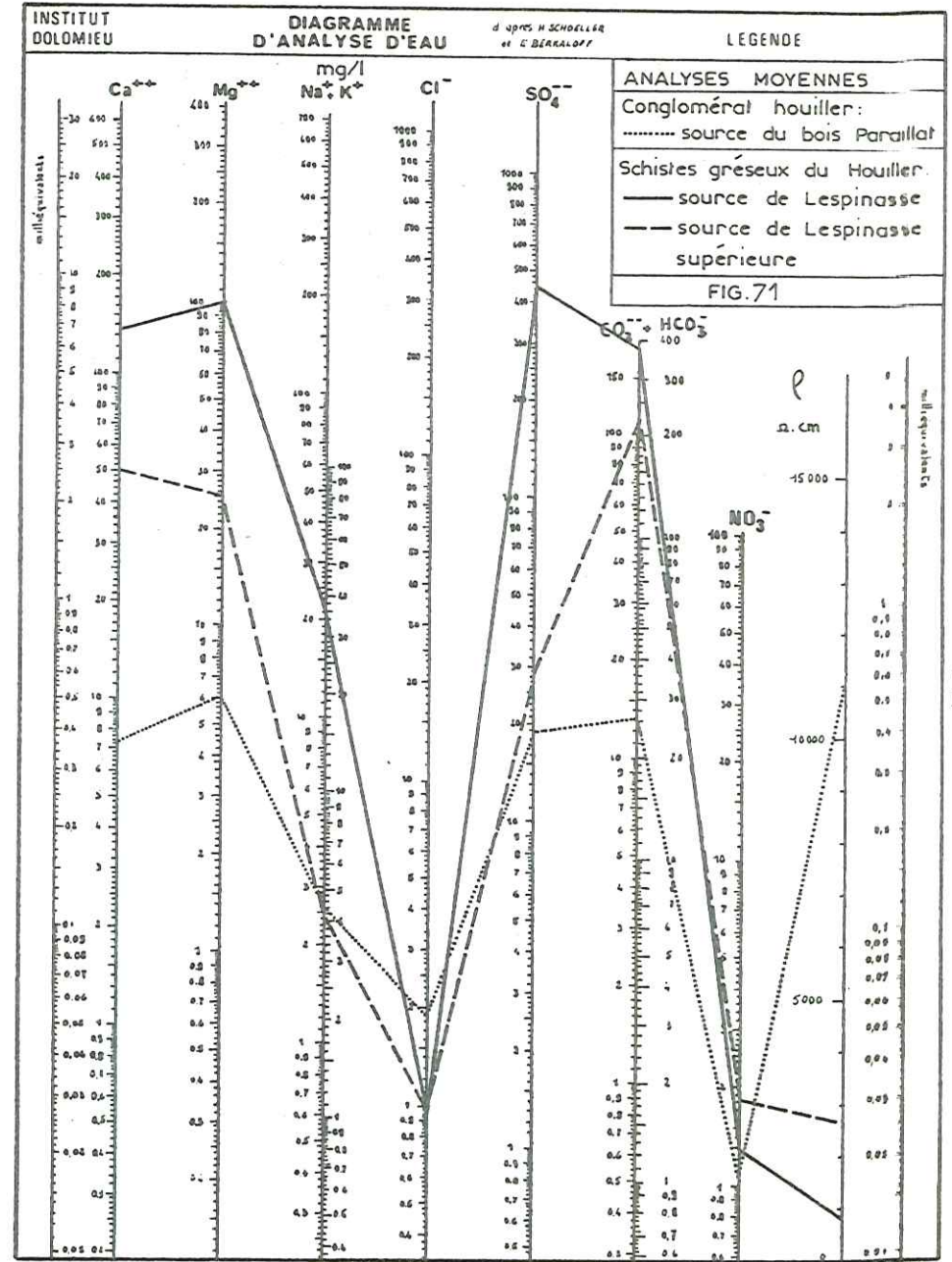
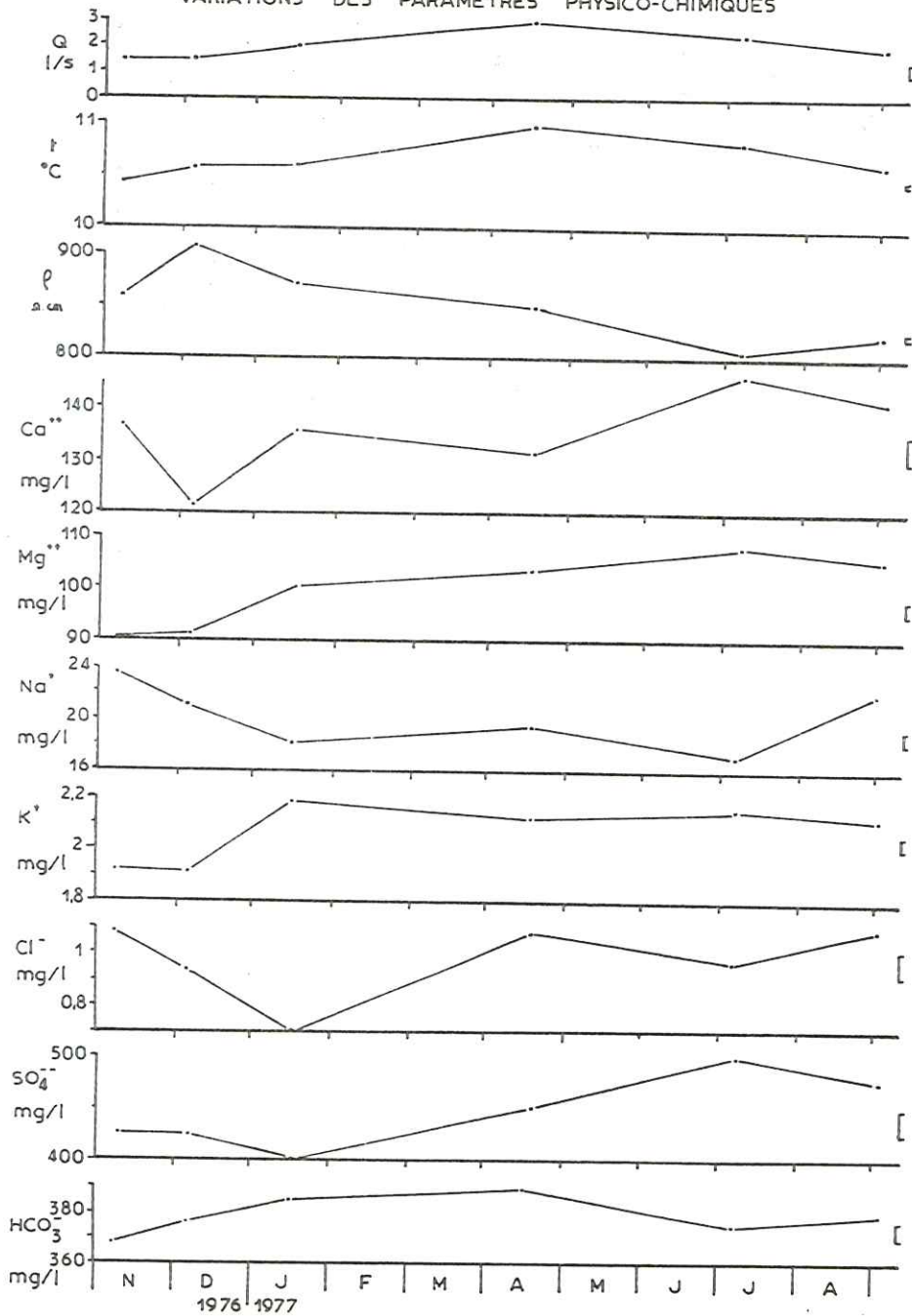
- les circulations se font dans des zones fracturées de ce conglomérat,
- les émergences se situent aux points d'intersections de deux systèmes de failles ,
- les débits sont faibles et constants (sauf lorsqu'il y a mélange avec des eaux superficielles),
- les eaux sont très peu minéralisées et donc très résistantes, elles sont bicarbonato-sulfatées magnésiennes avec des teneurs en fer élevées qui les rendent impropres à la consommation.

7.3.1.2. Les sources des schistes gréseux du Houiller

7.3.1.2.1. Localisation et conditions d'émergence

Il s'agit de la source de Lespinasse et de celle de Lespinasse supérieure qui sont toutes deux situées sur les contreforts de la colline de la Pierre Percée.

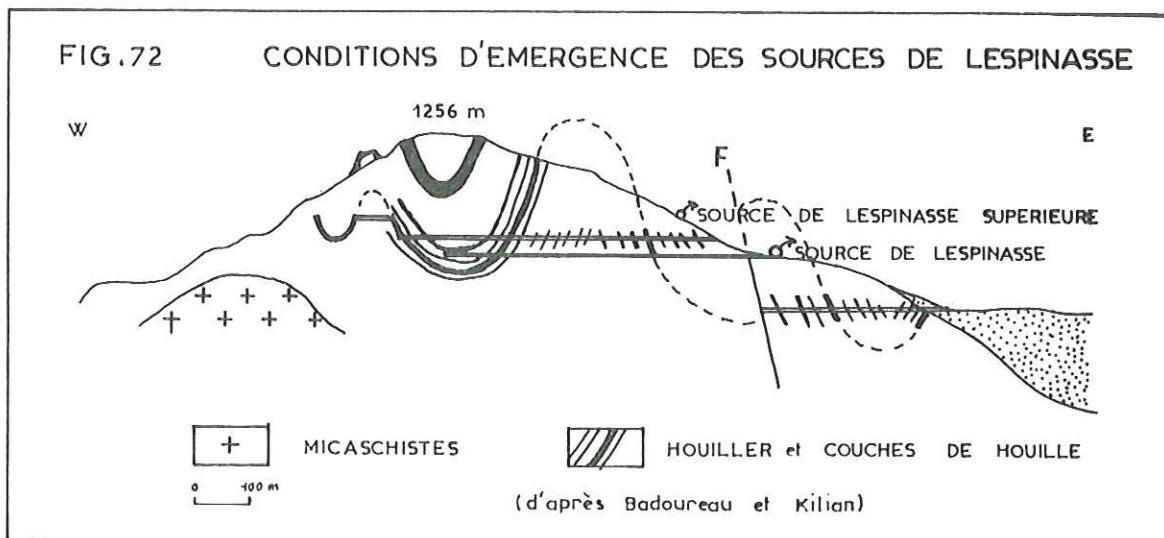
FIG.70 SOURCE DE LESPINASSE
VARIATIONS DES PARAMETRES PHYSICO-CHEMIQUES



Les coordonnées Lambert de ces deux sources sont les suivantes :

Source de Lespinasse $x = 870,65$ $y = 301,71$ et $z = 1\ 040$ m
 Source de Lespinasse supérieure $x = 870,47$ $y = 301,87$ et $z = 1\ 100$ m

La première émerge au niveau d'une ancienne galerie de mine actuellement écroulée (galerie St Anne); la seconde, captée pour alimenter un abreuvoir, sort des schistes gréseux du Houiller à la faveur d'une zone fracturée où les diaclases sont plus ouvertes (voir la figure n° 72 qui situe schématiquement ces deux sources sur une coupe géologique).



7.3.1.2.2. Les débits (voir fig. n° 71)

Le débit de la source de Lespinasse est important, de l'ordre de 2 l/s, il est très régulier puisque sa variabilité n'est que de 2. Les fortes précipitations du printemps font augmenter son débit jusqu'à 3 l/s alors que le débit d'étiage en automne n'est que de 1,5 l/s. Cette variabilité très faible indique l'existence de réserves souterraines importantes ne subissant que d'une façon très atténuée les variations de la pluviosité. Le débit de la source de Lespinasse supérieure est très faible et régulier, de l'ordre de 6 l/ mn.

7.3.1.2.3. Les températures (voir fig. n° 71)

Les températures des eaux de ces sources subissent très peu de variations et sont très élevées pour l'altitude des émergences. La température moyenne de la source de Lespinasse est de 10,7°C, celle de Lespinasse Supérieure de 9,3 °C. On peut donner plusieurs explications à ces anomalies de températures :

- un échauffement de l'eau sous l'influence du gradient géothermique dû à des circulations assez profondes,
- un échauffement de l'eau par d'anciens feux de mines, ceux-ci pouvant brûler pendant des années,
- un échauffement de l'eau dû aux réactions exothermiques d'oxydation de la pyrite.

Nous verrons plus loin si la composition chimique permet de trancher entre ces trois hypothèses.

7.3.1.2.4. Les résistivités (voir fig.n°71)

La résistivité de la source de Lespinasse est très faible (de l'ordre de 840 Ω .cm), ce qui est le reflet d'une minéralisation très élevée. Elle varie peu (10 %), on note toutefois une augmentation au début de l'hiver 1976, suivie d'une baisse régulière jusqu'au mois de juin 1977; elle augmente de nouveau durant l'automne.

La résistivité de la source de Lespinasse supérieure est moyenne (2 600 Ω .cm). Les deux prélèvements effectués l'un en été, l'autre en automne ne présentent pas de différence importante.

7.3.1.2.4. Chimie (voir fig. n° 71)

	$\rho_{18^\circ\text{C}}$	pH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	N(NO ₃ ⁻)	Fe
Lespinasse mg/l	837	6,5	136,1	100,2	20,2	2,08	0,97	446	378	0,29	7,2
Lespinasse m.équiv./l			6,79	8,24	0,88	0,053	0,027	9,29	6,20	0,021	
Lespinasse sup. mg/l	2625	6,35	49	25,5	1,84	1,14	0,97	28,5	225	0,39	0,6
Lespinasse sup. m.équiv./l			2,44	2,09	0,08	0,029	0,027	0,59	3,69	0,028	

Tableau n° 58 . Compositions chimiques moyennes de deux sources du Houiller schisto-gréseux.

Le pH , assez constant, est faible (6,5 pour la source de Lespinasse et 6,35 pour celle de Lespinasse supérieure).

D'une manière générale, la composition chimique varie très peu tout au cours de l'année (20 % pour les ions présentant la plus forte variabilité).

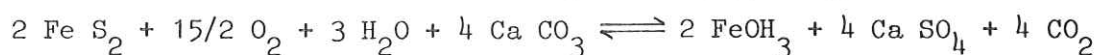
La source de Lespinasse présente des caractères chimiques très particuliers :

- une minéralisation totale très élevée (supérieure à 1 g/l),

- des teneurs en calcium, magnésium, sodium, sulfates et bicarbonates très élevées, alors que les teneurs en potassium, chlorures et nitrates sont normales pour la région; ces concentrations donnent aux rapports caractéristiques les valeurs suivantes :

$r \text{ Ca} / r \text{ Mg}$ est faible (0,8 à 0,9), $r \text{ SO}_4 / r \text{ Cl}$ est très élevé (300 à 400), $r \text{ Na} / r \text{ Cl}$ est très élevé également (de 30 à 40) et $r \text{ HCO} / r \text{ SO}_4$ est très faible (0,6 à 0,8).

La concentration très forte en sulfates provient à notre avis de l'oxydation des pyrites qu'on rencontre très fréquemment dans les schistes houillers, selon la réaction chimique suivante, qui est confirmée par la teneur élevée en fer total de la source de Lespinasse (7,25 mg/l) :



Cette réaction exothermique libère 717 Kcal,

ce qui pourrait expliquer la température anormale de cette source. Cependant pour SCHOELLER, cette réaction est limitée par la faible solubilité de l'oxygène de l'eau; en partant de la solubilité maximale de l'oxygène, il calcule que l'élévation maximale de la température imputable à l'oxydation des pyrites est de 0,03°C. Mais son raisonnement suppose l'absence de communication entre les circulations d'eau et l'atmosphère, ce qui n'est probablement pas le cas dans notre région où les travaux miniers permettent, par les vides qu'ils laissent, une circulation de l'air.

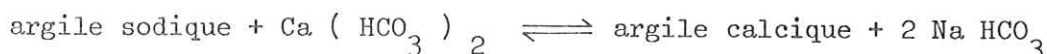
En admettent donc un apport d'air, l'oxydation des pyrites pourrait expliquer la température élevée de la source ainsi que la présence de sulfates et de fer; la source de Lespinasse serait donc une source thermale artificielle.

Les teneurs élevées en calcium et magnésium sont difficiles à expliquer dans la mesure où les schistes gréseux du Houiller

ne contiennent pas de carbonates à part quelques petits horizons carbonatés composés essentiellement de sidérite (FeCO_3).

On peut alors penser : soit que l'acide sulfurique formé au cours de l'oxydation des pyrites est responsable de l'attaque de ces rares niveaux carbonatés, soit qu'une partie de l'eau provient des dolomies triasiques qui affleurent au nord de la Pierre Percée, soit enfin qu'une partie de l'eau a une origine hydrothermale profonde liée peut-être à la faille de la Festinière.

La forte teneur en sodium est étonnante dans la mesure où il n'existe pas de niveaux à évaporites dans le Houiller; son origine est à rechercher dans des phénomènes d'échanges d'ions à l'intérieur de minéraux argileux. Des minéraux argileux sodiques seraient en effet susceptibles d'échanger leur sodium contre du calcium suivant le schéma suivant :



La source de Lespinasse supérieure est beaucoup moins minéralisée et, bien que sa composition chimique soit comparable à celle de Lespinasse, les concentrations en magnésium, sodium et sulfates sont proportionnellement plus faibles. Les rapports caractéristiques traduisent bien cette différence :

$r \text{Ca} / r \text{Mg}$ légèrement supérieur (1,1 à 1,2),
 $r \text{SO}_4 / r \text{Cl}$ est nettement plus faible (20 à 25) ce qui est cependant une valeur élevée pour la région,
 $r \text{Na} / r \text{Cl}$ est plus faible (2,9),
 $r \text{HCO}_3 / r \text{SO}_4$ est nettement supérieure (6).

En résumé comme le montre le diagramme de SCHOELLER de la figure n°70 , on peut dire que les eaux des schistes gréseux du Houiller sont soit sulfatées magnésiennes, soit bicarbonatées calciques et magnésiennes.

Les formules caractéristiques de ces eaux sont :

$r \text{Mg} > r \text{Ca} > r \text{Na} \gg r \text{K}$ et $r \text{SO}_4 > r \text{HCO}_3 \gg r \text{Cl} > r \text{NO}_3$ pour Lespinasse
 et $r \text{Ca} \gg r \text{Mg} \gg r \text{Na} > r \text{K}$ et $r \text{HCO}_3 > r \text{SO}_4 > r \text{NO}_3 \gg r \text{Cl}$ pour Lespinasse supérieure.

7.3.1.2.6. Conclusion

Les eaux des schistes gréseux du Houiller circulent naturellement dans les fractures et les diaclases qui les affectent, mais les travaux miniers peuvent créer des circulations artificielles importantes.

Les sources issues de ces terrains présentent des débits et des températures très réguliers, qui sont le signe de réserves souterraines importantes et profondes.

Les températures sont élevées ce qui pourrait être dû à l'oxydation des pyrites, qui est une réaction exothermique.

Les eaux issues de ces terrains sont caractérisés par des rapports $r \text{ Ca}/r\text{Mg}$ proches de l'unité et des rapports $r\text{SO}_4 / r\text{Cl}$ élevés

7.3.2. LES SOURCES DU LIAS DAUPHINOIS ET DU CALCAIRE DE LAFFREY

Nous avons groupé les sources liées à ces deux faciès du Lias, les eaux issues de ces terrains ayant des compositions chimiques très voisines.

7.3.2.1. Localisation et conditions d'émergence

Nous présentons ici la source de la route de Séchilienne et le ruisseau du Pey qui sont situés au nord du village de Laffrey, ainsi que la source de la combe de Chaupin située sur le Grand Serre; leurs coordonnées Lambert sont :

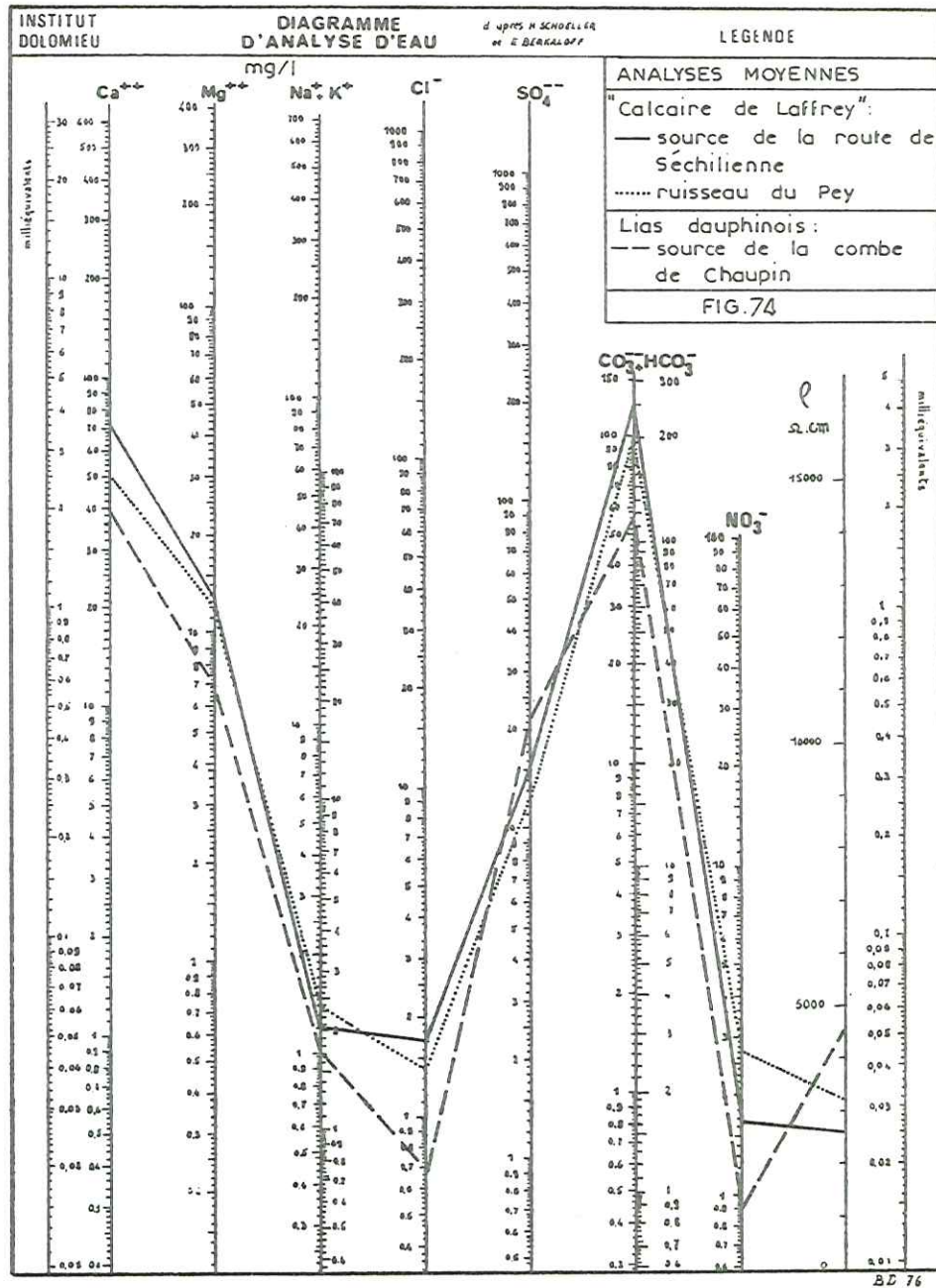
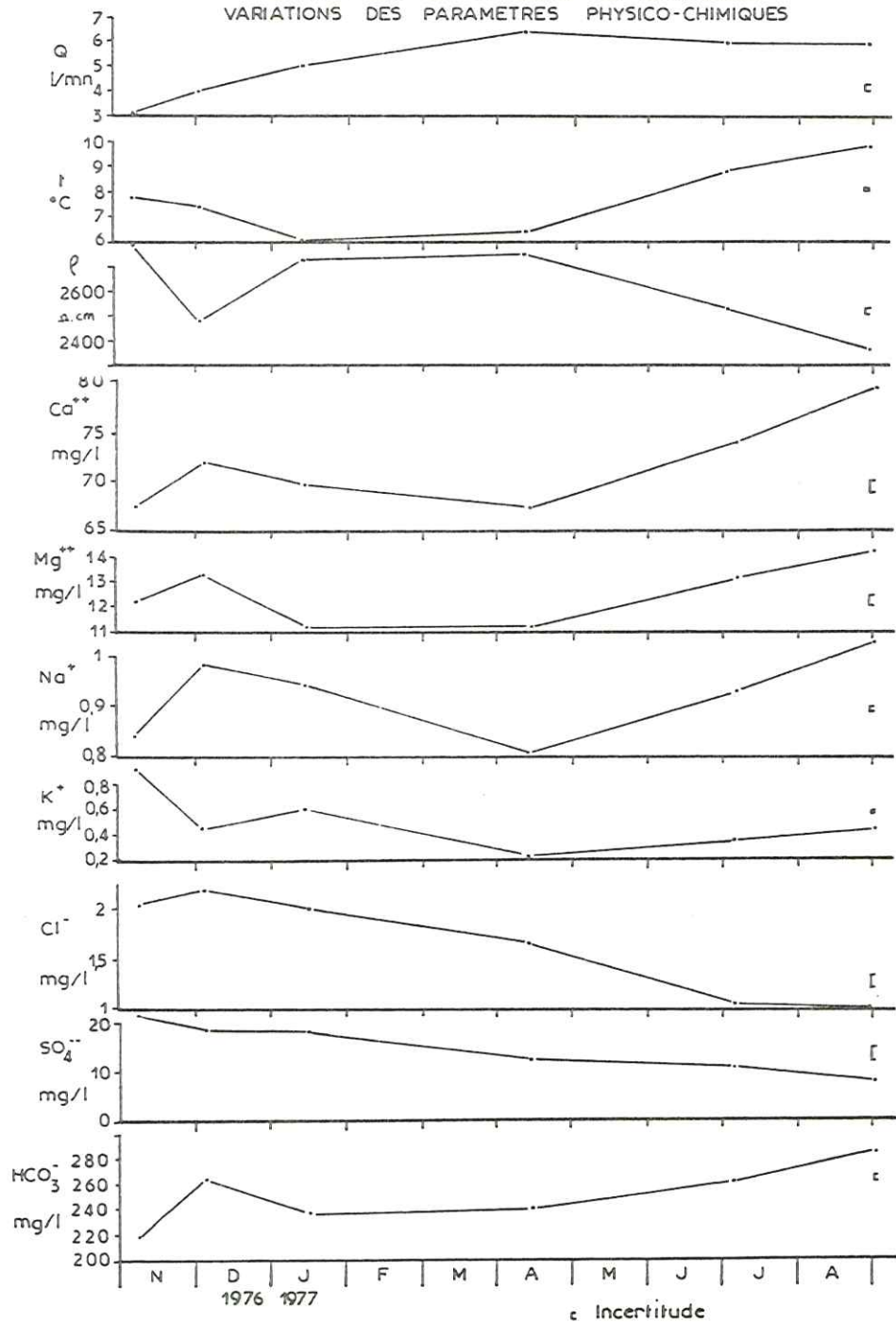
- source de la route de Séchilienne : $x = 870,75$ $y = 308,80$ et $z = 890$ m
- ruisseau de Pey $x = 870,80$ $y = 308,85$ et $z = 890$ m
- source de la Combe de Chaupin $x = 874,08$ $y = 305,75$ et $z = 1470$ m.

Les deux premières sont issues du Calcaire de Laffrey, alors que la dernière sort du Lias dauphinois.

La source de la route de Séchilienne, qui a fait l'objet d'un petit captage, émerge au pied d'un tapis d'éboulis provenant de la falaise de Calcaire de Laffrey qui le domine. Ces eaux qui ont circulé dans le Calcaire de Laffrey, émergent dans les éboulis après avoir rencontré les schistes noirs imperméables du Rhétien -Hettangien, qui constituent le niveau de base géologique local.

Le ruisseau du Pey qui coule dans une petite combe entaillée dans le Calcaire de Laffrey jusqu'au Trias, a une origine comparable, bien qu'il

FIG.73 SOURCE DE LA ROUTE DE SECHILLENNE
VARIATIONS DES PARAMETRES PHYSICO-CHEMIS



n'existe aucune émergence bien individualisée.

La source de la combe de Chaupin qui alimente un abreuvoir émerge des calcaires marneux du Lias dauphinois au niveau d'une zone de fracture, satellite de l'accident N 70 E du Grand Serre que nous avons décrit au chapitre 2.1.2.1.1.

7.3.2.2. Les débits

Ils sont faibles, mais ceci n'est pas une caractéristique de ce type de source, puisque le captage du syndicat du Connexe sur le Grand Serre qui a une origine identique à celle de la source de la combe de Chaupin, a un débit très important de 30 l/s.

Les débits de la source de la route de Séchilienne (6l/mn) qui ont été suivis tout au long de l'année, présentent une variabilité très faible (2). L'étiage a lieu en automne, alors que les forts débits s'observent au printemps (voir la figure n°73). Les débits de la source de la combe de Chaupin sont également très faibles (7 l/mn) et peu variables.

7.3.2.3. Les températures (voir fig.n°73)

Les températures des eaux de la source de la route de Séchilienne sont normales pour l'altitude de l'émergence (7,7°C), elles présentent des variations qui sont le reflet amorti des variations climatiques avec un minimum en janvier (6,1°C) et un maximum en septembre (9,8°C). La source de la combe de Chaupin a une température élevée pour son altitude (6,2°C) qui montre l'origine profonde des eaux.

7.3.2.4. Les résistivités

Les résistivités de ces sources varient peu (voir la fig. n° 73). Elles sont assez faibles pour la source de la route de Séchilienne (2 600 Ω .cm), plus élevées pour la source de la combe de Chaupin (4 530 Ω .cm).

7.3.2.5. Chimie (fig. n° 73 et 74).

		ρ_{18°	pH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	N(NO ₃ ⁻)
Route de	mg/l	2604	7,6	71,6	12,5	0,92	0,5	1,69	15	250	0,38
Séchilienne	m.équival/l	×	×	3,58	1,03	0,040	0,013	0,048	0,31	4,09	0,027
Ruisseau du	mg/l	3220	7,6	51,3	12,04	1,04	0,56	1,37	12,5	196	0,62
Pey	m.équival/l	×	×	2,56	0,99	0,045	0,014	0,038	0,26	3,21	0,044
Combe de	mg/l	4530	8	38,4	6,8	0,96	0,06	0,68	21,5	117,5	0,21
Chaupin	m.équival/l	×	×	1,92	0,56	0,042	0,0002	0,019	0,45	1,93	0,015

Tableau n° 59 . Compositions chimiques moyennes de 3 sources du Calcaire de Laffrey et du Lias dauphinois.

Le pH de ces eaux est assez élevé de 7,6 à 8.

La minéralisation totale est moyenne à assez forte pour la région (180 à 390 mg/l).

Les deux ions majeurs sont le calcium et les bicarbonates.

Les teneurs en magnésium sont assez fortes pour la région (7 à 12 mg/l), ce qui donne une valeur assez faible au rapport r Ca/r Mg qui est compris entre 3 et 4.

Les teneurs en sodium sont faibles, de l'ordre du mg/l.

Les teneurs en sulfates sont plutôt élevées pour la région (12 à 21 mg/l), ce qui donne au rapport r SO₄/ rCl une valeur élevée, 6 à 7 et même 20-30 pour la source de la combe de Chaupin.

En ce qui concerne les variations de la composition chimique de la source de la route de Séchilienne au cours de l'année (voir la fig.n° 73), on notera que les ions suivants Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺ et HCO₃⁻, présentent des concentrations minimales au printemps et maximales en automne, probablement dues à un apport plus important d'eaux superficielles au printemps. D'autre part, les ions chlorures et sulfates ont une concentration qui a diminué tout au long de l'étude, ce que nous attribuons à un phénomène de dilution, les débits ayant augmenté durant la période d'étude après la sécheresse de 1976.

En résumé, comme le montre le diagramme de SCHOELLER de la figure n° 74 , les eaux issues du Lias dauphinois et du Calcaire de Laffrey sont bicarbonatées calciques; leurs formules caractéristiques sont :

$r \text{ Ca} > r \text{ Mg} \gg r \text{ Na} > r \text{ K}$ pour les cations et
 $r \text{ HCO}_3 > r \text{ SO}_4 \gg r \text{ Cl} > r \text{ NO}_3$ pour les anions.

7.3.2.6. Conclusion

Les eaux issues du Lias dauphinois et du Calcaire de Laffrey ont de nombreux caractères communs qui nous les ont fait classer dans une même famille, et notamment :

- les débits très constants,
- les températures assez constantes ,
- des compositions chimiques voisines (eaux bicarbonatées calciques) caractérisées par un rapport $r \text{ Ca} / r \text{ Mg}$ compris entre 3 et 4, et un rapport $r \text{ SO}_4 / r \text{ Cl}$ assez élevé.

Par contre les modes de circulation sont différents, en effet :

- les eaux circulent dans le Calcaire de Laffrey par l'intermédiaire de la multitude de diaclases et de petites fractures qui l'affectent ; l'émergence a lieu au contact du Calcaire de Laffrey avec les schistes noirs du Rhétien-Hettangien.

- les circulations dans le Lias dauphinois sont localisées aux zones de grandes fractures qui l'affectent, et le long desquelles se situent les émergences.

7.3.3. LES SOURCES DE L'AALENIEN

7.3.3.1. Localisation et conditions d'émergence

Les sources que nous avons choisi de présenter sont toutes situées à l'ouest du lac de Laffrey où l'Aalénien constitue la majeure partie de la colline des Crêts. Il s'agit de la source des Nizets et des deux sources du bois du Chanet; leurs coordonnées Lambert sont les suivantes :

- source des Nizets	$x = 870,51$	$y = 305,81$	et $z = 990$ m
- source du bois du Chanet nord	$x = 870,63$	$y = 307,12$	et $z = 1018$ m
- source du bois du Chanet sud	$x = 870,61$	$y = 307,25$	et $z = 1022$ m.

Les trois émergences sont liées à des accidents N 70 E qui ont déjà été décrits au chapitre 2.1.2. La source des Nizets émerge au milieu d'un dépôt de tuf construit par celle-ci. Les sources du bois du Chanet nord et sud sortent directement des calcaires argileux de l'Aalénien.

7.3.3.2. Les débits (fig. n° 75)

Seule la source des Nizets présente un débit important atteignant 2 l/s, les deux autres sources ont des débits beaucoup plus faibles (quelques l/mn). La variabilité de ces sources est forte (de 6 à 15), ce qui est paradoxal pour des sources issues du substratum. Cette particularité s'explique à notre avis par le fait que les circulations se font dans des zones de fractures où la perméabilité est forte, mais qu'en dehors de ces zones, les calcaires argileux de l'Aalénien sont imperméables, le stockage d'eau qui ne peut avoir lieu que dans ces zones fracturées est donc limité en volume. Les hautes eaux ont lieu au printemps alors que l'étiage est atteint au mois de septembre.

7.3.3.3. Les températures (fig. n°75)

Elles sont normales compte tenu de l'altitude des émergences pour les deux sources du bois du Chanet, les variations sont peu importantes ce qui indique une circulation assez profonde. La source des Nizets, dont la température moyenne est normale, présente par contre des variations importantes qui sont dues au fait que l'eau circule longuement dans les tufs superficiels avant d'émerger, sa température subit donc l'influence des variations climatiques.

7.3.3.4. Les résistivités(fig.n°75)

Elles sont faibles, (2 700 Ω .cm en moyenne) varient peu (de 2 400 à 3 300 Ω .cm). Les plus fortes résistivités s'observent au printemps en même temps que les hautes eaux, alors qu'à l'étiage automnal elles sont minimales. D'autre part il est intéressant de noter que les trois sources présentent des variations de la résistivité identiques.

7.3.3.5. Chimie (fig. n° 75 et 76)

		ρ_{18°	pH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	N(NO ₃ ⁻)
Les Nizets	mg/l	2847	7,55	78,9	3,77	1,22	0,17	1,70	12,5	226	0,29
	m.équival/l	×	×	3,94	0,31	0,053	0,043	0,048	0,26	3,70	0,021
Bois du Chanet nord	mg/l	2678	7,5	83,9	2,91	1,43	0,17	1,96	12	244	0,18
	m.équival./l	×	×	4,19	0,24	0,062	0,043	0,055	0,25	4	0,013
Bois du Chanet sud	mg/l	2833	7,3	78,8	2,76	1,42	0,17	1,71	12,5	225	0,24
	m.équival/l	×	×	3,94	0,23	0,062	0,043	0,048	0,26	3,69	0,017

Tableau n° 60 . Compositions chimiques moyennes de trois sources de l'Aalénien.

Le pH de ces eaux est légèrement basique (7,3 à 7,5)

Comme le montre le diagramme de SCHOELLER de la figure n° 76 , les compositions chimiques de ces eaux sont très voisines.

La minéralisation totale est forte pour la région (270 à 380 mg/l).

Les deux ions dominants sont le calcium et les bicarbonates.

Le magnésium est présent à des concentrations faibles, ce qui donne au rapport r Ca/ r Mg des valeurs élevées (de 12 à 30).

Les teneurs en sulfates sont moyennes d'où un rapport r HCO₃ / r SO₄ relativement élevé (10 à 20).

Les autres ions sont présents à de faibles teneurs.

On notera par ailleurs que les variations des concentrations des ions majeurs sont similaires pour les trois sources (voir fig. n° 75).

En résumé, les eaux issues des calcaires argileux de l'Aalénien sont bicarbonatées calciques; leurs formules caractéristiques sont les suivantes :

r Ca \gg r Mg > r Na > r K pour les cations et

r HCO₃ \gg r SO₄ > r Cl > r NO₃ pour les anions.

7.3.3.6. Conclusion

Les eaux circulent dans les calcaires argileux de l'Aalénien au niveau des grandes fractures N 70 E qui les affectent.

Les réserves souterraines susceptibles d'être emmagasinées sont faibles ce qui se traduit par une variabilité des débits assez élevée.

Par ailleurs, ces eaux bicarbonatées calciques présentent toutes des caractères chimiques très proches.

7.3.4. LES SOURCES DES MORAINES WURMIENNES

7.3.4.1. Localisation et conditions d'émergence

Ces sources sont toutes situées sur la colline du Canier, à l'est du lac de Laffrey où les dépôts morainiques latéraux sont très développés.

Les sources que nous avons choisi de présenter en détail sont la source de la route Cholonge-Laffrey et la source des Josserands amont; leurs coordonnées Lambert sont les suivantes :

source de la route Cholonge-Laffrey	x = 871,97	y = 306,70 et
	z = 1 010 m	
source des Josserands amont	x = 871,92	y = 307,84 et
	z = 980 m	

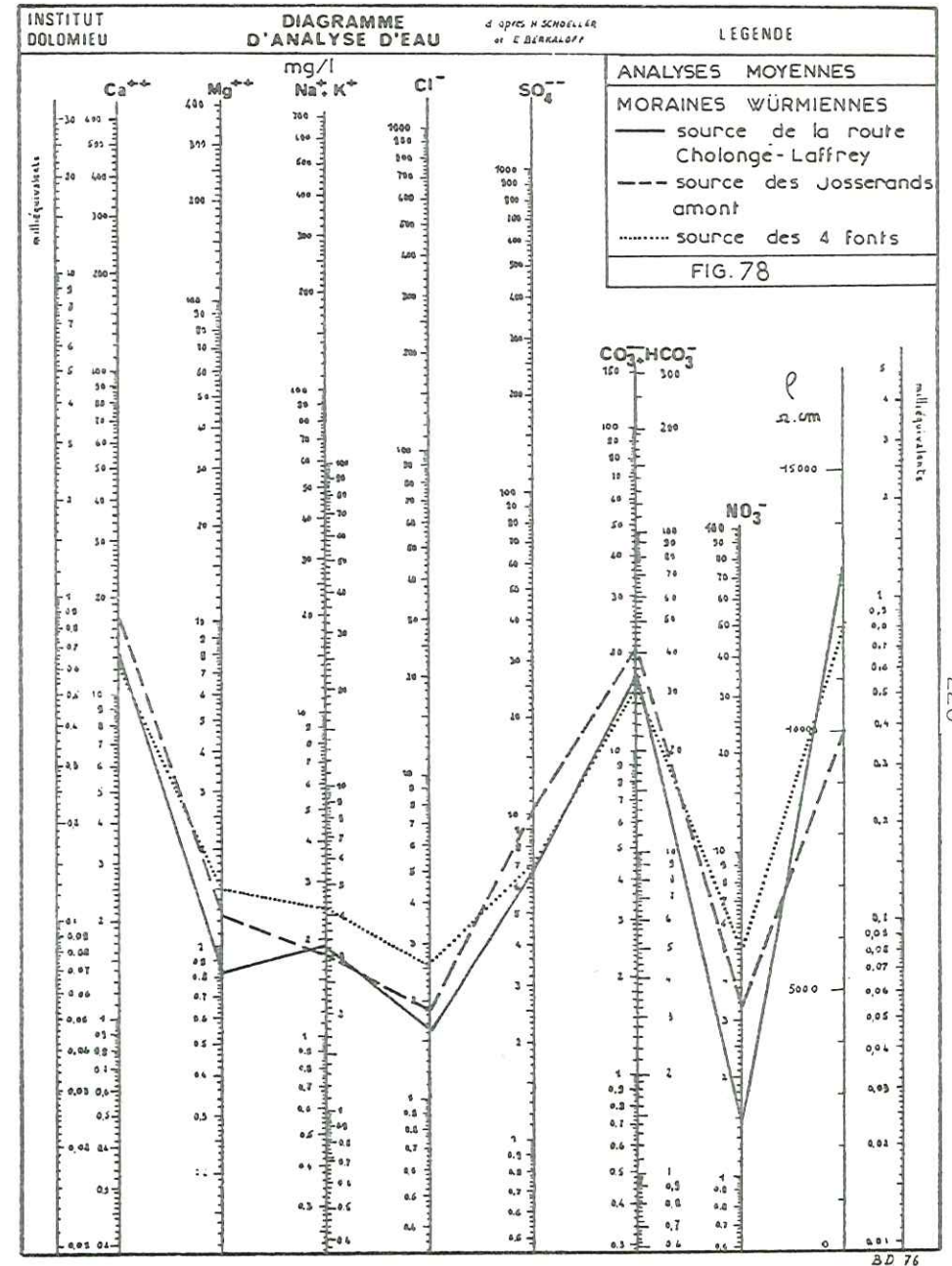
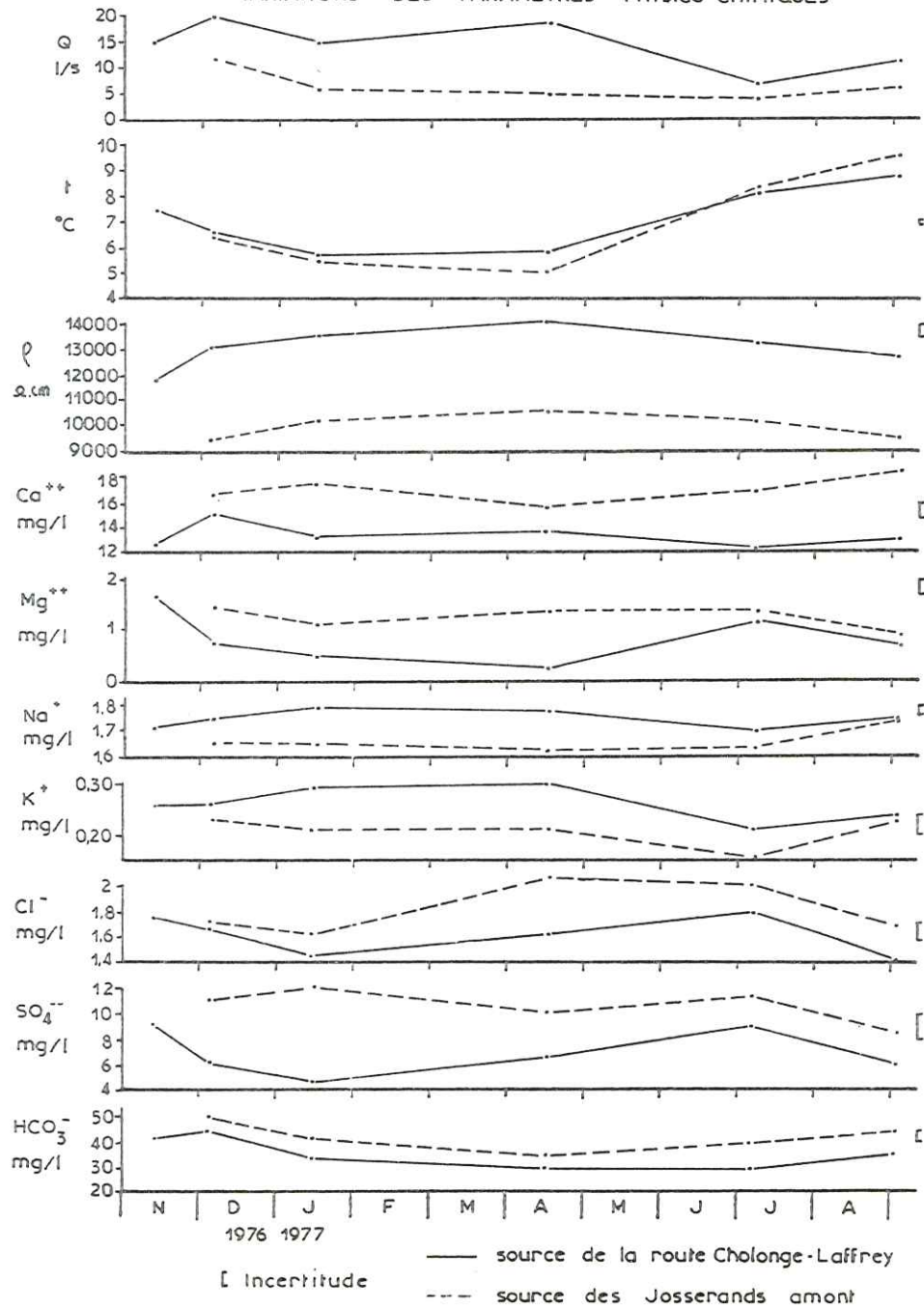
La source de la route Cholonge-Laffrey, qui a fait l'objet d'un petit captage au-dessus de la route, émerge au milieu des moraines würmiennes sablo-caillouteuses, au niveau d'un horizon plus argileux qui oblige les eaux à réapparaître.

La source des Josserands émerge dans un matériau morainique qui remplit un petit sillon glaciaire, cette source est captée à l'extrémité sud de ce sillon.

7.3.4.2. Les débits (fig. n° 77)

Les débits mesurés sont ceux des trop pleins qui sont donc inférieurs aux débits réels de ces sources. Les débits de la source des Josserands sont assez constants et présentent une variabilité faible; ceux de la

FIG. 77 SOURCES DES MORAINES WÜRMIENNES
VARIATIONS DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES



source de la route Cholonge-Laffrey varient beaucoup plus et semblent beaucoup plus liés aux précipitations récentes.

7.3.4.3. Les températures (fig. n° 77)

Elles sont légèrement plus élevées que la température moyenne annuelle de l'air, ce qui est peut être dû à la protection du manteau neigeux en hiver. Elles présentent des fluctuations très importantes liées directement à la température de l'atmosphère ce qui est le signe de circulations peu profondes.

7.3.4.4. Les résistivités (fig. n° 77)

Elles sont très élevées (de 9 500 à 14 000 $\Omega \cdot \text{cm}$), ce qui dénote une minéralisation totale très faible due à l'absence de carbonates dans les moraines würmiennes, fait que nous avons mis en évidence par des calcimétries, toutes négatives, de ces formations (voir chapitre 2.3.).

Les résistivités présentent des variations peu importantes avec cependant un maximum au printemps dû à la fonte des neiges.

7.3.4.5. Chimie (fig. n° 77)

	ρ_{18°	pH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	N(NO ₃ ⁻)
Source de la route	mg/l 10020	7,1	12,2	1,24	1,66	0,21	1,83	10,6	41,7	0,76
	m.équival/l	\times	0,86	0,10	0,072	0,005	0,051	0,22	0,68	0,055
Source des Josses	mg/l 13140	7,1	13,3	0,83	1,75	0,26	1,61	6,8	35,1	0,33
rands amont	m.équival/l	\times	0,66	0,068	0,076	0,066	0,045	0,14	0,57	0,024

Tableau n° 61 . Compositions chimiques moyennes de deux sources des moraines würmiennes.

Le pH est presque neutre (7,1).

La minéralisation totale est très faible (de 55 à 90 mg/l).

Les concentrations en bicarbonates et calcium sont très faibles ce qui est la conséquence de l'absence de calcaire dans ces moraines.

Les concentrations en magnésium, potassium, sulfates sont relativement faibles pour la région. Les autres ions sont présents à des teneurs normales.

Le rapport $r \text{ Ca} / r \text{ Mg}$ est très variable (de 3 à plus de 30); le rapport $r \text{ SO}_4 / r \text{ Cl}$ est plutôt faible (1 à 5).

On notera que les ions majeurs (Ca^{++} , Mg^{++} , SO_4^{--} , HCO_3^-) subissent des variations de concentrations au cours de l'année, les teneurs minimales se situant au printemps; les variations de concentrations des autres ions sont faibles et peu significatives.

Comme le montre le diagramme de SCHOELLER de la figure n° 78, ces eaux sont bicarbonatées calciques; leurs formules caractéristiques sont les suivantes :

$$\begin{aligned} r \text{ Ca} > r \text{ Mg} > r \text{ Na} > r \text{ K} & \text{ pour les cations et} \\ r \text{ HCO}_3 > r \text{ SO}_4 > r \text{ Cl} \geq r \text{ NO}_3 & \text{ pour les anions.} \end{aligned}$$

7.3.4.6. Conclusion

Les eaux circulent dans les moraines würmiennes au niveau des zones les plus perméables de celles-ci (souvent d'anciens chenaux intra-morainiques décrits au chapitre 2.2.). Leur émergence est généralement liée à l'existence d'horizons plus argileux qui obligent les eaux à réapparaître.

Les circulations sont superficielles comme l'attestent les fluctuations importantes de la température.

Les eaux sont bicarbonatées calciques, très peu minéralisées ce qui leur donne une résistivité très élevée (supérieure à 9 500 $\Omega \cdot \text{cm}$).

7.3.5. LES SOURCES MIXTES

Nous avons classé dans cette famille toute une série de sources qui sont alimentées à la fois par de l'eau ayant circulé dans le substratum, et par de l'eau ayant circulé dans les formations quaternaires morainiques, dans des proportions telles qu'il n'était plus possible de les laisser dans l'une ou l'autre de ces familles.

Cette famille de sources peut paraître artificielle, mais en fait, il s'avère que les caractères physico-chimiques montrent une coupure naturelle assez nette entre les eaux des moraines et celles des sources à alimentation mixte; la coupure est moins nette entre les sources à alimentation mixte et celles du substratum, néanmoins il semble que les rapports caractéristiques permettent de les distinguer lorsque l'étude géologique ne le permet pas.

7.3.5.1. Localisation et conditions d'émergence

De très nombreuses sources appartiennent à cette famille et il serait fastidieux de toutes les décrire; nous en avons choisi quatre, assez typiques des sources mixtes, que nous présentons ici. Il s'agit de la source des Josserands aval, de celle de Fontaine Pelouze sud, de celle de Pré Court et de la source sous-lacustre; leurs coordonnées Lambert sont les suivantes :

Josserand aval	x = 871,84	y = 307,70	et z = 955 m
Fontaine Pelouze sud	x = 871,87	y = 305,22	et z = 930 m
Pré Court	x = 871,87	y = 307,70	et z = 950 m
Source sous-lacustre	x = 871,69	y = 304,57	et z = 920 m

Le source des Josserands aval émerge à l'est du lac de Laffrey, au milieu d'un amas de blocs erratiques qui surmontent un niveau argileux. Ses eaux ont circulé dans le Calcaire de Laffrey et peut-être même dans le Trias qui constituent la colline du Canier, elles émergent dans les formations morainiques à la faveur d'un accident N 30 E qui abaisse le compartiment ouest (voir la carte géologique fig. n° 5).

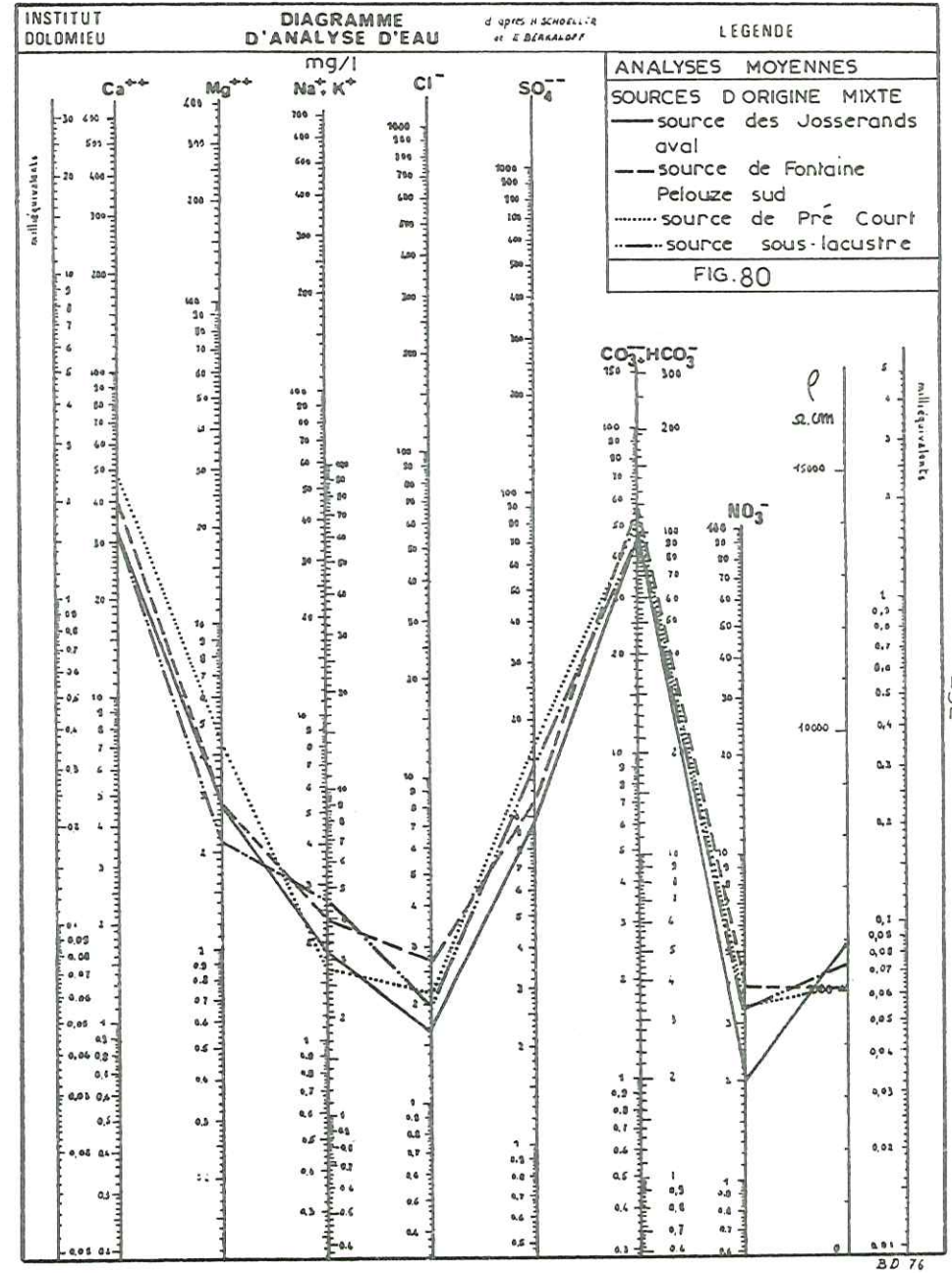
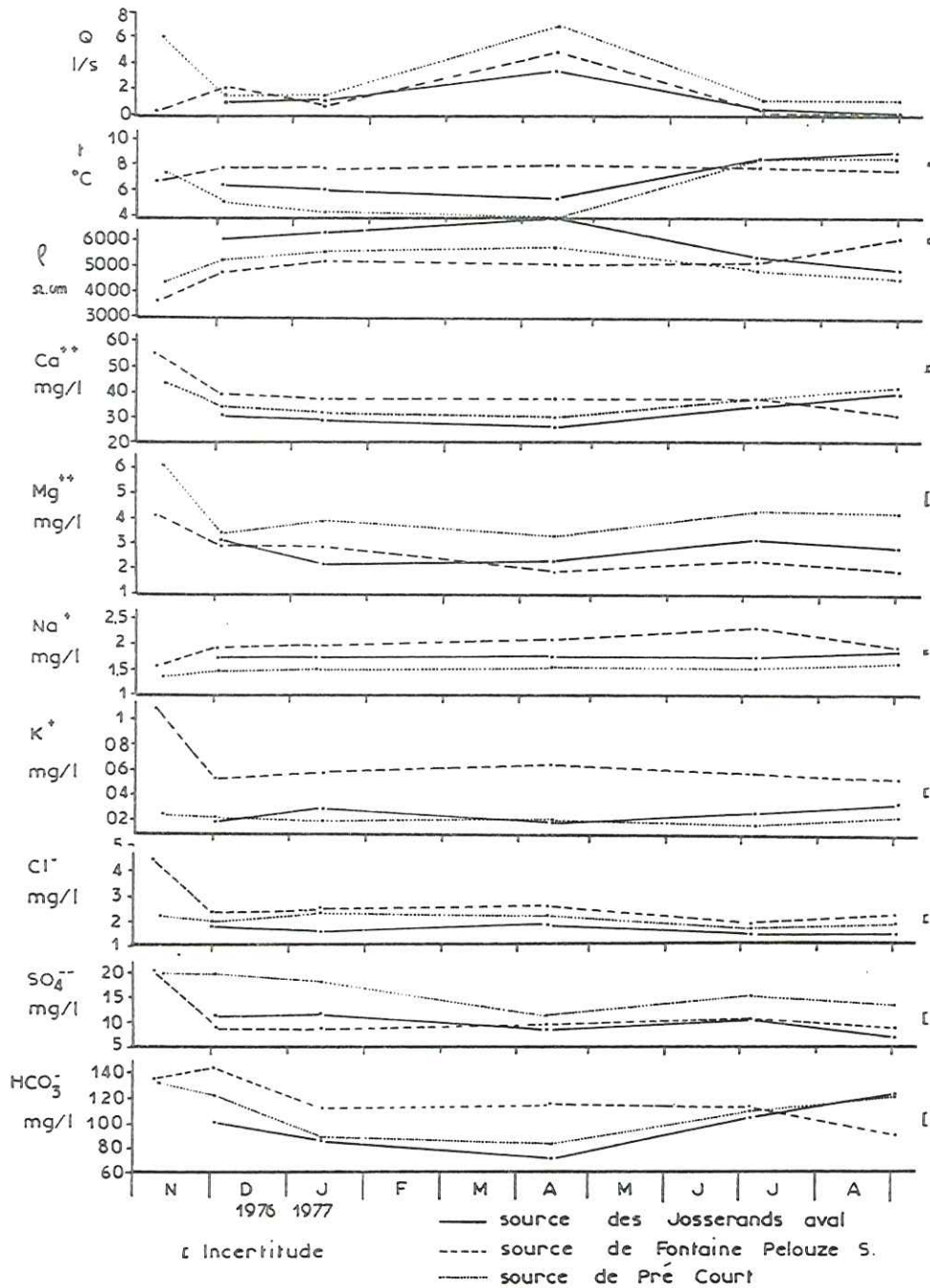
Les eaux se mélangent ensuite dans une très large proportion avec des eaux issues du remplissage morainique d'un petit sillon glaciaire.

La source de Fontaine Pelouze émerge à l'est du lac de Petichet, au pied d'un talus, à la limite entre le placage morainique sablo-caillouteux du versant et le remplissage du sillon glaciaire mis en évidence par l'étude géophysique (voir chap.2.2., fig. n° 15). Cette source serait due au trop plein de la nappe circulant dans le placage morainique qui se coince sous le remplissage moins perméable du sillon glaciaire. Une partie de l'eau proviendrait du substratum Aalénien qui se situe au niveau de l'émergence à une dizaine de mètres de profondeur (sondage électrique n° 25).

La source de Pré Court, située au nord est du lac de Laffrey, émerge à la base du Trias dolomitique dans lequel les eaux ont circulé par l'intermédiaire de larges diaclases ouvertes. Ces eaux proviennent en fait des placages morainiques qui surmontent ces affleurements, elles s'infiltrèrent ensuite dans le substratum mais leur trajet y est trop bref pour que les eaux présentent tout à fait les caractéristiques physico-chimiques de celui-ci.

La source sous-lacustre du lac de Petichet est située à une quinzaine de mètres de la rive est de ce lac. L'eau émerge au fond de plusieurs entonnoirs, creusés dans la vase lacustre qui recouvre un matériau morainique, à environ trois mètres de profondeur. Une partie de l'eau proviendrait

FIG. 79 SOURCES D'ORIGINE MIXTE
VARIATIONS DES PARAMETRES PHYSICO-CHEMIIQUES



du substratum mais il est difficile de préciser sa nature exacte.

7.3.5.2. Les débits (fig. n° 79)

Ils sont faibles ou importants suivant la source, mais leur caractéristique principale est leur variabilité, très forte, que les apports d'eau en provenance du substratum n'arrivent pas à diminuer. Cette variabilité est égale à 7 pour la source de Pré court, mais peut atteindre 60 pour la source de Fontaine Pelouze et même 100 pour celle des Josserands aval. Le débit de la source sous-lacustre n'a pas pu être mesuré, il semble très faible.

7.3.5.3. Les températures (fig. n° 79)

Les températures de ces sources sont normales pour les altitudes auxquelles elles émergent. Le domaine de variation de températures dépend lui, de la profondeur de circulation de l'eau et de la vitesse de circulation de celle-ci.

La source sous-lacustre et la source de Fontaine Pelouze ont des températures qui varient peu tout au long de l'année, ce qui est le signe d'une circulation profonde et lente.

Par contre les variations de températures très importantes des sources de Pré court et des Josserands aval indiquent des circulations assez superficielles et rapides.

7.3.5.4. Les résistivités (fig. n° 79)

Ces sources présentent une gamme de résistivité assez étendue qui va de 3 600 Ω .cm (Fontaine Pelouze à l'étiage automnal consécutif à la sécheresse de l'été 1976) à 7 000 Ω .cm (Les Josserands aval en période de hautes eaux).

La résistivité d'une manière générale reflète essentiellement la proportion de chaque mode d'alimentation, une faible résistivité indiquant un fort apport d'eau en provenance du substratum et inversement.

7.3.5.5. Chimie (fig.n° 79)

	18°C	pH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	N(NO ₃ ⁻)
Josserands mg/l	5930	7,6	32,4	2,75	1,77	0,26	1,66	9,8	97	0,46
aval m.équival/l			1,62	0,25	0,077	0,007	0,047	0,20	1,59	0,033
Fontaine Pelouze mg/l	5000	7,3	40,6	2,70	1,97	0,67	2,65	11	118	0,86
ze sud m.équival/l			2,03	0,22	0,086	0,017	0,075	0,23	2,46	0,061
Pré court mg/l	5053	7,6	37,1	4,22	1,53	0,21	2,07	16	109,5	0,78
m.équival/l			1,85	0,35	0,066	0,005	0,058	0,33	2,28	0,056
source sous lacustre mg/l	5330	7	31,9	2,44	2,33	0,67	1,99	14,4	96	0,77
m.équival/l			1,59	0,20	0,10	0,017	0,056	0,30	1,99	0,055

Tableau n° 62 . Compositions chimiques moyennes de quelques sources à alimentation mixte.

Le pH est assez peu caractéristique de ces sources, il se situe entre 7 et 7,6.

La minéralisation totale est moyenne, elle oscille entre 116 et 233 mg/l selon les proportions relatives d'eau du substratum et d'eau de la moraine.

Les ions majeurs sont le calcium et les bicarbonates.

Les concentrations moyennes de tous les ions sont en général légèrement plus faibles que les moyennes régionales, sauf pour les nitrates dont les concentrations sont assez élevées, ce qui est dû au lessivage de l'engrais des terres cultivées ou à des pollutions organiques.

Les concentrations varient tout au long de l'année; on observe une baisse des concentrations au printemps où l'apport des eaux superficielles d'origine morainique devient prépondérant. En automne, les apports en provenance du substratum devenant proportionnellement plus importants, les concentrations augmentent.

L'automne 1976, venant après la sécheresse très marquée de l'été, accentue encore ce phénomène et les concentrations se rapprochent de celles des eaux du substratum.

Les valeurs des rapports caractéristiques sont très variables comme le laissent supposer les origines très diverses de ces eaux :

r Ca / r Mg varie de 4 à 12, r SO₄ / r Cl varie de 2,5 à 7, r Na/r Cl

varie de 0,5 à 2 et $r \text{HCO}_3 / r \text{SO}_4$ varie de 4 à 13.

En résumé, les eaux des sources d'origines mixtes sont bicarbonatées calciques; leurs formules caractéristiques sont :

$r \text{Ca} \gg r \text{Mg} > r \text{Na} > r \text{K}$ pour les cations et
 $r \text{HCO}_3 \gg r \text{SO}_4 > r \text{Cl} \gg r \text{NO}_3$ pour les anions.

7.3.5.6. Conclusion

Les émergences des sources d'origines mixtes sont généralement situées dans les formations quaternaires morainiques, cependant elles peuvent exceptionnellement sortir du substratum après un trajet très court de celui-ci.

Leurs caractères physico-chimiques et l'étude géologique montrent que ces sources sont alimentées par des eaux provenant du substratum (probablement par l'intermédiaire de failles), et par des eaux ayant circulé dans les moraines.

Ce sont des eaux bicarbonatées calciques dont la résistivité moyenne est de 5 000 $\Omega \cdot \text{cm}$, les extrêmes pouvant aller de 3 600 à 7 000 $\Omega \cdot \text{cm}$ selon les proportions relatives de chaque type d'eau participant au débit total.

7.3.6. LES SOURCES DES FORMATIONS QUATERNAIRES A ELEMENTS SEDIMENTAIRES

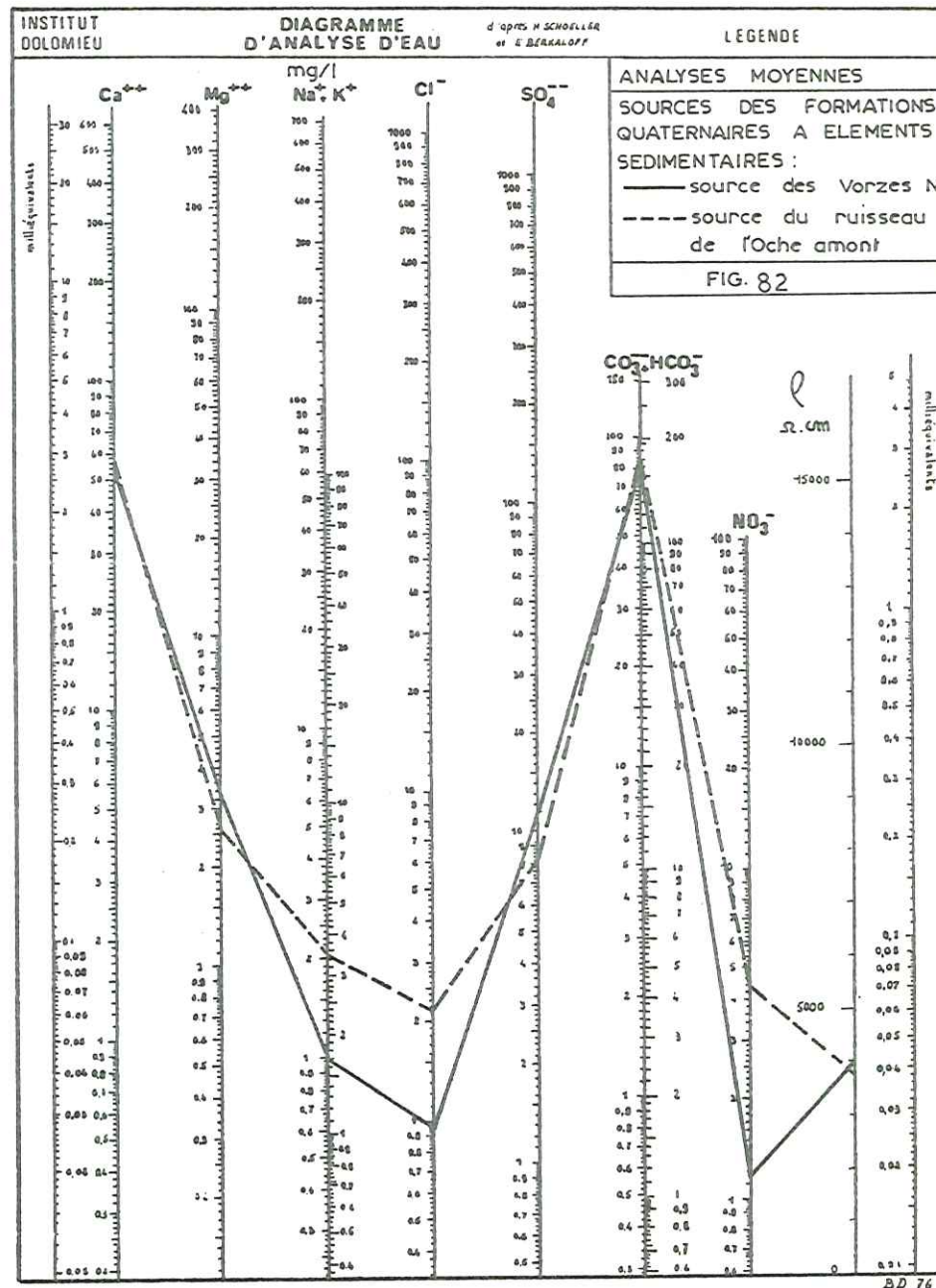
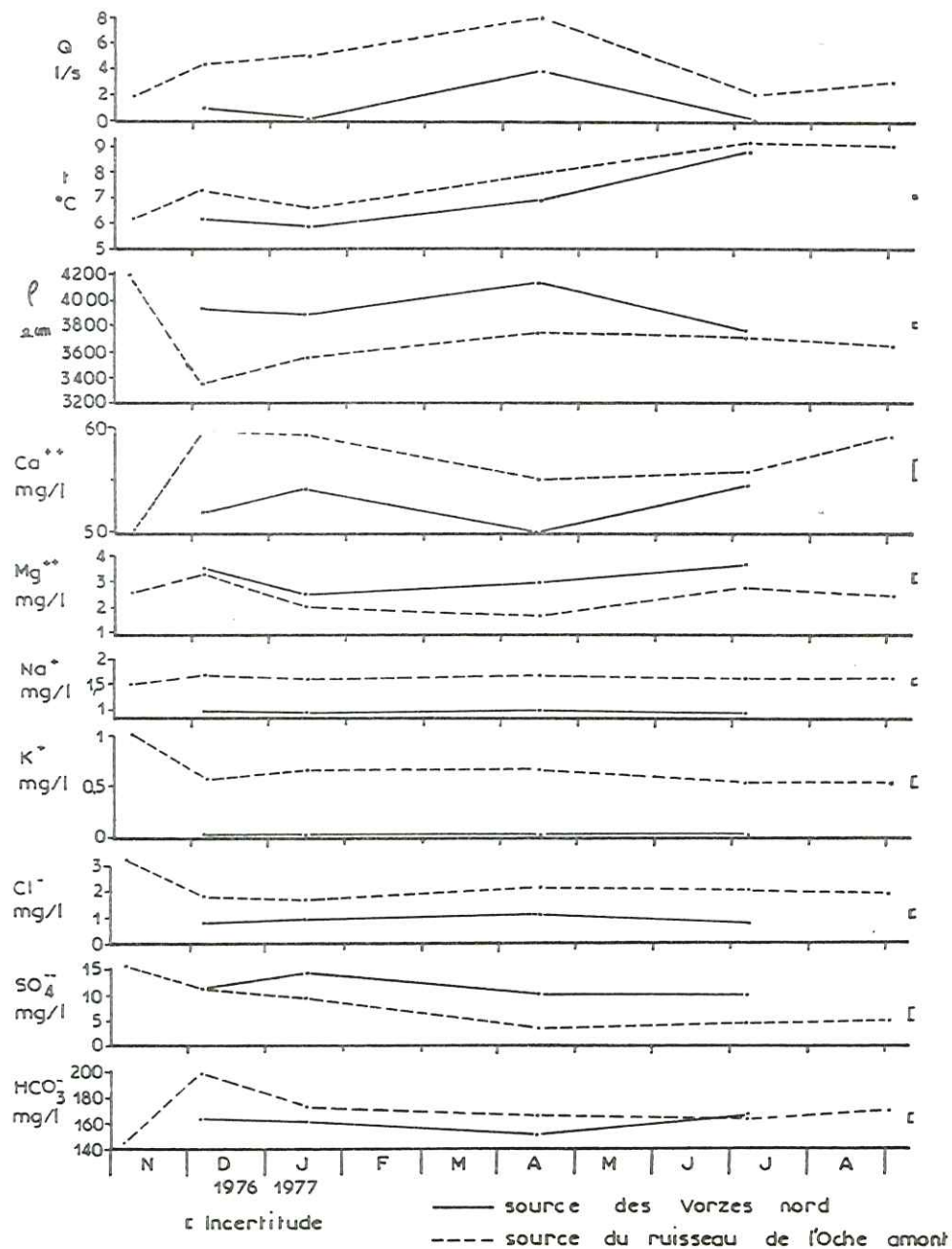
Nous avons classé dans cette catégorie toute une série de sources dont les eaux ont circulé dans des formations quaternaires à éléments sédimentaires (cônes de déjection, cônes mixtes), car elles présentent des caractères physico-chimiques particuliers.

7.3.6.1. Localisation et conditions d'émergence

Nous en avons choisi deux qui sont assez représentatives de l'ensemble de ces sources, il s'agit de la source des Vorzes nord et de la source du ruisseau de l'Oche amont. Leurs coordonnées Lambert sont :

Les Vorzes nord $x = 873,02$ $y = 305,67$ et $z = 1\ 090$ m
 Ruisseau de l'Oche
 amont $x = 872,76$ $y = 303,31$ et $z = 1\ 010$ m.

FIG. 81 SOURCES DES FORMATIONS QUATERNAIRES A ELEMENTS SEDIMENTAIRES
VARIATIONS DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES



La source des Vorzes nord, située au sud-est de Cholonge, émerge sur le cône de déjection du ruisseau de la combe de Chaupin. Ce cône est constitué d'éléments de calcaires marneux du Lias dauphinois très hétérométrique disposés en chenaux séparés par des lits plus argileux. Les eaux, qui proviennent de l'infiltration du ruisseau de la combe de Chaupin dans son cône de déjection, circulent préférentiellement dans les chenaux les plus perméables; l'émergence est liée à l'existence d'un lit argileux qui intercepte la topographie et oblige les eaux à ressortir.

La source du ruisseau de l'Oche, située à l'est du lac de Pierre-Châtel, émerge dans une petite combe entaillée dans les moraines würmiennes; elle donne naissance au ruisseau du même nom qui est grossi tout au long de son cours par des apports souterrains. Avant de ressortir au niveau de ces dépôts morainiques, les eaux ont circulé dans les terrasses fluvioglaciaires situées en amont et dans le remplissage du vallon entre Cholonge et Villard St Christophe, lesquels sont constitués en partie d'éléments du Lias dauphinois. Ces eaux proviennent à notre avis de pertes souterraines du bassin versant du ruisseau des Moulins, comme nous l'avons signalé au chapitre 4.

7.3.6.2. Les débits (fig. n° 81)

Ils sont importants pour la source du ruisseau de l'Oche (21/s à l'étiage, et encore ne s'agit-il là que du débit d'une seule des nombreuses émergences).

Les débits de la source des Vorzes par contre sont faibles (5l/mn à l'étiage).

Leur caractéristique commune est leur grande variabilité : de 4 pour Oche amont à 50 pour les Vorzes. Ils présentent un débit maximal au printemps, l'étiage étant en automne.

7.3.6.3. Les températures (fig. n° 81)

Elles varient assez peu tout au long de l'année, ce qui est le signe de circulations assez profondes (surtout pour la source du ruisseau de l'Oche). Le minimum est atteint en hiver et le maximum en été.

7.3.6.4. Les résistivités (fig. n° 81)

Les résistivités sont assez basses 3 700 à 3 900 Ω .cm en moyenne. Elles sont très stables tout au long de l'année (la forte valeur mesurée en novembre 76 pour la source du ruisseau de l'Oche étant probablement due à un mélange avec des eaux superficielles à l'émergence).

7.3.6.5. Chimie (fig. n° 81)

		18°C	pH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	N(NO ₃ ⁻)
Les Vorzes	mg/l	3940	7,9	52,6	3,28	0,98	0,075	0,95	11,42	161	0,26
nord	m.équival/l			2,62	0,27	0,043	0,002	0,027	0,24	2,64	0,019
Ruisseau de	mg/l	3703	7,9	56,7	2,57	1,65	0,71	2,14	8,3	170	0,99
l'Oche	amortm.équival/l			2,83	0,21	0,071	0,018	0,060	0,17	2,79	0,070

Tableau n° 63 . Compositions chimiques moyennes de deux sources des formations quaternaires à éléments sédimentaires.

Le pH de ces eaux est assez basique (7,9).

La minéralisation totale est élevée (de 217 à 280 mg/l).

Les deux ions dominants sont le calcium et les bicarbonates.

Le magnésium est présent à des concentrations assez faibles, ce qui donne au rapport r Ca/ r Mg des valeurs élevées allant de 8 à 18.

Les concentrations des ions Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄⁻⁻, sont normales, voire faibles pour la région; par contre les nitrates peuvent atteindre des concentrations assez élevées, comme c'est le cas pour la source du ruisseau de l'Oche.

Les variations des concentrations dans le temps sont très faibles sauf pour le calcium et les bicarbonates dont les teneurs baissent au printemps.

En résumé, comme le montre le diagramme de SCHOELLER de la figure n° 82, ces eaux sont bicarbonatées calciques; leurs formules caractéristiques sont les suivantes :

r Ca \gg r Mg > r Na > r K pour les cations et

r HCO₃⁻ \gg r SO₄⁻⁻ > r Cl⁻ \gg r NO₃⁻ pour les anions

7.3.6.6. Conclusion

Les sources issues des formations quaternaires à éléments sédimentaires sont bicarbonatées calciques et assez minéralisées. Les eaux circulent dans les zones les plus perméables de ces formations, constituées de chenaux; elles émergent lorsqu'un horizon plus argileux les oblige à réapparaître.

Leurs débits sont assez importants mais les variabilités sont fortes.

7.3.7. CONCLUSION A L'HYDROGEOLOGIE DESCRIPTIVE

Nous pensons avoir montré tout au long de ce chapitre, à travers la description de quelques sources, la diversité des types de sources rencontrées dans la région des lacs de Laffrey.

Nous allons dans le paragraphe suivant, essayer de regrouper les caractères principaux de ces familles de sources, et proposer ainsi une sorte de fiche signalétique de chacune de ces familles.

7.4. HYDROGÉOLOGIE COMPARATIVE

L'analyse des paramètres physico-chimiques des 35 sources qui ont été prélevées, en liaison avec leurs conditions géologiques d'émergences et de circulation, nous a permis de distinguer plusieurs familles de sources qui présentent des caractères qui leur sont propres.

L'annexe n° 3 présente la totalité des analyses effectuées sur les 35 sources; celles-ci sont classées suivant la famille de sources à laquelle elles appartiennent.

Nous avons résumé sous forme d'un tableau (n° 64), l'ensemble des caractéristiques physico-chimiques de ces familles de sources.

D'autre part, le report sur des diagrammes de SCHOELLER des analyses concernant chaque famille de sources, nous permet, en traçant la courbe qui enveloppe le domaine de variation du chimisme, d'obtenir une " image " de chaque famille (fig. n° 83 à 89).

Ces diagrammes permettent alors de déterminer l'origine d'une eau de source à partir de son analyse chimique.

Dans la pratique, nous nous sommes aperçus que certaines incertitudes

	Eaux issues du conglomérat houiller	Eaux issues du Houiller schisto-gréseux	Eaux du calcaire de Laffrey et du Lias dauphinois
Formules caractéristiques	$rMg > rCa > rNa > rK$ et $rHCO_3 \geq rSO_4 > rCl > rNO_3$	$rMg > rCa > rNa \gg rK$ $rSO_4 > rHCO_3 \gg rCl > rNO_3$ ou $rCa \geq rMg \gg rNa > rK$ $rHCO_3 > rSO_4 > rNO_3 \geq rCl$	$rCa > rMg \gg rNa > rK$ et $rHCO_3 > rSO_4 \gg rCl > rNO_3$
Résistivité à 18°C ($\Omega \cdot m$)	9500 à 14000	800 à 2600	2400 à 4600
Min. tot. = $\frac{a}{\rho} + b$		a = 946 000 b = - 24,4	a = 1013 126 b = - 36,2
Minéralisation totale mg/ l	50 à 73	330 à 1150	180 à 390
pH	6,8	6,5	7,5 à 8
rCa/rMg	0,7 à 0,8	0,7 à 1,2	3 à 4
rSO ₄ /rCl	8 à 9	20 à 400	6 à 30
rNa/rCl	1,6 à 2,1	3 à 40	0,6 à 2
rHCO ₃ /rSO ₄	1 à 1,3	0,6 à 6	8 à 25
Temp. Source/ Temp. moy. air	Légèrement supérieure	Très supérieure	Normale
Amplitude de var. des températures (°C)	2	1	3 à 4
Mode de circulation	Au niveau des zones fracturées	Zone fracturée diaclase (Galeries de mines)	Calc. Laffrey : diaclases Lias d. accidents tectoniques majeurs.
Conditions d'émergences	Par accident tectonique	Accident tectonique local (et galeries)	C.L. niveau de base hydrogéologique L.D. accident tectonique
Variabilité des débits	3	2	2

TABLEAU n° 64 - ELEMENTS POUR UNE CLASSIFICATION
DES SOURCES DU NORD DE LA MATHEYSINE

Eaux issues de l'Aalénien	Eaux issues des moraines du Würm	Eaux d'origine mixte	Eaux du IV à éléments sédimentaires.
$rCa \gg rMg > rNa > rK$ et $rHCO_3 \gg rSO_4 > rCl > rNO_3$	$rCa > rMg > rNa > rK$ et $rHCO_3 > rSO_4 > rCl \gg rNO_3$	$rCa \gg rMg > rNa > rK$ et $rHCO_3 \gg rSO_4 > rCl \gg rNO_3$	$rCa \gg rMg > rNa > rK$ et $rHCO_3 \gg rSO_4 > rCl \gg rNO_3$
2400 à 3300	9500 à 14000	3600 à 8900	2900 à 4400
a = 1003 650 b = -30,5	a = 776 426 b = + 0,6	a = 829 338 b = + 6,2	a = 896 248 b = + 2
270 à 380	55 à 90	95 à 230	205 à 315
7,4	7,1	7 à 7,6	7,5 à 7,9
12 à 30	3 à 30	4 à 14	8 à 18
4 à 7	1 à 5	0,7 à 11	1 à 11
0,9 à 1,5	1 à 2	1 à 2,5	0,75 à 2,5
10 à 20	2,5 à 6	4 à 30	4 à 29
Normale	Très légèrement sup.	Normale	Normale
3 à 4	Jusqu'à 6	Très variable	2 à 3
Accidents tectoniques majeurs	Chenaux intramorainiques perméables	Moraine + substratum	Chenaux de cônes de déjections.
Par accident tectonique	Niveau argileux	Niveau argileux ou remontée du substratum	Niveau argileux
6 à 15	3	Très élevée jusqu'à 100	Assez élevée 4 à 50

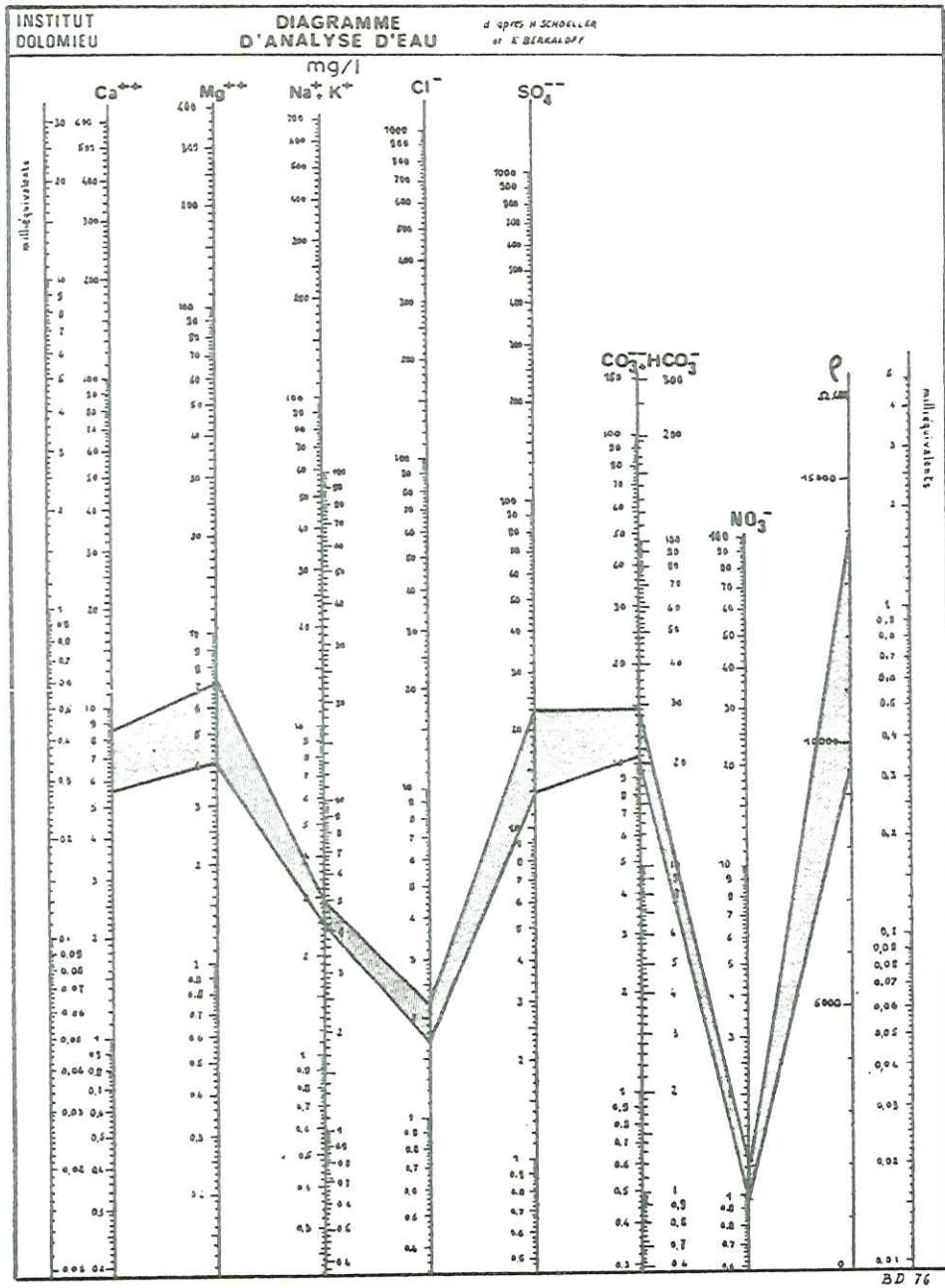


FIG. 83 EAUX ISSUES DU CONGLOMERAT HOUILLER

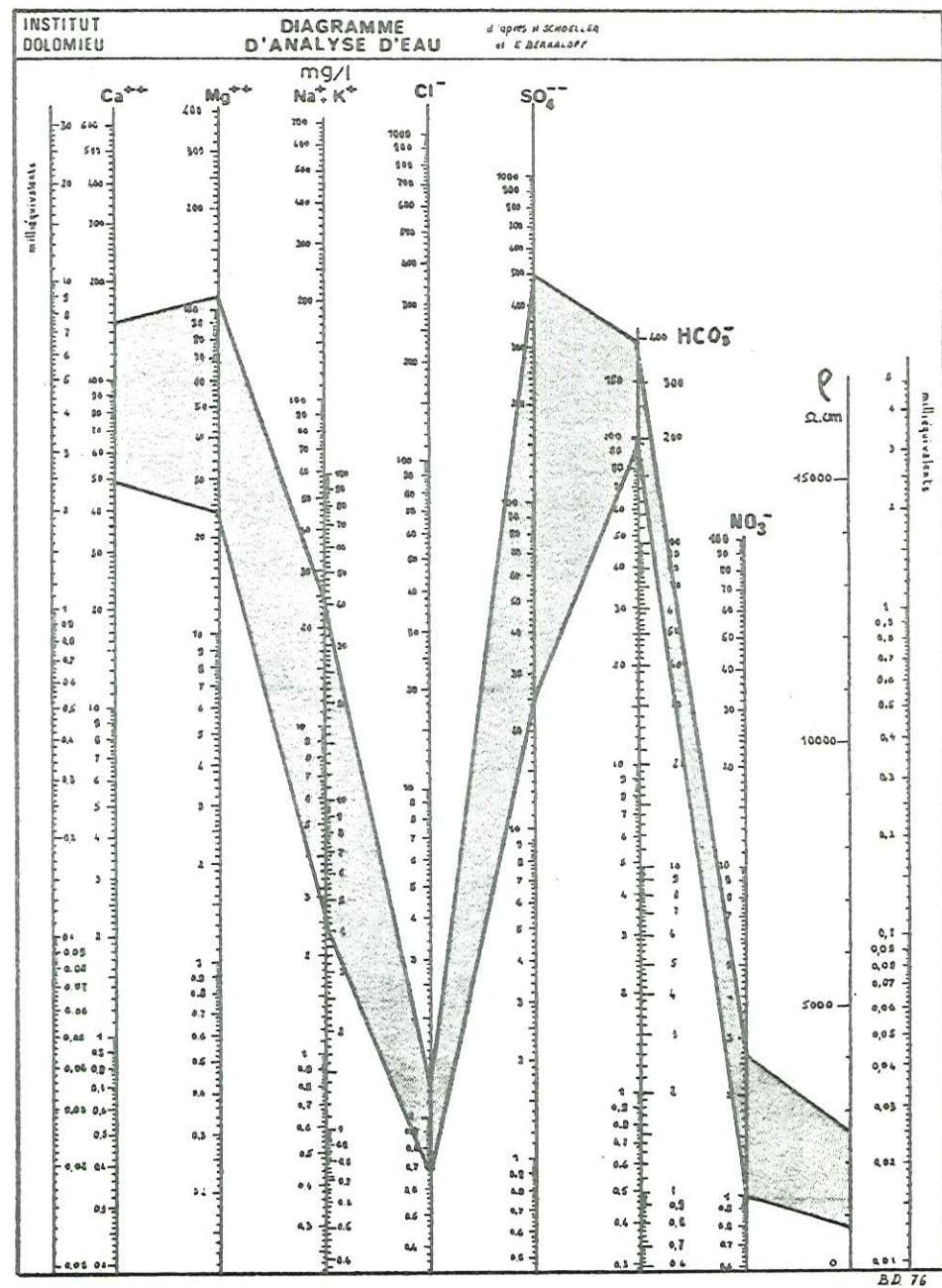


FIG. 84 EAUX ISSUES DES SCHISTES GRESEUX DU HOUILLER

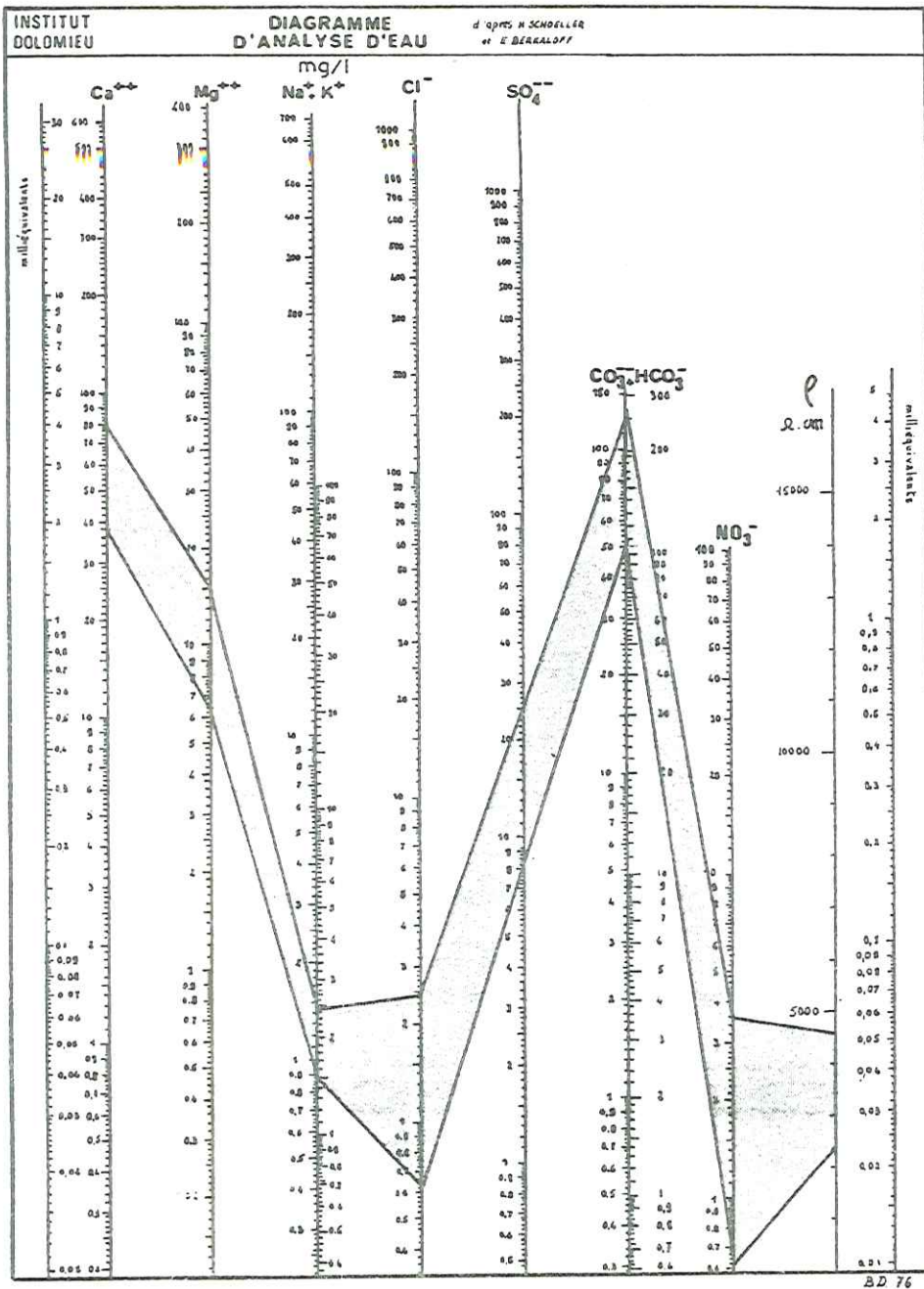


FIG. 85 EAUX ISSUES DU CALCAIRE DE LAFFREY
OU DU LIAS DAUPHINOIS

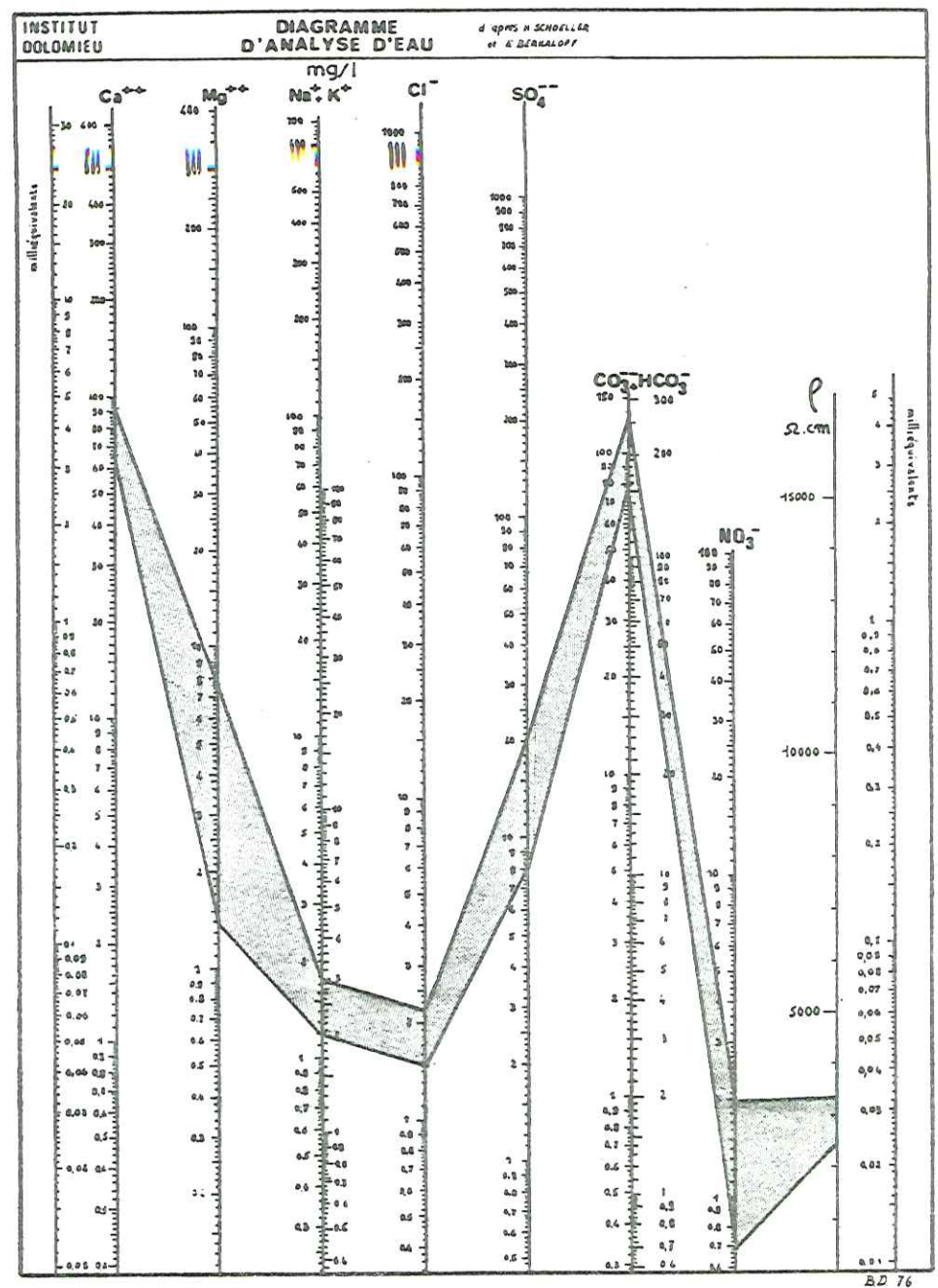


FIG. 86 EAUX ISSUES DE L'AALENIEN

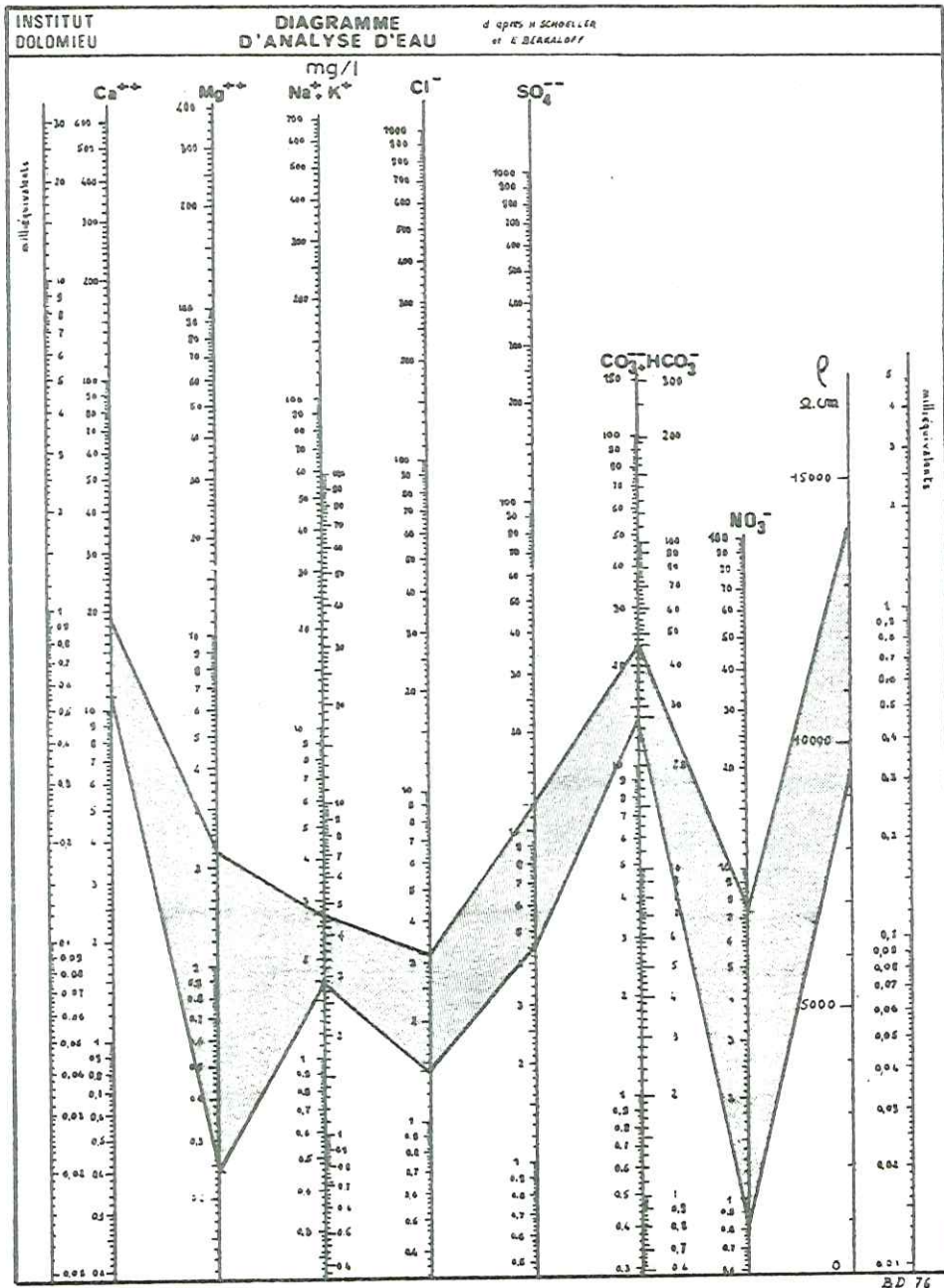


FIG. 87 EAUX ISSUES DES MORAINES WÜRMIENNES

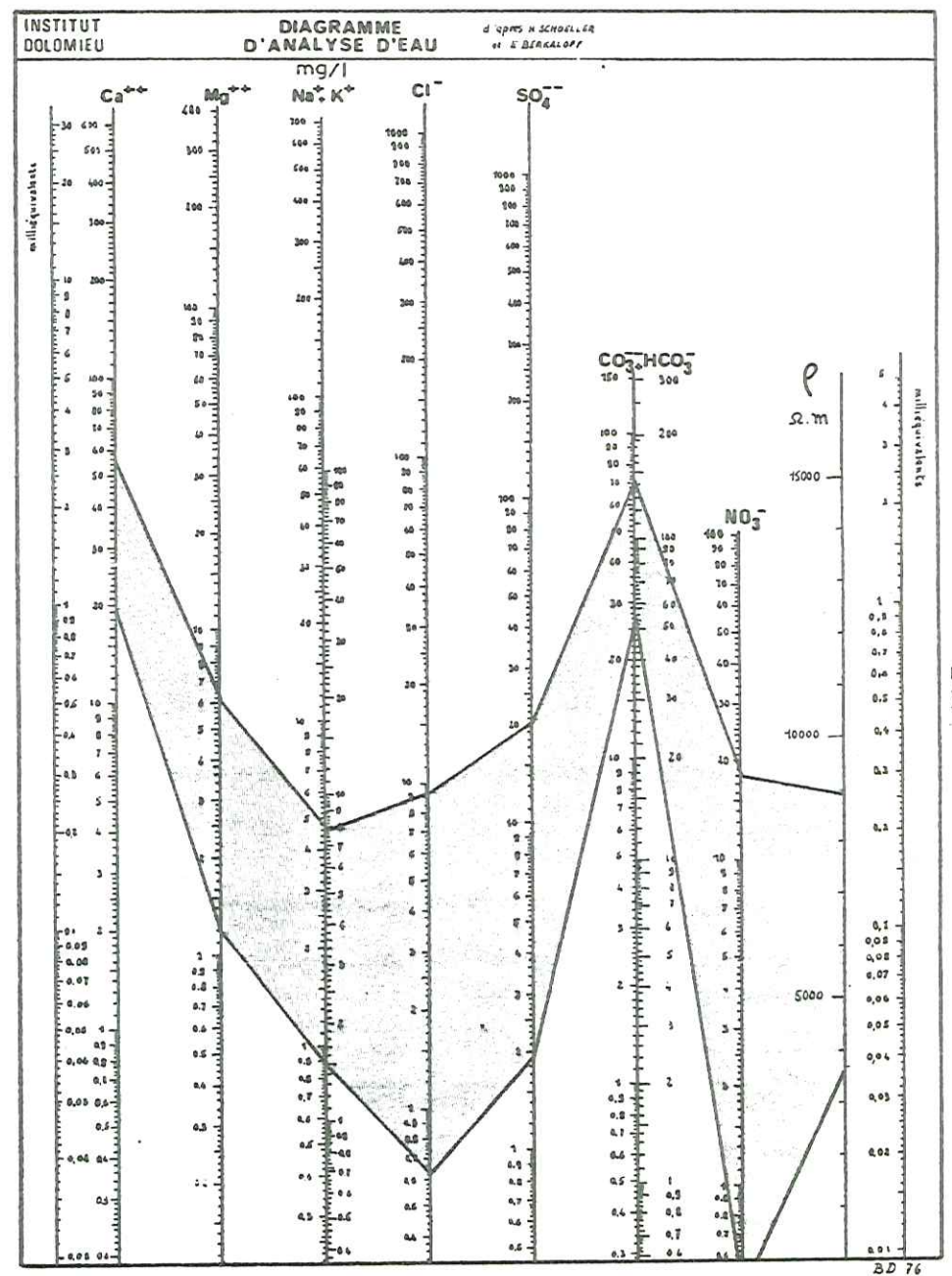


FIG. 88 EAUX D'ORIGINES MIXTES

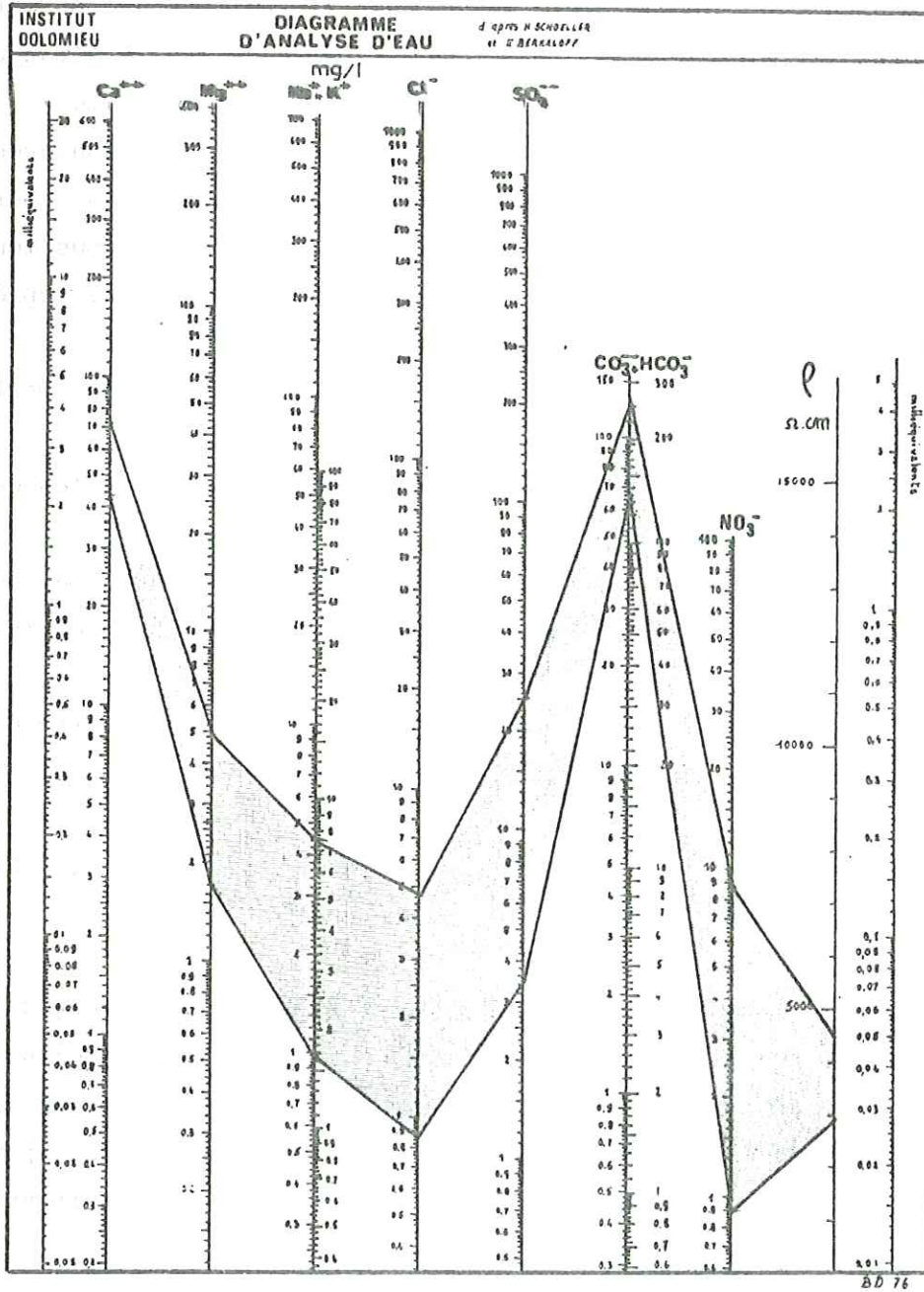


FIG. 89 EAUX ISSUES DES FORMATIONS QUATERNAIRES A ELEMENTS SEDIMENTAIRES

subsistaient car les " courbes enveloppes " de certaines familles de sources présentaient des domaines communs.

Nous avons donc été amenés à rechercher une méthode qui permettrait une meilleure discrimination entre les familles de sources. Le résultat de ces recherches a été la mise au point d'un nouveau type de diagramme.

Ayant remarqué que les concentrations et les rapports ioniques caractéristiques semblaient permettre une distinction entre certaines familles de sources, nous avons reporté sur un diagramme bilogarithmique les concentrations ioniques des eaux de source. Les rapports ioniques caractéristiques sont représentés sur un tel diagramme par des droites parallèles.

L'emploi des logarithmes n'a aucune signification chimique particulière, ils permettent seulement :

- de représenter sur un même diagramme des sources dont les concentrations sont très différentes,
- de représenter les rapports ioniques caractéristiques par des droites parallèles, au lieu de droites convergeant vers l'origine sur un diagramme arithmétique.

Nous avons reporté toutes les analyses chimiques sur quatre diagrammes représentant les rapports caractéristiques suivants :

$r \text{ Ca} / r \text{ Mg}$ (fig. n° 93), $r \text{ SO}_4 / r \text{ Cl}$ (fig. n° 91), $r \text{ Na} / r \text{ Cl}$ (fig. n° 92)
et $r \text{ HCO}_3 / r \text{ SO}_4$ (fig. n° 90).

Il apparaît alors que le diagramme qui permet la meilleure discrimination entre les différentes familles de sources est celui des concentrations en calcium et magnésium, sur lequel chaque famille de sources est représentée par un domaine distinct (voir la fig. n° 94). Ce diagramme devrait permettre de déterminer l'origine d'une eau de source à partir d'une simple analyse du calcium et du magnésium.

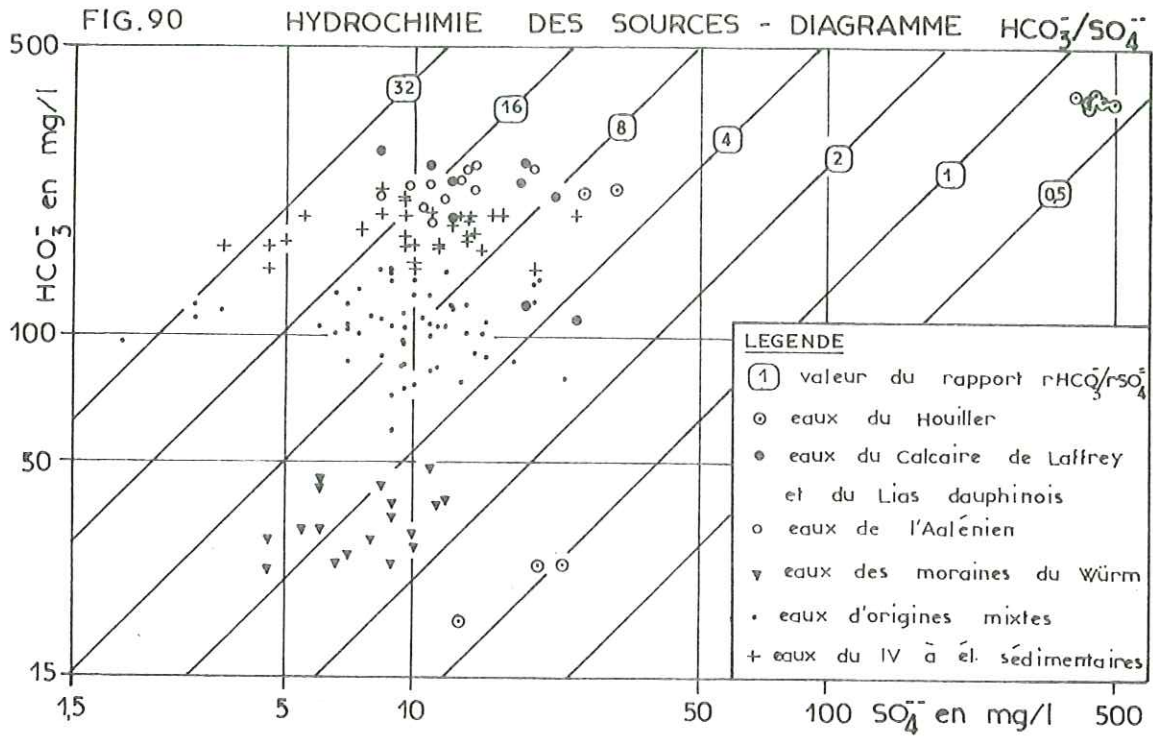


FIG.91 HYDROCHIMIE DES SOURCES
DIAGRAMME $\text{SO}_4^{--}/\text{Cl}^-$

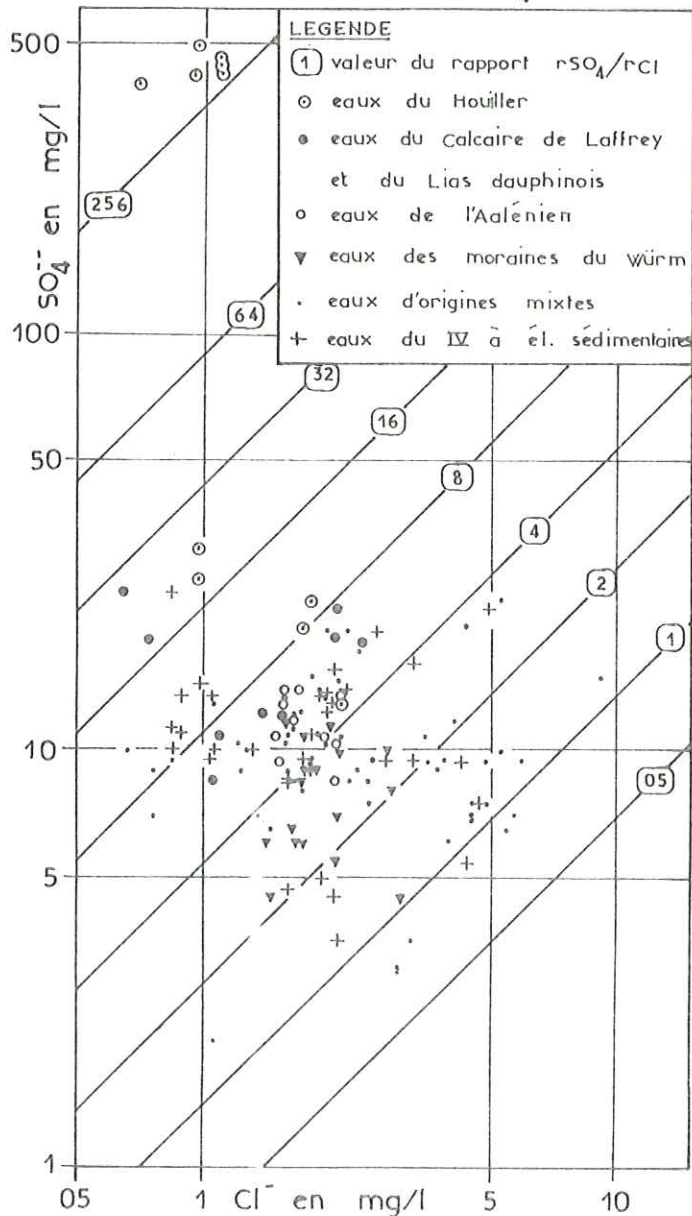


FIG.92 HYDROCHIMIE DES SOURCES
DIAGRAMME Na^+/Cl^-

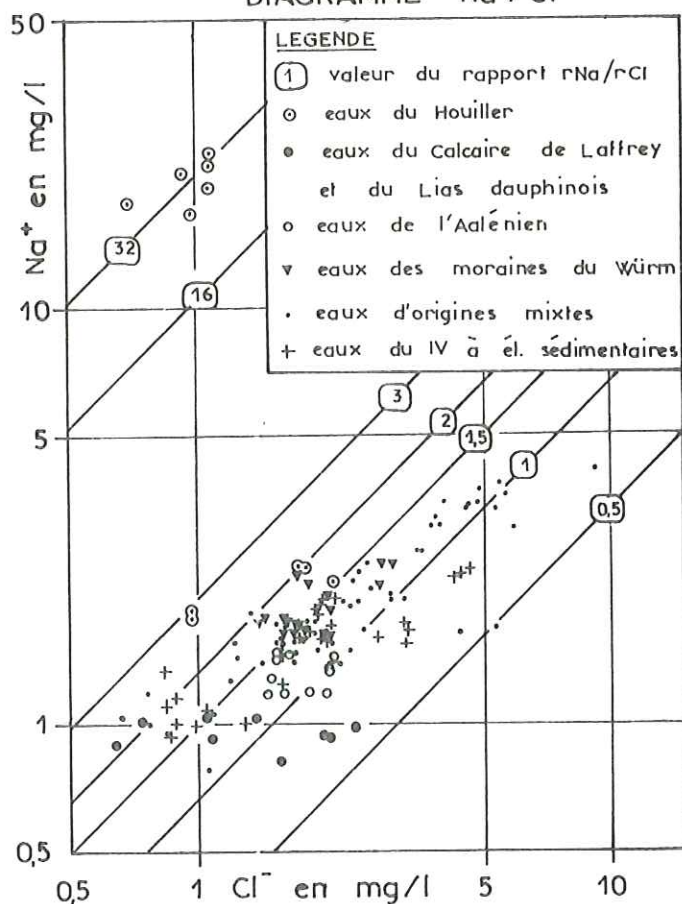


FIG.93 HYDROCHIMIE DES SOURCES - DIAGRAMME $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$

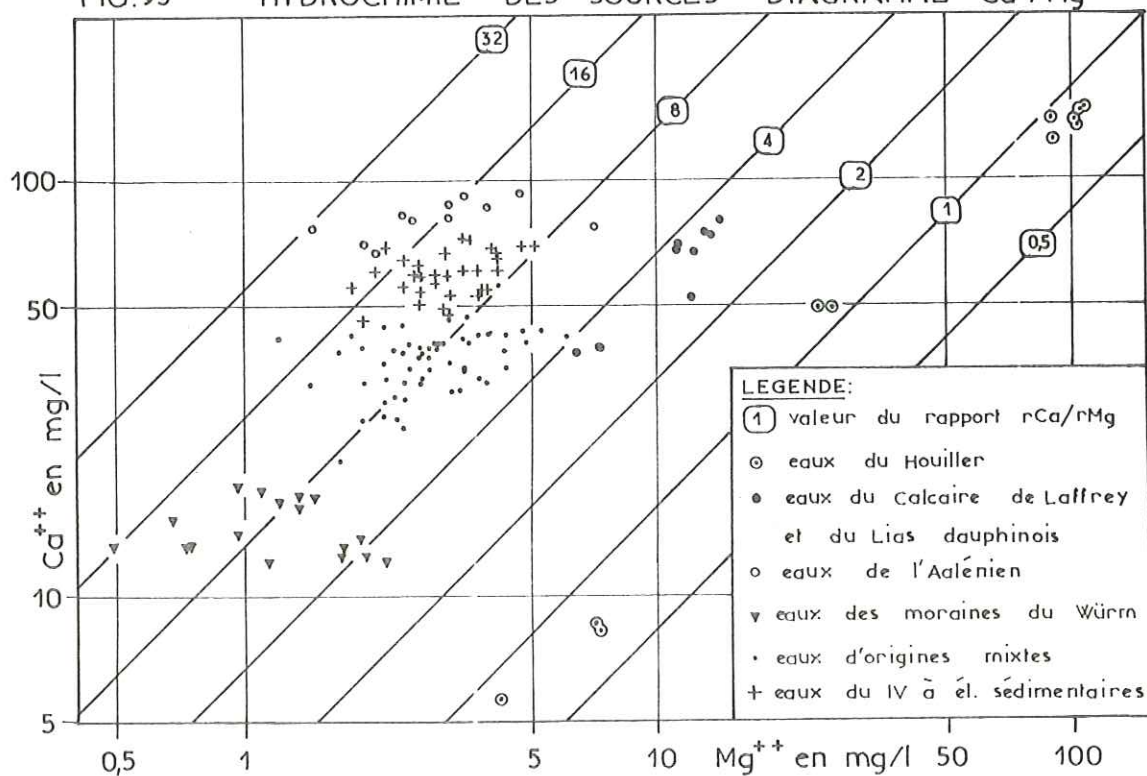
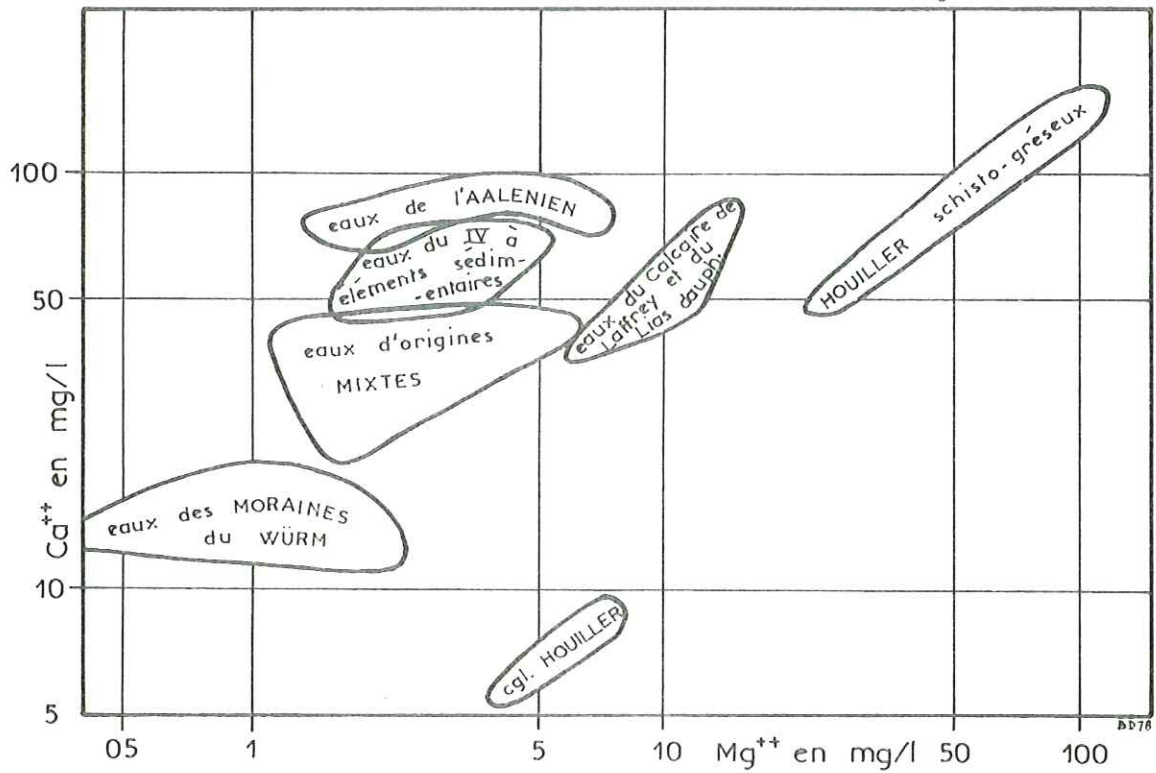


FIG. 94 REPARTITION DES DIFFERENTES FAMILLES DE SOURCES SUR UN DIAGRAMME $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$



7.5. CONCLUSION À L'ÉTUDE DES SOURCES

Au cours de cette étude nous avons constaté que la plupart des eaux de sources de la région des lacs de Laffrey sont peu différentes quant à leur composition chimique : elles sont toutes bicarbonatées calciques (sauf celles issues du Houiller).

Néanmoins une étude fine de la physico-chimie des eaux de 35 sources, en liaison avec les conditions géologiques d'émergences et de circulations, nous a permis d'établir une classification des eaux de sources.

Cette classification distingue sept grandes familles de sources suivant les terrains dans lesquels ont circulé les eaux.

Le rapport, sur des diagrammes de SCHOELLER et BERKALOFF, des analyses chimiques des eaux de chaque famille de sources, nous a permis, en traçant des " courbes enveloppes ", d'obtenir une " image " caractéristique de chaque famille.

Cependant à cause de la très grande similitude des compositions chimiques, cette méthode n'était pas totalement satisfaisante, aussi avons nous mis au point un nouveau type de diagramme qui permet une très bonne discrimination des grandes familles de sources.

Grâce à ce diagramme qui fait intervenir les concentrations en calcium et magnésium, l'origine des eaux d'une source de la région des lacs de Laffrey peut être identifiée par une simple analyse de ces deux éléments.

D'autre part nous avons montré :

- que la résistivité d'une eau permettait une bonne estimation de la minéralisation totale grâce à la relation de minéralisation-résistivité que nous avons établie,

- que chaque famille de source possède une relation minéralisation-résistivité qui lui est propre et qui pourrait être utilisée à l'avenir comme critère de classification.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Arrivés au terme de cette étude hydrogéologique du bassin versant des lacs de Laffrey et Petichet, il nous paraît utile de présenter ici les principaux résultats obtenus.

Le bassin versant des lacs de Laffrey et Petichet est un bassin de moyenne montagne (altitude moyenne 1 159 m), dont l'économie est basée sur l'agriculture et le tourisme.

Sa superficie réduite (17,37 km²) a permis d'y effectuer une étude hydrogéologique assez fine.

Nous nous sommes, dans un premier stade, intéressés à la géologie.

- L'étude géologique du substratum nous a montré que les dépôts sédimentaires, qui vont du Westphalien D au Dogger, et les micaschistes sur lesquels ils reposent, ne jouent pas un rôle très important dans les circulations souterraines, seules les zones ayant subi un broyage tectonique intense permettent des circulations d'eau qui semblent, cependant, dans tous les cas, assez limitées.

- L'étude géophysique par sondages électriques nous a permis de déterminer la forme et la nature du substratum dans les zones où elles étaient masquées par le recouvrement quaternaire.

Elle a permis de déterminer la forme des sillons glaciaires qui existent entre les lacs; il apparaît alors, que seuls les sillons situés entre le lac de Petichet et celui de Laffrey, sont susceptibles de par leurs formes, de permettre des circulations souterraines que nous n'avons toutefois pas pu chiffrer.

- L'étude morphologique des formations quaternaires du nord de la Matheysine a permis d'identifier les principaux éléments morphologiques liés aux glaciers; la majeure partie des dépôts glaciaires serait à attribuer à la difflueance würmienne du glacier de la Romanche en Matheysine (G. MONTJUVENT).

Grâce à la très bonne conservation de la morphologie des moraines würmiennes nous avons pu proposer un schéma cohérent, des stades de retrait glaciaire et des modalités de dépôts.

- L'étude lithologique des formations quaternaires a mis en évidence leur très grande perméabilité ainsi que leur homogénéité. Ces deux caractéristiques font que ces formations sont le siège de circulations souterraines importantes.

Nous avons, dans un deuxième stade, effectué une étude hydroclimatique du bassin versant durant la période octobre 1976 - septembre 1977, qui a permis de préciser les paramètres suivants :

- la période étudiée est très excédentaire quant aux précipitations (année décennale humide),
- la lame d'eau précipitée est égale à 1 538 mm,
- l'hygrométrie moyenne annuelle est élevée (83 %),
- la température moyenne annuelle est de 4,5 °C,
- l'évapotranspiration calculée par diverses méthodes s'élève à 480 mm.

L'étude hydrologique que nous avons entreprise dans un troisième stade, après avoir souligné le caractère excédentaire de la période étudiée, s'est intéressée au problème des réserves souterraines.

Nous avons pu montrer grâce à l'étude de très nombreuses courbes de tarissement que le bassin versant du ruisseau des Moulins comportait des possibilités de stockage très importantes (700 000 m³), vue sa superficie réduite.

D'autre part, les calculs de bilans hydrologiques, tant à l'échelle pluriannuelle que pour l'année étudiée, mettent en évidence les pertes que subit le bassin versant. Celles-ci s'élèvent en moyenne à plus de 4.10^6 m³/an qui s'écouleraient vers l'extérieur du bassin au travers du remplissage quaternaire du vallon situé entre Cholonge et Villard St Christophe.

Nous avons ensuite abordé l'étude du milieu lacustre, tout d'abord en analysant finement les paramètres physico-chimiques des eaux des lacs ainsi que leurs variations dans le temps et dans l'espace, puis en étudiant quantitativement les apports chimiques aux lacs.

Les paramètres physico-chimiques des eaux lacustres présentent des variations dans le temps et dans l'espace qui sont le reflet de l'activité biologique.

L'étude plus fine de ces variations de concentrations a montré que l'activité biologique est plus intense dans le lac de Petichet que dans le lac de Laffrey. D'autre part, le niveau trophique des lacs déterminé au cours de cette étude est critique : le lac de Petichet en est à un stade mésotrophe assez avancé alors que le lac de Laffrey n'en est qu'à un stade mésotrophe peu avancé.

Nous avons recherché l'origine de cette eutrophisation en étudiant les apports en éléments chimiques que reçoit chaque lac. Ces apports parviennent aux lacs par différentes voies (ruissellement, pollution, précipitations atmosphériques) dont nous avons calculé le taux de participation.

Il est apparu que les lacs recevaient des charges en azote et en phosphore généralement considérées comme dangereuses provenant essentiellement de l'activité humaine et agricole.

Le calcul montre que ces apports pourront être réduits jusqu'à un taux admissible grâce aux travaux d'assainissements entrepris.

Enfin nous avons entrepris une étude des sources dans laquelle, grâce à l'analyse des paramètres physico-chimiques des eaux, en liaison avec les conditions géologiques d'émergence et de circulation, nous avons pu distinguer sept familles de sources.

Les compositions chimiques de ces eaux de sources étant très voisines (bicarbonatées calciques) le diagramme de SCHOELLER et BERKALOFF n'a pas permis une discrimination réellement satisfaisante des différentes familles de sources; c'est pourquoi nous avons mis au point un nouveau type de diagramme qui fait intervenir les concentrations en calcium et magnésium, et qui permet à partir de l'analyse de ces deux éléments de déterminer l'origine d'une eau.

Cette classification des sources, suivant la nature du terrain dans lequel l'eau a circulé, présente un intérêt pratique certain lors d'un projet de captage dans la mesure où les débits et les qualités chimiques et sanitaires d'une eau sont liés au mode de circulation et à la nature des terrains traversés.

En résumé, bien que notre travail n'ait pas résolu tous les problèmes qui se sont présentés en cours d'étude, nous espérons qu'il contribuera à une meilleure connaissance de l'hydrogéologie de la région des lacs de Laffrey et en facilitera ainsi l'aménagement et la conservation.

Sur un plan plus général nous espérons que le lecteur aura perçu à travers notre démarche de recherche que la résolution de problèmes hydrogéologiques locaux passe nécessairement par une étude approfondie du cadre général.

BIBLIOGRAPHIE

- AMINOT A. (1974) : Géochimie des eaux d'aquifères karstiques. Les analyses chimiques en hydrogéologie karstique. Annales de spéléologie. Tome 29. Fasc. 4.
- ARMAND C. (1978) : Régime des eaux souterraines et paléomorphologie, géologie et hydrogéologie de la basse vallée de l'Arve (Haute-Savoie). Thèse de 3e cycle, Grenoble.
- ARMAND C. & DELAQUAIZE B. (1977) : Analyse physicochimique des eaux Mémento pratique. Publication interne du laboratoire d'hydrogéologie de l'Institut Dolomieu.
- ASTIER J.-L. (1971) : Géophysique appliquée à l'hydrogéologie. Masson éditeur, Paris.
- BAKALOWICZ M. (1974) : Géochimie des eaux d'aquifères karstiques, relation entre minéralisation et conductivité. Annales de spéléologie. Tome 29, Fasc. 2.
- BAKALOWICZ M. (1975) : Variation de la conductivité d'une eau en fonction de la température et précision des mesures. Annales de spéléologie. Tome 30. Fasc. 1.
- BARFETY J.-C., GIDON M., HAUDOUR J. & J. SARROT-REYNAULD J. (1970) : Nouvelles observations sur les conditions de sédimentation du Trias et du Lias du dôme de la Mure et de la chaîne de Belledonne méridionale. Géologie Alpine, Tome 46.
- BECKER J. (1952) : Etude palynologique des tourbes flandriennes des Alpes françaises. Thèse d'état. Université de Strasbourg.
- BENEDETTI-CROUZET E. (1972) : Etude géodynamique du lac d'Annecy et de son bassin versant. Thèse de 3e cycle. Université de Paris VI. C.R.G. Thonon.
- BHATTACHARYA P. K. & PATRA H. P. (1968) : Methods in geochemistry and geophysics. Direct current geoelectric sounding, Tome 9. Elsevier.
- BLANCHARD R. (1941) : Les Alpes occidentales. Les cluses préalpines et le sillon alpin. Tome 2, Arthaud éditeur à Grenoble.
- BOUTIN C. (1976) : Evolution et destruction de la stratification thermique estivale d'un lac. Société hydrotechnique de France, XIVE journée de l'hydraulique, Paris.
- BREISTROFFER M. (1942) : Rapport géologique sur un projet de captage de sources présenté par la commune de St-Théoffrey - Inédit - Institut Dolomieu, Grenoble.
- BREMOND M.-R. (1976) : Note technique sur la mesure de la qualité des eaux. XIV journées de l'hydraulique. Supplément houille blanche n° 8.
- BRETSCHKO G. (1976) : Reaction of a relative simple lake-ecosystem to human impacts. Extrait du colloque Pollution, ecology in fresh water. Commission of the european communities. Ispra (Italy).
- CAMPOROTA P. (1963) : Etude hydrogéologique de la région de la Mure. Thèse de 3e cycle, Grenoble.
- CASTANY G. (1967) : Traité pratique des eaux souterraines. Dunod Editeur.

- CASTANY G. (1967) : Introduction à l'étude des courbes de tarissement. B.R.G.M. Chronique d'hydrogéologie n° 10 (mars).
- CHASSAING B., OLIVE P., PELLETIER J.-P. & SIWERTZ E. (1975) : Evolution bio-géochimique du lac Léman de 1957 à 1973 (III). Archives des sciences de Genève - Vol. 28 - Fasc. 2.
- COLLIGNON M. & SARROT-REYNAULD J. (1960) : Succession des zones d'ammonites du Lias dans le dôme de la Mure (Isère) et ses bordures. Mémoires du B.R.G.M. - Extrait du colloque sur le Lias français - Chambéry.
- DELAQUAIZE B. (1975) : Etude hydrogéologique de la région de la Beaume (sud de la Mure). Etude préliminaire des conséquences du percement de la galerie de la Beaume. Rapport inédit H.B.C.M. La Mure.
- DELAQUAIZE B. (1978) : Etude géophysique par sondages électriques du bassin versant des lacs de Laffrey et Petichet - Rapport inédit D.D.A. de l'Isère.
- DELEBECQUE A. (1893) : Lacs du Dauphiné. Annuaire de la société des touristes du Dauphiné.
- DELEBECQUE A. (1898) : Les lacs français. Chamerot et Renouard, éditeurs à Paris.
- DUSSART B. (1966) : Limnologie, l'étude des eaux continentales. Gauthier-Villars Editeur à Paris.
- DUTRUY S., JOST J. & BALLAND P. (1976) : Assainissement du bassin versant du lac du Bourget ; mesure et élimination des apports. Société hydrotechnique de France. XIV journées de l'hydraulique. Paris.
- FOURNEAUX J.-C. & SARROT-REYNAULD J. (1977) : Déficit d'écoulement et évapotranspiration dans les Alpes du nord. 102^{ème} congrès des sociétés savantes - Limoges.
- GACHET M., SERRA-TOSIO B. & TETART J. (1974) : Etudes physico-chimiques et planctonologique quantitatives du Grand lac de Laffrey (années 1970, 1971 et 1973). Travaux du laboratoire d'hydrobiologie de Grenoble. Tome 64-65.
- GAY C. (1976) : Contribution à l'étude écologique et à l'aménagement d'un lac de montagne : le lac de Petichet (Isère). Thèse de 3e cycle - Grenoble.
- GIDON M., MONTJUVENT & STEINFATT E. (1968) : Sur la morphologie fluvioglaciaire aux marges des glaciers würmiens alpins. Le dispositif moraine - chenal marginal. Bulletin de l'association française pour l'étude du Quaternaire. Tome 2.
- GIGNOUX M. (1913) : Rapport sur les conditions géologiques des sources que la commune de Cholonge se propose de capter pour l'alimentation publique. Inédit, Institut Dolomieu.
- GOLTERMAN H. L. (1976) : Chemical and physical method to detect and control pollution from an ecological point of view. Tiré du colloque : Pollution, ecology in fresh water. Commission of the european communities, Ispra (Italy).
- HAUBERT M. (1975) : Bilan hydrochimique d'un bassin versant de moyenne montagne. La Dranse de Bellevaux (Brévon) Haute-Savoie. Thèse de 3e cycle. Université Pierre et Marie Curie - Paris - C.R.G. Thonon.

- HAUBERT M., SIWERTZ E., CHASSAING B. & OLIVE P. (1975) : Apports en nutriments au lac Léman pour la période 1963-1972 II, Archives des sciences de Genève. Vol. 28 ; Fasc. 1.
- HAUDOUR J. et SARROT-REYNAULD J. (1959) : Remarques sur l'importance relative des divers types de failles rencontrées dans le bassin houiller de la Mure. Travaux du laboratoire de géologie de la faculté de sciences de Grenoble. Tome 35.
- HAUDOUR J. & SARROT-REYNAULD J. (1960) : Stratigraphie du Lias du dôme de la Mure. Variétés de faciès entre le dôme de la Mure et ses bordures. Extrait du colloque sur le Lias français. Chambéry 1960. Mémoires du B.R.G.M.
- HUTCHINSON G.E. (1957) : A treatise on limnology. Wiley and Sons, London.
- JAIL M. et MARCHINI J. (1977) : Observations météorologiques dans le département de l'Isère pour l'année 1976. Revue de géographie alpine 77, Tome 3.
- JAIL M. & MARCHINI J. (1978) : Observations météorologiques dans le département de l'Isère pour l'année 1977. Revue de géographie alpine 78, Tome 3.
- JEREMIE J.-J. (1976) : Contribution à l'étude des paramètres hydrologiques de la région lémanique. Thèse de 3e cycle. Université de Paris VI. Thonon C.R.G.
- JEREMIE J.-J. & OLIVE P. (1976) : Les précipitations autour du Léman de 1901 à 1974, mise en évidence d'un rythme de 50 ans. Archives des sciences de Genève. Vol. 29, Fasc. 2.
- LEPILLER M. (1976) : Résultats de mesures de précipitations sur le massif du Semnoz. Annexe au Bulletin climatique mensuel de la Haute-Savoie, janvier.
- LETOURNEUR J. & MICHEL R. (1971) : Géologie du génie civil. Armand Colin, éditeur à Paris.
- LORY P., MORET L. et LUGEON M. (1929) : Rapport géologique préliminaire sur l'aménagement des lacs de Laffrey, de Petichet et de Pierre-Château. Rapport inédit. Institut Dolomieu.
- LUGRIN M. (1972) : Premières données sur les matières organiques dans le lac Léman. IIe colloque sur la pollution et la protection des eaux de la région Rhône-Alpes. Lyon.
- MARTIN N. (1969) : Etude préalable à l'aménagement rural des secteurs de la Mure, Corps, Valbonnais. Extrait des études d'aménagement rural. D.D.A. de l'Isère.
- MICHEL M. (1971) : Hydrogéologie du bassin versant de Theys (Isère). Thèse de 3e cycle, Grenoble.
- MINISTERE DE L'AGRICULTURE (1970) : Résultats du recensement général de l'agriculture de 1970. Département de l'Isère.
- MINISTERE DE LA QUALITE DE LA VIE (1973) : Analyse des eaux, méthodes et instructions. Direction de la prévention des pollutions et des nuisances.
- MISEREZ J.-J. (1973) : Géochimie des eaux du karst jurassien. Thèse de doctorat ès-Sciences - Neuchâtel.

- MONTJUVENT G. (1969) : Nouvelles datations absolues dans les formations quaternaires du sillon alpin méridional. *Revue de géographie alpine*. Tome 57, fasc. 3.
- MONTJUVENT G. (1978) : Le Drac, morphologie, stratigraphie et chronologie quaternaire d'un bassin alpin. Thèse d'état, Grenoble.
- MORET L. (1929 & 1930) : Trois rapports géologiques sur des projets d'adduction de sources présentes par les communes de Cholonge et St-Théoffrey. Rapports inédits. Institut Dolomieu.
- MUXART T. & BIROT P. (1977) : L'altération météorique des roches. Publication du département de géographie de l'Université de Paris sorbonne.
- OLIVE P. (1972) : Evolution de facteurs biotiques (transparence et oxygène) et abiotiques (azote minéral et phosphore total) dans le Léman de 1957 à 1972. IIe colloque sur la pollution et la protection des eaux de la région Rhône-Alpes. Lyon.
- OLIVE P. (1974) : Eléments de climatologie - C.R.G. Thonon.
- OLIVE P. (1976) : Le système $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{CaCO}_3$ memento pratique - C.R.G. Thonon.
- PAPPINI G. (1976) : Hydrogéologie du bassin versant du haut-Gelon - Savoie - Thèse de 3e cycle - Grenoble.
- PIRAUD V. (1923, 1927 et 1932) : Quatre rapports sur les conditions géologiques de sources pour les communes de Laffrey, Cholonge et St-Jean-de-Vaulx. Rapports inédits, Institut Dolomieu.
- RODIER J. (1960) : L'analyse chimique et physico-chimique de l'eau : eaux naturelles, eaux usées. Dunod éditeur à Paris.
- SARROT-REYNAULD J. (1956) : Les minerais métalliques et les sources minérales de la région de la Mure. Travaux du laboratoire de géologie de la faculté de sciences de Grenoble.
- SARROT-REYNAULD J. (1958) : Manifestations d'un métamorphisme post-Stéphanien dans le dôme de la Mure (Isère). Extrait des comptes-rendus du congrès des sociétés savantes, Aix et Marseille.
- SARROT-REYNAULD J. (1959) : Remarques sur l'importance relative des divers types de failles rencontrées dans le bassin houiller de la Mure. Travaux du laboratoire de géologie de la faculté de sciences de Grenoble. Tome 35.
- SARROT-REYNAULD J. (1960) : Le Lias dauphinois et le Lias du dôme de la Mure. Extrait du colloque sur le Lias français, Chambéry - Mémoires du B.R.G.M.
- SARROT-REYNAULD J. (1961) : Trias du dôme de la Mure et des régions annexes. Mémoires du B.R.G.M. - Extrait du colloque sur le Trias de la France et des régions limitrophes, Montpellier.
- SARROT-REYNAULD J. (1961) : Trias des zones externes des Alpes françaises. Mémoires du B.R.G.M. - Extrait du colloque sur le Trias de la France et des régions limitrophes, Montpellier.
- SARROT-REYNAULD J. (1961) : Le glaciaire et le fluvioglaciaire du Drac et de la Romanche à la périphérie du dôme de la Mure. Travaux du laboratoire de géologie de la faculté des sciences de Grenoble. Tome 37.

- SARROT-REYNAULD J. (1961) : Etude géologique du socle cristallin et de la couverture paléozoïque du dôme de la Mure et des régions annexes.
Etude géologique de la couverture mésozoïque et de la tectonique du dôme de La Mure (Isère) et des régions annexes. 1ère et 2ème thèse de doctorat ès-sciences.
- SARROT-REYNAULD J. (1965) : Style tectonique et morphologie de la bordure occidentale de la chaîne de Belledonne au sud d'Allevard. Extrait des travaux du laboratoire de géologie de la faculté des sciences de Grenoble.
- SARROT-REYNAULD J. & HAUDOUR J. (1965) : Hydrologie souterraine dans le bassin houiller de la Mure. Association internationale des hydrogéologues. Réunion de Hannover.
- SCHOELLER H. (1949) : La température des eaux souterraines. Travaux du laboratoire de géologie de la faculté de sciences de l'université de Bordeaux.
- SCHOELLER H. (1962) : Les eaux souterraines. Masson éditeur à Paris.
- SERRA-BERTRAL G. (1976) : Etude morphométrique, physicochimique et sédimentologique de quelques lacs de montagne des préalpes du Chablais. Thèse de 3e cycle. Université Pierre et Marie Curie, Paris 6e - C.R.G. Thonon.
- SERRA-BERTRAL G., CHASSAING B. & OLIVE P. (1976) : Détermination des teneurs en carbone organique total des eaux de quelques lacs de Haute-Savoie. Compte-rendu de l'académie des sciences, Tome 283, série D.
- SIWERTZ E., BLANC P., MEYBECK M. & OLIVE P. (1971) : Etude de la variabilité des éléments nutritifs dans les rivières, exemple de la Dranse du Chablais (Haute-Savoie). Archives des sciences de Genève, vol. 24, Fasc. 2.
- SIWERTZ E., CHASSAING B., HAUBERT M. & OLIVE P. (1974) : Bilan hydrologique du lac Léman pour la période 1963-1972 (I). Archives des sciences de Genève. Vol. 27, Fasc. 1.
- TRICART J. & CAILLEUX A. (1962) : Traité de géomorphologie, Tome III, le modèle glaciaire et nival. Sedes éditeur à Paris.
- VIAL R. (1976) : Etudes géologique et hydrogéologique de la région de Thonon - Douvaine (Haute-Savoie) - Thèse de 3e cycle, Grenoble.
- VOLLENWEIDER R.A. (1970) : Les bases scientifiques de l'eutrophisation des lacs et des eaux courantes sous l'aspect particulier du phosphore et de l'azote comme facteurs d'eutrophisation, Rapport O.C.D.E.

A N N E X E 1

METHODE D'ANALYSES DES SEDIMENTS LACUSTRES

Les sédiments lacustres prélevés à l'aide d'une benne Ekman ont été analysés par le laboratoire du Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon.

La teneur en eau est déterminée par pesée après dessiccation à 105°C. Une partie des sédiments est calcinée à 600°C puis à 1 000°C.

La perte de poids du sédiment entre 105 et 600°C représente la matière organique, alors que la différence entre la perte à 600°C et celle à 1 000°C correspond au CO₂ provenant de la dissociation des carbonates.

Une autre partie du sédiment (100mg), séché à 105°C puis broyé et homogénéisé, est fondue dans un creuset de platine avec 250 mg de carbonate de lithium et 250 mg d'acide borique; le produit de fusion est repris par 5 ml d'acide chlorhydrique 0,5 N et 20 ml d'eau, jusqu'à dissolution totale.

Sur cette solution sont dosés, par spectrophotométrie d'absorption, les éléments suivants : Al, Si, Fe total, Mn, Ca, Mg, Na, K.

Le titane et le phosphore sont dosés par colorimétrie.

Les teneurs des différents éléments (en oxyde) sont exprimés en pourcentage du poids du sédiment séché à 105 °C.

A N N E X E 2

METHODES D'ANALYSES CHIMIQUES DES EAUX

Les analyses chimiques des eaux ont été effectuées soit au laboratoire d'hydrogéologie de l'Institut Dolomieu, soit au laboratoire du Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon.

Les méthodes d'analyse sont parfois les mêmes mais certains éléments sont dosés par des méthodes différentes dont les précisions sont variables; nous présenterons donc les méthodes utilisées dans chaque laboratoire.

1. ANALYSES CHIMIQUES A L'INSTITUT DOLOMIEU

Ces analyses concernent principalement les eaux de sources, de ruisseaux et de précipitations.

1.1. Dosages titrimétriques

1.1.1. Dosage du calcium et du magnésium par complexométrie

En présence d'éthylène diamine tétracétique (EDTA), les ions alcalino-terreux forment un complexe du type chélate.

Dans la plupart des aquifères, les alcalino-terreux dominants sont le calcium et le magnésium, la part due aux métaux lourds dans le dosage complexométrique peut donc être considérée comme négligeable.

L'addition d'un indicateur d'ions dans une solution contenant Ca^{++} et Mg^{++} libres, à un pH donné, permet de les détecter par obtention d'une coloration spécifique. Si on ajoute alors de l'EDTA, il y a complexation de ces ions, et lorsque disparaissent les dernières traces d'éléments libres, l'indicateur change de couleur. Les indicateurs utilisés sont le noir d'ériochrome pour la dureté totale ($\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$) et le murexide pour la dureté calcique (Ca^{++}).

La précision de ce dosage est bonne; elle est d'environ $\pm 1\%$ pour le calcium et $\pm 3\%$ pour le magnésium, aux teneurs habituellement rencontrées sur le bassin versant.

Lorsque le T.H.T. est inférieur à 5 ° français (cas des eaux de pluies), le calcium et le magnésium sont dosés par spectrométrie de flamme.

1.1.2. Dosage des bicarbonates (T.A.C.) par acidimétrie

Pour un pH donné, les teneurs des diverses formes du carbone minéral en solution sont dans des rapports bien définis. Au pH des eaux habituelles (pH inférieur à 8,3), l'ion dominant à 99 % est l'ion bicarbonate.

Le dosage s'effectue par neutralisation des ions bicarbonates par une solution d'acide sulfurique titrée, jusqu'au point d'équivalence. Ce point d'équivalence dépend principalement de la concentration en ion HCO_3^- et du pH naturel de l'échantillon. L'indicateur de pH (méthylorange) ne donne pas une précision suffisante, aussi l'évolution du pH jusqu'au point d'équivalence calculé approximativement à partir du tableau ci-dessous, a-t-elle été suivie au moyen d'un pH - mètre.

pH de départ	TAC en ° français				
	5	10	15	20	30
7	4,70	4,55	4,46	4,40	4,315
7,4	4,725	4,58	4,485	4,43	4,33
7,7	4,74	4,59	4,50	4,44	4,345
8	4,74	4,10	4,505	4,445	4,35

La précision de ce dosage est d'environ $\pm 3\%$ si on se fixe uniquement au virage de l'indicateur; elle atteint $\pm 1\%$ si on arrête le dosage au point d'équilibre grâce au pH - mètre.

1.1.3. Dosage des chlorures par la méthode de Clarke au nitrate mercurique

L'ion mercurique Hg^{++} forme avec Cl^- un complexe soluble et peu dissocié; selon la réaction $\text{Hg}^{++} + 2 \text{Cl}^- \rightleftharpoons \text{Hg Cl}_2$.

Pour doser l'ion Cl^- on ajoute donc l'ion Hg^{++} à la solution et, après le point d'équivalence, l'excès d'ion mercurique est détecté par un indicateur coloré (diphényl carbazone + bleu de bromophénol) qui donne avec lui un complexe violet en milieu acide.

La précision de ce dosage est de l'ordre de $\pm 5\%$, aux teneurs habituelles des eaux de la région 1 à 5 mg/l.

1.2. Dosages colorimétriques

Sont susceptibles de dosages colorimétriques les substances donnant avec des réactifs une coloration dont la densité optique est fonction de leur concentration.

Le laboratoire est équipé d'un colorimètre HACHDC-DR à lecture directe, muni d'échelles graduées interchangeable; pour chaque substance dosée l'échelle est graduée directement en concentration, l'étalonnage ayant été réalisé par le constructeur. La précision des dosages avec cet appareil est moyenne mais la reproductibilité est bonne en général, ce qui permet de suivre avec une très grande finesse des variations de concentrations sans pour autant que les valeurs soient tout à fait exactes.

Les méthodes d'analyses n'étant pas détaillées par le constructeur nous ne ferons que citer les divers dosages effectués par colorimétrie ainsi que leurs précisions.

- La silice soluble 0.3 ppm

La précision du dosage est de $\pm 2\%$, la reproductibilité est très bonne ($\pm 1\%$).

- Les nitrates 0-10 ppm d'azote

La précision du dosage est de $\pm 10\%$, la reproductibilité est moyenne ($\pm 5\%$).

- Les nitrites 0-0,3 ppm d'azote

La précision du dosage est de $\pm 5\%$, la reproductibilité est excellente ($\pm 1\%$).

- L'ammonium 0-3 ppm d'azote

La précision du dosage est de $\pm 10\%$, la reproductibilité est moyenne ($\pm 5\%$).

- Les sulfates (dosage par turbidimétrie) 0-300 ppm

Le dosage est très peu précis $\pm 15\%$, mais sa reproductibilité est bonne ($\pm 2\%$).

- Les orthophosphates 0-3 ppm

La précision du dosage est de $\pm 5\%$, sa reproductibilité est bonne ($\pm 2\%$).

- Le fer total 0-3 ppm

La précision du dosage est de $\pm 5\%$, sa reproductibilité est bonne ($\pm 2\%$).

1.3. Dosages par spectrophotométrie de flamme

1.3.1. Absorption atomique

On mesure l'absorption d'un faisceau lumineux traversant un nuage d'atomes. Chaque élément possède un spectre caractéristique. L'excitation des atomes se fait par pulvérisation de l'échantillon dans une flamme. La densité optique est proportionnelle à la concentration en atomes libres quand celle-ci est faible.

- Dosage du calcium

Gamme de 0 à 1 ppm. Seul le calcium des eaux de pluies a été dosé par cette méthode.

- Dosage du magnésium

Gamme de 0 à 5 ppm. Longueur d'onde 285 nm. Seul le magnésium des eaux de pluies a été dosé par cette méthode.

- Dosage du potassium

Gamme de 0 à 2 ppm. Longueur d'onde 766,3 nm. Les solutions étalons contiennent, outre le potassium, 1 ppm de sodium pour éliminer l'effet de matrice.

1.3.2. Emission atomique

Par pulvérisation d'une solution dans une flamme à haute température, on obtient la dissociation atomique des sels contenus dans cette solution après vaporisation du solvant. Les atomes libérés subissent une excitation due à l'énergie thermique de la flamme, et le retour à l'état fondamental se caractérise par l'émission d'une radiation particulière à l'élément en solution, et dont l'intensité est une fonction de la concentration du sel en solution.

- Dosage du sodium

Gammes 0-3 ppm et 0-1 ppm. Longueur d'onde 588,8 nm. Les solutions étalons contiennent, outre le sodium, 70 ppm de calcium et 0,5 ppm de potassium pour s'affranchir de l'effet de matrice.

1.3.3. Précision et reproductibilité de ce type de dosage

La reproductibilité des dosages par absorption et émission atomique est très bonne ($\pm 0,5\%$), la précision est très bonne mais elle dépend essentiellement de la précision de la solution étalon et du facteur de dilution éventuel des échantillons, on peut l'estimer à ± 1 ou 2% selon qu'il y a eu ou non dilution de l'échantillon..

2. ANALYSES CHIMIQUES AU CENTRE DE RECHERCHES GEODYNAMIQUES DE THONON (d'après B.CHASSAING)

Ces analyses concernent principalement les eaux lacustres et les eaux de ruisseau.

2.1. Dosage titrimétrique

Dosage des bicarbonates. La méthode utilisée est la même que celle de l'Institut Dolomieu, seul l'indicateur coloré diffère (rouge de méthyle et vert de bromocrésol au lieu de méthyl orange); la précision est la même.

2.2. Dosages colorimétriques

Le laboratoire du C.R.G. est équipé d'un spectrophotomètre " Beckman Acta II ".

- Dosage de l'azote ammoniacal

En milieu alcalin, l'ion ammonium donne avec le phénol et l'hypochlorite de potassium un composé de type indophénol coloré en bleu dosable à 630 nm. La précision est de 5 %, la limite de dosage 0,001 mg/l.

- Dosage de l'azote nitreux

En milieu acétique, il y a formation d'un colorant azoïque rouge entre l'acide sulfanilique diazoté et l' α naphtylanine dosable à 520 nm. La limite de dosage est 0,001 mg/l.

- Dosage de l'azote nitrique

En milieu sulfurique concentré il y a nitration de l'acide phénol-disulfonique. Le dérivé nitré est coloré en jaune par passage en milieu alcalin ammoniacal; il est dosable à 410 nm. La précision du dosage est de 5 % et la limite de dosage 0,05 mg/l.

- Dosage des chlorures

Le thiocyanate mercurique en solution est très peu dissocié. En présence de chlorures, il y a libération d'ions thiocyanates et formation de chlorure mercurique. Les ions thiocyanates donnent avec le fer une coloration rouge susceptible d'un dosage à 460 nm.

- Dosage du phosphore

Les orthophosphates sont dosés par la méthode de Murphy et

et Riley : réduction du complexe phosphomolybdique par l'acide ascorbique en un composé coloré en bleu dosable à 882 nm.

Le Phosphore total soluble est déterminé après hydrolyse oxydante à 125°C des composés phosphorés en orthophosphates.

- Dosage de la silice soluble

Elle est dosée après réduction du complexe silico-molybdique par l'acide amino 1 - naphthol 2 - sulfonique 4 en un composé dosable à 810 nm.

- Dosage des sulfates

Ils sont dosés par turbidimétrie du sulfate de baryum en présence d'un agent tensioactif (Tween 20), l'absorption est mesurée à 420 nm.

2.3. Dosages par absorption atomique

Les éléments suivants Ca, Mg, Na, K, Sr, sont dosés par absorption atomique après l'addition de 5 % d'une solution de lanthane à 10 % dans HCl comme tampon spectral.

Le laboratoire du C.R.G. est équipé d'un spectrophotomètre d'absorption atomique 303 Perkin-Elmer.

Le tableau ci-dessous résume, pour chaque élément dosé, la longueur d'onde utilisée, le domaine d'utilisation, ainsi que la sensibilité de la méthode.

Eléments	Longueur d'onde nm	Domaine d'utilisation ppm	Sensibilité pour 1 % d'absorption
Ca	422,7	0 - 200	0,07
Mg	285,2	0 - 25	0,01
Na	589,0	0 - 8	0,02
K	766,5	0 - 4	0,02
Sr	460,7	0 - 2	0,15

2.4. Dosage particulier (dosage du carbone organique total)

Il est dosé sur des échantillons d'eau non filtrée selon une méthode dérivée de celle de Menzel et Vaccaro. Cette méthode consiste en une oxydation de la matière organique contenue dans l'eau, après élimination des formes inorganiques du carbone (CO_2 , CO_3^{--} , HCO_3^-), et un dosage du CO_2 résultant par un analyseur infrarouge non dispersif. L'erreur absolue sur ce dosage est de l'ordre de 0,05 à 0,1 ppm suivant la concentration.

A N N E X E 3

ANALYSES CHIMIQUES

Les pages suivantes présentent l'ensemble des analyses chimiques effectuées dans le cadre de cette étude; leur lecture sera facilitée par les quelques remarques qui suivent.

GENERALITES

- Les résistivités sont exprimées en $\Omega \cdot \text{cm}$ à 18°C.
 - L'ammonium les nitrates et les nitrites sont exprimés en mg d'azote par litre. On peut exprimer ces teneurs en ions en multipliant les valeurs correspondantes respectivement par 1,29, 4,4 et 3,3.
 - Les orthophosphates et le phosphore total sont exprimés en mg de phosphore par litre.
 - Tous les autres éléments sont exprimés en mg d'ion par litre.
 - La colonne Lab. indique le laboratoire dans lequel l'analyse a été effectuée :
- Dol: Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Institut Dolomieu
C.R.G. : Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon.
- Un blanc dans une colonne signifie que le paramètre concerné n'a pas été mesuré.

REMARQUES PARTICULIERES A CHAQUE TYPE DE PRELEVEMENT

- Analyses des eaux lacustres
La colonne h indique la profondeur en mètres à laquelle a été effectué le prélèvement.
Les teneurs en oxygène sont exprimées en mg d'O₂ par litre.
- Analyses des ruisseaux
La colonne Q indique le débit instantané du ruisseau en l/s, au moment du prélèvement.

- Analyses des précipitations atmosphériques

La colonne date indique l'intervalle durant lequel l'eau a été recueillie.

La colonne h indique la hauteur des précipitations en mm, tombée depuis le dernier prélèvement.

- Analyses des sources

Les analyses sont classées suivant les familles de sources définies au chapitre 7. Elles sont situées par leurs coordonnées Lambert.

La colonne t indique la température en °C de l'eau au moment du prélèvement.

Les colonnes $r \text{ Ca} / r \text{ Mg}$, $r \text{ SO}_4 / r \text{ Cl}$, $r \text{ Na} / r \text{ Cl}$ et $r \text{ HCO}_3 / r \text{ SO}_4$ indiquent les rapports ioniques caractéristiques calculés à partir des teneurs en milliéquivalents.

La colonne Q indique le débit de la source en l/mn (les débits suivis d'un astérisque sont exprimés en l/s).

LAC DE LAFFREY.

Date	-h m	ρ18°C	pH	O ₂ dis.	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Sr ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	ortho P	P total	C.orga total	Lab
19.10.76	0	4381	8,20	9,37	1,10	36,1	3,33	3,12	1,12	0,030	0,18	4,87	15,8	109,8	0,11	0,003	0,000	0,007	2,50	CRG
	0-5	3922	8,10		1,20	43,7	3,30	3,43	1,35	0,035	0,21	5,99	16,6	120,5	0,07	0,007	0,000	0,012	+ 4	CRG
	10	4300	8,25	9,33	1,16	36,6	3,33	3,29	1,15	0,032	0,20	4,98	16,0	110,5	0,12	0,005	0,000	0,012	2,33	CRG
	Fd	3936	7,35	1,46	4,72	41,4	3,25	3,16	1,15	0,047	0,20	5,10	13,8	125,4	0,33	0,005	0,000	0,043	1,88	CRG
13.11.76	0	4805	8,05		2	38,5	2,67	3,06	1,14			5,17	12	120	0,02					Do1
19.12.76	0	4814	8,10		2,6	37,1	3,77	3,17	1,48	0,00		5,16	11,5	123	0,18	0,004				Do1
6.02.77	0	4837	8,05		1,71	39,3	2,92	3,10	1,38	0,15		5,65	13,5	120	0,22	0,003				Do1
10.03.77	0	4520	7,85	12,05	2,14	38,6	2,73	3,49	1,16	0,014	0,19	4,73	17,4	116,1	0,35	0,004	0,001	0,008	2,29	CRG
	15	4739	7,90	11,93	2,16	38,6	2,74	3,42	1,09	0,013	0,29	4,67	17,6	115,7	0,31	0,004	0,002	0,008	1,42	CRG
	Fd	4739	7,90	11,89	2,04	38,6	2,74	3,40	1,14	0,009	0,19	4,66	17,7	115,7	0,34	0,004	0,002	0,007	1,63	CRG
28.06.77	0	4778	8	9,35	0,36	36,2	3,22	3,29	1,07	0,035	0,20	4,90	14,5	113,7	0,19	0,004	0,003	0,002	1,91	CRG
	10	4700	7,90	9,73	0,34	36,5	3,22	3,29	1,07	0,029	0,20	5,07	14,5	115,2	0,20	0,004	0,004	0,004	1,96	CRG
	15	4644	7,80	10,16	1,38	37,2	3,22	3,42	1,10	0,032	0,19	4,99	14,6	116,6	0,22	0,003	0,000	0,002	1,47	CRG
	30	4571	7,60	8,07	2,80	38	3,27	3,36	1,08	0,050	0,19	5,12	14,8	120	0,20	0,002	0,001	0,003	1,30	CRG
	Fd	4535	7,60	7,34	3,20	38,8	3,25	3,29	1,09	0,077	0,20	5,29	14,4	120,3	0,20	0,004	0,001	0,004	1,77	CRG
25.08.77	0	5241	7,25		0,44	35,5	3,28	3	1,13	0,04		4,99	9,5	106	0,13	0,005	0,016			Do1
18.10.77	0	5137	7,90	9,63	0,96	38,2	3,39	3,23	1,08	0,007	0,19	4,73	15,1	112,2	0,09	0,003	0,009	0,007	1,86	CRG
	14	5092	7,90	9,45	1,08	36,6	3,27	3,28	1,02	0,026	0,18	4,84	15,6	111,3	0,12	0,003	0,006	0,006	1,79	CRG
	25	4700	7,70	6,58	2,82	40,5	3,27	3,31	1,09	0,012	0,19	5	15,1	122	0,25	0,003	0,005	0,010	1,70	CRG
	Fd	4607	7,30	3,57	4,46	41,8	3,29	3,29	1,12	0,041	0,18	5,06	14,9	127,1	0,25	0,003	0,002	0,004	1,60	CRG

LAC DE PETICHET (bassin nord).

Date	-h m	P18°C	pH	O ₂ dis.	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Sr ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	ortho P	P total	C.orga total	Lab
19.10.76	0	4589	8,05	7,95	2,04	38,1	3,17	2,73	1,32	0,226	0,22	3,89	13,2	110,8	0,04	0,004	0,000	0,009	2,48	CRG
	Fd	4518	8,05	7,68	2,10	35,7	3,09	2,61	1,30	0,219	0,23	3,80	13,1	111,5	0,06	0,003	0,000	0,007	2,01	CRG
13.11.76	0	5060	8		1,10	37,3	2,43	2,55	1,32			4,14	11	121	0,09					DoI
19.12.76	0	4923	8,15		1,50	40,1	1,46	2,57	2,00	0,34		3,78	8,5	123	0,21	0,005				DoI
6.02.77	0	4820	8,10		1,69	39,9	2,31	2,86	1,53	0,39		4,68	13	123	0,30	0,003				DoI
10.03.77	0	4720	8	12,05	1,74	39,9	2,52	2,82	1,20	0,087	0,23	3,21	16,4	121,8	0,45	0,006	0,002	0,009	2,35	CRG
	8	4739	7,95	12,03	1,74	39,9	2,51	2,83	1,19	0,085	0,22	3,21	16,5	121,3	0,47	0,006	0,002	0,010	1,64	CRG
	Fd	4681	7,90	11,79	1,78	39,9	2,52	2,83	1,19	0,110	0,22	3,61	16,3	120,8	0,49	0,006	0,002	0,010	1,72	CRG
28.06.77	0	6047	8,05	10,00	1,10	28,1	2,80	2,56	1,03	0,043	0,22	3,75	12,2	86,4	,007	0,006	0,001	0,000	2,89	CRG
	7	5893	7,95	9,83	1,08	27,9	2,80	2,62	1,05	0,059	0,19	3,54	12,6	88,1	,008	0,006	0,001	0,004	2,51	CRG
	11	4518	7,40	5,06	1,80	41,1	2,97	2,68	1,18	0,233	0,26	4,78	12,8	127,6	0,28	0,005	0,000	0,004	1,54	CRG
	Fd	4414	7,45	2,64	2,38	41,9	2,89	2,68	1,22	0,374	0,26	4,25	12,1	132,5	0,24	0,008	0,019	0,005	1,67	CRG
25.08.77	0	5439			0,14	34,9	2,55	1,94	1,16	0,17		3,65	8,5	102	0,18	0,010	0,013			DoI
18.10.77	0	4919	7,85	8,80	1,19	38,8	2,90	2,60	1,17	0,210	0,22	3,60	12,52	122,7	0,10	0,007	0,003	0,003	1,94	CRG
	10	4858	7,80	8,82	1,18	39,0	2,90	2,65	1,12	0,211	0,23	3,56	12,52	122,7	0,10	0,006	0,004	0,007	1,85	CRG
	Fd	4858	7,60	6,42	1,64	39,0	2,97	2,62	1,17	0,320	0,20	3,64	12,88	124,9	0,08	0,006	0,015	0,019	1,77	CRG

LAC DE PETICHET (bassin sud).

19.10.76	0	4500	7,90	7,92	2,16	35,5	3,07	2,65	1,33	0,221	0,22	3,83	12,8	111,0	0,17	0,004	0,007	0,010	2,42	CRG
	Fd	4482	7,90	7,60	2,08	35,5	3,07	2,66	1,30	0,232	0,22	3,83	13	111,0	0,04	0,004	0,003	0,012	2,23	CRG

RUISSEAU DES MOULINS (Limnigraphie).

Date	$t_{18^{\circ}\text{C}}$	pH	SiO_2	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+	NH_4^+	Sr^{++}	Cl^-	SO_4^{--}	HCO_3^-	NO_3^-	NO_2^-	ortho P	P total	Q	Lab
19.10.76	2976	8,1	5,92	65,60	3,22	2,23	2,66	0,117	0,36	2,77	21,1	190,6	1,45	0,037	0,141	0,168	30	CRG
13.11.76	3680	8,1	6,25	49,60	3,16	1,43	1,02	0,05		1,93	16	142	0,12	0,006			205	Do1
17.11.76	4250	8,05	5,35	48,89	1,58	1,49	0,94	0,09		1,57	14	148,8	0,47	0,005			205	Do1
28.11.76	4182	8,05	5,50	50,10	1,21	1,77	1,12	0,12		2,45	11	164,7	0,77	0,003			125	Do1
5.12.76	4080	8,15	6,50	51,30	2,19	1,66	1,05	0,05		1,77	9,5	161	0,82	0,075			120	Do1
12.12.76	4038	8,1	5,50	51,70	3,16	1,44	0,98	0,02		1,75	8,5	174,5	0,72	0,012			155	Do1
19.12.76	4335	8,3	6,10	48,50	1,94	1,58	1,46	0,15		1,84	8,3	151	0,71	0,005			195	Do1
26.12.76	4103	8,3	4,35	49,30	3,40	1,51	1,22	0,14		1,73	8	148	0,84	0,003			135	Do1
2.01.77	4173	8,1	6,60	48,90	2,18	1,80	2,09	0,65		2,25	11,5	145	0,94	0,013			130	Do1
10.01.77	4211	8,1	6,10	50,50	1,22	1,64	1,20	0,17		1,75	9,5	149	0,82	0,001			115	Do1
16.01.77	4171	8,35	6,35	50,70	1,34	1,52	1,28	0,10		1,75	10,5	146	0,85	0,005			110	Do1
30.01.77	4204		5,65	49,69	2,06	1,45	1,17	0,07		1,69	11	149	1,02	0,003			205	Do1
6.02.77	4498	8,2	4,95	47,01	1,34	1,38	1,32	0,05		1,71	10	139	0,80	0,024			245	Do1
13.02.77	4760	8,2	5,20	44,08	1,22	1,28	0,87	0,07		1,69	9,5	131	0,60	0,002	0,160		465	Do1
20.02.77	4580	8,2	6,20	46,49	1,09	1,45	1,08			1,80	6	143	0,72	0,007	0,056		215	Do1
27.02.77	4632	8,2	5,60	44,08	2,67	1,45	0,97			1,59	7,5	135	0,67	0,001			260	Do1
6.03.77	4385		6,15	46,49	2,43	1,56	1,01			1,80	7,5	144	0,94	0,009			180	Do1
10.03.77	4284	8,25	3,38	49,20	1,93	1,47	0,78	0,011	0,26	0,97	14,2	146,9	0,85	0,008	0,019	0,030	145	CRG
20.03.77	4261	8,35	6,30	48,49	2,18	1,70	1,26			2,45	8	148	0,72	0,000			95	Do1
27.03.77	4133	8,25	5,70	51,30	2,43	1,40	0,83	0,04		2,11	9,5	159	0,47	0,001	0,027		125	Do1
3.04.77	4316	8,2	5,65	48,49	1,95	1,49	0,90	0,02		1,57	7	149	0,52	0,001	0,020		135	Do1
10.04.77	4398	7,95	8,25	46,49	2,43	1,46	0,93	0,02		1,46	5,5	143	0,54	0,000	0,008		165	Do1
17.04.77	4516	8	5,70	45,69	1,82	1,42	1,06	0,02		1,39	9	135	0,72	0,001	0,030		205	Do1

RUISSEAU DES MOULINS (Limnigraphie).

Date	t _{18°C}	pH	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Sr ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	ortho P	P total	Q	Lab
24.04.77	4265	7,75	5,50	47,69	1,70	1,54	1,40	0,52		1,84	6,5	144	0,54	0,015	0,40		270	Do1
1.05.77	4688	8	5,25	43,08	1,82	1,14	0,86	0,09		1,26	8,5	133	0,47	0,004			670	Do1
5.05.77	5017	8,3	5	40,48	1,70	0,94	0,55	0,01		1,17	6,5	123	0,40	0,003	0,093		895	Do1
8.05.77	4842	8,2		42,48	1,70	1,21	0,80	0,05		1,53	4,5	128	0,52	0,003	0,020		610	Do1
<u>15.05.77</u>																		
11h24	4350	7,95				1,54	1,56	0,69		1,98	7		0,62	0,020	0,44		204	Do1
11h28	4278	7,8				1,62	1,70	0,63		2,05	9,5		0,61	0,037	0,48		204	Do1
11h32	4310	7,85				1,57	1,54	0,59		1,82	8,5		0,62	0,014	0,41		204	Do1
11h37	4391	8				1,50	1,19	0,37		1,58	7		0,64	0,015	0,23		204	Do1
11h43	4452	8				1,46	1,06	0,21		1,50	6		0,62	0,010	0,16		204	Do1
11h58	4440	7,8				1,42	0,94	0,345		1,39	5,5		0,47	0,001	0,073		204	Do1
12h23	4493	8,15		46	1,95	1,40	0,69	0,08		1,30	6	138	0,62	0,001	0,057		204	Do1
<u>22.05.77</u>																		
10h33	4385			47,69	1,95	1,40	0,82	0,13		1,53	6	142	0,52	0,006	0,020		150	Do1
10h47	4372					1,42	0,87	0,15		1,54			0,52	0,005	0,020		150	Do1
11h02	4363					1,42	1,10	0,24		1,69			0,52	0,005	0,040		150	Do1
11h05	4355					1,44	1,10	0,33		1,53	6		0,52	0,008	0,080		150	Do1
11h07	4343					1,45	1,20	0,40		1,66			0,54	0,009	0,15		150	Do1
11h10	4292					1,50	1,42	0,55		1,80			0,52	0,013	0,33		150	Do1
11h13	4276					1,53	1,64	0,62		1,71			0,55	0,015	0,44		150	Do1
11h15	4259					1,55	1,70	0,66		1,85			0,62	0,018	0,53		150	Do1
11h18	4238					1,57	1,79	0,68		1,80	9,5		0,54	0,019	0,62		150	Do1

RUISSEAU DES MOULINS (Limnigraphie).

Date	(18°C)	pH	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Sr ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	ortho P	P total	Q	Lab
22.05.77	(suite)																	
11h23	4226					1,58	1,80	0,60		2,02			0,63	0,018	0,61		150	Do1
11h29	4263					1,54	1,61	0,48		1,69			0,63	0,015	0,44		150	Do1
11h33	4284					1,50	1,44	0,41		1,57			0,61	0,011	0,31		150	Do1
11h38	4347					1,46	1,24	0,30		1,51			0,63	0,011	0,21		150	Do1
11h46	4347					1,47	1,12	0,22		1,51	5,5		0,55	0,011	0,15		150	Do1
12h00	4330					1,50	1,25	0,19		1,60			0,52	0,009	0,145		150	Do1
12h20	4368					1,47	0,94	0,15		1,51	6		0,52	0,006	0,060		150	Do1
29.05.77	4370		5,45	48,09	1,70	1,41	0,74	0,00		1,35	5	146	0,44	0,006	0,003		155	Do1
5.06.77	4222	8	5,50	48,49	0,97	1,44	0,90	0,05		1,35	6,5	149	0,52	0,025	0,10		128	Do1
12.06.77	4092	8,2	5,50	49,49	2,31	1,49	1,03	0,04		1,24	9	154	0,62	0,015	0,060		103	Do1
19.06.77	3817		5,65	51,70	1,70	1,71	1,78	0,02		2,43	7	162	0,72	0,017			82	Do1
28.06.77	3882	8,1	5,40	52,90	2,40	2,33	1,96	0,018	0,26	2,40	11,4	165,4	0,60	0,007	0,165	0,238	65	CRG
3.07.77	3796		5,40	54,11	2,43	1,72	1,71	0,19		1,43	7,5	162	0,80	0,005	0,070		60	Do1
25.07.77	3945		6,40	57,71	2,07		1,01	0,08		1,80	4	156	0,72	0,002	0,060		65	Do1
31.07.77	3947		6,65	53,70	2,43	1,58	1,88	0,06		1,94	8	151	0,92	0,019	0,060		103	Do1
7.08.77	3728		6,40	56,91	2,67	1,48	1,31	0,16		1,36	4,5	176	0,53	0,015	0,026		103	Do1
21.08.77	3988		5,70	52,90	1,70	1,86	1,99	0,13		1,76	6,5	154	0,64	0,019	0,096		108	Do1
28.08.77	3922		5,60	54,91	1,46	1,60	1,35	0,07		1,40	5	161	0,68	0,022	0,060		82	Do1
4.09.77	3842			56,51	1,82	1,78	1,55	0,08		1,85	6	165	0,70	0,027	0,066		60	Do1
11.09.77	3747			57,11	2,31	2,55	1,44	0,05		3,31	6,5	167	0,80	0,019	0,103		48	Do1
19.09.77	3703			56,91	2,07	1,59	1,73	0,12		1,84	4,5	170	0,84	0,029	0,113		44	Do1

RUISSEAU DES MOULINS (Limnigraphie).

Date	t _{18°C}	pH	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Sr ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	ortho P	P total	Q	Lab
25.09.77	3611			58,11	2,55	1,85	1,78	0,20		2,34	5,5	172	0,94	0,050	0,163		43	Do1
2.10.77	3608			59,31	2,06	1,74	1,82	0,04		2,23	5,5	174	0,97	0,034	0,113		37	Do1
7.10.77	4214			46,29	2,19	1,58	1,25	0,32		3,78	6	128	1,30	0,031	0,116		120	Do1
10.10.77	3676			57,71	4,13	1,78	2,26	0,12		2,57	10,5	170	1,04	0,024	0,080		60	Do1
18.10.77	3692	8	5,92	56,80	2,66	1,81	1,46	0,058	0,30	1,61	12,8	172,8	0,72	0,017	0,109	0,127	63	CRG

RUISSEAU DES GONTHEAUMES.

17.11.76	3155	7,9	7	60,92	5,59	2,98	1,06			3,46	13	198	0,92				10	Do1
12.12.76	3017	8	7,25	63,70	6,08	2,70	1,09	0,00		5,89	13,5	204	1,27	0,000			6	Do1
19.12.76	3134	7,9	6,95	61,32	5,35	3,25	1,36	0,06		4,90	11	192	1,17	0,003			7	Do1
26.12.76	3080	8,1	4,20	64,13	7,05	2,37	1,37	0,21		2,75	11,7	200	1,22	0,002			7	Do1
2.01.77	3052	8,1	7	62,93	5,84	5,35	1,34	0,06		6	14,5	199	1,07	0,004			6	Do1
10.01.77	3054	8,05	6,85	66,53	4,62	2,40	1,34	0,18		2,72	16,5	208	1,14	0,000			5	Do1
30.01.77	3292		6,75	60,92	4,32	3,30	1,22	0,07		4,99	12	185	1,36	0,000				Do1
6.02.77	3268	8	6,20	58,12	4,49	3,04	1,26	0,03		4,23	15	179	1,19	0,001				Do1
13.02.77	3411	8,05	5,85	57,31	5,10	2,43	1,02			3,37	13,5	177	1,15	0,001	0,10			Do1
20.02.77	3407	8,1	6,85	57,11	6,08	2,20	1,02			2,88	13	182	0,95	0,000	0,017			Do1
27.02.77	3536	8	8,35	54,50	5,83	2,40	1,07			2,74	12	173	1,42	0,001				Do1
6.03.77	3409		8,10	57,71	4,86	2,40	1,19			2,77	12,5	179	1,57	0,001				Do1
10.03.77	3518	7,9	5,70	59,30	4,38	2,19	1,08	0,012	0,22	1,87	19,7	183	1,48	0,030	0,003	0,016	15	CRG
20.03.77	3370	8,1	7,85	56,91	5,11	3,30	1,27			3,96	12	181	1,04	0,004			6	Do1
27.03.77	3300	7,95	8,10	60,12	5,10	2,55	1,17	0,03		3,89	11,5	193	0,92	0,000	0,010		7	Do1
3.04.77	3255	7,95	7,60	60,72	4,74	3	1,14	0,18		3,73	9	195	0,88	0,004	0,008		6	Do1

RUISSEAU DES GONTHEAUMES.

Date	t _{18°C}	pH	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Sr ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	ortho P	P total	Q	Lab
10.04.77	2979	7,85	7,70	60,52	4,86	7,20	1,15	0,02		12,7	11	194	0,82	0,002	0,010		5	Do1
17.04.77	3356	7,7	7,85	58,12	5,23	2,55	1,12	0,02		3,10	11,5	179	1,10	0,002	0,009		7	Do1
24.04.77	3405	7,8	7,30	55,91	5,47	2,42	1,11	0,13		2,94	11	176	0,93	0,007	0,009		8	Do1
1.05.77	4294	7,95	7	51,16	4,38	5,09	1,08	0,31		8,68	10	161	0,96				7	Do1
15.05.77	3619	8		52,90	5,83	1,75	0,88			2,47	10,5	162			0,013		7	Do1
22.05.77	3450			55,71	5,59	1,88	0,31			2,47	11	177					5	Do1
29.05.77	3353		6,50	58,11	4,62			0,06		2,47	9,5	184	0,76	0,010	0,016		5	Do1
12.06.77	3193	8		60,92	5,11	1,86	1,01	0,16		2,25	11	196	0,80	0,037	0,020		4	Do1
25.07.77	3168			65,73	5,11	2,20	1,15	0,04		2,57	7,5	192	1,00	0,038	0,033		3	Do1
7.08.77	2984			68,14	5,11	1,32	0,90	0,04		4,24	9	196	0,85	0,017	0,030		3	Do1
21.08.77	3038		6,85	65,93	5,59	2,43	1,33	0,05		2,44	8,5	204	0,70	0,009	0,050		3,5	Do1

RUISSEAU DE LA BAIE NORD EST.

7.11.76	3865	7,5	7,70	54,90	2,43	1,76	1,44			3,19	19,5	145	1,20				4	Do1
20.10.76	2992	7,6	5,96	66,10	3,09	2,00	1,83	0,011	0,32	2,04	15,6	196	1,35	0,002	0,002	0,015	4	CRG
5.12.76	3343	7,7		62,12	2,67	1,90	1,46			1,93	13,5	193	1,02				4	Do1
16.01.77	3282	8,05		64,13	2,43	1,93	1,62			1,98	12,5	188	1,31				4	Do1
17.04.77	3403	7,5		59,32	2,92	2,00	1,43			2,16	14	178	1,16				7	Do1
2.09.77	3144	7,3		68,53	2,18	1,83	1,59			1,93	13,5	194	0,96				5	Do1

RUISSEAU DES MOULINS (en amont de Cholonge).

Date	ρ18°C	pH	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Sr ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	ortho P	P total	Lab
20.10.76	3857	7,35	5,76	48,7	1,70	1,44	0,92	0,009	0,21	1,16	8,5	147	0,71	0,003	0,004	0,017	CRG
17.11.76	6415	7,65	5,75	31,7	1,22	1,39	0,72			1,17	8	96	0,47				Do1
26.12.76	4039	7,8	3,20	52,5	1,95	1,36	0,60	0,05		1,37	3	160	1,14	0,000			Do1
10.03.77	4719	7,4	5,12	43,5	1,40	1,40	0,55	0,111	0,18	0,91	10	129	1,08	0,002	0,002	0,007	CRG
28.06.77	4191		5,30	49,5	1,71	1,32	0,63	0,012	0,20	1,03	6,8	153	1,08	0,001	0,005	0,004	CRG
21.08.77	4847		5,70	43,5	1,34	1,25	0,78	0,03		1,18	2,5	127	0,52	0,002	0,001		Do1
18.10.77	4398	7,7	6,18	48,8	1,68	1,39	0,62	0,006	0,20	1,07	8,2	149	0,65	0,001	0,008	0,003	CRG

RUISSEAU DES MOULINS (sous village).

17.11.76	4780	7,85	6,20	42,9	1,45	1,60	1,21			1,75	9	135	0,80				Do1
21.08.77	4193		5,95	49,1	2,07	1,65	2,32	0,23		2,05	6	146	0,72	0,023	0,087		Do1

RUISSEAU DE LA COMBE DE CHAUPIN.

17.11.76	2850	8,15	5,50	61	3,04	1,18	0,26			1,08	15	135	0,34				Do1
----------	------	------	------	----	------	------	------	--	--	------	----	-----	------	--	--	--	-----

RUISSEAU DU PEY (nord de Laffrey).

16.04.77	3221	7,6		51,3	12,0	1,04	0,56			1,37	12,5	196	0,62				Do1
----------	------	-----	--	------	------	------	------	--	--	------	------	-----	------	--	--	--	-----

EXUTOIRE DE PETICHET.

Date	Q18°C	pH	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Sr ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	ortho P	P total	Lab
20.10.76	4860	7,6	2,44	37,5	3,35	2,91	1,36	0,190	0,21	4,16	15,2	114	0,08	0,012	0,019	0,020	CRG
12.12.76	4716	8,05		38,9	2,43	2,54	1,32	0,24		4,00	9	131	0,24	0,000			Do1
6.02.77	4666	8	1,42	40,1	2,43	3,02	1,50	0,27		4,90	9	124	0,30	0,012			Do1
10.03.77	4571	7,95	1,12	41	2,78	2,98	1,25	0,055	0,21	3,44	18	123	0,50	0,007	0,000	0,010	CRG
28.06.77	5502	7,9	1,18	28,6	2,89	2,62	1,08	0,028	0,19	3,75	12,9	91	0,09	0,005	0,005	0,006	CRG
21.08.77	5400		0,19	35,1	2,43	2,42	1,17	0,15		3,67	9	104	0,15	0,006	0,013		Do1

EXUTOIRE DE LAFFREY.

20.10.76	4431	8,1	1,14	36,6	3,30	3,16	1,19	0,026	0,18	4,83	15,6	110	0,16	0,004	0,006	0,012	CRG
17.11.76	4807	8,05	2,35	39,1	3,04	3,22	1,17			4,63	12	123	0,12				Do1
12.12.76	4743	8,05	1,95	37,7	3,65	3,30	1,18	0,00		5,62	12	126	0,19	0,000			Do1
6.02.77	4814	8,05	1,66	38,5	2,55	3,06	1,38	0,05		5,53	10	117	0,20	0,002			Do1
10.03.77	4663	8,05	2,10	38,8	2,76	3,43	1,20	0,020	0,19	4,24	17,6	116	0,34	0,004	0,000	0,008	CRG
28.06.77	4681	8	0,50	36,5	3,22	3,23	1,10	0,031	0,19	4,93	14,6	114	0,15	0,003	0,007	0,009	CRG
21.08.77	5241		0,56	35,5	3,04	2,95	1,14	0,03		5,02	9	105	0,13	0,001	0,02?		Do1
19.10.77	4919	8,2	0,96	36,3	3,27	3,21	1,09	0,017	0,18	4,85	15,1	112	0,12	0,003	0,006	0,008	CRG

PRECIPITATIONS ATMOSPHERIQUES (La Fayette).

Date	ρ18°C	pH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	h mm	Lab
28-05.12.76	58615	6,75	0,60	0,02	0,07	0,03	0,00	0,63	0,0	0,12	0,040	48,9	Do1
5-12.12.76	48108	6,75	0,80	0,05	0,29	0,14	0,13	0,81	0,0	0,22	0,001	24,2	Do1
12-19.12.76	51516	6,90	0,60	0,02	0,06	0,08	0,20	0,45	0,0	0,18		21,8	Do1
19-02.01.77	42250	6,95	0,04	0,06	0,06	0,15	0,30	0,49	4,5	0,21	0,001	26	Do1
2-16.01.77	13375	6,65	1,93	0,19	0,77	0,36	0,91	1,39	18,5	0,72	0,011	17,5	Do1
16-23.01.77	45290		0,39	0,05	0,09	0,04	0,16	1,12	2,5	0,15	0,002	11,2	Do1
23-30.01.77	81560		0,18	0,02	0,03	0,01	0,09	0,40	0,5	0,16	0,001	32,5	Do1
30-06.02.77	79700	6,90	0,49	0,02	0,02	0,03	0,13	0,27	0,5	0,12	0,003	54,3	Do1
6-13.02.77	90800	7,15	2,17	0,03	0,02	0,02	0,18	0,41	0,0	0,16	0,001	48,2	Do1
13-20.02.77	110440	6,95	0,12	0,01	0,02	0,02	0,09	0,16	0,0	0,09	0,000	32,8	Do1
20-27.02.77	83860	6,90	0,75	0,02	0,05	0,08	0,12	0,16	0,5	0,22		32,8	Do1
27-13.03.77	36690		1,00	0,03	0,04	0,06	0,16	0,63	2	0,28		36,9	Do1
13-20.03.77												18,7	
20-27.03.77	28245	7		0,22	0,85	0,18	0,37	1,77	3	0,36	0,001	35,6	Do1
27-03.04.77	24650	6,70	1,43	0,06	0,06	0,14	0,51	0,49	4	0,32	0,006	15,9	Do1
3-17.04.77	20910	6,30	1,43	0,10	0,27	0,16	0,02	0,72	2,5	0,50	0,001	92,9	Do1
17-24.04.77	21810	6,25	1,84	0,13	0,19	0,50	1,33	3,71	2	0,94	0,009	7,2	Do1
24-01.05.77	72100	6,60	0,27	0,03	0,34	0,11	0,41	0,16	3	0,18		109,1	Do1
1-05.05.77	103300	7,10	0,39	0,03	0,05	0,09	0,17	0,22	0,0	0,14	0,003	46,7	Do1
5-15.05.77	35640	6,50	0,52	0,05	0,06	0,14		0,52	3,5			18,5	Do1

PRECIPITATIONS ATMOSPHERIQUES (La Fayolle).

Date	$\rho_{18^{\circ}\text{C}}$	pH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	h mm	Lab
15-22.05.77	37280		3,27	0,14	0,28	0,20	0,37	0,83	2,5			34,9	Do1
22-29.05.77	31387						0,36	0,58	2	0,27	0,006	32,6	Do1
29-05.06.77	22140	6,60	1,42	0,12	0,08	0,30	0,55	0,79	5,5	0,42	0,020	7,2	Do1
5-12.06.77	22930	6,65		0,20	0,19	1	1,25	0,76	6,5	0,50	0,013	18,4	Do1
12-19.06.77	29420		3,06	0,21	0,21	0,45	0,52	0,59	3	0,32		6,4	Do1
19-27.06.77	36280		0,84	0,09	0,07	0,35	0,49	0,47	3,5	0,42		40	Do1
27-03.07.77	81850		0,29	0,08	0,02	0,33	0,07	0,23	0,0	0,19		32	Do1
3-10.07.77	41755		3,96	0,17	0,20	0,83	0,24	0,63	2,5	0,44	0,018	37,1	Do1
10-25.07.77	21520		3,56	0,26	0,15	1,05	0,16	0,97	4,5	0,64		34,4	Do1
25-31.07.77	61815		2,03	0,10	0,08	0,44	0,14	0,30	0,0	0,22	0,004	59,4	Do1
31-07.08.77	31500		0,53	0,05	0,06	0,22	0,43	0,36	4	0,56	0,010	26,7	Do1
7-14.08.77	22235		2,45	0,18	0,11	0,88	0,41	0,70	1,5	0,56	0,041	8,7	Do1
14-21.08.77	37690		0,93	0,10	0,15	0,39	0,37	0,31	2,5	0,35	0,016	45	Do1
21-28.08.77	34990		0,90	0,08	0,16	0,19	0,20	0,47	3,5	0,34	0,015	21,1	Do1
28-04.09.77	24950		1,21	0,13	0,23	0,63	0,53	0,49	2,5	0,51	0,023	13,1	Do1
4-25.09.77	10790			0,28	0,36	0,54	0,28	1,87	17	0,84	0,030	8,3	Do1

Date	t	ρ	pH	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Q	rCa rMg	rSO rCl ⁴	rNa rCl	rHCO ₃ ³ rSO ₄
SOURCES ISSUES DU CONGLOMERAT DE BASE DU HOUILLER																	
Source du bois de Parailat : x = 870,37 y = 802,82 z = 1000																	
17.04.77	7,6	14130	6,9		5,6	4,13	2,20	0,59	2,11	13	21	0,27	30	0,82	4,55	1,60	1,27
7.07.77	9,5	9524	6,8		8	7,17	2,37	0,61	1,80	23	29	0,23	7	0,68	9,44	2,03	1
2.09.77	8,3	9520	6,6		8,4	7,05	2,40	0,63	1,73	20	29	0,22	10	0,72	8,55	2,14	1,14
SOURCES ISSUES DES SCHISTES GRESEUX DU HOUILLER																	
Source de Lespinasse : x = 870,65 y = 301,71 z = 1040																	
7.11.76	10,4	862	6,4	10,5	137	20,9	23,5	1,92	1,08	425	367	0,30	1,5*	0,91	291	33,6	0,68
5.12.76	10,6	912	6,5		122	91,7	21	1,91	0,94	425	376	0,22	1,5*	0,81	334	34,5	0,77
16.01.77	10,7	871	6,6		136	101	18	2,18	0,69	402	384	0,28	2*	0,82	430	40	0,75
17.04.77	11	851	6,4		132	104	19,5	2,12	1,08	450	388	0,24	3*	0,77	308	27,9	0,68
7.07.77	10,8	807	6,4		147	108	17	2,16	0,97	500	375	0,52	2,5*	0,82	391	27	0,59
2.09.77	10,6	821			142	106	22	2,20	1,08	475	379	0,22	2*	0,81	325	31,4	0,63
Source de Lespinasse supérieure : x = 870,47 y = 301,87 z = 1100																	
7.07.77	9,3	2593	6,3		48,9	26,3	1,87	1,12	0,97	31	228	0,57	5	1,13	24	2,97	5,80
2.09.77	9,3	2654			49,1	24,7	1,80	1,16	0,97	26	223	0,22	8	1,21	19,8	2,86	6,75
SOURCES ISSUES DU CALCAIRE DE LAFFREY ET DU LIAS DAUPHINOIS																	
Source de la route de Séchilienne : x = 870,75 y = 308,80 z = 890																	
7.11.76	7,8	2780	7,5	6	67,3	12,2	0,84	0,92	2,09	22	218	0,20	3	3,36	7,78	0,62	7,80
5.12.76	7,3	2478	7,6		72,1	13,4	0,98	0,46	2,38	19	264	0,46	4	3,27	5,74	0,63	11,2
16.01.77	6,1	2726	7,8		69,7	11,2	0,94	0,60	2,02	18	237	0,80	5	3,55	6,58	0,72	10,4
16.04.77	6,4	2734	7,4		67,3	11,2	0,81	0,22	1,53	12	239	0,24	6,5	3,65	6,03	0,82	15
7.07.77	8,8	2535	7,5		73,8	13,1	0,93	0,36	1,08	11	261	0,27	6	3,41	7,52	1,33	18,7
2.09.77	9,8	2371			79,4	14,2	1,04	0,45	1,04	8,5	283	0,34	6	3,38	6,04	1,54	26,2
Source de la combe de Chaupin : x = 874,08 y = 305,75 z = 1470																	
2.01.77	5,8	4675	6,1	4,25	38,1	6,32	0,70	0,12	0,63	25	112	0,14	6	3,66	28,7	2,20	3,60
3.07.77	6,4	4384	7,9		38,9	7,29	1,02	0,01	0,74	18	123	0,29	8	3,24	18,5	1,89	5,20

Date	t	ρ	pH	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Q	rCa rMg	rSO ₄ ⁴ rCl ⁴	rNa rCl	rHCO ₃ ³ rSO ₄ ⁴
SOURCES ISSUES DE L'AALENIEN																	
Source du bois du Chanet nord : x = 870,63 y = 307,12 z = 1018																	
17.04.77	7	2920	7,4		75,5	1,46	1,34	0,18	2,07	8,5	220	0,16	3	31,4	3,03	0,99	20,4
7.07.77	8,4	2593	7,7		85,8	3,89	1,45	0,19	2,12	13	253	0,19	2	13,4	4,70	1,06	14,7
2.09.77	9,3	2520	7,5		90,4	3,40	1,50	0,15	1,69	14	260	0,18	2	16,1	6,12	1,37	14,6
Source du bois du Chanet sud : x = 870,61 y = 307,25 z = 1022																	
17.04.77	6,6	3127	7,3		69,7	1,95	1,34	0,16	2,07	10	205	0,20	30	21,7	3,75	0,99	15,4
7.07.77	7,3	2754	7,3		80,6	3,16	1,44	0,15	1,53	14	229	0,22	3	15,5	6,76	1,45	12,9
2.09.77	8,1	2619			86,2	3,16	1,48	0,19	1,53	13	242	0,29	2	16,5	6,28	1,49	14,5
Source des Nizets : x = 870,51 y = 305,81 z = 990																	
7.11.76	8,5	2460	7,8	7	71,4	4,62	1,20	0,19	2,04	19	256	0,45	1*	12	6,88	0,91	10,6
5.12.76	6	2772	7,7		79,1	2,55	1,20	0,16	1,48	11	234	0,20	1*	18,8	5,44	1,25	16,9
17.04.77	5,7	3331	7,3		65,7	2,07	1,20	0,20	1,84	11	190	0,26	2*	19,3	4,19	1	13,6
7.07.77	9,1	2898	7,7		76,4	7,17	1,20	0,13	1,62	12	217	0,24	0,4*	6,5	5,47	1,14	14,2
2.09.77	9,7	2772	7,4		81,8	2,43	1,29	0,16	1,51	9,5	232	0,24	0,3*	20,4	4,65	1,32	19,2
SOURCES ISSUES DES MORAINES WURMIENNES																	
Source de La Bergogne nord : x = 871,59 y = 306,74 z = 950																	
7.07.77	8,9	11415	6,7		13,8	1,58	2,18	0,12	1,84	9	38	0,22	5	5,31	3,61	1,82	3,30
2.09.77	7,5	10564			16,4	1,21	2,43	0,17	1,73	6	46	0,18	12	8,24	2,56	2,16	6
Source des Jossierands amont : x = 871,92 y = 307,84 z = 980																	
5.12.76	6,5	2530	7,3		16,8	1,46	1,66	0,23	1,71	11	49	0,90	12	7	4,75	1,49	3,50
16.01.77	5,6	10198	7,8		17,4	1,09	1,65	0,21	1,62	12	41	0,86	6	9,70	5,47	1,57	2,70
17.04.77	5	10600	6,8		15,8	1,34	1,62	0,21	2,07	10	34	0,83	5	7,17	3,57	1,21	2,40
7.07.77	8,3	10167	6,6		17	1,34	1,63	0,16	2,02	11	39	0,67	4	7,71	4,20	1,25	2,70
2.09.77	9,6	9600			18,9	0,97	1,74	0,23	1,71	8,5	45	0,54	7	11,8	3,67	1,57	4,20
Source des Quatre Fontes : x = 871,93 y = 306,53 z = 1005																	
11.11.76	7,4	12280	7,4	11	12,4	1,70	2,16	0,54	2,79	10	32	0,85	2,5*	4,43	2,65	1,19	2,50
5.12.76	4,6	11486	7,1		12,4	1,94	2,44	0,43	2,81	8	33	1,22	3	3,88	2,10	1,34	3,20
17.04.77	5,2	12310	7		12,8	0,73	2,44	0,46	3	4,5	28	1,60		10,7	1,10	1,26	4,90
7.07.77	8,3	12766	7,1		11,8	2,18	1,90	0,35	2,09	7	30	1,11	1	3,29	2,46	1,40	3,40
2.09.77	10,9	11898			14	0,97	2,04	0,39	2,05	5,5	35	0,81	2	8,77	1,98	0,99	5

Date	t	ℓ	pH	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Q	rCa rMg	rSO rCl ⁴	rNa rCl	rHCO ₃ ³ rSO ₄
SOURCES ISSUES DES MORAINES WURMIENNES suite																	
Source de la route Cholonge-Laffrey : x = 871,97 y = 306,70 z = 1010																	
11.11.76	7,6	11955	7,3	10,8	12,8	1,70	1,72	0,26	1,75	9	40	0,50	15	4,57	3,80	0,97	3,50
5.12.76	6,6	13155	7,2		15,2	0,73	1,76	0,26	1,66	6	44	0,25	20	12,7	2,67	1,63	5,80
16.01.76	5,7	13568	8		13,3	0,49	1,80	0,29	1,44	4,5	33	0,30	15	16,4	2,30	1,92	5,70
16.04.77	5,8	14036	7		12,8	0,24	1,78	0,30	1,62	6,5	29	0,35	18	32,4	2,96	1,69	3,50
7.07.77	8,2	13325	6,8		12,2	1,13	1,70	0,21	1,80	9	29	0,31	7	6,56	3,69	1,46	2,50
2.09.77	8,8	12806			13,2	0,72	1,75	0,24	1,40	6	35	0,30	12	11,1	3,16	1,92	4,60
SOURCES D'ORIGINE MIXTE (MORAINES + SUBSTRATUM)																	
Source des Allards : x = 872,12 y = 308,54 z = 965																	
7.11.76	8,3	4975	7,5	7,4	40,9	3,40	1,28	0,22	1,21	11	126	0,10	4	7,30	6,41	1,63	9,40
5.12.76	7,3	4539	7,7		42,9	3,89	1,46	0,26	1,71	8,5	145	0,14	4	6,69	3,67	1,32	13,4
16.01.77	6,4	4567	8,1		45,3	2,43	1,44	0,26	1,26	10	137	0,21	8	11,3	5,87	1,76	10,7
17.04.77	6,4	5406	7,1		37,7	1,70	1,40	0,22	1,71	8	113	0,24	1,5*	13,4	3,45	1,24	11,1
7.07.77	9,2	4717	7,4		41,7	1,22	1,41	0,18	1,42	6,5	129	0,23	4	20,7	3,38	1,53	15,6
2.09.77	9,6	4365			46,5	3,52	1,54	0,21	1,24	9	145	0,24	5	8,03	5,36	1,91	12,7
Source du camping des Thénoux : x = 871,56 y = 304,04 z = 925																	
7.11.76	7,4	4055	7,2	11,2	42,1	3,65	4,08	0,23	9,25	15	90	4	1,5	6,99	1,19	0,68	4,70
5.12.76	8,3	4178	7,1		46,5	3,16	3,32	1,70	5,35	10	128	3,52	4,5	8,93	1,38	0,95	10
16.01.77	7,6	4488	7,7		40,3	3,04	3,44	1,96	4,02	12	106	3,10	6,5	8,04	2,21	1,32	6,90
17.04.77	7	4980	7		35,1	2,79	3,15	1,67	3,85	9,5	98	2,42	6,6	7,63	1,82	1,26	8,10
12.06.77		5028	7,2		34,9	2,55	2,60	1,56	3,52	9,5	97	1,97	3,8	8,29	1,99	1,14	8
7.07.77	9	4525	7,1		39,7	3,53	2,65	1,50	3,46	11	109	1,97	4	6,82	2,34	1,18	7,80
25.07.77		4622			40,1	2,92	3,32	1,53	4,53	7	105	2,03	3,5	8,33	1,14	1,13	11,8
31.07.77		5048			35,3	3,40	3,70	1,37	4,86	9,5	88	2,12	4,6	6,29	1,44	1,17	7,30
7.08.77		4806			36,9	2,67	3,80	1,43	5,50	6,5	100	1,80	3,3	8,38	0,87	1,06	12,1
14.08.77		4660			38,3	2,43	3,70	1,51	5,69	7	106	1,72	3	9,56	0,91	1	11,9
21.08.77		4866			37,3	2,79	3,44	1,55	4,82	7,5	102	1,93	3	8,11	1,15	1,09	10,7
2.09.77	9,7	4700			39,9	2,55	3,36	1,63	4,54	7	106	1,87	2,7	9,48	1,14	1,14	11,9
11.09.77		4793			38,5	2,67	3	1,49	3,92	6	105	1,72	2,2	8,75	1,13	1,18	13,8
25.09.77		4791			39,1	2,79	3,08	1,57	3,70	9	105	1,62	1,2	8,50	1,80	1,28	9,20

Date	t	ρ	pH	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Q	rCa rMg	rSO ₄ rCl ⁻	rNa rCl	rHCO ₃ rSO ₄
SOURCES D'ORIGINE MIXTE (MORAINÉ + SUBSTRATUM) suite																	
Source du col du Fond des Sciaux : x = 873,78 y = 308,65 z = 1235																	
11.11.76	6,6	6593	7,4	4,55	32,1	1,45	0,78	0,32	1,04	2	96	2,50		13,4	1,42	1,15	38
Source de Côte Froide : x = 871,87 y = 308 z = 970																	
11.11.76	7,9	4510	7,2	8,55	42,9	5,35	1,60	0,15	1,62	12	143	0,40	0,2*	4,86	5,57	1,52	9,40
5.12.76	5,7	5316	7,4		34,5	4,37	1,56	0,14	1,71	12	118	0,22	5	4,79	5,40	1,40	7,40
16.01.77	4,4	5416	7,8		34,1	4,37	1,54	0,12	1,57	14	101	0,24	2	4,76	6,35	1,51	5,90
17.04.77	5,0	5550	7,1		23,7	2,65	1,62	0,13	1,80	9,5	104	0,24	1*	5,60	3,90	1,39	8,70
7.07.77	13,4	4654	7,6		40,1	4,86	1,61	0,04	1,58	11	127	0,17	2	5	5,10	1,57	9,10
2.09.77	12,6	4504			42,7	4,74	1,66	0,05	1,58	9	134	0,18	4	5,46	4,20	1,62	11,7
Source de Fontaine Pelouze nord : x = 871,85 y = 305,23 z = 930																	
17.04.77	7,9	4555	7,2		44,5	2,19	2,06	0,72	2,50	7,5	129	0,80	1,5*	12,3	2,22	1,27	13,5
Source de Fontaine Pelouze sud : x = 871,87 y = 305,22 z = 930																	
7.11.76	6,7	3673	7,4	7,25	55,7	4,13	1,56	1,13	4,38	20	137	2	4	8,18	3,37	0,55	5,4
5.12.76	7,9	4865	7		38,3	2,92	1,92	0,54	2,34	9	143	0,72	2*	8,16	2,84	1,27	12,5
16.01.77	7,7	5202	7,8		38,9	2,92	1,99	0,59	2,43	8,5	112	0,69	1*	8,08	2,58	1,26	10,4
17.04.77	8	5028	7,2		38,9	1,95	2,12	0,64	2,56	9,5	115	0,72	5*	12	2,74	1,28	9,5
7.07.77	7,9	5150	7,2		38,5	2,31	2,32	0,57	1,94	11	112	0,61	6	10,1	3,99	1,84	8,4
2.09.77	7,8	6073			32,1	1,95	1,90	0,54	2,23	8,5	90	0,42	2	9,98	2,82	1,31	8,3
Source des Jossierands aval : x = 871,84 y = 307,7 z = 955																	
5.12.76	6,5	6116	7,8		30,5	3,16	1,77	0,20	1,89	11	101	0,42	1*	5,85	4,30	1,44	7,2
16.01.77	6,1	6382	8		29,3	2,18	1,76	0,31	1,66	11	85	0,49	1*	8,14	4,98	1,63	5,8
17.04.77	5,4	7000	7,4		26,1	2,31	1,76	0,20	1,80	9	73	0,50	3,5*	6,84	3,69	1,51	6,4
7.07.77	8,4	5257	7,3		36,1	3,16	1,73	0,28	1,58	10	107	0,47	8	6,93	4,91	1,69	8
2.09.77	8,8	4873			40,3	2,91	1,84	0,33	1,35	7	121	0,40	2	8,40	3,83	2,10	13,6
Source de Pré Court : x = 371,87 y = 308,17 z = 950																	
11.11.76	7,3	4295	7,5	7,5	43,7	6,08	1,38	0,24	2,20	20	133	1,10	6*	4,36	6,55	0,97	5,4
5.12.76	5,2	5284	7,5		35,3	3,40	1,50	0,22	1,98	19	122	0,87	1,5*	6,29	7,26	1,16	4,9
16.01.77	4,2	5552	8,2		32,1	3,89	1,51	0,21	2,34	18	88	0,79	1,5*	5	5,53	0,99	3,9
17.04.77	3,9	5802	7,4		30,9	3,28	1,58	0,21	2,16	11	84	0,74	7*	5,71	3,76	1,12	6
7.07.77	8,4	4815	7,4		38,5	4,37	1,58	0,18	1,80	15	110	0,64	1*	5,34	6,16	1,35	5,8
2.09.77	8,5	4568			42,3	4,25	1,63	0,23	1,94	13	120	0,54	1*	6,04	5,14	1,29	7

Date	t	ρ	pH	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Q	$\frac{rCa}{rMg}$	$\frac{rSO}{rCl^4}$	$\frac{rNa}{rCl}$	$\frac{rHCO_3}{rSO_4}$
SOURCES D'ORIGINE MIXTE (MORAINES + SUBSTRATUM) suite																	
Source du ruisseau de l'Oche aval : x = 872,47 y = 303,42 z = 995																	
7.11.76	6,9	6195	7,2	10,5	32,5	2,43	1,70	1,42	5,35	23	80	0,60	0,5*	8,11	3,18	0,49	2,75
17.04.77	6,4	5232	7,5		36,5	2,18	2	0,55	2,93	3	111	1,09	0,5*	10,2	0,75	1,04	29,1
7.07.77	10,7	4968	7,2		39,3	2,67	2,02	0,35	3,20	3,5	117	0,94	0,3*	8,93	0,82	0,97	26
2.09.77	10,5	4884			41,7	1,82	2,06	0,47	2,97	3	101	0,74	15	13,9	0,74	1,07	31
Source du Sapney lavoir : x = 873,84 y = 309,8 z = 1000																	
7.11.76	7,3	7940	7,4	5,6	26,5	1,94	1,06	0,24	1,06	13	77	0,15	12	8,27	9,06	1,54	4,8
7.04.77	4,4	8963	7,2		21,2	1,70	1	0,17	0,76	9	60	0,17	30	7,58	8,75	2,03	5,2
7.07.77	12,5	7122	7,2		26,8	2,19	1,05	0,19	0,65	10	77	0,26	10	7,44	11,4	2,62	6,1
2.09.77	12,3	6522			29,9	2,31	1,20	0,23	0,76	7	88	0,15	9	7,84	6,8	2,44	9,9
Source du Sapney sud : x = 873,82 y = 309,34 z = 1174																	
17.04.77	5,2	7396	7,2		25,1	2,43	0,96	0,12	0,85	9,5	74	0,22	0,2*	6,26	8,26	1,74	6,1
Source sous-lacustre de Petichet : x = 871,69 y = 304,57 z = 920																	
19.10.76	8,5	4607	7,1	6,5	32,8	2,71	2,47	0,74	2,11	15	102	0,92		7,34	7	1,80	5,4
25.08.77	8,2	6050			32,9	2,19	2,20	0,61	1,87	14	92	0,62		9,10	5,53	1,80	5,2
Source des Vernes : x = 872,24 y = 305,48 z = 1010																	
17.04.77	4	5511	7,5		32,1	2,67	3	1,41	5,87	9,5	85	1,97		7,29	1,20	0,79	7
SOURCES ISSUES DES FORMATIONS QUATERNAIRES A ELEMENTS SEDIMENTAIRES																	
Source des Essards : x = 872,9 y = 304,5 z = 1068																	
5.12.76	5,9	4467	7,3		46,1	1,95	1,45	0,28	1,60	4,7	145	0,74	2,5*	14,3	2,17	1,40	24,2
Source de Pierre-Châtel est : x = 872,04 y = 302,62 z = 840																	
17.04.77	8,6	3284	7,6		60,1	3,70	2,64	1,35	4,59	7,5	182	1,77	0,5*	9,99	1,20	0,89	19
7.07.77	10	3059	7,9		66,9	4,13	2,50	1,37	4,18	9,5	195	1,62	0,1*	9,83	1,68	0,92	16
2.09.77	9,5	3037			68,1	4,01	2,56	1,46	4,41	5,5	192	1,97	0,5*	10,3	0,92	0,89	27
Source du ruisseau de la baie nord-est (voir analyses des ruisseaux)																	

Date	t	ρ	pH	SiO ₂	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Q	rCa rMg	rSO ₄ ⁼ rCl ⁻	rNa rCl	rHCO ₃ ⁻ rSO ₄ ⁼
SOURCES ISSUES DES FORMATIONS QUATERNAIRES A ELEMENTS SEDIMENTAIRES suite																	
Source du ruisseau de l'Oche amont : x = 872,76 y = 303,31 z = 1010																	
7.11.76	6,2	4200	7,8	9	50,1	2,67	1,55	1,05	3,24	16	145	0,90	2*	11,4	3,65	0,74	7,1
5.12.76	7,3	3361	7,9		60,1	3,40	1,72	0,67	1,80	11	198	1,07	4,5*	10,7	4,59	1,47	13,9
16.01.77	6,7	3550	8,1		59,5	2,07	1,64	0,70	1,75	9,5	173	1,21	5*	17,5	4	1,45	14,3
17.04.77	8	3756	7,8		55,3	1,82	1,72	0,69	2,11	3,5	166	1	8*	18,4	1,22	1,26	37
7.07.77	9,2	3710	7,8		56,1	2,92	1,64	0,57	2,75	4,5	165	0,97	2*	11,7	1,62	1,23	28,9
2.09.77	9,1	3642			59,1	2,55	1,65	0,57	1,91	5	171	0,85	3*	14,1	1,93	1,33	26,8
Source de La Traverse nord : x = 873,1 y = 302,86 z = 1025																	
17.04.77	6,6	2972	7,5		67,9	4,74	1,60	0,90	2,74	9,5	212	0,90	1*	8,70	2,56	0,90	17,8
2.09.77	9,9	3245			64	4,13	1,26	0,55	1,60	8,5	194	0,62	2*	9,39	3,92	1,21	17,9
Source de La Traverse sud : x = 873,19 y = 302,74 z = 1029																	
17.04.77	8	3388	7,7		60	4,13	1,44	0,11	2,11	13	195	0,72	4*	8,81	4,55	1,05	11,8
7.07.77	10,1	2943	7,6		69,1	5,11	1,68		3,24	9,5	215	0,54	0,5*	8,21	2,16	0,80	17,8
2.09.77	10	2908			75,5	3,52	1,70	0,29	1,64	8,5	222	0,45	0,5*	12,8	3,83	1,60	20,6
Source des Vorzes est : x = 873,19 y = 305,57 z = 1110																	
5.12.76	6,5	3950	7,5		52,1	3,16	1,35	0,44	0,85	11	165	0,28	0,2*	10	9,99	2,45	11,3
17.04.77	6,1	3916	7,6		47,3	3,16	1	0,08	1,30	10	144	0,27	0,3*	9,08	5,69	1,20	11,3
Source des Vorzes nord : x = 873,02 y = 305,67 z = 1090																	
5.12.76	6,2	3943	7,7		52,1	3,65	1	0,08	0,90	11	165	0,31	60	8,66	9,19	1,71	11,6
16.01.77	5,9	3892	8,2		54,1	2,67	0,98	0,07	0,99	14	161	0,22	10	12,3	10,8	1,53	8,7
17.04.77	7	4162	7,8		49,5	3,04	1,02	0,07	1,06	10	151	0,27	240	9,88	6,97	1,48	11,9
7.07.77	8,9	3763	7,8		54,7	3,77	0,94	0,08	0,86	10	166	0,25	5	8,80	8,59	1,67	13
Source des Vorzes sud : x = 873 y = 305,41 z = 1080																	
7.11.76	8,2	3120	7,4	6	71,3	3,40	1,12	0,23	0,85	24	191	0,20	25	12,7	20,8	1,73	6,2
5.12.76	7,6	3646	7,4		58,1	2,67	1,18	0,18	0,90	14	177	0,24	25	13,2	11,1	2,02	10,3
16.01.77	6,9	3566	7,9		58,5	3,16	1,08	0,14	1,04	13	172	0,22	6	11,2	9,59	1,60	10
17.04.77	6,4	3788	7,5		54,1	3,89	1,06	0,13	1,03	9,5	166	0,25	30	8,44	6,82	1,59	13,8

ANNEXE 4

SONDAGES ELECTRIQUES. INTERPRETATION.

N°	ρ_1	h_1	ρ_2	h_2	ρ_3	h_3	ρ_4	h_4	ρ_5
1	105	3,40	735	30	550				
2	245	0,65	572	3,2	235	21	1000		
3	650	5	130	25	725				
4	9000	1,20	2970	6,5	80				
5	800	0,34	5600	5,8	82				
6	1200	0,70	2230	9,1	56				
7	1170	1,10	4680	5	106				
8	1050	0,62	4200	3,7	106				
9	400	6,5	45						
10	1000	2,70	333	3,5	76				
11	800	0,80	7200	2,4	900		1100		
12	220	0,70	1100	15,4	430				
13	95	1,30	380	39	720				
14	710	0,38	473	5,3	120	3	436		
15	500	1,25	928	8,1	150	1,3	360		
16	1300	0,62	1950	3,4	211	3,5	724		
17	1070	0,46	4280	5,5	688				
18	540	0,42	10300	3,8	380				
19	84	1,10	196	2,2	115	21	2280		
20	59	0,80	177	6,8	78	21,6	1635		
21	85	1,30	170	9,1	75	20,7	360		
22	275	1,10	148	19,8	86	30	420		
23	170	1,10	85	5,5	162	10,1	66	15	352
24	330	0,70	990	1,3	172	0,5	800	6	310
25	550	0,70	753	9,8	244				
26	72	0,55	216	2,8	75	15,7	1560		
27	750	0,75	1392	9	350	5	295		
28	1090	0,46	9810	0,1	2700	4,2	250		
29	1200	9,5	133	6,6	180				

N°	ρ_1	h_1	ρ_2	h_2	ρ_3	h_3	ρ_4	h_4	ρ_5
30	860	1,95	2006	19,5	97				
31	370	1,40	740	9	165				
32	700	0,65	3500	1,3	2260	6,9	118		170
33	530	0,38	2120	8,7	108	8	125		
34	530	0,36	2650	1,8	278	11,2	174		
35	420	0,38	2940	3	371	10	170		
36	750	0,72	1750	1,2	531	4,8	116		
37	1200	0,42	4800	5	131	40	360		
38	2700	0,65	1350	5,5	132	35	260		
39	580	0,60	1740	4,8	169	37	500		
40	1070	0,62	5350	5,6	232				
41	340	0,56	1360	3,9	280	7,5	225		
42	235	0,70	337	6,3	117	56	344		
43	1850	0,55	4315	1,2	278				
44	340	0,80	415	4	287	46,8			
45	295	0,55	548	5,5	76	4,8	420		
46	190	0,50	760	5,5	217				
47	220	0,44	440	15,4	115	5,3	184		
48	160	30	320						
49	350	0,90	427	7,7	208				
50	150	1,15	600	3,2	394	7,6	251		
51	440	1,30	189	2,9	450	4,3	220		
52	165	1,25	82	1,3	315	7,5	153	26	220
53	480	0,70	1920	9,8	175				
54	280	0,80	187	0,7	287	23,7	241		
55	270	0,87	116	3,5	254				
56	150	0,48	225	9,6	408	10	230		
57	140	1,80	700	12,6	135	38	247		
58	380	0,58	1520	5,2	260	30	435		

Les résistivités sont exprimées en $\Omega \cdot m$, les épaisseurs en m.

ANNEXE 5

PRECIPITATIONS ANNUELLES A GRENOBLE.

1878	1061	1898	932	1918	1085	1938	724	1958	1121
1879	847	1899	679	1919	1250	1939	1284	1959	883
1880	952	1900	956	1920	836	1940	1253	1960	1278
1881	868	1901	920	1921	511	1941	997	1961	1007
1882	912	1902	943	1922	1244	1942	757	1962	850
1883	1103	1903	1044	1923	1219	1943	795	1963	1023
1884	584	1904	667	1924	836	1944	1119	1964	807
1885	885	1905	1042	1925	908	1945	844	1965	1089
1886	1059	1906	732	1926	1048	1946	1116	1966	1089
1887	531	1907	985	1927	1114	1947	895	1967	712
1888	926	1908	848	1928	1037	1948	1027	1968	1170
1889	950	1909	900	1929	772	1949	665	1969	943
1890	765	1910	1490	1930	1158	1950	883	1970	1127
1891	959	1911	905	1931	1027	1951	1258	1971	991
1892	1004	1912	1107	1932	808	1952	1082	1972	847
1893	670	1913	1120	1933	990	1953	706	1973	995
1894	860	1914	1271	1934	931	1954	1182	1974	1094
1895	842	1915	1155	1935	1266	1955	965	1975	1089
1896	1033	1916	1180	1936	1025	1956	987	1976	836
1897	676	1917	1223	1937	1155	1957	754	1977	1315

PRECIPITATIONS ANNUELLES A LA MOTTE D'AVEILLANS.

1920	920	1932	793	1944	1125	1956	951	1968	1147
1921	479	1933	944	1945	836	1957	849	1969	914
1922	1349	1934	974	1946	1100	1958	1021	1970	1221
1923	1245	1935	1405	1947	950	1959	956	1971	925
1924	908	1936	1017	1948	1128	1960	1348	1972	803
1925	1017	1937	1164	1949	750	1961	950	1973	807
1926	1211	1938	698	1950	894	1962	864	1974	929
1927	1045	1939	1260	1951	1226	1963	1127	1975	1108
1928	1172	1940	1238	1952	946	1964	768	1976	812
1929	710	1941	934	1953	692	1965	1137	1977	1182
1930	1126	1942	759	1954	1100	1966	980		
1931	1040	1943	883	1955	945	1967	753		

Les hauteurs de précipitations sont exprimées en millimètres.

LISTE DES FIGURES

FIGURES N°	Pages
1 - Cadre géographique	4
2 - Les lacs du plateau matheysin - Carte toponymique	H.T.
3 - Courbes hypsométriques et fréquences altimétriques	8
4 - Le bassin versant des lacs de Laffrey et Petichet	10
5 - Les lacs du plateau matheysin - Carte géologique	14
6 - Série stratigraphique du Houiller matheysin	16
7 - Stratigraphie du Trias matheysin	19
8 - Stratigraphie du Lias épais dauphinois	22
9 - Stratigraphie du Lias réduit de la région de Laffrey	22
10 - Plans de situation géographique des sondages électriques	34
11 - Carte de situation des forages	37
12 - Etalonnages de la résistivité du substratum	37
13 - Résistivités réelles des terrains du substratum	38
14 - Coupe géologique 1 - Sondages électriques 1 à 9	42
15 - Coupes géologiques 2, 3 et 4. Sondages électriques 13 à 30	44
16 - Coupe géologique 5. Sondages électriques 31 à 42.....	46
17 - Coupes géologiques 6, 7 et 8 . Sondages électriques 44 à 57	48
18 - Morphologie du substratum, coupes sérieés s	52
19 - Coupe longitudinale du nord de la Matheysine	54
20 - Les lacs du plateau matheysin, carte morphologique 1/50 000	55
21 - Granulométrie des moraines. Courbes de fréquence cumulée	56
22 - Coupe schématique du dispositif fluvio-glaciaire du Villard St-Christophe - 60	62
23 - Schémas de situation des tourbières datées	62
24 - Cartes schématiques des glaciers régionaux	64
25 - Extension du glacier rissien de la Romanche. Stades de retrait de la diffluence du glacier würmien de la Romanche en Matheysine (1.2) - 68	68
26 - Stades de retrait de la diffluence du glacier würmien de la Roman- che en Matheysine (3.4.6.)	70
27 - Stades de retrait de la diffluence du glacier würmien de la Roman- che en Matheysine (7.8.9.)	72
28- Stades de retrait de la diffluence du glacier würmien de la Romanche en Matheysine (10.11.13.14.).....	74
29 - Equipement hydro-météorologique du bassin versant.....	80
30 - Corrélation entre hauteurs pluviométriques cumulées	81
31 - Ajustement des modules pluviométriques annuels à la loi de Gauss (Grenoble)	82
32 - Ajustement des modules pluviométriques annuels à la loi de Gauss (La Motte d'Aveillans)	83
33 - Moyennes mobiles sur 20 ans des précipitations annuelles à Grenoble de 1 878 à 1 977	85
34 - Précipitations mensuelles à La Motte d'Aveillans (1961-1976)... 35 - Précipitations mensuelles à La Fayolle	87
36 - Précipitations quotidiennes à La Fayolle (1 976-1 977).....	88
37 - Ecart à la moyenne des températures mensuelles (La Motte d' Aveillans oct. 76 - sept 77)	89
38 - Températures moyennes mensuelles à La Fayolle	93

39 - Gradient altimétrique de la température entre St Martin d'Hère et La Fayolle	93
40 - Courbes de tarage	111
41 - Débits moyens quotidiens du ruisseau des Moulins	112
42 - Ruisseau des Moulins - 3 crues caractéristiques	114
43 - Ruisseau des Moulins - Courbes des débits moyens quotidiens classés (oct. 76 - sept 77)	117
44 - Débits moyens mensuels - Ruisseau des Moulins. Exutoire de Laffrey - Exutoire de Petichet	118
45 - Courbes de tarissement du ruisseau des Moulins	122-123
46 - Variations des réserves souterraines - Variations du coefficient de tarissement	124
47 - Courbes de tarissement théoriques	124
48 - Zones de circulations souterraines et de stockage d'eau	127
49 - Corrélations précipitations-lame d'eau écoulée. Bassin versant total de 1 948 à 1 970	131
50 - Cartes bathymétriques des lacs de Petichet et Laffrey	136
51 - Variations de niveau des lacs	138
52 - Lac de Laffrey - Variations de la température en fonction de la profondeur	141
53 - Lac de Petichet - Variations de la température en fonction de la profondeur	142
54 - Variations de la température de surface des lacs	142
55 - Variations de la transparence	144
56 - Variations des concentrations en oxygène dissous	145
57 - Variations du pH en fonction de la profondeur	147
58 - Variations des concentrations en éléments dissous en fonction de la profondeur	150
59 - Variations des concentrations en éléments dissous en fonction de la profondeur	152
60 - Variations des concentrations en éléments dissous en fonction de la profondeur	156
61 - Variations des concentrations en éléments dissous en fonction de la profondeur	159
62 - Ruisseau des Moulins (aval) - Variations des concentrations en fonction du débit	175
63 - Ruisseau des Moulins (aval) - Variations des concentrations en fonction du débit	177
64 - Ruisseau des Moulins (aval) - Variations des concentrations en fonction du débit	178
65 - Ruisseau des Moulins (aval). Deux exemples de pollutions	180
66 - La Fayolle - Variations physico-chimiques des précipitations atmosphériques	186
67 - Carte de situation des points de prélèvements	202
68 - Répartition de la résistivité des sources	206
69 - Relation minéralisation totale- résistivité pour les sources	208
70 - Source de Lespinasse - Variations des paramètres physico-chimiques	214
71 - Diagramme de SCHOELLER . 3 sources du Houiller	214
72 - Conditions d'émergence des sources de Lespinasse	215
73 - Source de la route de Séchilienne - Variations des paramètres physico-chimiques	220
74 - Diagramme de SCHOELLER . 3 sources du Calcaire de Laffrey et du Lias dauphinois	220
75 - Trois sources de l'Aalénien - Variations des paramètres physico-chimiques	224
76 - Diagramme de SCHOELLER . 3 sources de l'Aalénien	224
77 - Deux sources des moraines würmiennes. Variations des paramètres physico-chimiques	228

78 - Diagramme de SCHOELLER. 3 sources des moraines würmiennes	228
79 - Trois sources d'origine mixte . Variations des paramètres physico-chimiques	232
80 - Diagramme de SCHOELLER . 4 sources d'origine mixte	232
81 - Deux sources des formations quaternaires à éléments sédimentaires. Variations des paramètres physico-chimiques	236
82 - Diagramme de SCHOELLER. 2 sources des formations quaternaires à éléments sédimentaires	236
83 - Diagramme de SCHOELLER . Eaux issues du conglomérat houiller	242
84 - Diagramme de SCHOELLER . Eaux issues des schistes gréseux du Houiller.....	242
85 - Diagramme de SCHOELLER . Eaux issues du Calcaire de Laffrey ou du Lias dauphinois	243
86 - Diagramme de SCHOELLER . Eaux issues de l'Aalénien	243
87 - Diagramme de SCHOELLER . Eaux issues des moraines würmiennes	244
88 - Diagramme de SCHOELLER . Eaux d'origine mixte	244
89 - Diagramme de SCHOELLER . Eaux issues des formations quaternaires à éléments sédimentaires	245
90 - Hydrochimie des sources. Diagramme $\text{HCO}_3^- / \text{SO}_4^{--}$	247
91 - Hydrochimie des sources. Diagramme $\text{SO}_4^{--} / \text{Cl}^-$	248
92 - Hydrochimie des sources. Diagramme $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$	248
93 - Hydrochimie des sources. Diagramme $\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++}$	248
94 - Répartition des différentes familles de sources sur un diagramme $\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++}$	249

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAUX N°	Pages
1 - Bassin versant des lacs de Petichet et Laffrey. Répartition altimétrique et fréquences altimétriques des surfaces	7
2 - Bassin versant du ruisseau des Moulins. Répartition altimétrique et fréquences altimétriques des surfaces	9
3 - Progression des distances AB et MN de la prospection électrique	33
4 - Gammes de résistivités spécifiques des terrains du substratum	39
5 - Altitude du fond des sillons glaciaires entre La Coirelle et Cholonge	49
6 - Principales caractéristiques granulométriques de deux moraines matheysines	57
7 - Précipitations à La Motte d'Aveillans (1 961 - 1 976)	86
8 - Lames d'eau précipitées (oct. 76 - sept 77)	91
9 - Températures moyennes mensuelles à La Motte d'Aveillans	92
10 - Moyennes mensuelles des températures minimales et maximales quotidiennes à La Fayolle, et températures moyennes mensuelles à St Martin d'Hères.....	94
10a- Gradient altimétrique de la température entre St Martin d'Hères et La Fayolle	94
11 - Hygrométrie moyenne mensuelle et pression partielle d'eau à La Fayolle....	95
12 - Durée de l'insolation mensuelle à St Martin d'Hères	96
13 - Vitesse moyenne mensuelle du vent à St Martin d'Hères	97
14 - Radiation solaire globale à St Martin d'Hères	98
15 - Evapotranspiration mensuelle selon L. TURC	99
16 - Facteur de correction c de la formule de C.W. THORNTHWAITE	99
17 - Evapotranspiration mensuelle selon C.W. THORNTHWAITE	100
18 - Coefficient mensuel j de la formule de B. PRIMAULT	100
19 - Evapotranspiration mensuelle selon B. PRIMAULT	100
20 - Evapotranspirations réelles et déficits d'écoulements en mm calculés pour la période oct. 76 - sept 77	102
21 - Températures moyennes mensuelles de l'eau des lacs et pressions de vapeur saturante à ces températures	103
22 - Pression de vapeur d'eau de l'air à La Fayolle	104
23 - Evaporation de la surface des lacs d'après la formule de LUGEON et SKYENKIEWICZ	104
24 - Evaporation de la surface des lacs d'après la formule de A. MEYER	105
25 - Paramètres hydrologiques mensuels des trois points de mesures des débits..	116
26 - Paramètres hydrologiques annuels caractéristiques	119
27 - Paramètres hydrologiques des courbes de tarissement du ruisseau des Moulins	121
28 - Paramètres morphométriques des lacs de Laffrey et Petichet	137
29 - Concentrations moyennes et masses d'éléments dissous dans les deux lacs..	148
30 - Les différentes formes de phosphore présent dans l'eau	158
31 - Teneurs en eau des sédiments lacustres.....	162
32 - Composition chimique et granulométrique des sédiments des lacs de Laffrey et Petichet	162-163
33 - Teneurs en CaCO ₃ des sédiments lacustres	164
34 - Analyses chimiques des eaux interstitielles des sédiments lacustres.....	164
35 - Classification des niveaux trophiques des lacs d'après l'alcalinité des eaux	166
36 - Classification des niveaux trophiques des lacs d'après les teneurs en N et P	166
37 - Ruisseau des Moulins - analyse chimique moyenne	172
38 - Ruisseau des Moulins - analyses chimiques du 21.8.77	172
39 - Relation concentration - débit pour les principaux éléments dissous du ruisseau des Moulins	174

39a-	Composition chimique théorique des eaux souterraines du bassin versant du ruisseau des Moulins	176
40 -	Eléments dissous apportés par le ruisseau des Moulins au lac de Petichet d'oct. 76 à sept. 77.....	181
41 -	Charge supplémentaire apportée par deux épisodes de pollution	182
42 -	Charge annuelle apportée par les pollutions quotidiennes	182
43 -	Composition chimique moyenne des apports des versants du lac de Petichet	183
44 -	Masse d'éléments dissous apportés par les versants du lac de Petichet..	183
45 -	Analyse des apports atmosphériques dans différentes régions du monde...	184
46 -	Composition chimique moyenne des apports atmosphériques à La Fayolle de décembre 76 à octobre 77.....	185
47 -	Apports atmosphériques sur le bassin versant des lacs de Petichet et Laffrey d'octobre 76 à septembre 77	187
48 -	Charge dissoute sortant du lac de Petichet (oct. 76 - sept. 77).....	188
49 -	Bilan chimique du lac de Petichet et pourcentage de participation aux apports	189
50 -	Apports de l'exutoire du lac de Petichet au lac de Laffrey	191
51 -	Apports des versants du lac de Laffrey et composition chimique moyenne de ceux-ci.	
52 -	Apports atmosphériques sur le lac de Laffrey	192
53 -	Charge dissoute sortant du lac de Laffrey	192
54 -	Bilan chimique du lac de Laffrey et pourcentage de participation aux apports	193
55 -	L'érosion chimique dans les Alpes	194
56 -	Charges admissibles et dangereuses en azote total et en phosphore total	196
57 -	Composition chimique moyenne de la source du bois de Paraillat	212
58 -	Compositions chimiques moyennes de deux sources du Houiller schisto-gréseux	216
59 -	Compositions chimiques moyennes de 3 sources du Calcaire de Laffrey....	222
60 -	Compositions chimiques moyennes de 3 sources de l'Aalénien	226
61 -	Compositions chimiques moyennes de 2 sources des moraines würmiennes..	229
62 -	Compositions chimiques moyennes de quelques sources à alimentation mixte	234
63 -	Compositions chimiques moyennes de deux sources des formations sédimentaires à éléments sédimentaires.....	237
64 -	Eléments pour une classification des sources du nord de la Matheysine..	240-241

VU

Grenoble, le 20/12/78

Le Président de la thèse

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized name followed by a long horizontal flourish.

Vu, et permis d'imprimer,

Grenoble, le

Le Président de l'Université
Scientifique et Médicale