

TYPOLOGIE DES EAUX SOUTERRAINES DU FLYSCH DE LA NAPPE TECTONIQUE DU NIESEN (PREALPES SUISSES)

THESE N° 1073 (1992)

PRESENTEE AU DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES

PAR

PEDRO PABLO BASABE-RODRIGUEZ

Ingénieur géologue diplômé de l'Ecole Polytechnique Nationale de Quito (Equateur)
Hydrogéologue diplômé de l'Université de Neuchâtel
de nationalité équatorienne

acceptée sur proposition du jury:

Prof. J.-H. Gabus, rapporteur
Dr A. Ackermann, corapporteur
Dr G. Della Valle, corapporteur
M. J. Mautner, corapporteur
Prof. A. Parriaux, corapporteur
Dr F. Vuataz, corapporteur

Lausanne, EPFL
1992

*Pensando en aquellos que carecen de agua y
en aquellos que teniéndola saben respetarla.*

*(En pensant à ceux qui manquent d'eau et à ceux qui en ont et
qui savent la respecter).*

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	I
LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES ANNEXES	XIII
RESUME	XV
ZUSAMMENFASSUNG	XVII
ABSTRACT	XXI
RESUMEN	XXV
REMERCIEMENTS	XXIX
1. INTRODUCTION	1
Préambule	1
Projet AQUITYP	1
Objectifs de l'étude	3
2. CADRE DE L'ETUDE	5
2.1 Géographie physique, hydrographie et occupation du territoire	5
2.1.1 Régions de la nappe du Niesen	5
2.1.2 Région de la nappe du Gurnigel	7
3. GEOLOGIE	9
3.1 Introduction	9
3.2 Cadre général : Les Préalpes	9
3.3 Nappe du Niesen	11
3.3.1 Historique	11
3.3.2 Aperçu tectonique	11
3.3.3 Lithostratigraphie et pétrographie	14
3.4 Nappe du Gurnigel	17
4. METHODOLOGIE ET ACQUISITION DES DONNEES	19
4.1 Enoncé du problème	19
4.2 Méthodologie générale	20
4.3 Etude bibliographique et données empruntées	22
4.3.1 Inventaire et sélection des sources	22
4.3.2 Pluviométrie et température de l'air	22

4.3.3	Données hydrochimiques et hydrogéologiques	23
4.3.4	Cartographie topographique, géologique et des zones de protection de sources	25
4.4	Travaux de terrain et acquisition des données	26
4.4.1.	Réseaux d'observation des eaux souterraines	26
4.4.2	Equipement des sources principales et acquisition de ses données	30
4.4.3	Echantillonnage des eaux souterraines et mesures physico-chimiques in situ	30
4.4.4	Echantillonnage des roches des flyschs	30
4.5	Analyses des eaux, contrôles et choix des paramètres chimiques	31
4.5.1	Paramètres, unités, méthodes et appareillage	31
4.5.2	Analyses chimiques	32
4.5.3	Influences qualitatives d'origine extra-géologiques	39
4.5.4	Influences dues au sol	41
4.5.5	Choix des éléments	41
4.6	Lixiviats de roche et analyses	43
4.7	Traitement et interprétation de paramètres	43
5.	HYDROLOGIE ET HYDROGEOLOGIE	47
5.1	Contexte hydrologique et hydrogéologique général	47
5.2	Traceurs artificiels	50
5.3	Comparaison des paramètres hydrochimiques des neiges et des eaux souterraines	53
6.	PARAMETRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES	57
6.1	Introduction	57
6.2	Caractérisation physique et chimique régionale : cartes et histogrammes des paramètres (réseau 1 à répartition spatiale)	57
	Les paramètres physico-chimiques	59
6.2.1	Le débit (Q en l/mn)	59
6.2.2	La température (T en °C)	61
6.2.3	Le pH	64
6.2.4	La minéralisation totale (TSD en mg/l)	66
	Les anions principaux	69
6.2.5	Les hydrogénocarbonates (HCO ₃ en mg/l)	69
6.2.6	Les sulfates (SO ₄ en mg/l)	71
6.2.7	Les chlorures (Cl en mg/l)	74

Les cations principaux et le silicium	76
6.2.8 Le calcium (Ca en mg/l)	76
6.2.9 Le magnésium (Mg en mg/l)	78
6.2.10 Le sodium (Na en mg/l)	80
6.2.11 Le strontium (Sr en mg/l)	82
6.2.12 Le potassium (K en mg/l)	84
6.2.13 Le silicium (Si en mg/l)	86
Les éléments en trace	88
6.2.14 Le baryum (Ba en µg/l)	88
6.2.15 Le fer (Fe en µg/l) "traitement descriptif"	90
6.2.16 Le bore (B en µg/l)	92
6.2.17 Le lithium (Li en µg/l)	94
6.2.18 Le brome (Br en µg/l) "traitement descriptif"	96
6.2.19 Le zinc (Zn en µg/l) "traitement descriptif"	98
6.2.20 Le rubidium (Rb en µg/l)	100
6.2.21 L'aluminium (Al en µg/l) "traitement descriptif"	102
6.2.22 Le nickel (Ni en µg/l)	104
6.2.23 L'iode (I en µg/l) "traitement descriptif"	106
6.2.24 Le manganèse (Mn en µg/l)	108
6.2.25 Le cuivre (Cu en µg/l)	110
6.2.26 L'uranium (U en µg/l)	112
6.2.27 Le chrome (Cr en µg/l)	114
6.2.28 Le vanadium (V en µg/l)	116
6.2.29 Le cobalt (Co en µg/l)	118
6.2.30 Le lanthane (La en µg/l) "traitement descriptif"	120
6.2.31 Résumé de la caractérisation hydrochimique régionale des eaux souterraines	122
6.3 Variation temporelle des paramètres physiques et chimiques (réseau N°3)	126
7. CLASSIFICATION CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES ET CARACTERISATION GEOLOGIQUE DES BASSINS	133
7.1 Classification chimique des eaux souterraines	133
7.1.1 Faciès hydrochimiques des eaux (composés majeurs)	134
7.1.2 Composés mineurs et en trace	141
7.2 Caractérisation géologique des bassins	142
7.3 Analyse de corrélation des composés chimiques des eaux	143
7.4 Evolution spatio-temporelle (réseau N° 2) des éléments majeurs et mineurs basée sur l'Analyse multivariée en composantes principales	144

8.	DISCUSSION SUR L'HYDROCHIMIE DES EAUX ET DES ROCHES	147
8.1	Eaux souterraines considérées	147
8.2	Echantillons de roche et composition hydrochimique des lixiviats	148
8.3	Comparaison eaux souterraines - lixiviats de roches	156
8.3.1	Considérations générales	156
8.3.2	Minéralisation totale	156
8.3.3	Les composés majeurs et mineurs	157
8.3.4	Les éléments en trace	164
8.3.5	Les éléments en micro-trace	168
8.4	Synthèse comparative eaux souterraines - lixiviats de roche par séquences de flyschs	175
9.	COMPARAISON AVEC LE RESEAU AQUITYP	179
9.1	Comparaison des composés chimiques des exutoires du flysch du Niesen avec les autres exutoires d'aquifères-types N°2 du réseau AQUITYP	182
9.2	Comparaison des composés chimiques des exutoires du flysch du Niesen avec les autres aquifères-types du réseau AQUITYP	184
9.2.1	Comparaison des composés chimiques des exutoires du flysch du Niesen et des exutoires d'aquifères-types N°1 du réseau AQUITYP	184
9.2.2	Comparaison des composés chimiques des exutoires du flysch du Niesen et des exutoires d'aquifères-types N°3 du réseau AQUITYP	186
9.2.3	Comparaison des composés chimiques des exutoires du flysch du Niesen et des exutoires d'aquifères-types N°4 du réseau AQUITYP	188
9.2.4	Comparaison des composés chimiques des exutoires du flysch du Niesen et des exutoires d'aquifères-types N°5 du réseau AQUITYP	190
10.	CONCLUSIONS ET RAPPEL DES RESULTATS	193
	BIBLIOGRAPHIE	195
	ANNEXE 1	A1
	ANNEXE 2	A5
	ANNEXE 3	A39
	ANNEXE 4	A49
	ANNEXE 5	A51
	ANNEXE 6	A57
	CURRICULUM VITAE	A59

LISTE DES FIGURES

Fig. 1.1	Carte des sources du réseau AQUITYP.	2
Fig. 2.1	Situation géographique du territoire d'étude. Axes des nappes tectoniques du Niesen au SE et du Gurnigel au NW.	6
Fig. 3.1	Situation géographique et géologique des nappes du Niesen et du Gurnigel d'après Plancherel (1979).	10
Fig. 3.2	Esquisse géologique et structurale de la nappe du Niesen d'après Ackermann (1986).	12
Fig. 3.3	Profils schématiques dans le secteur nord-est de la nappe du Niesen d'après Ackermann (1986).	13
Fig. 4.1	Organigramme sur la méthodologie de l'étude, avec numérotation des chapitres.	21
Fig. 4.2	Localisation des sources des réseaux à répartition spatiale (N° 1) et temporelle (chiffres encadrés) (N° 3).	28
Fig. 4.3	Exemple de contrôle des analyses : Concentrations en calcium par Complexométrie et par Spectrophotométrie d'absorption atomique (AAS).	36
Fig. 4.4	Exemple de contrôle des analyses : Concentrations en calcium par Spectrométrie de masse à source à plasma (ICP-MS) et par Spectrophotométrie d'absorption atomique (AAS).	36
Fig. 4.5	Exemple de contrôle des analyses : Concentrations en calcium par Complexométrie et par Spectrométrie de masse à source à plasma (ICP-MS).	36
Fig. 5.1	Partage de la nappe du Niesen d'après son contexte hydrologique et hydrogéologique régional.	48
Fig. 5.2	Localisation des essais de traçage dans la nappe du Niesen.	50
Fig. 5.3	Vecteurs de vitesses de transit (en m/h) des traceurs artificiels sur des sources du pays d'Enhaut (fond géologique simplifié du substratum, d'après l'atlas géologique de la Suisse, 1: 25'000, feuille 1265, Les Mosses).	52
Fig. 5.4	Comparaison de composants chimiques des neiges et des sources prises à l'exutoire du bassin concerné.	55
Fig. 6.1	Histogramme des fréquences des débits des sources de la nappe du Niesen (situation correspondant approximativement à l'étiage).	60
Fig. 6.2	Répartition des débits des sources (situation correspondant approximativement à l'étiage).	60

Fig. 6.3a	Corrélation de la température et de l'altitude des sources.	62
Fig. 6.3b	Histogramme des fréquences de la température des eaux des sources de la nappe du Niesen.	63
Fig. 6.4	Répartition de la température des eaux des sources.	63
Fig. 6.5	Histogramme des fréquences du pH des eaux des sources de la nappe du Niesen.	65
Fig. 6.6	Répartition du pH des eaux des sources.	65
Fig. 6.7	Histogramme des fréquences de la minéralisation totale des eaux des sources de la nappe du Niesen.	66
Fig. 6.8	Répartition de la minéralisation totale des eaux des sources.	67
Fig. 6.9	Histogramme des fréquences des concentrations en hydrogénocarbonates des eaux des sources de la nappe du Niesen.	69
Fig. 6.10	Répartition des concentrations en hydrogénocarbonates des eaux des sources.	70
Fig. 6.11	Histogramme des fréquences des concentrations en sulfates des eaux des sources de la nappe du Niesen.	73
Fig. 6.12	Répartition des concentrations en sulfates des eaux des sources.	73
Fig. 6.13	Histogramme des fréquences des concentrations en chlorures des eaux des sources de la nappe du Niesen.	75
Fig. 6.14	Répartition des concentrations en chlorures des eaux des sources.	75
Fig. 6.15	Histogramme des fréquences des concentrations en calcium des eaux des sources de la nappe du Niesen.	77
Fig. 6.16	Répartition des concentrations en calcium des eaux des sources.	77
Fig. 6.17	Histogramme des fréquences des concentrations en magnésium des eaux des sources de la nappe du Niesen.	79
Fig. 6.18	Répartition des concentrations en magnésium des eaux des sources.	79
Fig. 6.19	Histogramme des fréquences des concentrations en sodium des eaux des sources de la nappe du Niesen.	81
Fig. 6.20	Répartition des concentrations en sodium des eaux des sources.	81
Fig. 6.21	Histogramme des fréquences des concentrations en strontium des eaux des sources de la nappe du Niesen.	83

Fig. 6.22	Répartition des concentrations en strontium des eaux des sources.	83
Fig. 6.23	Histogramme des fréquences des concentrations en potassium des eaux des sources de la nappe du Niesen.	85
Fig. 6.24	Répartition des concentrations en potassium des eaux des sources.	85
Fig. 6.25	Histogramme des fréquences des concentrations en silicium des eaux des sources de la nappe du Niesen.	87
Fig. 6.26	Répartition des concentrations en silicium des eaux des sources.	87
Fig. 6.27	Histogramme des fréquences des concentrations en baryum des eaux des sources de la nappe du Niesen.	89
Fig. 6.28	Répartition des concentrations en baryum des eaux des sources.	89
Fig. 6.29	Histogramme des fréquences des concentrations en fer des eaux des sources de la nappe du Niesen.	91
Fig. 6.30	Répartition des concentrations en fer des eaux des sources.	91
Fig. 6.31	Histogramme des fréquences des concentrations en bore des eaux des sources de la nappe du Niesen.	93
Fig. 6.32	Répartition des concentrations en bore des eaux des sources.	93
Fig. 6.33	Histogramme des fréquences des concentrations en lithium des eaux des sources de la nappe du Niesen.	95
Fig. 6.34	Répartition des concentrations en lithium des eaux des sources.	95
Fig. 6.35	Histogramme des fréquences des concentrations en brome des eaux des sources de la nappe du Niesen.	97
Fig. 6.36	Répartition des concentrations en brome des eaux des sources.	97
Fig. 6.37	Histogramme des fréquences des concentrations en zinc des eaux des sources de la nappe du Niesen.	99
Fig. 6.38	Répartition des concentrations en zinc des eaux des sources.	99
Fig. 6.39	Histogramme des fréquences des concentrations en rubidium des eaux des sources de la nappe du Niesen.	101
Fig. 6.40	Répartition des concentrations en rubidium des eaux des sources.	101
Fig. 6.41	Histogramme des fréquences des concentrations en aluminium des eaux des sources de la nappe du Niesen.	103

Fig. 6.42	Répartition des concentrations en aluminium des eaux des sources.	103
Fig. 6.43	Histogramme des fréquences des concentrations en nickel des eaux des sources de la nappe du Niesen.	105
Fig. 6.44	Répartition des concentrations en nickel des eaux des sources.	105
Fig. 6.45	Histogramme des fréquences des concentrations en iode des eaux des sources de la nappe du Niesen.	107
Fig. 6.46	Répartition des concentrations en iode des eaux des sources.	107
Fig. 6.47	Histogramme des fréquences des concentrations en manganèse des eaux des sources de la nappe du Niesen.	109
Fig. 6.48	Répartition des concentrations en manganèse des eaux des sources.	109
Fig. 6.49	Histogramme des fréquences des concentrations en cuivre des eaux des sources de la nappe du Niesen.	111
Fig. 6.50	Répartition des concentrations en cuivre des eaux des sources.	111
Fig. 6.51	Histogramme des fréquences des concentrations en uranium des eaux des sources de la nappe du Niesen.	113
Fig. 6.52	Répartition des concentrations en uranium des eaux des sources.	113
Fig. 6.53	Histogramme des fréquences des concentrations en chrome des eaux des sources de la nappe du Niesen.	115
Fig. 6.54	Répartition des concentrations en chrome des eaux des sources.	115
Fig. 6.55	Histogramme des fréquences des concentrations en vanadium des eaux des sources de la nappe du Niesen.	117
Fig. 6.56	Répartition des concentrations en vanadium des eaux des sources.	117
Fig. 6.57	Histogramme des fréquences des concentrations en cobalt des eaux des sources de la nappe du Niesen.	119
Fig. 6.58	Répartition des concentrations en cobalt des eaux des sources.	119
Fig. 6.59	Histogramme des fréquences des concentrations en lanthane des eaux des sources de la nappe du Niesen.	121
Fig. 6.60	Répartition des concentrations en lanthane des eaux des sources.	121
Fig. 6.61	Récapitulation des réponses chimiques des eaux souterraines des flyschs de la nappe tectonique du Niesen et des terrains à influence extra-flysch.	125

Fig. 6.62	Variations temporelles des caractéristiques physiques et chimiques de la source Lädiwald située dans le secteur central de la nappe tectonique du Niesen.	130
Fig. 6.63	Variations temporelles des caractéristiques physiques et chimiques de la source Mani située dans le secteur NE de la nappe tectonique du Niesen.	131
Fig. 6.64	Variations temporelles des caractéristiques physiques et chimiques de la source les Becques située dans le secteur SW de la nappe tectonique du Niesen.	132
Fig. 7.1	Identification statistique (en hachuré) de la zone des concentrations retenues dans la classification des éléments mineurs et en trace.	133
Fig. 7.2	Exemples de faciès hydrochimiques des sources des flyschs du Niesen (trait continu) ou à faible incidence extra-flysch (trait discontinu).	140
Fig. 7.3	Analyse multivariée en composantes principales. Plan factoriel 1-2. Evolution des émergences du réseau N° 2 au cours des 3 campagnes et comparaison avec les faciès hydrochimiques des eaux obtenus lors de leur classification chimique (cf. chap. 7.1.1).	145
Fig. 8.1a	Composés chimiques (majeurs et mineurs) des lixiviats de roches.	150
Fig. 8.1b	Composés chimiques (majeurs et mineurs) des lixiviats de roches.	151
Fig. 8.1c	Composés chimiques (éléments en trace) des lixiviats de roches.	152
Fig. 8.1d	Composés chimiques (éléments en trace) des lixiviats de roches.	153
Fig. 8.1e	Composés chimiques (éléments en trace) des lixiviats de roches.	154
Fig. 8.2	Comparaison de la minéralisation totale des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].	156
Fig. 8.3	Contenu en hydrogénocarbonates, calcium et sulfates des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].	158
Fig. 8.4	Contenu en magnésium, sodium et strontium des eaux souterraines et des lixiviats de roches par flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].	160
Fig. 8.5	Contenu en silicium des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].	161
Fig. 8.6	Contenu en chlorures et en potassium des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].	163
Fig. 8.7	Comparaison du contenu en (Ba, Fe et B) des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].	165

Fig. 8.8	Comparaison du contenu en (Li, Br et Zn) des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].	167
Fig. 8.9	Comparaison du contenu en (Rb, Al et Ni) des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].	169
Fig. 8.10	Comparaison du contenu en Pb, I et Mn des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].	171
Fig. 8.11	Comparaison du contenu en Cu, U et Cr des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].	173
Fig. 8.12	Comparaison du contenu en (V, Co, La) des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].	174
Fig. 8.13	Comparaison des concentrations en sels minéraux majeurs et mineurs des eaux souterraines et des lixiviats de roches des flyschs.	175
Fig. 8.14	Comparaison des concentrations en sels minéraux en trace et en micro-trace des eaux souterraines et des lixiviats de roches des flyschs.	177
Fig. 9.1	Localisation et environnement géologique de l'hydrotraverse du réseau AQUITYP. (Parriaux 1990, coupe géologique d'après Escher et al. 1987).	181
Fig. 9.2	Comparaison des concentrations chimiques des eaux souterraines des flyschs du Niesen et des autres sources d'aquifères-types N° 2 du réseau AQUITYP.	183
Fig. 9.3	Comparaison des concentrations chimiques des eaux souterraines des flyschs du Niesen et des sources d'aquifères-types N° 1 du réseau AQUITYP.	185
Fig. 9.4	Comparaison des concentrations chimiques des eaux souterraines des flyschs du Niesen et des sources d'aquifères-types N° 3 du réseau AQUITYP.	187
Fig. 9.5	Comparaison des concentrations chimiques des eaux souterraines des flyschs du Niesen et des sources d'aquifères-types N° 4 du réseau AQUITYP.	189
Fig. 9.6	Comparaison des concentrations chimiques des eaux souterraines des flyschs du Niesen et des sources d'aquifères-types N° 5 du réseau AQUITYP.	191

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1	Stations pluviométriques et météorologiques fédérales utilisées et sources étudiées. * (Coordonnées des sources, cf. tabl. 4.3).	23
Tableau 4.2	Points de prélèvements de profils neigeux situés dans la nappe du Niesen.	24
Tableau 4.3	Dénomination, localisation et type de réseau des sources: Spatial N° 1. Spatio-temporel N° 2 et Temporel N° 3. (* légende chapitre 7.2).	29
Tableau 4.4	Méthodes de mesure sur le terrain et d'analyse en laboratoire.	33
Tableau 4.5	Problèmes analytiques, influences extra-géologiques et choix des éléments.	42
Tableau 6.1	Récapitulation des réponses chimiques des eaux souterraines des flyschs de la nappe tectonique du Niesen et des terrains à influence extra-flysch.	123
Tableau 7.1	Classification chimique des eaux (éléments majeurs) et caractérisation géologique des sources (pour la légende cf. chap. 7.2).	136
Tableau 7.2	Classification chimique des eaux (éléments mineurs et en trace).	137
Tableau 8.1	Exutoires retenus pour la comparaison eaux souterraines-lixiviat de roches.	147
Tableau 8.2	Désignation et description des échantillons de roches des flyschs.	149
Tableau 8.3	Matrice de corrélation des composés chimiques des lixiviats de roches.	155
Tableau 9.1	Désignation, localisation et environnement géologique de l'hydrotraverse du réseau AQUITYP.	180

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Paramètres physiques et chimiques des exutoires du réseau à répartition spatiale (N° 1).	A1
Annexe 2 : Paramètres physiques et chimiques des exutoires des réseaux spatio-temporelle (N° 2) et temporel (N° 3).	A5
Annexe 3 : Evolution temporelle des paramètres physiques et chimiques des exutoires du réseau N° 3.	A39
Annexe 4 : Matrices de corrélation des composés chimiques des eaux.	A49
Annexe 5 : Echantillons de roches et analyses chimiques des lixiviats.	A51
Annexe 6 : Paramètres physiques et chimiques du réseau AQUITYP (tournée de novembre 1989).	A57
Curriculum Vitae	A59

RESUME

La typologie des eaux souterraines des flyschs des nappes tectoniques du Niesen et du Gurnigel s'inscrit dans le cadre du projet AQUITYP mené depuis 1981 par le Laboratoire de géologie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Son but est la caractérisation hydrogéologique et géochimique de plusieurs types d'aquifères d'origine alpine.

Parmi les flyschs alpins, celui du Niesen (composé surtout des trois unités : Frutigen, Niesenkulm et Seron d'âge Maastrichtien) avec ses importants faciès conglomératiques et calcaires, ainsi que le flysch du Gurnigel (Maastrichtien-Eocène) avec ses faciès grésocalcaires, sont favorables à la circulation des eaux souterraines. La nappe du Niesen comprend aussi, en discordance (limite intranappe), un soubassement "anté-flysch" formé de terrains disparates et discontinus allant du Trias au Crétacé. Elle est limitée tectoniquement par les unités de l'Ultrahelvétique au SE (périphérie) et de la Zone submédiane au NW.

76 exutoires d'eaux souterraines des flyschs ont été traités. Ils forment le réseau d'observation à répartition spatiale (N°1). Certains d'entre eux sont influencés aussi par le soubassement anté-flysch. 20 sources font partie du réseau spatio-temporel (N°2) et 6 exutoires ont été équipés et suivis systématiquement pendant deux années (réseau temporel N°3). A ce dernier réseau s'ajoute la source de Lioson du projet AQUITYP qui sert de lien avec l'hydrotraverse régionale de ce projet.

Chaque échantillon a fait l'objet de mesures physico-chimiques in situ et d'analyses chimiques en laboratoire. La technique de l'ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) a fourni en général les meilleurs résultats dans la détection des cations, et des éléments en trace et en micro-trace, jusqu'à un seuil de détection de 0.1 µg/l. Cependant, quelques éléments (Fe, B, Br, I et Sc) ont posé des problèmes de détection à cause des interférences spectrales, leur seuil de détection s'est trouvé élevé d'un facteur 10 environ. Le choix et la représentativité des éléments ont été complétés par une étude des influences anthropogènes sur certaines sources (salage des routes, tuyauterie de captage, engrais), ainsi que l'influence de la couverture pédologique. Les principales pollutions atmosphériques (Pb et Al) ont aussi été décelées grâce aux analyses des eaux de neige.

Caractéristiques hydrogéologiques des aquifères

Géomorphologiquement, la nappe du Niesen peut être divisée en trois grands compartiments qui se distinguent aussi quant à leur bassin d'alimentation. Le secteur NE ayant des bassins versants de montagne, de part et d'autre des crêtes, subit une influence bien définie des flyschs. Le secteur central, caractérisé par des entailles topographiques (Simme, Louibach, Sarine) est alimenté par des écoulements transversaux à influence des terrains extra-flysch, similaire à celle des parties basses de la nappe. Le secteur SW (entre la Sarine et la Grande Eau) retrouve la continuité du secteur NE, mais avec des bassins plus vastes du côté nord, une structure tectonique plus complexe dans ce secteur produit l'imbrication des unités de flyschs.

Les écoulements souterrains existent surtout dans les discontinuités, et les conduits micro-karstiques interconnectés du flysch du Niesen. Les pélites et turbidites fines, ainsi que la structure tectonique plissée provoquent des aquicludes, limitant les écoulements régionaux. Les secteurs les plus aquifères fournissent des débits de 1000-1500 l/mn à l'étiage. Les variations temporelles de débit sont de l'ordre d'un facteur 3 pour les eaux souterraines du Niesen et de 2.5 pour celles du Gurnigel, ce qui les différencie des écoulements typiquement karstiques.

Caractérisation chimique et géologique des eaux souterraines

Les eaux du flysch du Niesen sont froides (moy. 6°C), avec une minéralisation totale moyenne de 350 mg/l. Les eaux du flysch du Gurnigel sont légèrement plus chaudes et plus minéralisées. La température est dépendante de

l'altitude, l'effet géothermique n'est pas notable. L'étude statistique et la répartition régionale des paramètres ont déterminé le domaine de variation des concentrations pour les eaux du flysch du Niesen, ainsi que leur distinction d'avec les eaux à influence extra-flysch (cf. tabl. 6.1). L'étude des variations temporelles indique une stabilité générale de la plupart des composés. Les débits des exutoires les plus productifs peuvent fluctuer entre 500 et 5000 l/mn.

Les eaux souterraines de la nappe du Niesen appartiennent à six faciès hydrochimiques principaux (type JÄCKLI) : 1) Ca-HCO_3 , 2) Ca-(Mg)-HCO_3 , 3) Ca-Mg-(Na)-HCO_3 , 4) $\text{Ca-HCO}_3\text{-(SO}_4\text{)}$, 5) $\text{Ca-(Mg)-HCO}_3\text{-(SO}_4\text{)}$ et 6) $\text{Na-HCO}_3\text{-(SO}_4\text{)}$. A l'intérieur de ces faciès, le contenu en Mg et SO_4 peut être supérieur, définissant donc des sous-faciès. Une étude des bassins caractérise géologiquement chaque exutoire. Ainsi, les faciès 1 et 2 correspondent surtout aux sources des flyschs du Niesen (Frutigen, Niesenkulm et Seron) et du Gurnigel, dont les exutoires sont situés en surface. Des écoulements plus profonds et lents dans les flyschs sont caractérisés par le sous-faciès 2B (Mg entre 20 et 50 %), le faciès 3, et un contenu généralement plus élevé du reste des composés (y c. les traces). Les faciès 4 et 5 correspondent aux exutoires à incidences diverses des terrains extra-flysch (intranappe) ou de type évaporitique du Trias (périphérie). Le faciès 6 correspond à une source située à l'extrême NE; il définit un autre type d'influence extra-flysch avec aussi des très fortes anomalies en Fe, B, Li et I (de 277 à 950 $\mu\text{g/l}$). Par ailleurs, les composés en trace les plus abondants des eaux des flyschs sont le Ba, le Fe et le B avec des moyennes entre 13 et 35 $\mu\text{g/l}$. Le Li, Br et Zn sont présents entre 2 et 7 $\mu\text{g/l}$. Des micro-traces (Rb, Al, Ni, I, Mn, Cu, U, Cr, V, Co et La) ont aussi été décelées avec des concentrations moyennes $\leq 1.5 \mu\text{g/l}$.

Une analyse multivariée en composantes principales (facteurs) a été effectuée sur les paramètres du réseau spatio-temporel. Les principaux faciès hydrochimiques restent différenciés malgré les variations temporelles.

Des tests de lixiviation des différentes roches des flyschs et leurs analyses ont permis de comparer les composés hydrochimiques de la partie soluble des roches avec ceux des eaux souterraines. En effet les lixiviats sont chargés de presque tous les composés qui se trouvent dans les eaux à des concentrations généralement supérieures, ce qui confirme l'origine géologique de ces composés dans les eaux souterraines.

La traverse de base du projet AQUITYP comporte cinq groupes d'aquifères-types. Les eaux des flyschs font partie du groupe 2 : aquifères des roches sédimentaires avec porosité de fissures et d'interstices. Parmi ces exutoires, les sources de la Cornalle et d'Alliaz présentent des anomalies en Cl, Na, Ba, B, Li, Br, I et Cr par rapport au reste des exutoires de ce groupe, y compris ceux des flyschs. Leur composition chimique se rapproche plutôt de celle des exutoires à influence extra-flysch (évaporitique).

Par rapport au reste d'aquifères-types du réseau AQUITYP, la composition chimique des exutoires des flyschs correspond assez bien avec celle des exutoires des roches karstiques carbonatées (groupe N° 3). Elle est aussi similaire à celle des aquifères en terrains meubles du quaternaire (N° 1) mais avec des concentrations inférieures notamment en HCO_3 , NO_3 , Cl, Br et I. Par contre, les eaux des flyschs se différencient évidemment de celles des aquifères karstiques évaporitiques (groupe 4) qui ont des concentrations plus élevées notamment en SO_4 , Ca, Mg, Sr, Si, Fe, Li, I et Cu. Elles se différencient aussi des eaux des aquifères du cristallin (groupe 5) qui ont des concentrations en général plus faibles, à l'exception de l'As, le Mo, le W et l'U caractéristiques de ces eaux.

Ce travail nous a permis de mettre en évidence les caractéristiques hydrochimiques et hydrogéologiques propres des aquifères des flyschs du Niesen et du Gurnigel qui les différencient des terrains extra-flysch environnants (surtout évaporitiques). Une différenciation a aussi été obtenue lorsque les écoulements sont profonds et lents dans les flyschs. Par rapport au projet AQUITYP, les aquifères des flyschs constituent bien un type au sein de ce projet, et se distinguent clairement des autres aquifères-types alpins.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Unterteilung der Flyschgrundwässer der tektonischen Niesen- und Gurnigel- Decken findet im Rahmen des Projektes AQUITYP statt, das seit 1981 vom "Laboratoire de géologie de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (GEOLEP)" verfolgt wird. Ziel dieses Projektes ist eine hydrogeologische und geochemische Charakterisierung verschiedener Arten von Grundwasserleitern alpinen Ursprungs.

Unter den alpinen Flyscharten sind der Niesenflysch (der sich hauptsächlich aus drei Einheiten zusammensetzt : Frutigen, Niesenkulm und Seron, Masstrichtien - Alter) mit seiner bedeutenden Konglomerat- und Kalkfazies und der Gurnigelflysch (Maastrichtien-Eozän) mit seiner Kalksandsteinfazies besonders geeignet für die Grundwasserzirkulation. Die Niesendecke enthält zudem in diskordanter Lage ("intranappe Grenze") eine "anté-Flysch" - Unterlage aus Fremdgestein, das eine unvollständige Abfolge von der Trias bis zur Kreide aufweist. Tektonisch wird sie im Südosten (Rand) durch die ultrahelvetischen Einheiten, im Nordwesten durch die "zone submédiane" begrenzt.

Insgesamt wurden 76 Quellen der Flyschgrundwässer untersucht. Davon werden einige von der "anté-Flysch"- Unterlage beeinflusst. Zusammen bilden sie das Meßnetz Nr. 1, das die räumliche Verteilung wiedergibt. Das räumlich-zeitliche Meßnetz (Nr. 2) setzt sich aus 20 Quellen zusammen, und sechs Quellen wurden zwei Jahre lang systematisch mit Meßgeräten untersucht (zeitliches Meßnetz Nr. 3). An dieses Netz wurde die Quelle Lioson des AQUITYP-Projektes als Bindeglied mit der AQUITYP-Hydrotraverse angefügt.

Jede Quelle wurde im Feld auf ihre physikalisch-chemischen Eigenschaften hin geprüft und die entsprechenden Wasserproben wurden im Labor chemisch analysiert. Die Analysemethode der "Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)" lieferte gewöhnlich die besten Resultate bei der Bestimmung der Kationen, der Spuren- und Mikrospurenelemente bis zu einer Empfindlichkeit von 0.1 µg/l. Einige Elemente (Fe, B, Br, I und Sc) verursachten hingegen Analyseschwierigkeiten, die die Nachweisschwelle etwa um einen Faktor 10 erhöhten. Die Auswahl und Repräsentativität der Elemente wurde ergänzt durch eine Studie anthropogener Einflüsse auf einige Quellen (Straßensalzung, Verrohrung der Grundwasserfassungen, Düngung) sowie eine Studie über den Einfluß der Bodendeckschicht. Mit Schneeanalysen konnten auch die wichtigsten atmosphärischen Grundwasserbelastungen (Pb und Al) nachgewiesen werden.

Hydrogeologische Eigenschaften der Aquifere

Nach geomorphologischen Gesichtspunkten kann die Niesendecke großräumig in drei Sektoren unterteilt werden, die sich auch in Bezug auf die Einzugsgebiete unterscheiden. Der NO-Sektor mit einem von den Bergen gespeisten Becken wird deutlich durch Flysch bestimmt. Der zentrale Sektor, den Gewässereinschnitte (Simme, Louibach, Saane) auszeichnen, wird durch Seitenzuflüsse aus "extra-Flysch" - Gebieten, ähnlich jenen der unteren Deckenpartien, gespeist. Der SW-Sektor (zwischen Saane und Grande Eau) entspricht dem NO-Sektor, doch mit großräumigeren Becken im Norden; eine komplexere tektonische Struktur verursacht eine Verzahnung der Flyscheinheiten.

Der Grundwasserfluß findet in den Diskontinuitäten und den kommunizierenden Karstmikroröhren des Niesenflysch statt. Die Zwischenlagerung von Peliten und feinkörnigen Turbiditen, ebenso wie die gefaltete tektonische Struktur bewirken Grundwassersperren, die den regionalen Fluß beschränken. Die am stärksten wasserführenden Sektoren liefern bei Niedrigwasser Ausflußmengen von 1'000-1'500 l/min. Die zeitlichen Schwankungen der Wasserführung liegen innerhalb eines Faktors 3 für die Grundwässer des Niesen und 2,5 für

jene des Gurnigel, im Gegensatz zu typischen Karstabflüssen.

Chemische und geologische Eigenschaften der Grundwässer

Die Wässer des Niesenflysch sind kalt (im Mittel 6° C) und haben eine mittlere Gesamtmineralisation von 350 mg/l. Die Wässer des Gurnigelflysch sind geringfügig wärmer und mineralisierter. Die Temperatur hängt von der Höhenlage ab; der geothermische Effekt ist nicht nennenswert. Eine statistische Untersuchung und die regionale Verteilung der Parameter bestimmen den Schwankungsbereich der Elementkonzentrationen für die Wässer des Niesenflysch und die Unterscheidung von den Wässern, die vom "Extra-Flysch" beeinflusst werden (vgl. Tab. 6.1). Zeitlich betrachtet ist die Ionenzusammensetzung der Wässer im allgemeinen konstant. Die Ausflussmengen der ergiebigen Quellen schwanken zwischen 500 und 5'000 l/min.

Die Grundwässer der Niesen-Decke gehören zu sechs verschiedenen hydrochemischen Hauptfazien (nach JÄCKLI, 1970): 1) Ca - HCO₃, 2) Ca - (Mg) - HCO₃, 3) Ca - Mg - (Na) - HCO₃, 4) Ca - HCO₃ - (SO₄), 5) Ca - (Mg) - HCO₃ - (SO₄) und 6) Na - HCO₃ - (SO₄). Innerhalb dieser Fazien kann der Magnesium- und Sulfatgehalt größer sein, so daß Subfazien unterschieden werden können. Eine Untersuchung der Einzugsgebiete kennzeichnet den geologischen Charakter der Quellen. Fazies 1 und 2 entsprechen demnach hauptsächlich den Quellen des Niesen- (Frutigen, Niesenkulm, Seron) und Gurnigelflysch, deren Ausflusstellen sich an der Erdoberfläche befinden. Tiefere und langsamere Grundwasserbewegungen im Flysch werden durch die Subfazies 2B mit einem Mg-Gehalt zwischen 20 und 50 % und durch die Fazies 3 mit einem gewöhnlich höheren Gehalt an den übrigen Bestandteilen (einschl. Spurenelementen) charakterisiert. Die Fazies 4 und 5 entsprechen Quellen mit verschiedenen Einflüssen aus "extra-Flysch"-Gebieten ("intranappe Grenze") oder dem Evaporittyp der Trias (Rand). Die Fazies 6 gehört zu einer ganz im Nordosten gelegenen Quelle und beschreibt einen anderen "extra-Flysch" - Einflußtyp mit sehr starken Anomalien an Eisen, Bor, Lithium und Jod (zwischen 277 und 950 µg/l). Die häufigsten Spurenelemente in den Flyschwässern sind Barium, Eisen und Bor mit Mittelwerten zwischen 13 und 35 µg/l, und Lithium, Brom und Zink mit Mittelwerten zwischen 2 und 7 µ/l. Daneben sind Mikrospurenelemente (Rb, Al, Ni, I, Mn, Cu, U, Cr, V, Co und La) mit mittleren Konzentrationen von ≤ 1.5 µg/l anzutreffen.

Eine Multivariablenanalyse wurde für die Hauptbestandteile (Faktoren) mit den Parametern des räumlich-zeitlichen Meßnetzes durchgeführt. Die hauptsächlichsten hydrochemischen Fazien bleiben trotz der zeitlichen Schwankungen unterschieden.

Auslaugversuche an verschiedenen Flyschgesteinen und ihre Analysen haben einen Vergleich der hydrochemischen Komponenten der löslichen Gesteinsanteile mit denjenigen der Grundwässer erlaubt. Dabei ergaben die Auslaugungen fast die gleichen chemischen Bestandteile wie die Wässer, nur mit gewöhnlich höheren Konzentrationen, was den geogenen Ursprung dieser Komponenten in den Grundwässern bestätigt.

Die Basistraverse des Projektes AQUITYP umfaßt fünf Gruppen typischer Grundwasserleiter. Die Flyschwässer gehören zur Gruppe 2: Grundwasserleiter der Sedimentgesteine mit Kluft- und Porenporosität. Dabei weisen die Quellen der Cornalle und Alliaz Anomalien in Cl, Na, Ba, B, I, und Cr gegenüber den restlichen Quellen dieser Gruppe, einschließlich jener des Flysch, auf. Ihre chemische Zusammensetzung ähnelt eher jener der Quellen mit "extra-Flysch"-(evaporitischem) Einfluß.

Mit Bezug auf die übrigen Aquifertypen des AQUITYP-Projektes entspricht die chemische Zusammensetzung der Flyschquellen recht gut jener der verkarsteten Karbonatgesteine (Gruppe 3). Sie ähnelt auch jener der

Aquifere der quartären Lockergesteine (Gruppe 1), jedoch mit geringeren Konzentrationen vor allem an HCO_3 , NO_3 , Cl, Br und I. Hingegen unterscheiden sich die Flyschwässer natürlich von jenen der verkarsteten Evaporitaquifere (Gruppe 4), die höhere Konzentrationen vor allem an SO_4 , Ca, Mg, Sr, Si, Fe, Li, I und Cu aufweisen. Sie unterscheiden sich auch von den Wässern der kristallinen Aquifere (Gruppe 5), die gewöhnlich mineralärmer sind, mit Ausnahme der für diese Wässer typischen Elemente: As, Mo, W und U.

Diese Arbeit hat uns erlaubt, die für die Niesen- und Gurnigelflysch-Aquifere typischen hydrochemischen und hydrogeologischen Eigenschaften darzustellen. Diese unterscheiden sie von den umgebenden "extra-Flysch"- (evaporitischen) Gesteinen. Eine Unterscheidung konnte auch für tiefe und langsame Fließvorgänge im Flysch gefunden werden. Mit Bezug auf das AQUITYP-Projekt stellen die Flysch-Aquifere sehr wohl einen Typ im Rahmen dieses Projektes dar und unterscheiden sich deutlich von den anderen alpinen Aquifertypen.

ABSTRACT

The typology of the underground waters of the flyschs of the Niesen and Gurnigel tectonic nappes form part of the AQUITYP project which has been worked on by the geology laboratory of the Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne since 1981. Its principal aim is the hydrogeological and geochemical characterisation of several types of aquifers of alpine origin.

Amongst the alpine flyschs, that of Niesen (composed essentially of three subdivisions: Frutigen, Niesenkulm and Seron from the Maastrichtian age) with its important conglomerate and limestone facies, as well as the Gurnigel flysch (Maastrichtian-Eocene) with its sandy limestone facies, favour underground water movements. The Niesen nappe also includes, as a discontinuity (intra-nappe limit), an "ante-flysch" lower layer formed of disparate and discontinuous ground between the Triassic and Cretaceous ages. It is limited tectonically by the Ultrahelvétique region to the SE (periphery) and the submedian zone to the NW.

Seventy-six underground flysch ground water outlets have been treated. They form the spatially divided observation network (N°1). Among these, there are several examples which are also influenced by the "ante-flysch" lower layer. Twenty springs are included in the time-space network (N°2) and six outlets were equipped and monitored for two years (time-based network N°3). To this network one can add the Lioson LLI spring which forms a link with the hydro-axis of AQUITYP project.

Each sample underwent in-situ physical-chemical measurements and chemical analyses in the laboratory. Generally speaking the ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) technique provided the best results in the detection of cations, trace elements and micro-trace elements down to the threshold of 0.1 µg/l. However, some elements (Fe, B, Br, I et Sc) were more difficult to detect due to spectral interference and their detection threshold was about a factor of ten greater. The choice and validity of the elements were completed by a study of anthropological influences on some of the springs (salting roads, catchment pipes, and fertilizers), as well as the influence brought about by the soil. The most common atmospheric pollution forms based on Pb and Al were also detected by way of melt water analyses.

Hydrogeological characteristics of aquifers

Geomorphologically speaking, the Niesen nappe may be divided into three large compartments which can be distinguished by their catchment basins. The influence of flyschs on the NE sector, which has some mountain sided and some ridge born catchment areas, is well defined. The central sector, which is scored topographically (Simme, Louibach, Sarine), is fed by transversal flows influenced by extra-flysch ground, similar to the lower parts of the nappe. The continuity of the NE sector is regained in the SW sector (between the Sarine and the Grande Eau), but with larger basins towards the north. A more complex tectonic structure in this sector produces overlapping flysch units.

Underground water flows correspond to an aquifer environment with discontinuity porosity (including micro-karst) in the Niesen flysch. Alternating mudstones and fines turbites, as well as the folded tectonic structure,

provoke aquicludes, which limit regional flows. Flow rates of the order of 1000-1500 l/mn at low water were observed in the most aquiferous sectors. Time flow variations are on the order of a factor of 3 for the Neissen groundwater, and 2.5 for the Gurnigel groundwater, which differentiates them from typical karstic flows.

Geological and chemical characterisation of subterranean waters

The Niesen flysch water is cold (average = 6°C). It has a total hardness of 350 mg/l. The waters of the Gurnigel flysch are slightly warmer and harder. The temperature is dependant on altitude as geothermal effects are negligible. The statistical study and the regional distribution of the parameters produced the range of variation in concentration for the waters of the Niesen flysch as well as their differences in comparison with water which had extra-flysch influences on its make-up (c.f. Table 6.1). The studies of time dependant changes indicate a general stability of the majority of components. The flow rates of the most productive outlets can fluctuate between 50 and 500 l/m.

The subterranean waters of the Niesen nappe belong to six principal hydrochemical facies (JÄCKLI'S type): 1) Ca-HCO_3 , 2) Ca-(Mg)-HCO_3 , 3) Ca-Mg-(Na)-HCO_3 , 4) $\text{Ca-HCO}_3\text{-(SO}_4\text{)}$, 5) $\text{Ca-(Mg)-HCO}_3\text{-(SO}_4\text{)}$ and 6) $\text{Na-HCO}_3\text{-(SO}_4\text{)}$. Within these facies, the Mg and SO_4 content can be superior, thus defining the sub-facies. A study of the reservoirs geologically characterises each outlet. Hence, facies 1 and 2 correspond, above all, to the Niesen (Frutigen, Niesenkulm and Seron) and Gurnigel flyschs, of which the outlets are situated at the surface. Deeper and slower flows in the flyschs are characterised by sub-facies 2B (with Mg between 20 and 50 %), facies 3 and a generally higher content of all the other components (including the trace elements). Facies 4 and 5 correspond to outlets of varying nature from extra-flysch ground (intra-nappe) or from Triassic evaporites (periphery). Facies 6 correspond to a source situated in the extreme NE; it defines another type of extra-flysch influence with very great anomalies in Fe, B, Li and I (from 277 to 950 $\mu\text{g/l}$). Incidentally, the most abundant trace components of flysch waters are Ba, Fe and B with averages between 13 and 35 $\mu\text{g/l}$. Li, Br and Zn are present in quantities ranging from 2 to 7 $\mu\text{g/l}$. Micro-trace components (Rb, Al, Ni, I, Mn, Cu, U, Cr, V, Co, and La) were also detected with mean concentrations $\leq 1.5 \mu\text{g/l}$.

A multi-variable analysis of the principal components (factors) was carried out with the space-time network parameters. The principal hydrochemical facies remain staggered despite the time variations.

Lixiviation tests of different flysch rocks and their analyses allowed comparison of the hydro-chemical components of the soluble portion of the rocks with those of subterranean waters. In fact the lixiviat contain virtually all of the components found in the waters in generally superior concentrations, which confirms the geological origin of these components in subterranean waters.

The base axis of the project AQUITYP includes five groups of aquifer types. The flysch waters are included in group 2 : aquifers of sedimentary rocks with fissures and interstices. Amongst the outlets, the Cornalle and Alliaz springs present anomalies in Cl, Na, Ba, B, Li, Br, I and Cr in comparison with the other outlets in this group, including those of the flyschs. Their chemical composition resembles that of the outlets with extra-flysch (evaporitic) influences.

In comparison to the rest of the aquifers of the AQUITYP network, the chemical composition of flysch outlets corresponds quite well with that of carbonated karstic rocks (group 3). It is also similar to that of loose quaternary soils (group 1) but with concentrations which are inferior in certain minerals, particularly in HCO_3 , NO_3 , Cl, Br and I. However, flysch waters are distinguishable from those of karstic evaporitic aquifers (group 4) which have higher concentrations in SO_4 , Ca, Mg, Sr, Si, Fe, Li, I and Cu. They also differ from crystalline aquifer waters (group 5) whose mineral concentrations are generally lower, with the exception of the As, Mo, W and U which are characteristic of this water.

This work has allowed us to describe the hydrochemical and hydrogeological characteristics unique to the aquifers of the Niesen and Gurnigel which distinguishes them from the extra-flysch ground of the same region (mainly evaporites). A distinction has also been obtained when deeper and slower flows in the flyschs have been considered. As far as AQUITYP is concerned, the flysch aquifers have been found to form a distinct type at the heart of this project and can be said to have been found to be clearly distinguishable from other alpine aquifer types.

RESUMEN

La tipología de aguas subterráneas en los flyschs de las napas tectónicas de Niesen y de Gurnigel se inscribe en el marco del proyecto de investigación AQUITYP, que lleva a cabo el Laboratorio de Geología de la Escuela Politécnica Federal de Lausanne. El objetivo es determinar el carácter hidrogeológico y geoquímico de varios tipos de acuíferos de origen alpino.

Entre los flyschs alpinos, el del Niesen (compuesto de tres unidades principales: Frutigen, Niesenkulm y Seron, del período Maastriciano) con sus importantes facies conglomeráticas y calcáreas y el del Gurnigel (Maastrician-Eoceno) con sus facies greso-calcáreas, son favorables a la circulación de las aguas subterráneas. La napa tectónica del Niesen comprende también en discordancia (límite intranapa), un basamento "anté-flysch" formado de terrenos dispartes y discontinuos de edad entre el Triásico y el Cretácico. Esta napa está limitada tectónicamente por las unidades del Ultrahelvético al SE (periferia) y de la Zona Submediana al NW.

Un número de setenta y seis fuentes de aguas subterráneas del flysch fueron estudiadas. Ellas forman la red de observación espacial (N° 1). Algunas de estas fuentes son influenciadas también por el basamento até-flysch. Un número de veinte fuentes forman la red espacio-temporal (N° 2) y seis fueron equipadas, controladas y muestreadas durante dos años (red temporal N° 3). A esta red se suma la fuente de Lioson del proyecto AQUITYP que sirve de vínculo con la red hidrogeológica regional de este proyecto.

En cada fuente se llevaron a cabo medidas fisico-químicas y sus muestras fueron analizadas en laboratorio. La técnica moderna "ICP-MS" (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) suministró los mejores resultados en la determinación de cationes, aniones y elementos en trazas con un límite de detección de 0.1 µg/l. Sin embargo con algunos elementos (Fe, B, Br, I y Sc) hubo problemas de detección debido a interferencias espectrales. Así sus límites de detección aumentaron de un factor 10 aproximadamente. La elección y representatividad de los elementos se completó con un estudio de las posibles influencias antropógenas sobre ciertas fuentes (salaje de los caminos, tubería de captación o abonos), así como la influencia de los suelos. Las principales contaminaciones atmosféricas (Pb y Al) también fueron puestas en relieve gracias a análisis de nieves.

Características hidrogeológicas de los acuíferos

Geomorfológicamente, la napa tectónica del Niesen puede ser dividida en tres grandes compartimentos que se distinguen también por su zona de alimentación. El sector NE con zonas de alimentación de vertientes de montaña tienen una influencia definida de los flyschs. El sector central, caracterizado por cortes topográficos (los ríos: Simme, Louibach, Sarine), es alimentada por escurrimientos subterráneos transversales influenciados por los terrenos extra-flysch, similares a aquellos de las partes bajas de la napa. El sector SW (entre los ríos Sarine y la Grande Eau) manifiesta la continuidad del sector NE, pero con valles más vastos al norte y una estructura geológica más compleja que produce la imbricación de los flyschs.

Los escurrimientos subterráneos se producen sobre todo en las discontinuidades, y los conductos micro-kársticos interconectados del flysch del Niesen. Las pelitas y turbiditas finas, así como la estructura tectónica plisada, provocan acuícludos, limitando los escurrimientos regionales. Los sectores los más acuíferos suministran caudales de 1000-1500 l/mn al estiaje. Las variaciones temporales de caudales de vertientes subterráneas del Niesen son del orden de un factor 3 y de un factor 2.5 por aquellos del Gurnigel, esto les diferencia de los escurrimientos típicamente kársticos.

Carácter químico y geológico de las aguas subterráneas

Las aguas subterráneas del flysch del Niesen son frías (media 6°C) y tienen una concentración mineral total de un promedio de 350 mg/l. Las aguas del flysch del Gurnigel son ligeramente más calientes y mineralizadas. La temperatura depende de la altitud, el efecto geotérmico no se manifiesta. El estudio estadístico y la repartición regional de parámetros han determinado el dominio de variación de las concentraciones para las aguas del flysch del Niesen, así como su distinción con aquellas a influencia extra-flysch (cf. cuadro 6.1). El estudio de las variaciones temporales indican una estabilidad general de la mayoría de componentes. Los caudales de las vertientes más productivas pueden variar entre 500 y 5000 l/mn.

Las aguas subterráneas de la napa del Niesen conforman seis facies hidroquímicas principales (tipo JÄCKLI) : 1) Ca-HCO₃, 2) Ca-(Mg)-HCO₃, 3) Ca-Mg-(Na)-HCO₃, 4) Ca-HCO₃-(SO₄), 5) Ca-(Mg)-HCO₃-(SO₄) y 6) Na-HCO₃-(SO₄). Al interior de estas facies, el contenido de Mg y SO₄ puede aún aumentar definiendo sub-facies. Un estudio geológico de las vertientes de alimentación de cada fuente definió su carácter geológico. Así, las facies 1 y 2 corresponden sobre todo a fuentes de los flyschs del Niesen (Frutigen, Niesenkulm y Seron) y del Gurnigel, que emergen superficialmente. Los escurrimientos más profundos y lentos en los flyschs están caracterizados por la sub-facie 2B (Mg entre 20 y 50 %), la facie 3, y un contenido generalmente más elevado del resto de los elementos (inclusive las trazas). Las facies 4 y 5 corresponden a fuentes con diversas incidencias de terrenos extra-flysch (intranapa) o del tipo evaporítico del Triásico (periferia). La facie 6 corresponde a una fuente situada al extremo NE; esta fuente define otro tipo de influencia extra-flysch a la cual se suman fuertes anomalías en Fe, B, Li y I (entre 277 y 950 µg/l). Por otro lado, los elementos en trazas los más abundantes de las aguas de los flyschs son: Ba, Fe y B con medias entre 13 y 35 µg/l. Igualmente están presentes el Li, Br y Zn con valores entre 2 y 7 µg/l. Fueron también detectadas las micro-trazas (Rb, Al, Ni, I, Mn, Cu, U, Cr, V, Co y La) con concentraciones medias ≤ 1.5 µg/l.

Un análisis estadístico multivariable en componentes principales (factores) fue efectuado con los parámetros de la red espacio-temporal. Las principales facies hidroquímicas se diferenciaron también en función del tiempo.

Con el fin de comparar la composición de la fase soluble de rocas y aquella de las aguas subterráneas, se realizaron ensayos de lixiviación (disolución) de muestras de rocas en laboratorio. En efecto, los lixiviatos se mostraron más cargados químicamente que las aguas subterráneas, confirmando así el origen geológico de sus componentes.

La red de base del proyecto AQUITYP está formada de cinco grupos de acuíferos-tipos. Las aguas subterráneas del Niesen forman parte del segundo grupo: acuíferos de rocas sedimentarias con porosidad de fisuras y de intersticios. Entre las fuentes de este grupo constan la "Cornalle" y la "Alliaz" que presentan anomalías de Cl, Na, Ba, B, Li, Br, I y Cr en relación al resto de fuentes de este grupo, incluido las del flysch. Esta composición química diferente es más bien próxima de las aguas subterráneas influenciadas por los terrenos extra-flysch tipo evaporítico.

En relación a los otros acuíferos-tipos de la red AQUITYP, la composición química de las vertientes del flysch corresponden bastante bien a las vertientes de rocas kársticas carbonatadas (grupo 3). Las aguas subterráneas del flysch se asemejan también a aquellas de terrenos cuaternarios (grupo 1) pero con concentraciones inferiores sobre todo en HCO₃, NO₃, Cl, Br y I. Por otro lado, las aguas del flysch se diferencian de las de los acuíferos kársticos tipo evaporítico (grupo 4) que tienen concentraciones mas elevadas sobre todo en SO₄, Ca, Mg, Sr, Si, Fe, Li, I y Cu. Ellas se diferencian también de los acuíferos de rocas cristalinas (grupo 5) que manifiestan concentraciones generalmente inferiores, a la excepción del As, Mo, W y el U que son característicos de las aguas subterráneas de acuíferos de rocas cristalinas.

En síntesis este trabajo nos ha permitido poner en evidencia las características hidroquímicas e hidrogeológicas propias de los acuíferos de los flyschs del Niesen y del Gurnigel. Estas a su vez los diferencian de los terrenos extra-flysch vecinos (sobre todo evaporíticos). Además fue obtenida una diferenciación si los escurrimientos son más lentos y profundos en los flyschs. En relación al proyecto AQUITYP, se mostró que los acuíferos de los flyschs constituyen uno de los acuíferos-tipos, que se diferencian claramente de los otros acuíferos-tipos alpinos.

REMERCIEMENTS

Parvenu au terme de ce travail, je me fais un plaisir de pouvoir remercier tous ceux qui m'ont permis de l'accomplir, par leur appui scientifique ou pratique, leur aide matérielle ou morale.

En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de thèse, M. le professeur Jacques-Henri Gabus pour ses corrections sur le manuscrit et son soutien amical, particulièrement dans la phase finale de ce travail.

Je remercie également M. le professeur Aurèle Parriaux, à l'origine du projet AQUITYP. Il m'a proposé ce travail de thèse, l'a corrigé et j'ai pu entretenir avec lui des discussions scientifiques toujours fructueuses.

Ce travail a bénéficié de l'appui financier du Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique et de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Que ses membres trouvent dans ces quelques lignes toute ma reconnaissance.

J'adresse mes remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils me font.

Je tiens à remercier les autorités cantonales des cantons de Bern, Fribourg et Vaud, et particulièrement MM. Della Valle, Becker et Mautner; MM. Burnier et Vienet du Service des Eaux de la Ville de Lausanne; le Service Hydrologique et Géologique National, en particulier MM. Emmenegger, Flück et Jemelin; l'Institut Suisse de Météorologie ainsi que M. Riquet de la Société Romande d'Electricité et M. Berod du Département de Génie Rural de l'EPFL pour m'avoir donné l'accès à de précieuses documentations techniques, géologiques et hydrogéologiques ainsi que l'accès aux sources.

Les réseaux d'observation des exutoires n'auraient pu être mis en place sans l'appui logistique du Service technique de l'EPFL en la personne de Mlle Mercier, ni sans la collaboration des communes recouvrant les nappes tectoniques du Niesen et du Gurnigel; que ces communes soient ici remerciées, ainsi que les employés communaux pour leur aide pratique, de même que les bureaux privés et les propriétaires des terrains où sont sises les sources.

Toni Ackermann, Olivier Atteia, Olivier Lateltin, Elka Pentcheva et Hans Rudolph Pfeifer de l'Institut de minéralogie de l'Université de Lausanne méritent ma reconnaissance pour les fructueuses discussions scientifiques que nous avons eues.

Je n'aurais pu venir à bout de ce travail sans l'aide et l'amitié des personnes suivantes, que je suis heureux de remercier.

Les équipes de chimie du GEOLEP m'ont généreusement aidé pour les analyses et aussi par la discussion: MM. Rosa Ana Menendez, Alina Wisniewski et Michael Bensimon, ainsi que MM. Sabine Burli, Brigitte Schmidt et Théophil Lutz.

Mes autres collègues Sandrine De Coulon, Gabriel De Los Cobos, Antonio Dematteis, Jean-Daniel Dubois, François Kunz malheureusement disparu, Yvan Mandia, qui m'ont aidé et encouragé.

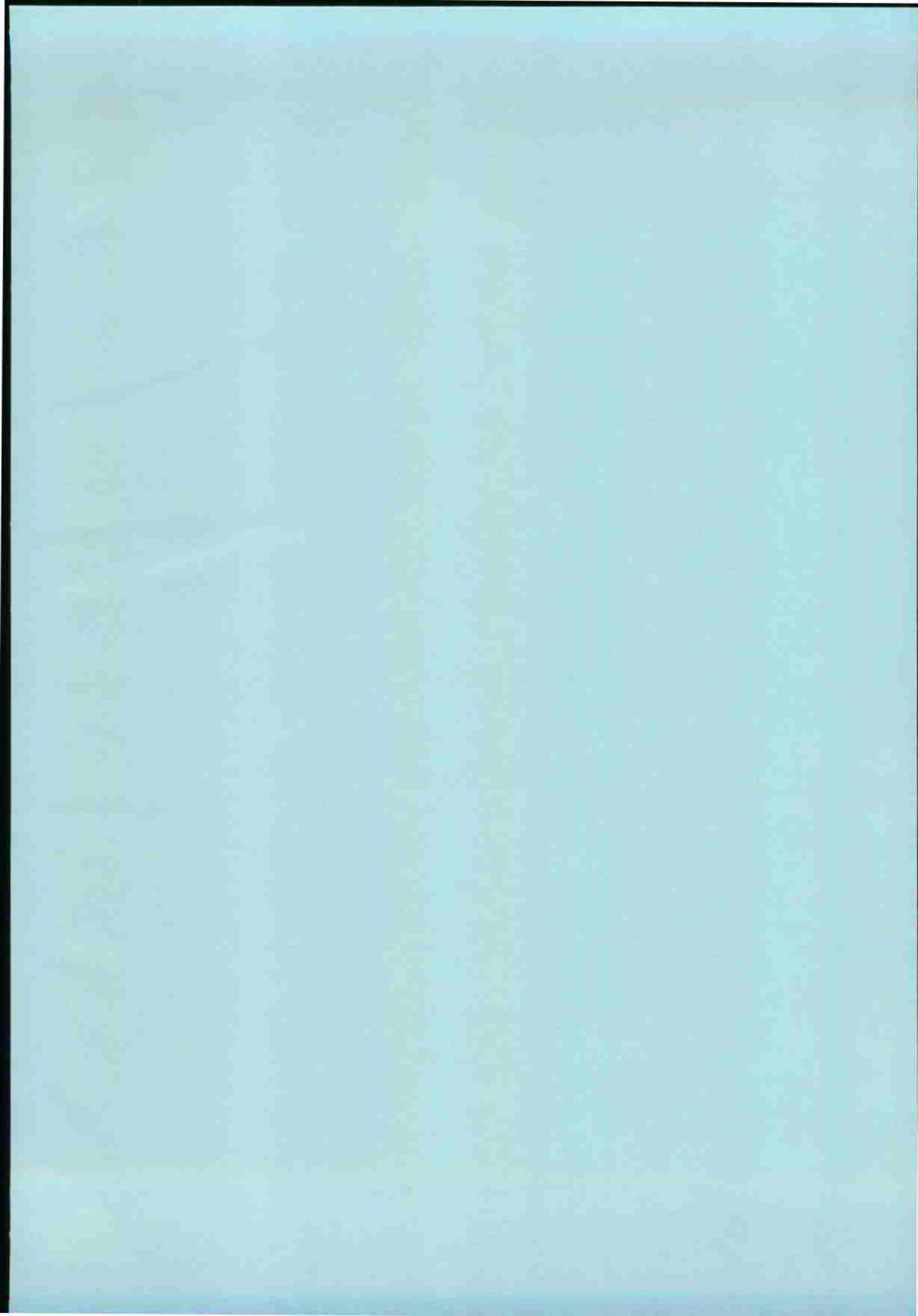
Je m'en voudrais d'oublier M. Patrice Gallay pour son aide lors de l'installation des appareils de mesure, ainsi que pour ses conseils pratiques sur le terrain; Raphaël Mayoraz, pour m'avoir poussé à l'exploitation du Macintosh et pour ses conseils en informatique; Bernard Sperandio, pour son aide dans les réalisations graphiques; Michel Looser, Roland Beutler et Stefan Hesske qui se sont intéressés à ma thèse avant même qu'elle ne soit terminée.

Marie-Lise Tanner, Reynald Berthod, Dominique Vaucoret, Patrick Vogt et Nadine Cuennet qui m'ont assisté dans la mise en forme de ce travail.

Enfin à mes proches, ma famille et mes amis : ils savent que sans leur soutien fidèle et inconditionnel, je n'aurais pas accepté, ni achevé cette thèse. Mes pensées vont aussi aux membres de ma famille disparus, tout particulièrement à ma mère, à qui je dois une grande partie de ma façon d'être.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION



1. INTRODUCTION

PRÉAMBULE

L'eau est un élément vital. Les eaux souterraines sont une des richesses offertes par la nature. L'homme s'en sert mais leur doit des égards pour qu'elles soient toujours abondantes, saines, limpides. C'est en respectant la nature que nous nous respecterons nous-mêmes.

La science des eaux souterraines et des sources, considérées souvent comme une énigme, est connue et utilisée depuis l'antiquité. A ce jour, les besoins en ressources hydriques sont en constante augmentation. De nouvelles régions, comme les montagnes, ont subi une influence importante de l'homme et de nouvelles conditions et défis se sont présentés.

En effet, les régions de montagne ont vu augmenter les aménagements hydrauliques et hydroélectriques, les installations de sports d'hiver, leur population, etc. De nouvelles conditions hydrologiques, écologiques et hydrogéologiques se sont développées. Quant aux nouveaux défis nous pouvons indiquer : l'alimentation en eau potable en étiage hivernal, le traitement des eaux usées et résiduelles, le stockage d'hydrocarbures, l'imperméabilisation du sol, l'impact sur les rivières, l'érosion des versants ou le recul des forêts.

Par ailleurs, les techniques et méthodes d'analyse chimique atteignent actuellement des seuils de détection très bas de l'ordre du $\mu\text{g/l}$. L'eau souterraine, lors de son voyage, acquiert une image chimique de son environnement géologique. Ainsi, une étude hydrochimique systématique et approfondie de cette eau à l'exutoire nous permettra de déceler des informations importantes de son passage complexe dans les aquifères.

PROJET AQUITYP

Depuis plusieurs années, le Laboratoire de Géologie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (GEOLEP) exploite un réseau régional d'observation des écoulements souterrains. Ce projet nommé AQUITYP (PARRIAUX et al. 1990b) comporte une vingtaine de points d'eau sur une géotraverse allant du Jura occidental au centre des Alpes en passant par le Plateau (fig. 1.1). Les sources choisies sont toutes pérennes et correspondent à des aquifères-types à géologie et pétrographie déterminées. Elles ont été équipées de limnigraphes. Des mesures physico-chimiques et des analyses chimiques d'échantillons sont périodiquement réalisées en fonction de cycles hydrodynamiques précis.

Le projet AQUITYP a déjà permis l'aboutissement de deux thèses de doctorat :

- Typologie des aquifères du cristallin . Exemple des massifs des Aiguilles Rouges et du Mont-Blanc (France, Italie et Suisse), selon J.-D. DUBOIS (1992).

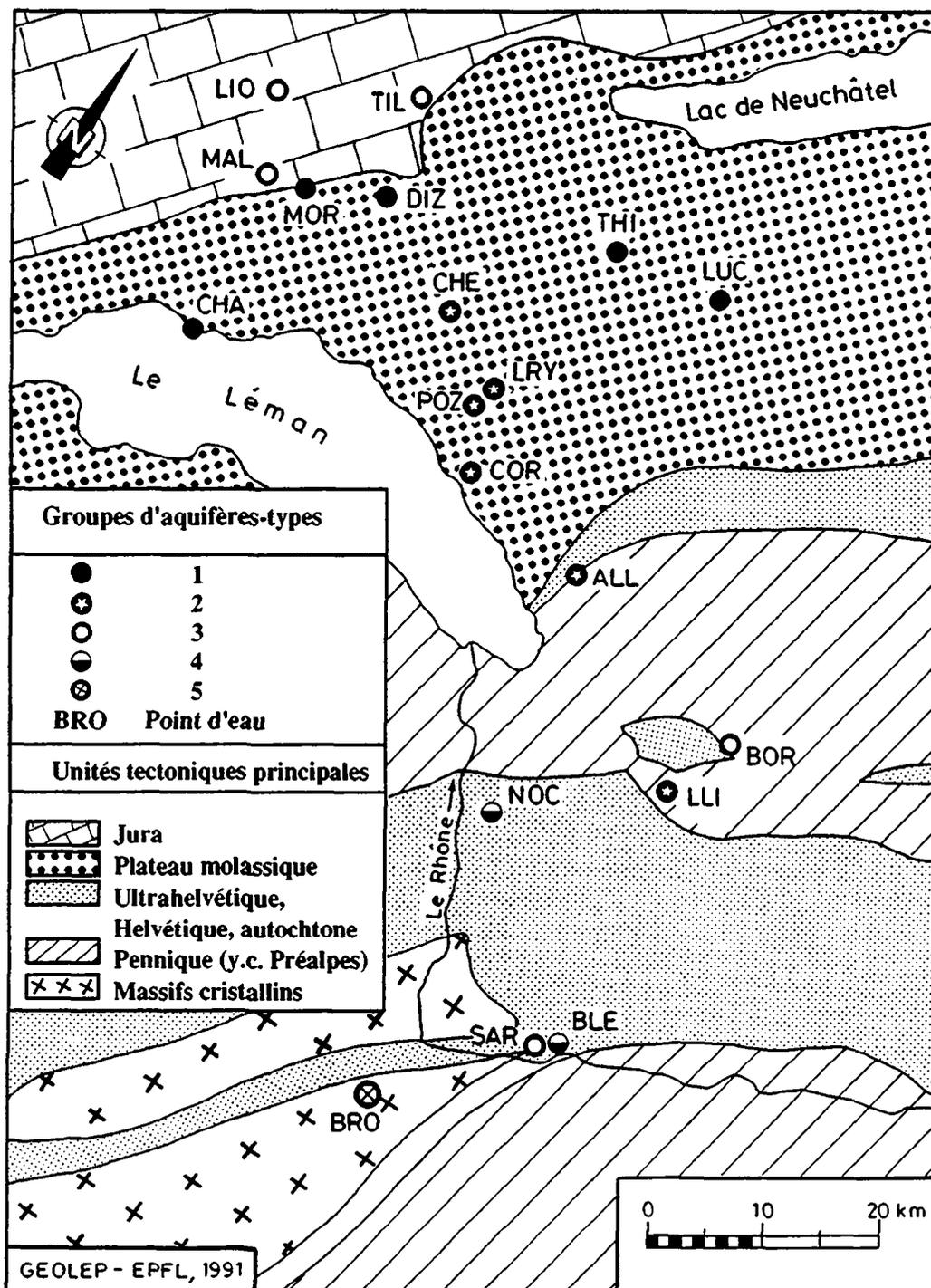


Fig. 1.1 Carte des sources du réseau AQUITYP.

- Typologie des aquifères évaporitiques du Trias dans le bassin lémanique du Rhône (Alpes occidentales), selon Y. MANDIA (1991).

La présente thèse traite de la typologie des eaux souterraines dans les flyschs de la nappe du Niesen avec des points de comparaison dans la nappe du Gurnigel. D'autres thèses compléteront ce projet avec d'autres aquifères-types du réseau.

De cette façon, le GEOLEP cherche à contribuer à la connaissance des caractéristiques hydrogéologiques et géochimiques de plusieurs types d'aquifères proches de l'état naturel. Les résultats sont de première utilité dans la détermination de l'origine et du type d'eau rencontré dans les ouvrages de constructions souterraines, d'entreposage de déchets, d'utilisation ou de protection des eaux souterraines.

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Les flyschs, formations détritiques terrigènes, ont été déposés principalement par des courants de turbidité sur des cônes sous-marins profonds. Souvent associés aux zones orogéniques, les flyschs apparaissent aujourd'hui tectonisés et forment d'importantes nappes de charriage.

Ces faciès orogéniques ne semblent pas, a priori, être propices à d'importantes circulations d'eau souterraine, et peu d'études hydrogéologiques à caractère régional existent dans ce domaine. Néanmoins, les flyschs alpins présentent des lithologies très variables. Le flysch de la nappe du Niesen avec sa prédominance grés-conglomératique-calcaire, ainsi que la nappe du Gurnigel avec ses flyschs grés-calcaires, peuvent favoriser la circulation des eaux souterraines. Cet aspect, ajouté à la nécessité d'approfondir la connaissance de l'hydrogéologie en région de montagne et aux besoins accrus en eau déjà exposés ci-dessus, ont encouragé cette recherche.

L'hydrogéologie de montagne, en particulier celle des flyschs alpins tectonisés et couvrant de grandes extensions, est très complexe. Les méthodes hydrogéologiques utilisées en plaine, comme l'observation de la nappe par forages, l'élaboration de cartes d'isohypses, d'isopaques, le bilan hydrologique ou le bilan des nappes sont difficilement applicables dans ce contexte montagneux.

Pour contourner ces difficultés, nous avons mis l'accent sur l'étude des émergences d'eau souterraine et sur leurs réponses physiques et chimiques, en suivant le critère utilisé par le projet AQUITYP. Par ailleurs, ces réponses comparées avec celles du milieu traversé nous renseignent sur les caractéristiques de l'aquifère.

L'objectif final envisagé est une typologie des écoulements souterrains représentative des flyschs alpins. Le cas de la nappe du Niesen a fait l'objet d'une étude complète. Celui de la nappe du Gurnigel est considéré ponctuellement à titre comparatif.

Plus précisément, les tâches et objectifs suivants ont été proposés :

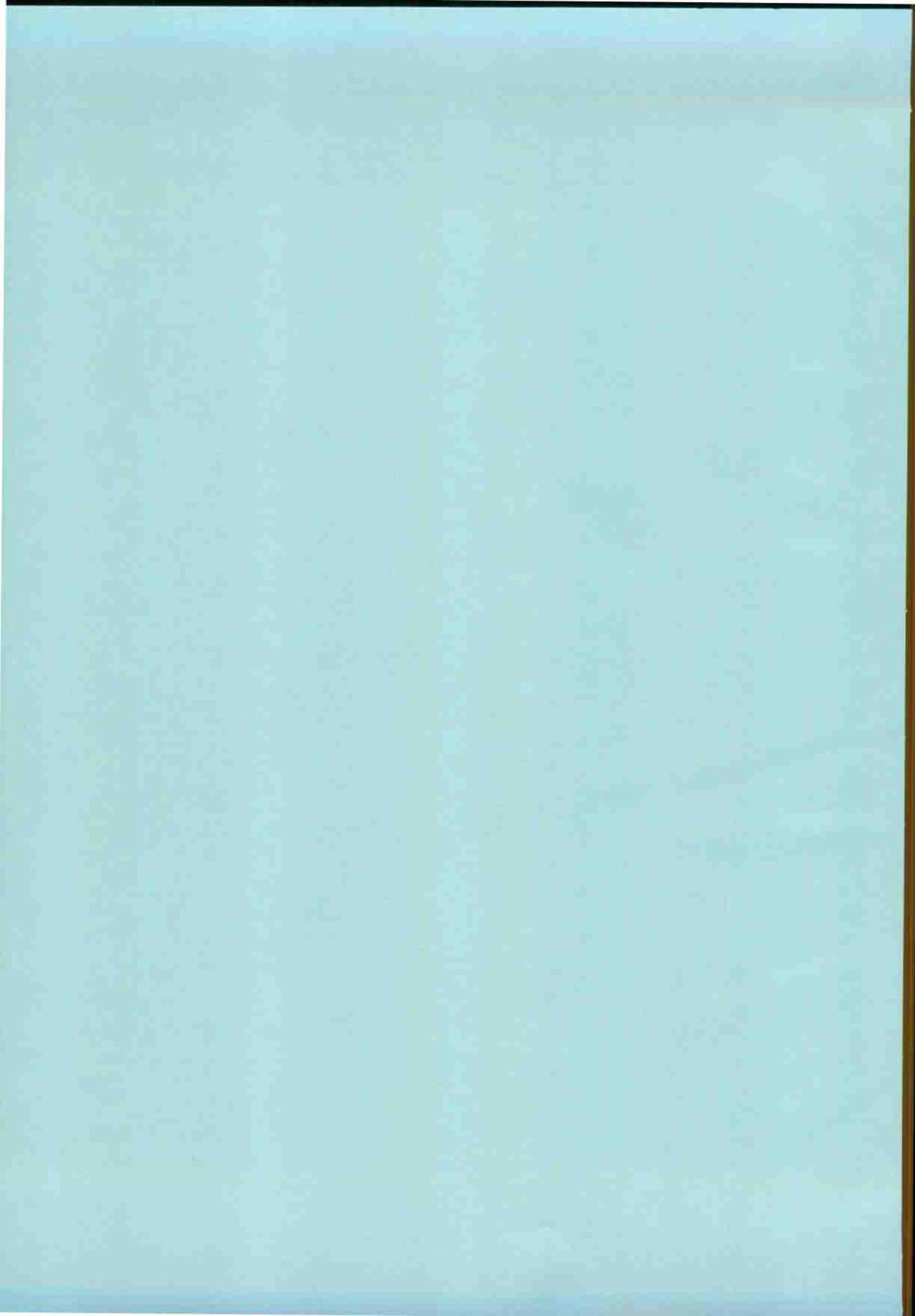
- Dresser un état des connaissances dans les domaines géologique, hydrologique et hydrogéologique.
- Dresser un inventaire, choisir une sélection d'exutoires dans la nappe du Niesen et localiser quelques points d'eau comparatifs dans la nappe du Gurnigel.
- Etablir des réseaux d'observation d'écoulements souterrains à répartition spatiale, spatio-temporelle et temporelle.
- Observer les sources : instrumentation et maintenance des principales émergences, échantillonnage et mesures physico-chimiques in situ.
- Interpréter les traceurs artificiels et les vitesses de transit.
- Analyser chimiquement les échantillons d'eau : éléments majeurs, mineurs et traces. Contrôler les analyses et détecter les influences extra-géologiques.
- Etablir la distribution spatiale des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines (cartes des paramètres).
- Définir l'évolution spatio-temporelle et la variabilité temporelle des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.
- Déterminer la caractérisation hydrochimique des eaux.
- Proposer une caractérisation géologique des exutoires.
- Proposer une caractérisation hydrochimique des roches.
- Proposer une typologie hydrochimique des eaux souterraines par séquences de flysch et l'influence des faciès triasiques des nappes tectoniques du Niesen et, localement, du Gurnigel.
- Comparer les caractéristiques hydrogéochimiques des aquifères du type "flysch" à celles des autres groupes d'aquifères-types du réseau AQUITYP.

Remarques :

Nous utiliserons les termes "Nappe du Niesen", "Nappe du Gurnigel" ou parfois "nappe" en nous référant à des unités tectoniques ou "nappes de charriage". Ces termes n'ont aucune connotation avec des nappes d'eau souterraine qui seront toujours accompagnées de l'adjectif "souterraines" ou "aquifères".

CHAPITRE 2

CADRE DE L'ETUDE



2. CADRE DE L'ETUDE

2.1 GÉOGRAPHIE PHYSIQUE, HYDROGRAPHIE ET OCCUPATION DU TERRITOIRE

2.1.1 *Régions de la nappe du Niesen*

La nappe du Niesen fait partie de l'arc préalpin, située dans le sud-ouest de la Suisse. Elle forme une chaîne de montagnes, d'orientation sud-ouest/nord-est, qui s'étend sur 60 km, de la Grande Eau (près du Sépey) jusqu'au lac de Thoune (cartes topographiques échelle 1:25'000 : N° 1265 Les Mosses, N° 1266 Lenk, N° 1246 Zweisimmen, N° 1247 Adelboden et N° 1227 Niesen). Une convexité particulière vers le sud-est la singularise parmi les autres nappes préalpines (fig. 2.1).

La chaîne du Niesen ressort comme une entité dans le paysage préalpin mais se révèle complexe dans le détail. Avec un relief accidenté, elle commence à affleurer irrégulièrement à partir d'environ 1000 m d'altitude au sud-ouest et d'environ 700 m au nord-est. Ses basses pentes sont constituées de pâturages et d'alpages, parsemées de quelques forêts de résineux et de feuillus. En dessus de 1800 m, la couverture végétale est de type toundra-alpine. Plus on monte, plus le relief devient abrupt avec des pentes, des parois et des arêtes dénudées qui sont souvent à l'origine de glissements de terrain et de chutes de pierres. Dans son secteur central, la chaîne culmine dans l'Albristhorn à 2762 m.

Dans sa partie plus méridionale, elle se termine au Pic Chaussy à 2351 m et du côté septentrional au Niesen à 2362 m.

Du point de vue hydrographique, la nappe est entaillée transversalement par les vallées de la Haute-Sarine et du Louibach qui coulent vers Gstaad, ainsi que par la Simme qui, elle, coule vers St. Stephan.

De petites rivières ou des ruisseaux naissent, sur le versant nord-ouest ou sur le versant sud-est, formant d'innombrables bassins versants de montagne, d'altitude moyenne, situés entre 1400 et 1900 m. Les précipitations sont importantes dans la région. Celle-ci peut être divisée en trois parties :

- les trois vallées transversales qui reçoivent entre 1000 et 1400 mm
- la majeure partie de la chaîne qui a des valeurs moyennes annuelles comprises entre 1400 et 2000 mm
- les valeurs enregistrées aux sommets qui peuvent atteindre entre 2000 et 2800 mm.

Les précipitations sous forme de neige jusqu'à l'altitude de 2500 m atteignent 200 cm pour le mois de février (période 1961-1980, valeurs médianes de hauteur de neige), selon l'ATLAS CLIMATOLOGIQUE DE LA SUISSE (1987).

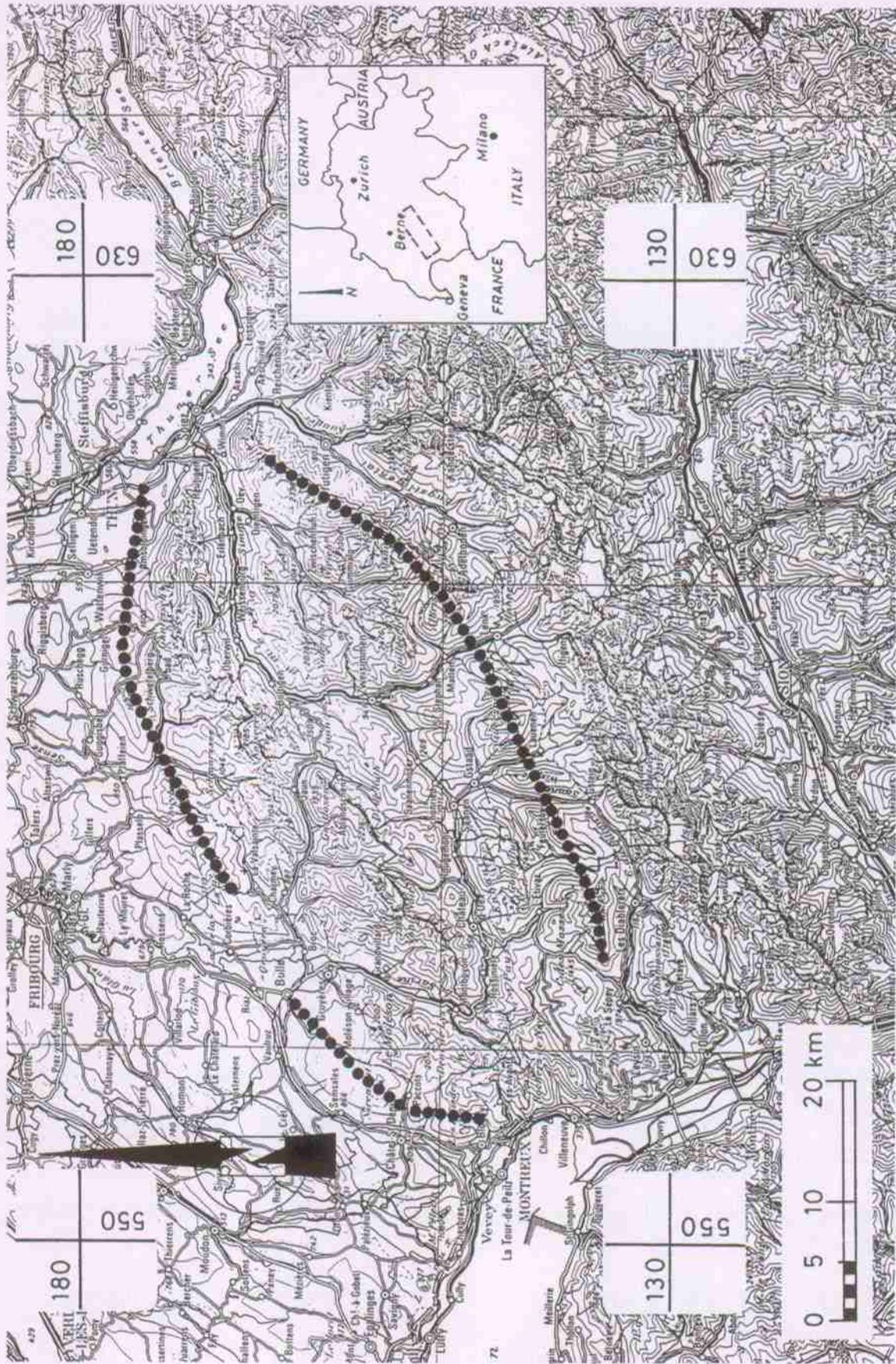


Fig. 2.1 Situation géographique du territoire d'étude. Axes des nappes tectoniques du Niesen au SE et du Gurnigel au NW.

(Reproduit avec l'autorisation de l'Office fédéral de topographie du 10.08.1992).

Dans le voisinage de la chaîne du Niesen, il y a lieu de souligner la présence de stations touristiques équipées pour l'été et pour l'hiver. Ainsi, Adelboden a annuellement plus de 500'000 nuitées. Les Diablerets, Gstaad, Saanen, Lenk, Frutigen et Diemtigen comptent chacune entre 100'000 et 500'000 nuitées; et le Col des Mosses, St. Stephan entre 50'000 et 100'000 (GRAND ATLAS SUISSE 1982). Il s'agit donc d'une région assez peuplée durant toute l'année.

2.1.2 Région de la nappe du Gurnigel

La nappe du Gurnigel constitue la chaîne la plus externe des Préalpes dans le sud-ouest suisse. Cette unité s'étale de manière discontinue de Bonneville, en France, jusqu'à la Suisse centrale. Dans cette étude, nous ne prenons en compte que la partie qui s'étend du nord de Montreux au Lac de Thoun (fig. 2.1). Quelques points d'eau ont été choisis dans cette région afin d'établir une comparaison avec ceux de la nappe du Niesen.

Cette chaîne est orientée du sud-ouest au nord-est, avec une convexité vers le nord-est. Elle culmine à la Berra, 1719 m, avec un relief plus doux et régulier que celui du Niesen. La végétation y est plus importante, on trouve même des cultures maraîchères.

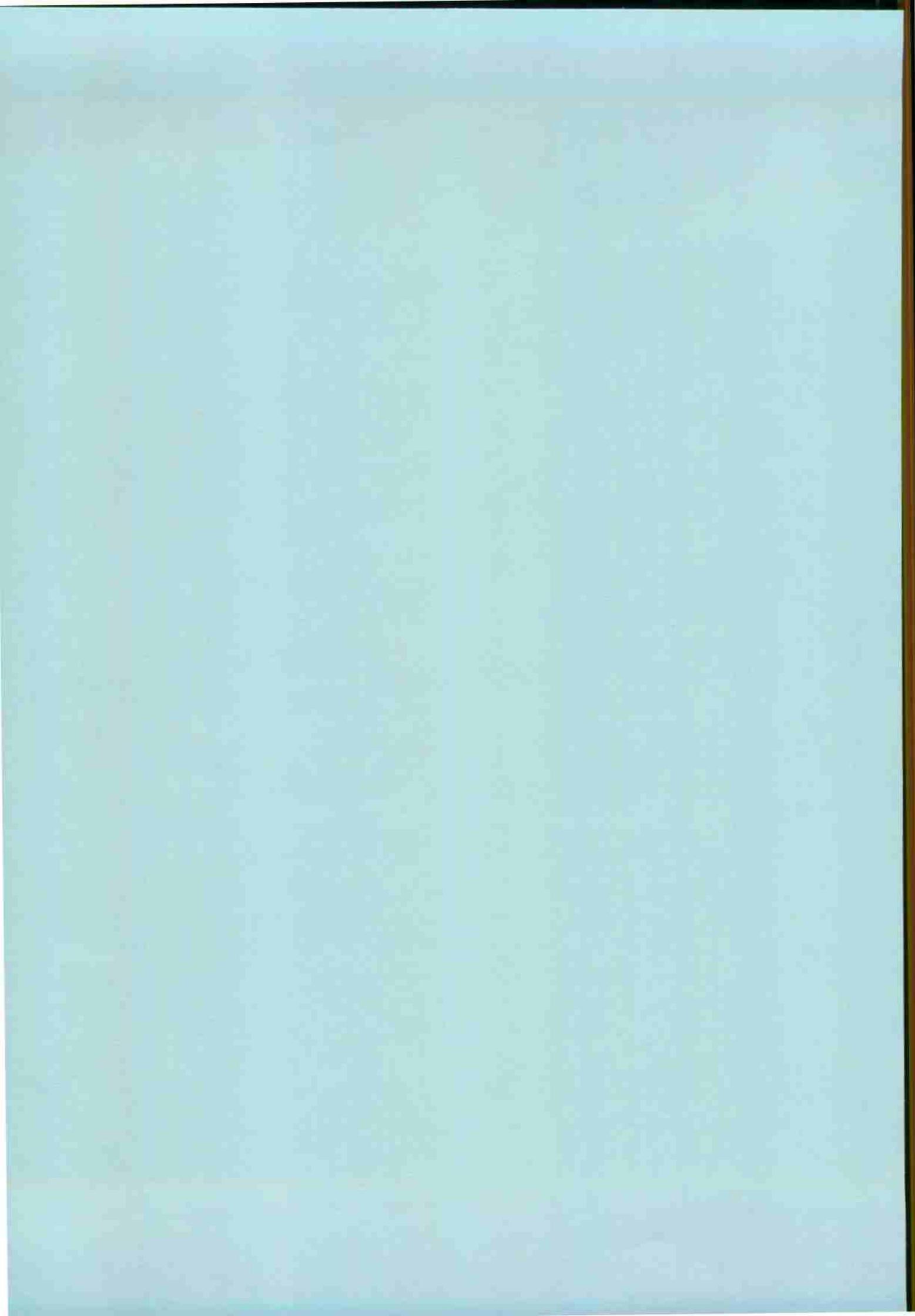
La Sarine est à l'origine d'une importante coupure hydrographique. Celle-ci divise entièrement la nappe à la hauteur de Broc. De nombreux bassins versants de montagne à hauteur modérée sont présents. Les plus importants sont ceux de la Sense au nord et de la Trême au sud, qui traversent complètement la nappe.

Les valeurs moyennes annuelles des précipitations sont similaires à celles décrites pour la nappe du Niesen à altitude égale, soit entre 1400 et 2000 mm.

Une population stable réside dans la région et on trouve peu de stations touristiques d'été ou d'hiver dans le voisinage, à l'exception de Charmey, Schwarzsee et Plaffeien avec 50'000 à 100'000 nuitées.

CHAPITRE 3

GEOLOGIE



3. GEOLOGIE

3.1 INTRODUCTION

Les structures géologiques dénommées nappes du Niesen et du Gurnigel font partie des Préalpes suisses, région à géologie complexe qui a fait l'objet de nombreuses études et constatations scientifiques, spécialement durant ce siècle. Dans ce chapitre nous présentons une synthèse géologique et pétrographique fondée sur les travaux existants. Celle-ci, qui ne prétend pas être exhaustive, est conçue dans le but de mieux comprendre la géochimie et l'hydrogéologie des flyschs.

3.2 CADRE GÉNÉRAL : LES PRÉALPES

Dans le secteur sud-ouest de la Suisse, entre l'Arve et le lac de Thoune, les chaînes alpines frontales sont connues sous le nom de Préalpes. Celles-ci sont partagées par la vallée du Rhône en deux segments (fig. 3.1) :

- les Préalpes chablaisiennes au sud-ouest
- les Préalpes romandes, qui nous concernent, au nord-est.

Les Préalpes sont constituées de plusieurs unités structurales. Elles comportent des terrains allochtones des domaines paléogéographiques ultrahelvétiques, penniques et austroalpins (TRÚMPY 1980). Ces terrains sont considérés comme des nappes de charriage plissées et déformées sur un soubassement ultrahelvétique et/ou molassique.

Chaque domaine paléogéographique a une succession stratigraphique propre, liée au développement des bassins marins téthysiens, à partir de la phase extensive du Lias (HOMEWOOD et al. 1988). La sédimentation de turbidites (Flysch) s'est produite de façon diachrone dans les différents bassins et annonce la phase compressive (collision) entre les plates-formes européenne et adriatique, dès le Crétacé moyen.

La fin de ces séquences détritiques terrigènes marque aussi l'arrêt de la sédimentation dans chacun de ces domaines paléogéographiques.

Une étude détaillée à ce sujet a été élaborée par l'Institut de Géologie de l'Université de Fribourg. Les auteurs se sont intéressés aux différents flyschs préalpins selon les méthodes stratigraphiques, sédimentologiques et géodynamiques (CARON et al. 1989).

Ces flyschs comportent plusieurs nappes de charriage. La plus interne est la nappe du Niesen suivie de celles de la Zone submédiane, des Médiannes rigides, de la Nappe supérieure des Préalpes (Sarine, Dranses, Simme et Gets groupées par CARON (1972)), des Médiannes plastiques et de la nappe du Gurnigel à l'extérieur.

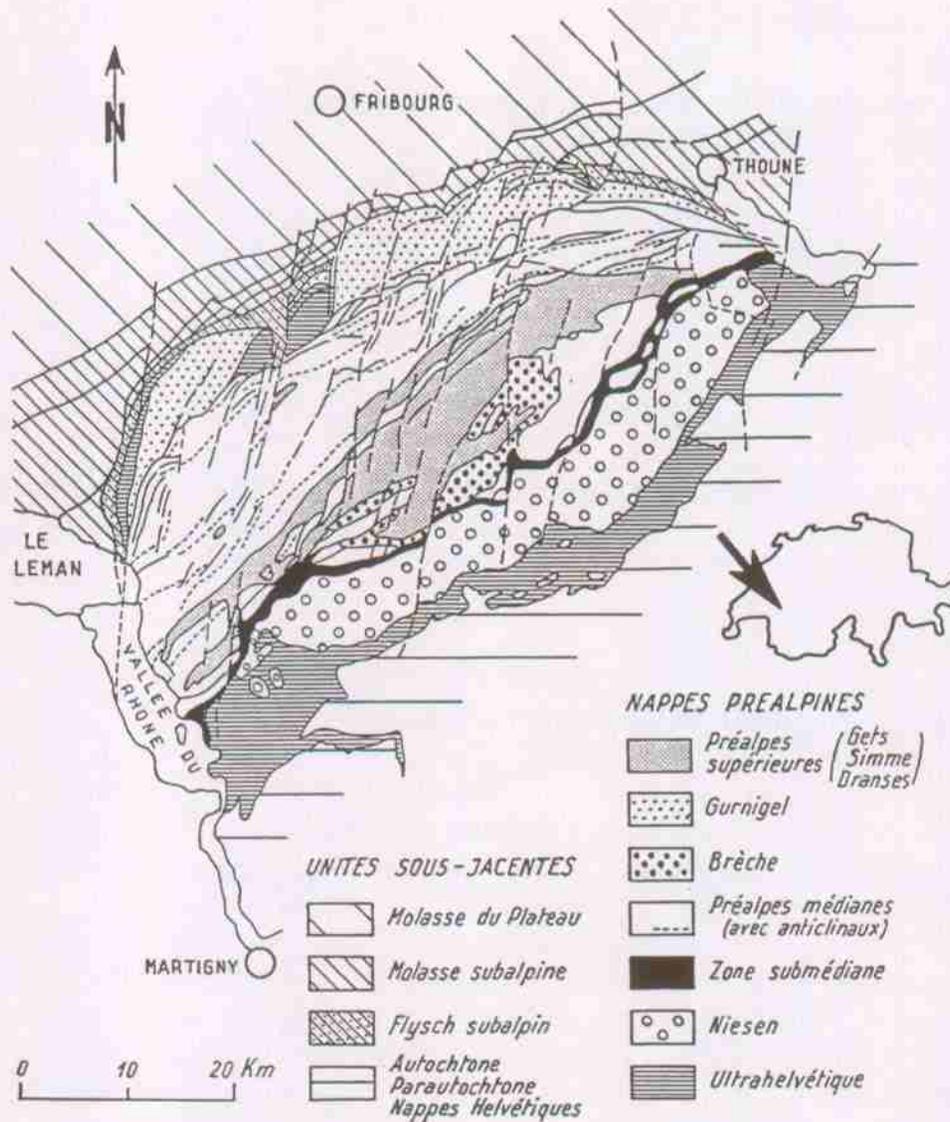


Fig. 3.1 Situation géographique et géologique des nappes du Niesen et du Gurnigel d'après PLANCHEREL (1979).

Parmi les diverses séquences des flyschs des nappes préalpines, celles de la nappe du Niesen avec ses importants faciès conglomératiques et calcaires sont les plus propices aux écoulements souterrains et ont servi de base dans cette étude. La nappe du Gurnigel à flyschs gréso-calcaires joue un rôle hydrogéologique un peu moins important. Elle a été étudiée localement à titre comparatif.

3.3 NAPPE DU NIESEN

3.3.1 Historique

Le terme de "nappe du Niesen" est créé en 1902 par LUGEON; depuis lors, plusieurs auteurs ont contribué à sa connaissance. ARGAND en 1911 attribue la nappe au domaine paléogéographique nord-pennique. DE RAAF en 1934 étudie en détail le soubassement du flysch du Niesen; il y distingue deux digitations tectoniques avec des lambeaux de roches triasiques et/ou jurassiques.

Ces importantes données ont été confirmées par MCCONNEL (1951). Elles permettent de distinguer la limite stratigraphique inférieure du flysch (limite intranappe) et la limite tectonique de la nappe du Niesen, qui comprend aussi un soubassement anté-flysch.

En 1986, ACKERMANN effectue des études sédimentologiques et pétrographiques détaillées des flyschs de la nappe du Niesen. Il fait une synthèse des travaux existants et définit une nouvelle subdivision lithostratigraphique qui sera utilisée dans le cadre de cette étude. Quatre formations de flyschs sont ainsi différenciées, de bas en haut, Frutigen, Niesenkulm, Seron et Chesselbach, en concordance stratigraphique (fig. 3.2).

Les trois premiers flyschs ont été datés par MCCONNEL (1951) et LOMBARD (1971) du Maastrichtien. ACKERMANN (1986) le confirme à l'aide des datations micropaléontologiques. Pour le flysch du Chesselbach, il indique un âge du Lutétien supérieur et l'absence de faune typique du Paléocène.

3.3.2 Aperçu tectonique

La nappe du Niesen qui appartient au domaine paléogéographique valaisan (nord-pennique) est considérée comme une nappe de charriage. BORNHAUSER (1929), dans son étude de la partie nord-orientale de la nappe, avait déjà reconnu une synforme couchée, dont le flanc inverse plonge sous les unités préalpines au nord-ouest (fig. 3.3, coupe AA').

Des études ultérieures ont démontré que la nappe du Niesen est limitée au sud-est par son chevauchement (à inclinaison faible vers le NW) sur les différents terrains ultrahelvétiques dans la dépression de la zone des Cols. Du côté septentrional, la Zone submédiane, localisée aussi dans une dépression morphologique, se superpose à la nappe du Niesen et la limite tectoniquement. Ensuite, les Préalpes médianes recouvrent, à leur tour, ces deux unités structurales (WEIDMANN et al. 1976).

A l'intérieur de la nappe, un chevauchement (à inclinaison vers le NW) du flysch du Niesen sur des terrains du soubassement anté-flysch a aussi été signalé. Dans cette étude, il est nommé limite ou chevauchement intranappe.

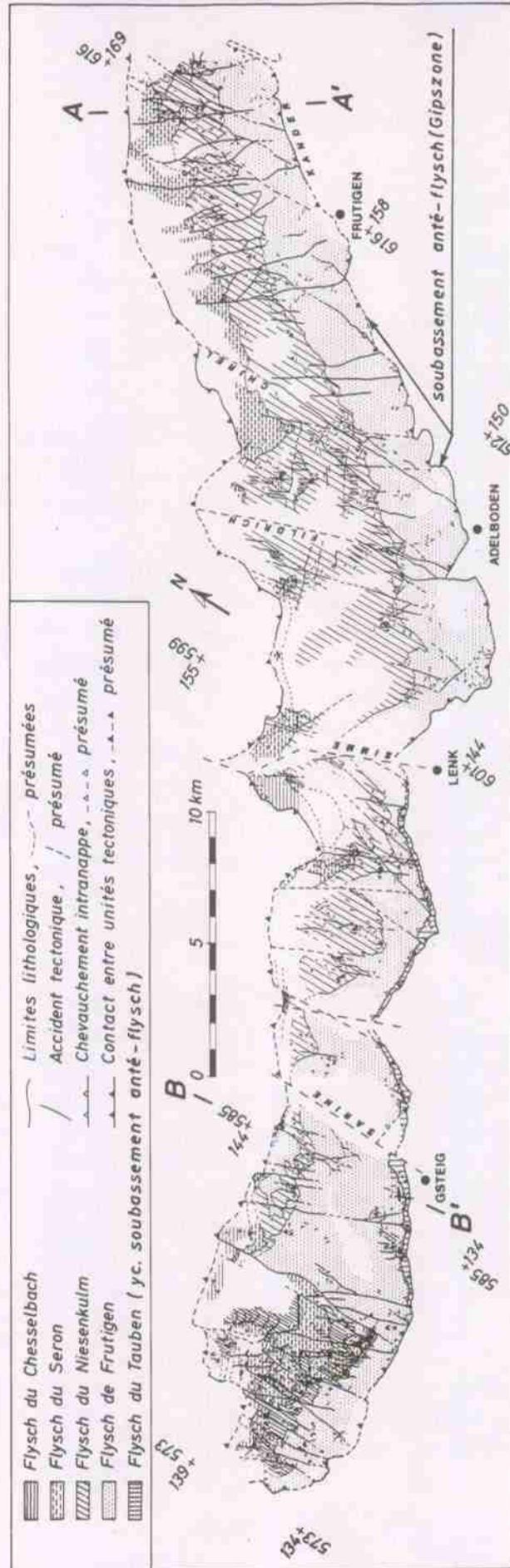


Fig. 3.2 Esquisse géologique et structurale de nappe du Niesen d'après ACKERMANN (1986).

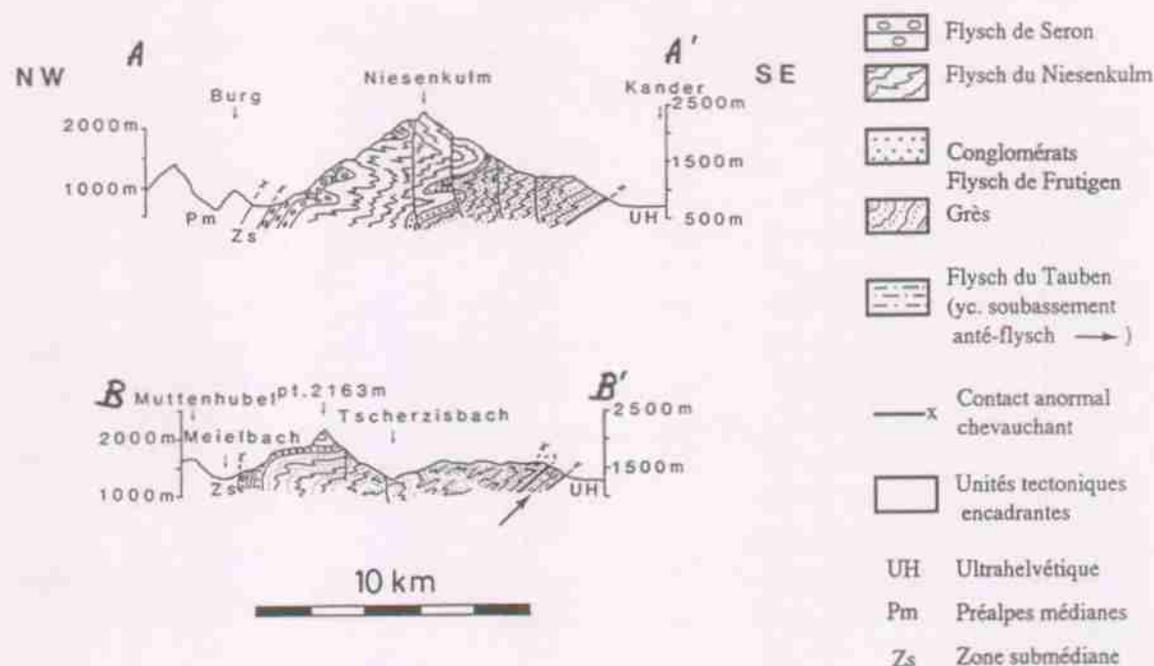


Fig. 3.3 Profils schématiques dans le secteur nord-est de la nappe du Niesen d'après ACKERMANN (1986).

En général, la nappe du Niesen est très tectonisée. Elle a subi des plissements à plusieurs échelles avec des plis déversés, couchés et des schistosités associées. Un anchimétamorphisme dans certaines zones voire un épizonal a été signalé grâce à la présence exclusive de l'illite et la Fe-chlorite (ACKERMANN 1986).

ACKERMANN (1986) a réalisé une étude approfondie des accidents structuraux affectant la nappe du Niesen (cf. fig. 3.2), dont les principaux sont :

- Des accidents verticaux ou subverticaux de direction SSE-NNW présents dans toute la nappe et dans les unités alpines qui l'encadrent.
- Des accidents de direction méridienne à subméridienne affectant la nappe et les unités encadrantes.
- Des accidents E-W ou NE-SW, secondaires et découpés par les précédents.

3.3.3 *Lithostratigraphie et pétrographie*

Une brève description des principales unités lithostratigraphiques de la nappe du Niesen et des zones environnantes qui peuvent avoir une influence sur les écoulements souterrains est exposée ci-dessous:

- *l'Ultrahelvétique et la Zone submédiane*

Même si ces deux zones sont séparées par la nappe du Niesen et que leur indépendance a été mise en évidence par WEIDMANN (1976), elles ont quelques formations identiques. Lorsque la nappe est absente, elles sont en contact direct et leur distinction devient malaisée (BADOUX & GABUS 1991).

D'une façon générale, l'Ultrahelvétique et la Zone submédiane sont constituées d'un éventail de formations sédimentaires et parfois métamorphiques du Trias au Tertiaire. Aux limites de ces zones, la nappe du Niesen se trouve donc souvent au contact d'unités triasiques, qui, formées d'évaporites et de dolomies, ont une influence importante sur les écoulements souterrains.

Nappe du Niesen

- *Le soubassement anté-flysch*

A la base du flysch du Niesen, ACKERMANN (1986, 1991) identifie des affleurements lenticulaires de séries anté-flysch. Il les différencie en deux types : les contacts stratigraphiques (concordants ou discordants) avec le flysch du Niesen, ou les contacts tectoniques.

- L'anté-flysch à liaison stratigraphique discordante comprend principalement un "flysch jurassique" composé de grès, marnes, calcaires et conglomérats.
- Les lambeaux, décrits par différents auteurs, comme par exemple la "zone de Murgaz" (MCCONNEL 1951) au sud, ou la "Gipszone" (BORNHAUSER 1929) au nord, font partie de l'anté-flysch à contact tectonique. Parmi la pétrographie de ces lambeaux se distinguent des roches liasiques et triasiques, dont les gypses et les dolomies qui influencent les eaux souterraines.

ACKERMANN (1986) définit comme écaille du Tauben une unité composée d'un soubassement anté-flysch et du flysch. Elle est limitée au secteur compris entre le Col du Pillon et la Simme (fig. 3.1).

- *Le flysch de Frutigen*

Cette unité constitue la partie inférieure du flysch du Niesen. Elle se caractérise par un dépôt à alternances de conglomérats, de grès, parfois schisteux, de grès calcaires et de pélites. Son épaisseur varie de 100 m à l'ouest dans la région du Sépey à 750 m à l'est dans le secteur de Frutigen. Sa lithologie change beaucoup latéralement (ACKERMANN 1986). Le ciment peut être argileux dans le grès et gréseux ou calcaréo-dolomitique, et rare, dans les conglomérats (LOMBARD 1975). Les séquences conglomératiques de cette unité lui confèrent une importance hydrogéologique.

Dans les feuilles géologiques Les Mosses et Lenk, cette série est divisée par faciès et dans la nouvelle feuille d'Adelboden, elle est groupée sous le nom de "flysch inférieur".

- *Le flysch du Niesenkulm*

Cette formation de flysch est dénommée Niesenkulm car elle forme la plupart des sommets de la chaîne du Niesen. Elle correspond à l'apparition de boues calcaires décimétriques à patine claire dans les séquences turbiditiques, ce qui lui vaut aussi le nom de "flysch à calcaire blanc". Son épaisseur varie de 100 m à l'ouest à 250 m à l'est. Latéralement sa lithologie est homogène (ACKERMANN 1986). Du point de vue hydrogéologique, le calcaire tend à se dissoudre en formant des micro-karsts.

- *Le flysch de Seron*

Il est aussi connu comme "flysch supérieur" et affleure dans la partie septentrionale de la nappe sur une épaisseur de 120 à 300 m.

Ce flysch est divisé en deux parties :

La partie basse se distingue du flysch du Niesenkulm par la disparition des calcaires fins dans les turbidites et l'apparition massive de conglomérats polygéniques en gros bancs et de pélites. Parmi les éléments du conglomérat, il faut noter la présence de calcaires à faciès triasique et la rareté du ciment (LOMBARD 1975). Cette séquence représente une zone aquifère assez importante. Sur la feuille Les Mosses, il est appelé "flysch moyen".

La partie haute est formée d'un flysch calcaire détritique sableux en gros bancs souvent schistoïdes. Cette séquence est connue sous le nom de "calcschistes zoogènes" car elle abrite aussi une micro-faune et des débris d'organismes liés par un ciment calcaire.

Sur la nouvelle feuille d'Adelboden, toute l'unité du flysch de Seron est dénommée aussi "flysch supérieur".

- *Le flysch du Chesselbach*

Le flysch du Chesselbach affleure exclusivement à l'ouest de la Simme dans le bord nord-est de la nappe. Il est constitué par une alternance de grès turbiditiques et de pélites (ACKERMANN 1986). Ce flysch, très localisé et à granulométrie fine, n'exerce pas une grande influence sur la circulation des eaux souterraines.

Les flyschs de Frutigen, du Niesenkulm et de Seron forment la majeure partie de la nappe du Niesen et font l'objet principal de cette étude.

Composants sédimentaires

Des études de pétrographie sédimentaire ont été réalisées par ACKERMANN (1986) pour les trois grandes unités du flysch du Niesen (Frutigen, Niesenkulm et Seron). On peut relever :

- la présence de minéraux lourds, généralement dominés par la tourmaline et le zircon. Une augmentation progressive des pourcentages de l'apatite et des minéraux accessoires (p. ex. l'anatase et la brookite) différencie les formations.
- Des analyses des minéraux argileux de flysch du Niesen par diffractométrie indiquent la présence exclusive de l'illite et de la Fe-chlorite parmi les argiles interstratifiées. L'argile intervient dans les circulations souterraines soit par dissolution, soit comme transport solide.
- Parmi les principaux composants des grès ressortent les différents types de quartz, de feldspath et toute sorte de débris lithiques sédimentaires mais aussi volcaniques et tectoniques.
- La fraction détritique des conglomérats est extrêmement variée et polygénique. Elle comporte des roches :
 - Sédimentaires : dolomies, pélites plus ou moins carbonatées, arénites et calcarénites avec des faciès à quartz et glauconie du flysch du Niesenkulm, bioclastiques et plusieurs sortes de roches carbonatées.
 - Métamorphiques : schistes verts, micaschistes, gneiss, quartzites, migmatites, amphibolites.
 - Intrusives : granites, pegmatites, granodiorites.
 - Effusives : rhyodacites, rhyolites, dacites, diabases, hyaloclastites.

En résumé, la nappe du Niesen comprend un soubassement "anté-flysch" formé de terrains disparates et discontinus allant du Trias au Crétacé, et le "flysch du Niesen", épaisse série (400 à 1300 m) de roches détritiques terrigènes : conglomérats, grès, pélites et calcaire d'âge Maastrichtien à l'exception de sa partie sommitale d'âge Lutétien.

3.4 NAPPE DU GURNIGEL

Cette unité tectonique présente des séquences qui affleurent entre Bonneville en France et la Suisse centrale, en formant surtout les Préalpes externes. Seul le secteur entre le lac Léman et le lac de Thounne a été considéré, car un secteur plus grand aurait dépassé le volume de travail d'une thèse.

La nappe du Gurnigel est constituée de larges masses de flysch riches en grès, en calcaire et en argilites dont l'âge est compris entre le Maastrichtien et l'Eocène moyen. Son origine se rattache au domaine paléogéographique sud-pennique dans l'océan Liguro-piémontais. Tectoniquement, elle repose sous les Préalpes médianes du côté sud-est et chevauche les terrains de l'Ultrahelvétique ou de la molasse subalpine du côté nord-ouest. A part les limites tectoniques de la nappe, complexes et souvent en échelons, les principaux accidents structuraux qui l'affectent ont une direction SSW - NNE.

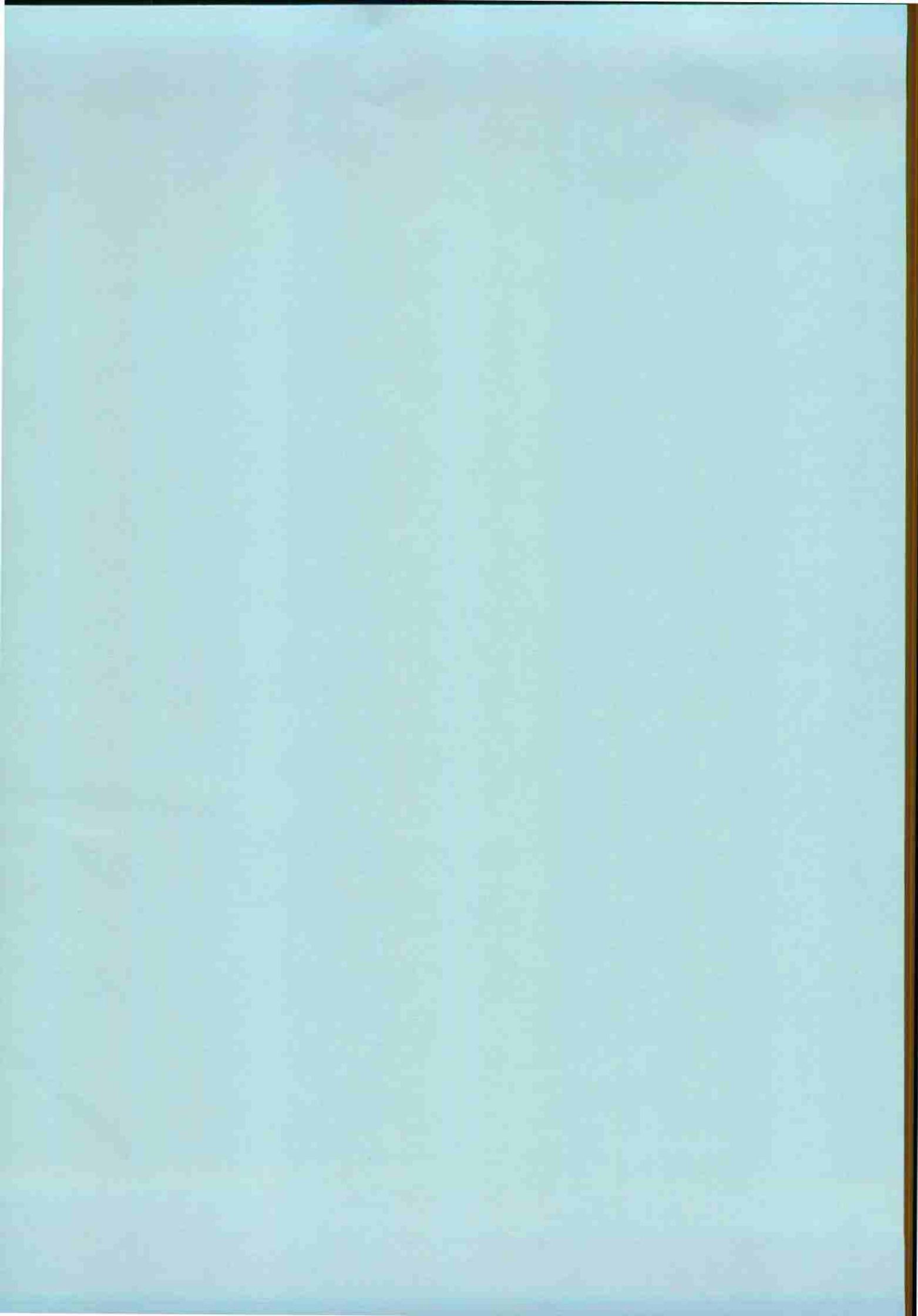
Le flysch du Gurnigel peut atteindre jusqu'à 2300 m d'épaisseur, comme c'est le cas dans les Voirons (WINKLER 1984a et VAN STUIJVENBERG 1979). Ses différents faciès turbiditiques ont été groupés en trois grandes séquences de bas en haut :

- Les calcaires fins, isolés dans des pélites (argilites) et dans des schistes, parfois intercalés de conglomérats.
- L'alternance de grès plus ou moins calcaire avec la présence de conglomérats et de pélites.
- Les turbidites grésopélitiques et les schistes, parfois intercalés de conglomérats.

Ces séquences sont dénommées Gca, Ggc et Gga respectivement dans la feuille géologique de Moudon No 1224 en préparation (communication orale du Prof. J.-H. GABUS 1992). Les sources d'eau étudiées appartiennent aux séquences grésocalcaires (gc) et grésosargileuses (ga). Cette même désignation a été maintenue pour la caractérisation géologique des sources .

CHAPITRE 4

METHODOLOGIE ET ACQUISITION DES DONNEES



4. METHODOLOGIE ET ACQUISITION DES DONNEES

4.1 ENONCÉ DU PROBLÈME

Les écoulements souterrains dans les aquifères rocheux de montagne obéissent à des conditions et régimes hydrauliques très particuliers liés au milieu traversé.

Les lois de base de la dynamique des écoulements souterrains répondent à des conditions spécifiques du milieu perméable et du type d'écoulement. Les principales caractéristiques physiques requises pour un réservoir théorique sont : la continuité, l'isotropie et l'homogénéité. Quant à l'écoulement, il devrait être de type laminaire (CASTANY 1982). Des conditions aux limites et des précisions sur la partie saturée ou non saturée doivent aussi être remplies.

Les nappes du Niesen et du Gurnigel forment une vaste région montagneuse. Leurs séquences de flysch très tectonisées, fracturées et comportant de nombreux faciès lithostratigraphiques, remplissent rarement les conditions précitées des lois de la dynamique des écoulements. Les écoulements traversent des milieux poreux, fissurés ou mixtes, qui sont aussi fortement hétérogènes, discontinus et sans limites concrètes.

Ces aquifères rocheux sont ainsi très éloignés de tout modèle de calcul et de toute simplification des conditions. L'application des méthodes hydrogéologiques conventionnelles est, elle aussi, inadaptée.

Dans ce contexte le "*véhicule hydrochimique*" s'est avéré la méthode la plus appropriée pour caractériser les écoulements souterrains des flyschs alpins. En effet, les circulations naturelles acquièrent une empreinte chimique lors de leur passage à travers les aquifères. Si ces eaux sont échantillonnées à l'exutoire et analysées, leur composition chimique peut être déterminée et donnera des indices sur la composition de l'aquifère. Par ailleurs, la géologie des bassins d'alimentation des sources peut être connue, tandis que l'échantillonnage et les tests de lixiviation de roches nous permettront de simuler la charge chimique potentielle de l'eau souterraine et d'étudier le lien eau-roche. En appliquant cette démarche aux différentes séquences de flyschs ou formations géologiques, une typologie des écoulements souterrains en rapport à celles-ci peut être élaborée.

Ces derniers critères ont été adoptés dans cette étude. A cet effet et comme base de la recherche, un inventaire ainsi qu'un suivi systématique et approfondi des sources d'eau pérennes considérées comme exutoires des écoulements souterrains ont été effectués.

4.2 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

D'une manière générale, le travail a été organisé en quatre grandes parties :

- 1) Une *étude bibliographique* comportant un inventaire des points d'eau connus, le rassemblement des données météorologiques et hydrologiques nécessaires et des travaux géologiques et hydrogéologiques antérieurs.
- 2) *Les travaux de terrain* ont consisté en l'établissement des réseaux d'observation d'eaux souterraines, l'instrumentation et les prélèvements ainsi que l'échantillonnage des roches des différents faciès des flyschs.
- 3) La *compilation* des données et des enregistrements de terrain et les *travaux de laboratoire* : analyses chimiques des eaux, contrôles, détection des erreurs et choix des éléments, ainsi que des tests de lixiviation de roches.
- 4) *Le traitement et l'interprétation* des réponses physiques et chimiques des eaux souterraines avec l'élaboration des cartes des paramètres et l'analyse statistique, qui ont abouti à la détermination des concentrations-types des eaux souterraines. La variation temporelle des paramètres, une classification hydrochimique des eaux, la caractérisation géologique des exutoires, une discussion eau-roche et finalement l'insertion des résultats dans le projet AQUITYP.

Cette démarche est présentée plus en détail dans le tableau synoptique de la figure 4.1, et décrite dans les sous-chapitres suivants.

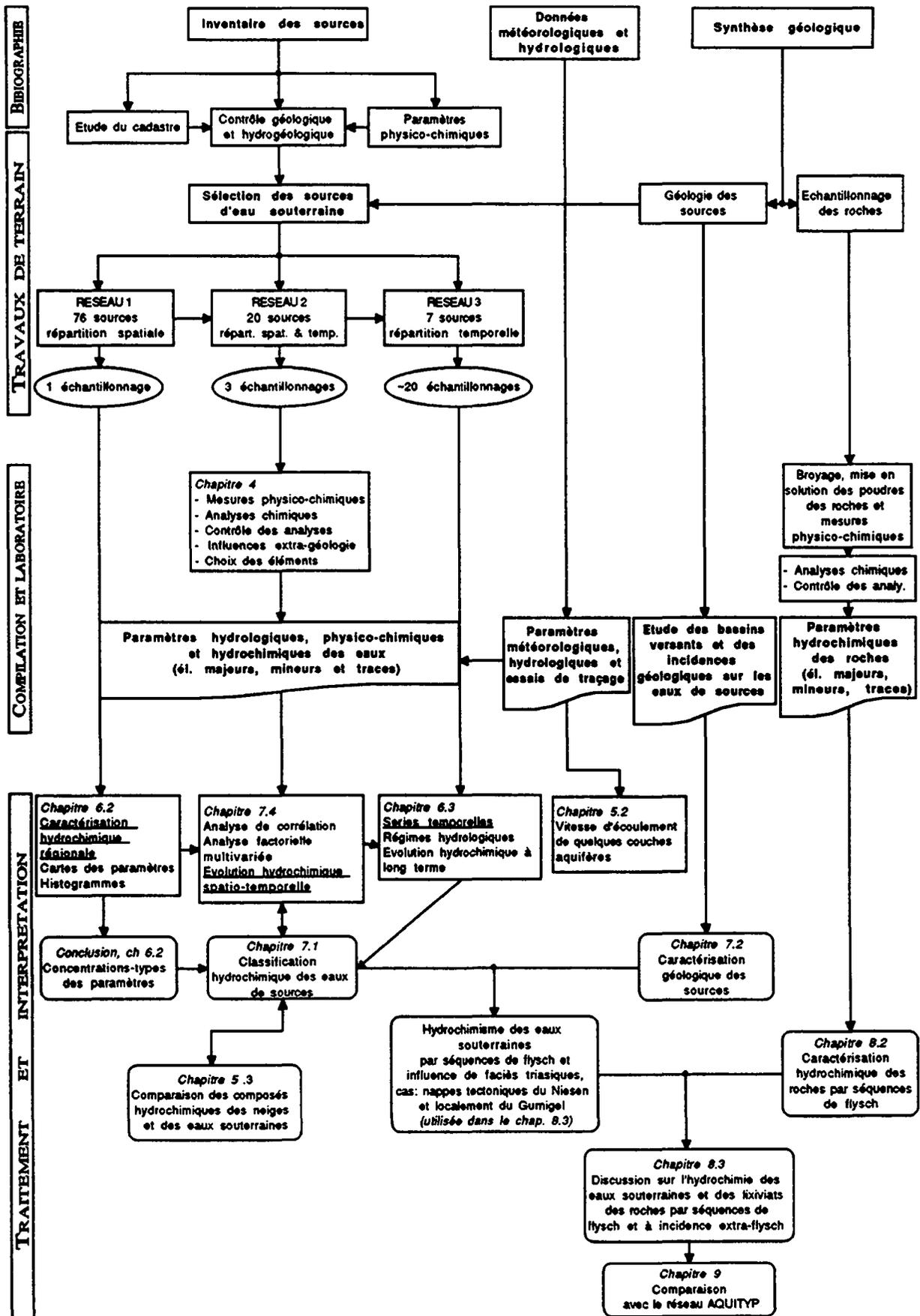


Fig. 4.1 Organigramme sur la méthodologie de l'étude, avec numérotation des chapitres.

4.3 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET DONNÉES EMPRUNTÉES

Ce travail a débuté par la compilation des données existantes et des études antérieures. Les cartographies topographique et géologique sont décrites respectivement dans les chapitres 2.1.1. et 4.3.4.

4.3.1 Inventaire et sélection des sources

Les cadastres des sources et les cartes des zones de protection des sources des cantons de Berne et Fribourg ont pu être consultés grâce aux autorisations cantonales et aux facilités accordées respectivement par MM. Della Valle et Becker. Le cadastre des sources et les cartes hydrogéologiques du canton de Vaud (MAUTNER, J. & BADOUX, H. 1970-75) ont aussi été étudiées. Toute cette documentation fut très importante dans l'évaluation des sources et dans l'établissement des réseaux d'observation des écoulements souterrains.

Nous avons pris contact avec les autorités communales, les bureaux d'étude et les sociétés privées d'exploitation d'eau. Sur le terrain, nous avons bénéficié de leur collaboration afin de localiser les sources et d'effectuer une première sélection.

Pour le choix final du réseau de référence, nous avons cherché à ce que les sources soient les plus représentatives possibles des aquifères choisis. L'influence due aux écoulements superficiels ou hypodermiques est difficile à déceler. Des observations sur l'origine des sources, leur pérennité, leur turbidité lors des crues et la régularité de paramètres physico-chimiques comme le débit, la conductivité électrique et la température nous ont aidés à sélectionner les eaux qui répondent le mieux aux écoulements souterrains. Nous avons éliminé les exutoires trop liés à des terrains glaciaires régionaux. De cette façon, trois réseaux d'observation des eaux souterraines ont été établis.

4.3.2 Pluviométrie et température de l'air

Afin d'évaluer les réponses hydrochimiques des eaux des sources au cours du temps, la connaissance des régimes hydrologiques et météorologiques (pluviométrie et température ambiante) est nécessaire. A ce propos les données des sources du réseau temporel (cf. chap. 4.4.1) et la source LLI (Lioson) du projet AQUITYP ont été prises en compte.

Les six sources du réseau à répartition temporelle ont été échantillonnées entre octobre 1988 et décembre 1990. Les données considérées de la source LLI vont de 1981 à 1990.

Pour les mêmes périodes, les données de pluviométrie et de température de l'air ont été empruntées aux stations pluviométriques ou météorologiques fédérales les plus proches des sources et à une altitude similaire. Les stations ainsi consultées sont indiquées dans le tableau 4.1.

Stations pluviométriques			Stations météorologiques			Sources du réseau temporel *		
N°	Nom	Altitude (m)	N°	Nom	Altitude (m)	Nom	code	Altitude (m)
NAPPE DU NIESEN								
7950	Col des Mosses	1445	7958	Le Sépey	1267	Les Becques et Lioson	VB LLI	1450 1845
5588	Gstaad Grund	1085	5588	Gstaad Grund	1085	Lädiwald	TL	1120
5260	Stiegelschwand	1465	5270	Adelboden	1320	Albristhübel et Stigelbach	SL AS	1430 1560
5330	Hondrich	760	5190	Interlaken	580	Mani	WM	660
NAPPE DU GURNIGEL								
5760	Gauglera	910	5770	Plaffeien-Oberschrot	850	Joux gauche	GJ	1240

Tableau 4.1 Stations pluviométriques et météorologiques fédérales utilisées et sources étudiées. * (Coordonnées des sources, cf. tabl. 4.3).

4.3.3 Données hydrochimiques et hydrogéologiques

Projet AQUITYP

- *Emergences*

Une des sources du réseau de référence AQUITYP (Lioson = LLI) est localisée dans la nappe du Niesen (PARRIAUX et al. 1990b). De nombreuses mesures et analyses ont été acquises à partir de 1981. Ces résultats sont incorporés à cette étude, afin de faire le lien entre le réseau AQUITYP et les sources considérées ici.

Les paramètres hydrochimiques (y c. les éléments en trace) de la tournée d'échantillonnage de novembre 1989 du réseau AQUITYP complet sont considérés dans la comparaison générale des résultats (cf. chap. 9).

- *Couverture neigeuse*

Afin de juger l'effet des précipitations sur les aquifères, le projet AQUITYP maintient depuis l'hiver 1987-88 un réseau de 14 à 25 points de prélèvement des profils neigeux.

Deux de ces points (cf. tabl. 4.2) sont situés dans les hauteurs de la zone d'alimentation des sources de la nappe du Niesen. Une comparaison des composés chimiques des solutions de neige avec ceux des eaux des sources, exutoires des bassins versants correspondants, est traitée dans le chapitre 5.3.

REGION	Points de prélèvement de neige					Sources de la comparaison eau souterraine-neige		
	N°	Nom	Coord. X	Coord. Y	Altitude	Nom	code	Altitude
MOLAIRE	13	Col d'Isenau	580.97	136.22	2077	Isenau	VI	1877
ISENAU	14	Les Marguiers	580.11	138.05	1670	La Molaire	VM	1407

Tableau 4.2 *Points de prélèvements de profils neigeux situés dans la nappe du Niesen.*

Projet AQUISOL

Pour évaluer le rôle du sol sur les eaux souterraines, le GEOLEP, en collaboration avec le laboratoire de pédologie du département de génie rural de l'EPFL, a développé un projet de recherche appelé AQUISOL (ATTEIA 1992). Les principaux résultats empruntés à cette étude sont interprétés dans le chapitre 4.5.4.

Essais de traçage

Plusieurs essais de traçage ont été précédemment exécutés dans la région. Les données de ceux qui ont un rapport avec les sources étudiées sont utilisées ici, à savoir :

- L'essai de traçage au lac Lioson (KUNZ 1986).
- Les essais de traçage dans les bassins versants des sources du pays d'Enhaut (NORBERT 1988).
- Les essais de traçage dans la région de Zünigwald, Commune de Wimmis (GEOTEST 1982).
- Les essais de traçage dans la région de Weissenberg, Communes de Weissenberg et Lenk (CSD 1985).

L'analyse de ces résultats et la discussion de la vitesse de transit sont présentées dans le chapitre 5.2.

4.3.4 Cartographie topographique, géologique et des zones de protection de sources

Grâce à l'autorisation du Service Hydrologique et Géologique National et à la disponibilité de MM. Flück et Jemelin, la cartographie et la documentation géologiques fédérales existantes ou en élaboration ont pu être consultées. Les feuilles de zones de protection des sources, relevant des Cantons, ont aussi été exploitées. L'étude des bassins d'alimentation des sources avec leurs limites topographiques et leurs incidences hydrogéologiques a fourni la caractérisation géologique des sources. Les documents utilisés sont :

Carte géologique de la Suisse 1 : 500 000

Carte tectonique de la Suisse 1 : 500 000

Carte géotechnique de la Suisse 1 : 200 000

- File. 3 Genève-Lausanne-Sion, 1965

Carte géologique générale de la Suisse 1 : 200 000 :

- File. 5 Genève-Lausanne, 1948
- File. 6 Sion, 1942
- Dans la même échelle, la carte nationale de la Suisse, feuille topographique 3.

Atlas géologique de la Suisse 1 : 25 000 et notices explicatives :

- N° 1206 Gurnigel TERCIER, J. & BIER, P. 1961
- N° 1265 Les Mosses LOMBARD, A. 1975
- N° 1266 Lenk BADOUX, H. & LOMBARD, A. 1962
- N° 1267 Gemmi FURRER, H., BADOUX, H., HUBER, H. & VON TAVEL, H. 1956
- N° 1285 Les Diablerets BADOUX, H. & GABUS, J.-H. 1991
- Dans la même échelle et sous les mêmes numéros, les feuilles topographiques et les feuilles des zones de protection de sources.

Atlas géologique de la Suisse 1 : 25 000 et notices explicatives, en élaboration :

- N° 1227 Niesen SCHWIZER, B. Responsable
- N° 1246 Zweisimmen FLÜCK, W. Responsable
- N° 1247 Adelboden FURRER, H. Responsable

- N° 1245 Châtel St. Denis WEIDMANN, M. Responsable
- N° 1224 Moudon GABUS, J.-H. Responsable
- Dans la même échelle et sous les mêmes numéros, les feuilles topographiques et les feuilles des zones de protection de sources.

Les cartes géologiques et tectoniques de la Suisse, Berne 1931 :

- File 1, N° 69 Carte géol. Simmental et Diemtigtal avec coupes, 1 : 50 000 RABOWSKI, F. (1912)
- File 4, N° 243 Geologische Karte der Niesenkette, 1 : 50 000. BORNHAUSER, M. (1928).

Autres cartes

- Carte géologique de la région sud de Fribourg. EMMENEGGER, CH. 1962
- Interpreted geological map of the eastern part of the Gurnigel nappe. VAN STUIJVENBERG, J. 1979
- Esquisse structurale de la Nappe du Niesen, ACKERMANN, T. 1986.

4.4 TRAVAUX DE TERRAIN ET ACQUISITION DES DONNÉES

4.4.1. Réseaux d'observation des eaux souterraines

Après l'inventaire et la sélection des sources (cf. chap. 4.3.1), trois réseaux d'observation des sources considérées comme exutoires des écoulements souterrains ont été établis et constituent la base de cette recherche.

Le premier réseau est celui à répartition spatiale. Il a servi aussi de référence pour former le deuxième, plus restreint, à répartition spatio-temporelle. Celui-ci a été à l'origine de la définition du troisième réseau qui comporte le suivi temporel des sources.

La figure 4.2 présente la localisation des sources. Le tableau 4.3 indique leur dénomination, leurs coordonnées, leur altitude et le type de réseau, de même que l'environnement géologique qui est précisé dans le chapitre 7.2.

Réseau à répartition spatiale (N° 1)

Le réseau N° 1 ou de référence est formé de 67 sources distribuées sur l'ensemble de la nappe du Niesen (c'est-à-dire qu'il inclut les séquences de flysch et le soubassement anté-flysch) et de 9 sources localisées dans la nappe du Gurnigel. Il s'agit d'émergences principalement de montagne (80 % sont situées entre 1000 et 2000m. d'altitude). Leur accès en hiver est souvent difficile.

Les sources furent échantillonnées durant l'étiage d'automne 1988 entre le 19 octobre et le 21 décembre. Leurs paramètres physico-chimiques ont été mesurés in situ. Ce réseau a permis d'observer la répartition spatiale des caractéristiques hydrochimiques des écoulements

souterrains à l'échelle régionale et de démarquer les zones aquifères influencées par des terrains extra-flysch. Les cartes des paramètres à répartition spatiale sont présentées et discutées dans le chapitre 6.2.

Ce réseau de référence est aussi utilisé pour la classification chimique de ces eaux et pour la caractérisation géologique des exutoires, lesquels sont traités dans le chapitre 7.

Réseau à répartition spatio-temporelle (N° 2)

Suite à l'évaluation des sources du réseau N° 1, dix-neuf émergences représentatives des différentes séquences de flysch de la nappe du Niesen (c'est à dire sans influence extra-flysch) ont été sélectionnées et constituent le réseau N° 2.

Ce réseau considéré comme intermédiaire, comporte d'un côté une répartition spatiale et de l'autre il a fait l'objet de mesures physico-chimiques in situ et d'échantillonnages, suivis durant trois cycles hydrologiques :

- Automne 1988 : entre octobre et décembre
- Hautes eaux 1989 : entre avril et juin
- Etiage d'été 1989 : entre août et septembre.

Les mesures et les résultats des analyses chimiques obtenus ont permis de déterminer l'évolution spatio-temporelle des paramètres des eaux souterraines. Dans cette démarche, nous avons utilisé l'analyse multivariée en composantes principales, dont les résultats ont été comparés avec les faciès hydrochimiques définis quantitativement (cf. chap. 7.4).

Réseau à répartition temporelle (N°3)

Après l'évaluation des réseaux 1 et 2, six sources de différents types chimiques ont été choisies. Cinq sont distribuées dans la nappe du Niesen et une dans celle du Gurnigel. Ce réseau a été équipé (cf. chap. 4.4.2) et fut l'objet d'un suivi et d'un échantillonnage systématique et régulier pendant deux années entre l'automne 1988 et décembre 1990. Vingt séries de prélèvements ont été ainsi effectués pour la plupart des émergences.

Le but de ce réseau est d'acquérir des informations sur le comportement physico-chimique et sur les réponses chimiques des eaux souterraines, en relation avec les régimes hydrologiques et météorologiques locaux (cf. chap. 6.3).

A ce réseau a été incorporée la source LLI (Lioson) du réseau AQUITYP. Elle a fait l'objet d'un suivi dès 1981. Les données obtenues jusqu'à décembre 1990 ont été dépouillées et prises en compte.

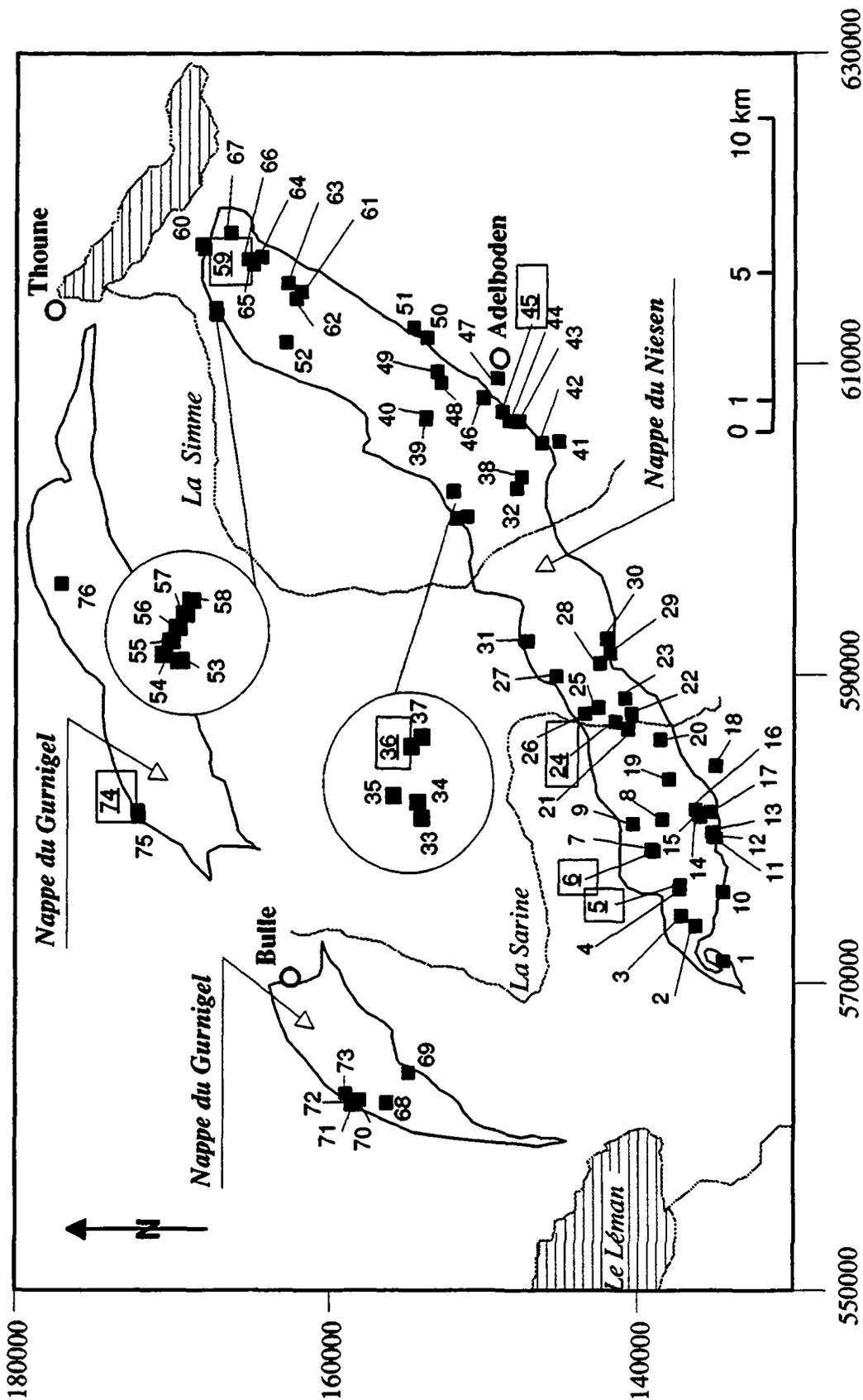


Fig. 4.2 Localisation des sources des réseaux à répartition spatiale (N° 1) et temporelle (chiffres encadrés) (N° 3).

File. top. 1:25 000	N° source	Nom des sources	code	Coord. X	Coord. Y	Alt. Z	Réseau	Caractère géol. *
LES MOSSES N°1265	1	Les Evoättes	VE	571.47	134.56	1140	N° 1	F
	2	Mimou	VN	573.72	136.38	1570	N° 1 et N° 2	Fz (t)
	3	Champillon	VC	574.40	137.29	1700	N° 1	F
	4	Lioson	VL	576.36	137.34	1860	N° 1 et N° 2	FS
	5	Lioson-AQUITYP	LLI	576.12	137.39	1845	N° 1, N° 2 et N° 3	FN
	6	Les Becques	VB	578.60	139.04	1450	N° 1, N° 2 et N° 3	S(N)
	7	Plampérette	VP	578.70	139.18	1510	N° 1 et N° 2	F(S)
	8	Molaire	VM	580.70	138.51	1407	N° 1 et N° 2	S(N)
	9	Petit-Revers	VT	580.44	140.40	1325	N° 1 et N° 2	F
	10	Deux Roches	VR	575.95	134.56	1345	N° 1	F(z)
	11	Tunnel d'Arnon A	YA	579.44	135.00	1502	N° 1	F(N,S)
	12	Tunnel d'Arnon B	YB	579.50	135.20	1502	N° 1	F(N,S)
	13	Tunnel d'Arnon C	YC	579.83	135.29	1502	N° 1	F(N,S)
	14	Tunnel d'Arnon D	YD	580.88	136.06	1503	N° 1	F(N)
	15	Tunnel d'Arnon E	YE	581.00	136.15	1503	N° 1	F(N)
	16	Tunnel d'Arnon F	YF	581.32	136.38	1503	N° 1	F(N)
	17	Izenau	VI	581.18	135.40	1877	N° 1 et N° 2	F
	18	Gridi	TR	584.16	135.09	1430	N° 1	uH(F)
	19	Stuedeli	YG	583.30	138.08	1560	N° 1	Fm
LENK N°1266	20	Gschwändleni	TW	585.86	138.66	1590	N° 1 et N° 2	F
	21	Mülschüpfi	TS	586.52	140.71	1230	N° 1	FN
	22	Fangweid	TF	587.53	140.53	1210	N° 1 et N° 2	Fm (M)
	23	Moos	TM	588.52	140.94	1500	N° 1 et N° 2	Fm
	24	Lädiwald	TL	586.99	141.56	1120	N° 1, N° 2 et N° 3	FN t
	25	Chlösterli	TC	587.89	142.67	1400	N° 1	FM (m)
	26	Grund	TG	587.50	143.54	1140	N° 1	Nm (M,t)
	27	Trom2	TO	589.94	145.39	1180	N° 1	Nm (M,Zs)
	28	Stalde	LS	590.73	142.55	1240	N° 1	F(m,f)
	29	Wildhorn	LH	591.41	141.87	1370	N° 1	F t
	30	Chillerebrunen	LC	592.33	142.10	1560	N° 1 et N° 2	F f
ZWEISMIMEN N°1246	31	Turbach	TT	592.21	147.25	1410	N° 1 et N° 2	Nm
	32	Weissenberg total	LW	602.00	148.00	1800	N° 1	F(N) (m)
	33	Birchlouene A (gauche)	SB	600.18	151.53	1315	N° 1	S N i(Zs,Pm)
	34	Birchlouene B (milieu)	SM	600.19	151.54	1315	N° 1	S N i(Zs,Pm)
	35	Alpenrose	SR	600.09	152.19	1490	N° 1	S i(Zs,Pm)
	36	Albristhübel A	SL	601.79	152.12	1430	N° 1, N° 2 et N° 3	S N
	37	Albristhübel B	SA	601.85	152.07	1435	N° 1	S N
ADELBODEN N°1247	38	Wyssberg	LT	602.76	147.68	1920	N° 1	F
	39	Mittelberg A (source r.)	DR	606.48	153.90	1775	N° 1	Nm
	40	Mittelberg B (captage)	DM	606.60	153.90	1880	N° 1 et N° 2	Nm
	41	Geils	AG	605.02	145.24	1830	N° 1	F t
	42	Hindersüller	AD	604.93	146.35	1950	N° 1	F
	43	Understalde	AU	606.33	147.84	1620	N° 1 et N° 2	F s
	44	Allebach 3	AA	606.37	148.47	1480	N° 1	F a
	45	Stigelbach	AS	606.93	148.94	1560	N° 1, N° 2 et N° 3	F f
	46	Tschenten	AC	607.81	150.19	1770	N° 1	F
	47	Suterbachli	AT	609.07	149.27	1430	N° 1	F t
	48	Ahorni	FR	608.79	152.94	1710	N° 1	FN
	49	Almi	FM	609.50	153.20	1540	N° 1 et N° 2	F
	50	Ladholz	FL	611.70	153.83	1270	N° 1	FM
	51	Linter Tunnel	FT	612.36	154.70	1000	N° 1	F t
NIESEN N°1227	52	Ottenschwand	DO	611.40	162.94	1520	N° 1 et N° 2	Nm
	53	Zünigwald C	WC	613.20	167.36	830	N° 1	S M (N,t)
	54	Zünigwald A	WA	613.27	167.40	840	N° 1	S N t M
	55	Zünigwald B	WB	613.26	167.40	840	N° 1	S N t M
	56	Zünigwald D	WD	613.32	167.43	830	N° 1	S N t M
	57	Zünigwald E	WE	613.38	167.44	820	N° 1	S N t M
	58	Zünigwald privé	WQ	613.60	167.45	840	N° 1	S i(Zs) (N)
	59	Mami	WM	617.42	168.17	660	N° 1, N° 2 et N° 3	N F (i)
	60	Augam	WP	617.71	168.31	650	N° 1	N F (a,t)
	61	Gungg sud+Joseli	FG	614.64	161.98	1490	N° 1	N F
62	Gungg nord	FN	614.20	162.30	1700	N° 1	N (F)	
63	Lebenweide	RL	615.22	162.84	1400	N° 1	FN (m)	
64	Snurzweid	RS	616.88	164.52	1440	N° 1 et N° 2	FN (m)	
65	Niesen A (Quelle)	RN	616.39	165.07	1760	N° 1	N	
66	Niesen B (source r.)	RR	616.74	165.38	1800	N° 1	N	
67	Bad Heustrich	AH	618.44	166.48	800	N° 1	F t	
CHATEL N°1244	68	L'Essert	GE	561.96	156.39	1238	N° 1	G-ga
	69	Chäh	GH	564.22	154.94	1342	N° 1	G-ga
MOUDON N°1224	70	La Cieme	GR	562.14	158.16	1025	N° 1	G-gc
	71	Villene	GV	561.86	158.53	930	N° 1	G-gc
	72	Moyon	GM	561.87	158.70	915	N° 1	G-gc
	73	Les Côtes	GC	562.55	159.03	1050	N° 1	G-gc
ROSSENS N°1205	74	Joux A (gauche)	GJ	580.54	172.75	1204	N° 1, N° 2 et N° 3	G-ga
	75	Joux B (droite)	GT	580.49	172.71	1204	N° 1	G-ga
GUGGISBERG N°1206	76	Schwarzenbühl	GS	595.88	177.20	1570	N° 1	G-gc

Tableau 4.3 Dénomination, localisation et type de réseau des sources : Spatial N° 1. Spatio-temporel N° 2 et Temporel N° 3. (* légende chapitre 7.2).

4.4.2 Equipement des sources principales et acquisition de ses données

Afin de connaître le régime hydrologique des eaux souterraines, les sept sources du réseau à répartition temporelle (N° 3, cf. chapitre 4.4.1) ont été équipées de stations limnigraphiques. Pour assurer l'entretien et les prélèvements, ces sources ont été choisies en fonction de leur accessibilité pendant toute l'année.

Dans la plupart des sources ont été installés des limnigraphes mécaniques type OTT R16 à enregistrements mensuels. Le limnigraphe de la source Stigelbach (N° 45) comporte en plus un capteur de température (type OTT R16-T).

Les limnigrammes et thermogrammes obtenus furent compilés et digitalisés. La conversion des niveaux mesurés en débits réels fut réalisée à l'aide des courbes de tarages acquises in situ après de nombreux jaugeages. Les hydrogrammes des sources ainsi obtenus et les régimes thermiques sont présentés, par source, conjointement avec l'évolution du reste des paramètres (cf. chap. 6.3).

La source Les Becques (N° 6) a un accès difficile durant l'hiver. Un enregistreur électronique type MADD avec sondes pour mesurer le niveau d'eau et la conductivité y furent aménagés. Les enregistrements ont été dépouillés et les niveaux d'eau traduits en débits réels grâce aussi à des jaugeages in situ et aux courbes de tarage. Les pics de crue des hydrogrammes de cette source n'ont pas pu être enregistrés à cause de l'inondation de la galerie de captage.

4.4.3 Echantillonnage des eaux souterraines et mesures physico-chimiques in situ

Pour l'*échantillonnage* des eaux souterraines, nous avons utilisé des flacons en polyéthylène. Trois échantillons ont été prélevés et filtrés in situ : deux de 500 ml et un de 100 ml. Un échantillon de 500 ml a été utilisé, le jour même du prélèvement, pour l'analyse du pH, des duretés (totale et bicarbonatée) et du calcium. Le deuxième échantillon de 500 ml, destiné à l'analyse des cations et des éléments en trace, a été acidifié avec 2 ml de HNO₃ supra pur à 65 % et stocké à l'abri de la lumière. L'échantillon de 100 ml a été congelé et maintenu en réserve.

Chaque échantillonnage a été accompagné de *mesures physico-chimiques* in situ (débit, conductivité électrique, température et pH). Quand les appareils étaient à disposition et que les conditions météorologiques étaient favorables, l'oxygène dissous et le potentiel oxydoréduction ont également été mesurés. Afin de vérifier les valeurs, les mesures ont toujours été exécutées à plusieurs reprises. Les méthodes et le matériel utilisé sur le terrain sont indiqués, conjointement avec ceux du laboratoire, dans le tableau 4.4. Il faut préciser que la mesure du pH par pH mètre s'est avérée impraticable pendant la saison hivernale. Ainsi, et pour obtenir des valeurs comparables durant toute l'année, le pH a été mesuré à l'aide du papier indicateur MERCK sensible à des variations de 0.2 unités pH.

4.4.4 Echantillonnage des roches des flyschs

Comme indiqué dans le chapitre 3, le flysch est constitué de nombreuses séquences de roches

turbiditiques à éléments polygéniques variés. Un prélèvement des roches des flyschs a été réalisé à plusieurs endroits afin de simuler leur dissolution en laboratoire (cf. chap. 4.4.4) et pouvoir ainsi comparer leur composition chimique avec celle de l'eau souterraine (cf. chap. 8.2).

Les flyschs de la nappe du Niesen ont été échantillonnés dans les points suivants :

- Les affleurements de la route Le Sépey - Diablerets - Col de Mosses (fle. Les Mosses : 571 000 - 571 400 / 134 300 - 134 460). Cette route coupe transversalement la stratigraphie et met en évidence plusieurs faciès du flysch de Frutigen.
- Au pied du versant nord de l'Albristhübel (fle. Zweisimmen : 601 900 - 602 200 / 151 800 - 152 000), où des affleurements surtout du flysch du Niesenkulm sont présents.
- A l'intérieur de la galerie de captage de la source des Becques et dans les parois rocheuses situées directement à l'arrière (fle. Les Mosses : 578 600 - 578 640 / 139 000 - 139 200). Ces affleurements appartiennent au flysch de Seron.
- Dans le tunnel d'adduction du lac d'Arnon (fle. Les Mosses, entre les points : 581 000/136 140 - 582 500 / 137 280).

Quelques échantillons ont aussi été pris parmi les grès de la nappe du Gurnigel :

- Près du captage des sources de la Joux de Treyvaux (fle. Rossens : 580 700 - 580 900 / 172 500 - 172 700)
- Dans les affleurements de la route de Schwarzenbühl près de la source du même nom (fle. Guggisberg : 595 900 / 177 320).

4.5 ANALYSES DES EAUX, CONTRÔLES ET CHOIX DES PARAMÈTRES CHIMIQUES

4.5.1 Paramètres, unités, méthodes et appareillage

Afin de caractériser chimiquement les eaux souterraines, nous avons déterminé leur contenu en sels minéraux dissous (éléments majeurs, mineurs et traces). Toutes les analyses chimiques ont été effectuées au GEOLEP. La majeure partie des éléments a été déterminée par la technique "Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry" (ICP-MS), en utilisant l'instrument PlasmaQuad (PQ plus) commercialisé par VG Elemental. Les autres éléments ont été analysés par des méthodes recommandées dans le "MANUEL SUISSE DES DENRÉES ALIMENTAIRES" (1973) ou dans le manuel "STANDARD METHODS" (1975).

Le tableau 4.4 résume les composés chimiques obtenus, leurs unités de mesure, et les méthodes et appareillages d'analyse. Les mesures physico-chimiques prises sur le terrain y sont aussi décrites.

Néanmoins, il faut compléter ce tableau avec les remarques suivantes :

L'hydrogénocarbonate et le calcium ont été analysés le jour même du prélèvement, le premier par titration acide et le second par complexométrie (EDTA). Le calcium fut aussi analysé par absorption atomique et par l'ICP-MS, comme les autres cations majeurs et mineurs (magnésium, sodium, strontium et potassium). Généralement les meilleurs résultats, comparés en fonction de la balance ionique, ont été fournis par l'ICP-MS (cf. chap. 4.5.2.2 : Vérification et choix du type d'analyse).

La spectrométrie de masse à source à plasma (ICP-MS) est une technique analytique récente qui consiste dans le mariage de deux systèmes performants, la source d'ionisation à plasma (ICP) et le haut pouvoir de détection du spectromètre de masse (MS). Cette technique présente le grand avantage de l'analyse quantitative multi-élémentaire sur une très large gamme dynamique de l'ordre de 10^6 (0.1 $\mu\text{g/l}$ à 100 mg/l). D'autre part, le seuil de détection est très bas (0.1 à $1\mu\text{g/l}$) pour pratiquement tous les éléments du tableau périodique. De plus, l'interprétation des spectres de masse résultants est simple. Tous ces avantages font de l'ICP-MS la technique la plus performante dans le domaine des analyses des sels minéraux des eaux, et surtout des éléments en trace (BENSIMON et al. 1991). Néanmoins quelques inconvénients analytiques se sont présentés (cf. chap. 4.5.2.3).

Pour ce qui est des unités, les concentrations des ions dissous sont exprimées en mg/l pour les éléments majeurs et mineurs, et en $\mu\text{g/l}$ pour les éléments en trace. S'il s'agit de l'interaction des éléments (par exemple pour le calcul de la balance ionique), les concentrations sont exprimées en $\text{m}\text{éq/l}$.

4.5.2 Analyses chimiques

4.5.2.1 Fiabilité des analyses

Afin de déterminer la fiabilité des analyses chimiques des eaux du point de vue de l'appareillage et de la méthode, nous avons considéré : les limites de détection instrumentale, la précision de la mesure et la reproductibilité des résultats. Ceci a déjà été établi au laboratoire de chimie du GEOLEP, lors de tests sur les eaux, à composition très variée, du réseau AQUITYP (BENSIMON et al. 1991). Ces résultats furent précisés lors des analyses des eaux des flyschs.

Les **limites de détection** et la **précision** de la mesure varient en fonction de la teneur en sels minéraux analysés, de la méthode d'analyse et des problèmes analytiques rencontrés (tabl. 4.5). Ces inconvénients ont influencé le choix et le type de traitement des paramètres; nous pouvons résumer la situation ainsi :

- Les concentrations des éléments majeurs (M) et mineurs (m) sont largement au delà de leur seuil de détection, ce qui rend ces valeurs très fiables.
- Le fluor, analysé par potentiométrie, a montré des mesures au-dessous de la limite de détection (standard 0.02 mg/l). Cet élément fut donc éliminé de l'étude.

Paramètres	Unités	Mesures / analyses	Méthode et appareillage
PHYSICO-CHIMIQUES :			
h Niveau d'eau	m	In situ	Enregistreurs mécaniques (OTT R16) et électroniques (MADD)
Q Débit	l/mn	"	Jaugeage au bidon, réservoir et chronomètre
T Température	°C	"	Thermomètre digital (WTW LF 91), enregistrement mécanique (OTT R16-T) et électronique (MADD)
K20 Conductivité électrique à 20 °C	µS/cm	"	Conductivimètre digital (WTW LF 91) et enregistreur électronique (MADD)
pH Potentiel d'hydrogène	-	"	Papier indicateur (MERCK)
Eh Potentiel oxydoréduction	mV	"	Eh mètre digital (WTW pH 95)
O ₂ Oxygène dissout	% saturation	"	Oxymètre digital (WTW Oxi 92)
Dtot. Dureté totale ou mesure des alcalino-terreux	(°F)	GEOLEP	Complexométrie en milieu alcalin (EDTA)
ANIONS :			
Dpas. Dureté passagère ou mesure des hydrogénocarbonates	mg/l d' HCO ₃ ⁻	GEOLEP	Titration acide au HCl
SO ₄ ²⁻ Concentration en sulfates	mg/l	"	} Chromatographie liquide à haute pression (HPLC) (Chromatographe LC 10 PERKIN-ELMER)
Cl ⁻ Concentration en chlorures	"	"	
NO ₃ ⁻ Concentration en nitrates	"	"	
F ⁻ Concentration en fluor	"	"	Potentiométrie à courant nul (électrode sélective)
CATIONS :			
Ca ⁺⁺ Concentration en calcium	mg/l	GEOLEP	} 1) Complexométrie (EDTA), 2) et 3) 2) Spectrophotométrie d'absorption atomique (AAS). Na ⁺ et K ⁺ en émission. Ca ⁺⁺ , Mg ⁺⁺ et Sr ⁺⁺ en absorption. 3) Spectrométrie de masse à source à plasma ICP-MS (VG PlasmaQuad)
Mg ⁺⁺ Concentration en magnésium	"	"	
Na ⁺ Concentration en sodium	"	"	
Sr ⁺⁺ Concentration en strontium	"	"	
K ⁺ Concentration en potassium	"	"	
AUTRES :			
Si Concentration en silicium	mg/l	GEOLEP	Colorimétrie
CONCENTRATIONS D'ELEMENTS EN TRACE :			
Baryum (Ba) Fer (Fe)	µg/l	GEOLEP	Spectrométrie de masse à source à plasma ICP- MS (VG PlasmaQuad)
Bore (B) Lithium (Li)	"	"	
Brome (Br) Zinc (Zn)	"	"	
Scandium (Sc) Rubidium (Rb)	"	"	
Aluminium (Al) Nickel (Ni)	"	"	
Iode (I) Manganèse (Mn)	"	"	
Cuivre (Cu) Plomb (Pb)	"	"	
Uranium (U) Chrome (Cr)	"	"	
Vanadium (V) Cobalt (Co)	"	"	
Lanthane (La)	"	"	

Tableau 4.4 Méthodes de mesure sur le terrain et d'analyse en laboratoire.

- Les éléments en trace présentent dans la plupart des cas des valeurs au-dessus des limites de détection fournies par l'ICP-MS. Les concentrations en lanthane, dont la concentration moyenne est inférieure au seuil de détection, sont traitées en ordre de grandeur.
- Les éléments fer, brome et iode se sont avérés difficiles à mesurer par l'ICP-MS à cause des problèmes analytiques d'interférence et d'effet mémoire. Les limites de détection et la précision de mesures en sont affectées. Les résultats obtenus furent proches des limites de détection et sont donc considérés comme ordre de grandeur (cf. chap. 4.5.2.3 et tabl. 4.5).

La **reproductibilité** C_v % (pourcentage de l'écart type par rapport à la moyenne) des résultats est aussi indiquée dans le tableau 4.5. La plupart des coefficients sont inférieurs à 10 %. Les éléments en trace comme le bore, le brome, l'iode, le vanadium et le lanthane présentent des coefficients entre 10 et 12 %. Une recherche plus détaillée a révélé qu'il s'agit de problèmes analytiques (effet mémoire, gamme dynamique et interférences).

4.5.2.2 Contrôles de qualité et choix du type d'analyse des éléments majeurs et mineurs

A part les références de fiabilité indiquées ci-dessus, une vérification de la qualité des analyses hydrochimiques est nécessaire. En fait, il peut se produire des erreurs de différents types, allant du stockage et de la préparation à la manipulation des échantillons et aux imprécisions lors de l'analyse.

Des tests sur le **stockage des échantillons** ont été effectués. Ils ont consisté en des analyses à l'ICP-MS des cations et des éléments en trace sur des échantillons :

- non congelés, acidifiés au HNO_3 ,
- congelés, non acidifiés et
- congelés, acidifiés au HNO_3 .

En comparant les résultats, nous constatons que les eaux acidifiées non congelées, mais gardées à l'abri de la lumière, ont donné des résultats satisfaisants. Ainsi, ce type de stockage, qui d'ailleurs a été le plus commode, fut utilisé dans cette étude.

La détection d'erreurs ou de problèmes d'analyses est une tâche minutieuse. Nous l'avons séparée en deux parties : les contrôles et l'évaluation d'analyses des éléments majeurs et mineurs présentés ci-dessous et les problèmes liées à la détermination des éléments en trace, détaillés dans le chapitre 4.5.2.3.

Le **contrôle de qualité des analyses** des éléments majeurs et mineurs a suivi plusieurs étapes. Au départ, nous nous sommes basés dans le principe d'électro-neutralité d'une analyse complète : la somme de charges des anions doit être égale à la somme de charges des cations. De grandes différences du bilan ionique permettent de supposer qu'il y a eu des erreurs d'analyse, ou qu'une composante plus ou moins importante n'a pas été considérée. Il faut noter

que ce type de contrôle ne se prête pas aux éléments en trace.

Pour chaque analyse chimique ont été calculées : la *balance ionique* qui traduit la somme des cations sur la somme des anions ($\Sigma c / \Sigma a$) en méq/l et *l'erreur sur la balance* ($(\Sigma c - \Sigma a / \Sigma c + \Sigma a) 100$ en pourcentage. Dans les annexes N°1 et N°2 ces valeurs sont présentées conjointement avec les concentrations des eaux. Une erreur sur la balance de 5 % a généralement été admise. Différents chercheurs suggèrent aussi cette valeur (p. ex. MAZOR 1991).

Les analyses, dont l'erreur sur la balance est >5% furent l'objet d'un ensemble de contrôles interdépendants :

1) Réévaluation des résultats analytiques bruts :

- Anions : révision des spectres obtenus par chromatographie ionique, contrôle des standards et des courbes d'étalonnage. Dans le cas des bicarbonates, détectés par titration, les calculs et les remarques d'analyse furent contrôlés.
- Cations : vérification des courbes d'étalonnage et contrôle des standards d'analyse par spectrophotométrie d'absorption atomique (AAS). Les spectres et concentrations des standards des analyses par ICP-MS ont aussi été vérifiés conjointement à ceux des éléments en trace.

L'évaluation des courbes d'étalonnage était particulièrement importante pour préciser les fourchettes de fiabilité des analyses.

2) Vérification et choix du type d'analyse :

- Pour les cations (Mg^{++} , Na^+ , Sr^{++} , et K^+) il fut possible de réaliser des analyses à double : à l'AAS et à l'ICP-MS. Les résultats ont été évalués et contrôlés par la balance ionique. Dans la plupart des cas, les analyses à l'ICP-MS se sont révélées plus fiables. Par conséquent cette méthode fut retenue.
- Le calcium, qui par ailleurs est le cation le plus abondant, a été analysé le jour même de l'échantillonnage, par une troisième méthode, la complexométrie. Celle-ci a fourni les meilleurs résultats. Toutefois, les résultats par ICP-MS ont également été satisfaisants. Ils furent utilisés dans les cas où la balance ionique continuait d'être déséquilibrée (l'erreur sur la balance > 5 %) après le contrôle des analyses.
- Un exemple de cette évaluation est présenté ci-dessous pour les concentrations en calcium. Dans les figures 4.3 et 4.4 nous pouvons apprécier la meilleure réponse des analyses faites par complexométrie ou par ICP-MS par rapport à l'absorption atomique. Entre les deux premières (fig. 4.5) existe une harmonie des valeurs. Néanmoins, les analyses par complexométrie fournissent une meilleure définition, spécialement à haute concentration.

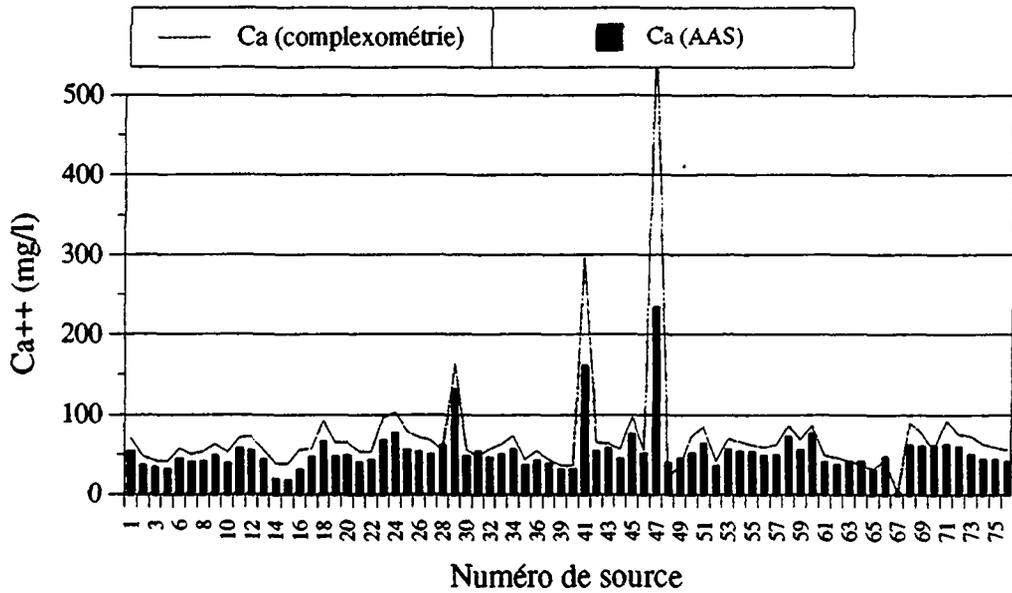


Fig. 4.3 Exemple de contrôle des analyses : Concentrations en calcium par Complexométrie et par Spectrophotométrie d'absorption atomique (AAS).

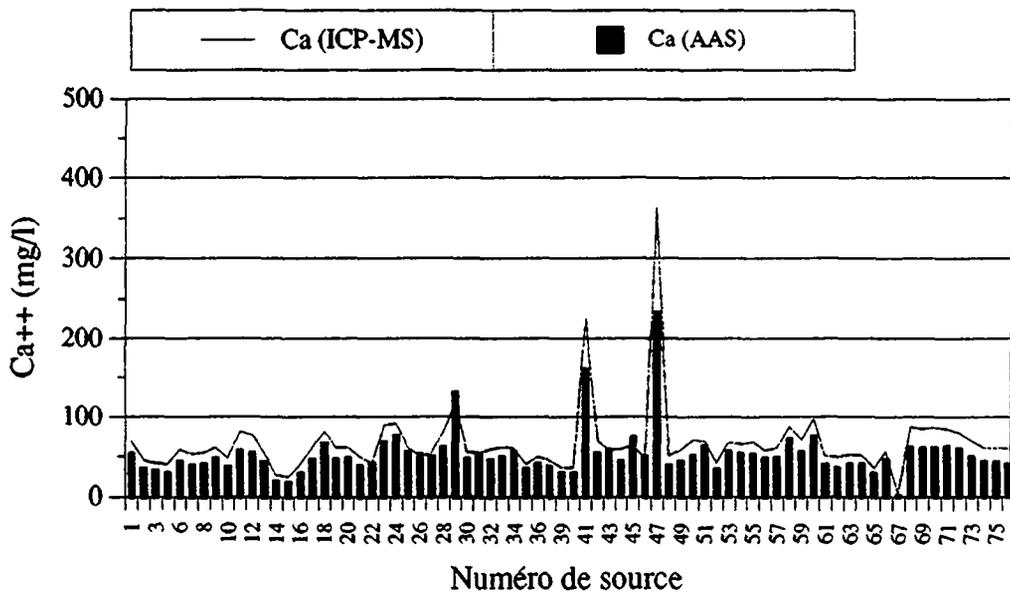


Fig. 4.4 Exemple de contrôle des analyses : Concentrations en calcium par Spectrométrie de masse à source à plasma (ICP-MS) et par Spectrophotométrie d'absorption atomique (AAS).

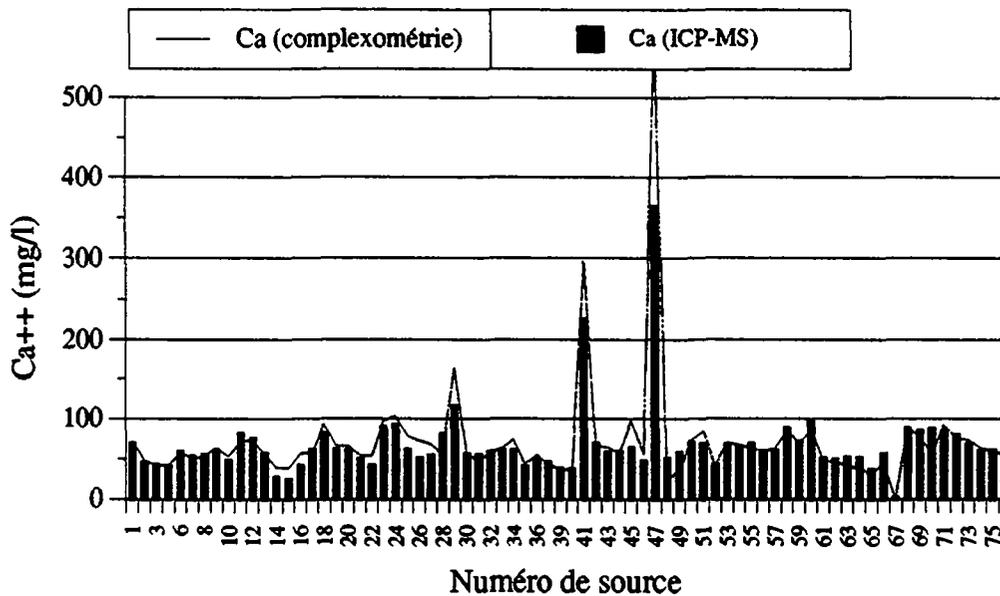


Fig. 4.5 Exemple de contrôle des analyses : Concentrations en calcium par Complexométrie et par Spectrométrie de masse à source à plasma (ICP-MS).

3) Verdict :

- Une fois la meilleure méthode d'analyse définie par la balance ionique des résultats ou la réévaluation des réponses brutes des analyses, une erreur sur la balance ionique < 5% fut obtenue sur 88 % des échantillons analysés. 10 % des eaux atteignirent une erreur entre 5 et 10 %.

Quelques améliorations ont encore été possibles. Ainsi, une fois l'erreur identifiée, quatre échantillons d'une des séries temporelles, ont été réanalysés pour les sulfates. Un cas particulier a été la source N° 67 de la série à répartition spatiale; elle a dû être rééchantillonnée et réanalysée. Il s'agit d'une eau bicarbonatée sodique et très chargée en d'autres éléments.

Quant au reste des échantillons qui présentaient une erreur sur la balance ionique entre 5 et 10%, il s'agit de sources du réseau à répartition temporelle, à composition principalement bicarbonatée calcique. L'erreur peut souvent être due à ces deux composants, mais le reste de la minéralisation peut tout de même être considéré pour l'étude des variations temporelles. Ainsi, ces échantillons ont été acceptés et, dans le cas des anomalies substantielles, ils sont discutés lors de la présentation des séries temporelles (cf. chap. 6.3).

4.5.2.3 Problèmes analytiques dans la détermination des éléments en trace par l'ICP-MS

L'évaluation des analyses en trace nécessite une approche complètement différente de celle des éléments majeurs ou mineurs. Leur détection faite par ICP-MS a présenté, malgré la performance de cet appareil, quelques inconvénients analytiques (BENSIMON et al. 1992) pour certains éléments (voir aussi le résumé dans le tableau 4.5) :

Interférences aux masses 54, 56 et 57 : code A1

La détection du fer, de l'ordre du $\mu\text{g/l}$, s'est révélée difficile, à cause des interférences spectrales entre les isotopes de fer et les complexes de l'argon avec l'azote, l'oxygène et l'eau :

^{54}Fe interfère avec $^{40}\text{Ar}^{14}\text{N}$

^{56}Fe interfère avec $^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}$

^{57}Fe interfère avec $^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}^1\text{H}$

Dans ces conditions, la limite de détection du fer est comprise entre 1 et 10 $\mu\text{g/l}$ avec une précision de l'ordre de 2 $\mu\text{g/l}$. Les concentrations en fer obtenues dans les eaux souterraines ont une moyenne de 18 $\mu\text{g/l}$ et varient entre 0 et 50 $\mu\text{g/l}$. Donc, la présence de fer est certaine, mais les valeurs absolues ne doivent être prises que comme ordre de grandeur.

Problèmes de gamme dynamique liés à une mauvaise résolution : code A2

Dans le cas des eaux chargées en bicarbonates, le pic principal du bore (^{11}B) est influencé par le pic du ^{12}C ; cette influence augmente le seuil de détection du bore ($\sim 1 \mu\text{g/l}$). Puisque les eaux analysées ont des teneurs en bore (moy. 13 $\mu\text{g/l}$) bien au delà de ce seuil, les valeurs analytiques du bore sont prises sans restriction dans la typologie des eaux souterraines.

Effet mémoire : code A3

L'iode et le brome manifestent un "effet mémoire". Cet effet est dû à l'adsorption d'une partie de ces atomes sur les parois du spectromètre et de la tuyauterie du système d'introduction. La partie adsorbée ne peut être résorbée après la durée de détection du spectre, créant ainsi un déficit apparent de ces éléments.

Les limites de détection se trouvent augmentées à environ 5 à 10 $\mu\text{g/l}$. Etant donné que les concentrations d'iode et de brome mesurées varient entre 1 et 4 $\mu\text{g/l}$, ces traces minérales sont exclues de la classification chimique des eaux souterraines (chap. 7.1) et ont été traitées uniquement dans les chapitres descriptifs 6.2.18 et 6.2.23.

Interférences à la masse 45 : code A4

Dans le cas des eaux contenant du silicium, le scandium (^{45}Sc) s'est avéré aussi un élément difficile à détecter du fait qu'il interfère avec le $^{28}\text{Si}^{16}\text{O}^1\text{H}$. Le coefficient de corrélation de 98% entre ces deux éléments corrobore cette anomalie. Par conséquent, le scandium a été éliminé de cette étude (communication orale de BENSIMON).

Interférences à la masse 51 : code A5

Dans le cas d'eau contenant du chlorure au-delà de 10 mg/l, une faible interférence entre le ^{51}V et le $^{35}\text{Cl}^{16}\text{O}$ a été décelée. Vu que les concentrations mesurées les plus élevées en chlorure sont de l'ordre de 10 mg/l, les valeurs analytiques du vanadium sont prises sans restriction dans la typologie des eaux souterraines.

Problèmes de limite de détection : code A6

Les valeurs du lanthane sont les concentrations en trace analysées les plus faibles que nous ayons détectées dans les eaux. Leur moyenne de 0.06 $\mu\text{g/l}$ se situe au-dessous du seuil de détection, lui même de l'ordre de 0.1 $\mu\text{g/l}$. Par conséquent, le lanthane n'est considéré que dans le chapitre 6 lors de la description des éléments.

Le fluor a été analysé par potentiométrie. Le seuil de détection de 0.02 mg/l n'a été atteint que par une source, la N° 67 avec 0.1 mg/l. Par conséquent il n'est pas considéré.

4.5.3 Influences qualitatives d'origine extra-géologiques

Des substances de type anthropogène ou d'incidences indépendantes du milieu souterrain aquifère ont été considérées, et présentées en résumé dans le tableau 4.5. Elles sont :

Effet géographique : code II

Les nitrates contenus dans les eaux souterraines proviennent d'influences extra-géologiques. Par exemple, dans les zones couvertes par la végétation, ils peuvent avoir pour origine une nitrification de l'azote organique. Dans les zones de cultures, les nitrates, composants d'engrais, sont facilement lessivés par les eaux de ruissellement et tendent à enrichir les eaux souterraines.

Les nitrates des eaux étudiées n'ont pas présenté de véritables anomalies. Les concentrations sont ≤ 8 mg/l et de nombreuses sources ont des valeurs < 0.5 mg/l. Puisque les nitrates obéissent davantage aux conditions géographiques que géologiques, le comportement de ce composé n'a pas été développé dans cette étude.

Le salage des routes : code I2

Le salage des routes peut affecter les eaux souterraines. La plupart des sources étudiées sont éloignées des routes ouvertes en hiver. Toutefois, deux émergences (N°1 et N°72) ont manifesté des anomalies de **sodium** et de **chlorures**, provenant du salage. Ces anomalies ont été exclues du traitement, réduisant ainsi le nombre des sources examinées pour ces composés de 76 à 74 (cf. tabl. 4.5).

Tuyauterie de captage : code I3

Quelques-uns des points d'eau considérés font partie d'un réseau de captage d'eaux potables. La tuyauterie utilisée, soit pour les drains, soit pour les conduites d'amenée, peut larguer certains éléments et mettre ainsi en cause l'origine géologique des concentrations. Ceci est surtout important pour les éléments en trace qui, du fait de leurs faibles concentrations, sont plus exposés à ce type de contamination.

Le GEOLEP a fait une recherche (PARRIAUX et al. 1990c) afin de caractériser l'influence des différents types de matériaux de captage. Y ont été considérés l'acier, la fonte, l'acier inoxydable, l'acier galvanisé, le laiton, le ciment et le PVC. Les résultats de cette recherche furent comparés avec les anomalies que nous avons trouvées dans les sources captées, par rapport aux émergences non captées.

Les concentrations des éléments ayant subi une influence de la tuyauterie de captage ont été ainsi décelées et éliminées. De cette façon sur un total de 76 sources échantillonnées, nous n'avons pas pris en compte le **fer** pour 33 sources, le **zinc** pour 30 sources, le **nickel** pour 18 sources, le **cuivre** pour 22 sources, le **chrome** pour 1 source et le **vanadium** pour 1 source.

De ces éléments, le fer (qui par ailleurs a présenté aussi des problèmes analytiques) et le zinc, sont ceux qui présentent le plus d'incertitudes et ils ne sont traités que du point de vue descriptif dans les chapitres 6.2.15 et 6.2.19.

Pollutions atmosphériques : code I4

Les précipitations sont au départ du cycle des eaux souterraines. Le GEOLEP exploite un réseau d'observation et de prélèvement des eaux d'alimentation sous forme d'accumulations neigeuses. Les analyses et l'évaluation sont présentées dans le chapitre 5.3.

Le **plomb** et l'**aluminium** se sont révélés être les éléments à forte présence dans l'air par rapport à ce qu'ils sont dans les eaux des sources. Le plomb, qui est par ailleurs absent des lixiviats de roches (cf. chap. 8.3.5), a été éliminé de cette étude. Quant à l'aluminium, il est aussi présent dans les lixiviats de roches, ce qui peut indiquer une provenance géologique. De ce fait l'aluminium est traité descriptivement dans la caractérisation chimique des eaux (cf. chap. 6.2.21) et il ne fait pas partie de la classification hydrochimique du chapitre 7.1.

D'autres éléments à très faible concentration ont été observés dans les analyses de neige, concentrations qui sont dans la plupart des cas nettement inférieures à celles trouvées dans les

eaux des sources (cf. chap. 5.3).

4.5.4 Influences dues au sol

Le sol est un milieu complexe qui joue un rôle important dans le cycle hydrologique. Le GEOLEP et le laboratoire de pédologie ont mené une recherche (AQUISOL) afin d'évaluer l'influence de sols d'aquifères-types sur la composition chimique des eaux de percolation.

Dans le cas de la nappe du Niesen, la grande diversité lithologique et l'envergure de la région d'étude ne fournissent pas un type de sol unique. Au contraire, la couche pédologique est variée. Par ailleurs, le sol dans cette région montagneuse n'est pas toujours développé, voire souvent inexistant. De nombreuses régions élevées présentent des affleurements rocheux fissurés et dénués de végétation, facilitant ainsi l'infiltration directe de l'eau des précipitations vers les aquifères.

Dans ces conditions, une généralisation du rôle du sol sur les écoulements souterrains est inapplicable. Pour cette étude, l'incidence due au sol est évaluée indirectement, en comparant les résultats des analyses chimiques de la fonte des accumulations neigeuses avec ceux des eaux souterraines (cf. chap. 5.3) et avec les résultats des lixiviats de roche (cf. chap. 8.3). Ces évaluations ont révélé les éléments qui proviennent de ces différents milieux. Le déficit ou le surplus de certains éléments peuvent nous indiquer l'influence du sol. Celui-ci, étant un milieu naturel, n'a pas été considéré parmi les influences extra-géologiques résumées dans le tableau 4.5.

Quant aux résultats du projet AQUISOL, ils nous servent de guide, spécialement pour les éléments qui ont montré un comportement similaire dans différents types de sols. Par exemple, le potassium, le vanadium, le rubidium et le chrome constituent des éléments libérés par les sols lors d'une lixiviation lente et indépendante du pH (ATTEIA 1992). D'autres éléments sont aussi désignés mais à des conditions pédologiques spécifiques. Ces influences sont discutées lors de la description de chaque élément (cf. chap. 6.2).

4.5.5 Choix des éléments

Le tableau 4.5 fait la compilation des problèmes analytiques et des influences extra-géologiques rencontrés et traités dans les chapitres 4.5.2 et 4.5.3. De là ont été choisis les éléments à considérer et le type de traitement. En résumé :

- *Éléments éliminés de tout traitement* : les nitrates, le scandium, le plomb et le fluor.
- *Éléments avec un nombre de sources réduit* : les chlorures, le sodium, le fer, le zinc, le nickel, le cuivre, le chrome et le vanadium.
- *Éléments dont la concentration est à considérer comme ordre de grandeur, décrits dans le chapitre 6, mais qui ne font pas partie de la classification des eaux souterraines du chapitre 7* : le fer, le brome, le zinc, l'aluminium, l'iode et le lanthane.

Elément	PROBLEMES ANALYTIQUES				INFLUENCES EXTRA-GEOLOGIQUES		CHOIX DES ELEMENTS				
	Moyenne 76 sources (1) (mg/l)	Méthode (2)	Seuil de détection (Précision) (3) (mg/l)	Reproduct. Cv % (4)	Type de problème	Code (5)	Type d'influence dans quelques sources	Code (6)	Nbre. d'échant. retenus sur 76	Traitement (7)	Elément
Majeur, mineur											Majeur, mineur
HCO3	213.0	Titration	0.01-0.1	3							HCO3
SO4	43.8	HPLC	0.2-0.5	8							SO4
NO3	2.0	HPLC	0.2-0.5	10			géographique, bassin versant salage des routes (2 sources)	11		éliminé	NO3
Cl	1.2	HPLC	0.2-0.5	10				12	74 éch.	éliminé	Cl
F	<0.02	Potentiométrie	0.02	8	lim. de détection	A6					F
Ca	72.7	Tit. et ICP-MS	0.05-0.1	3							Ca
Mg	6.9	ICP-MS	0.001-0.01	4							Mg
Na	6.4	ICP-MS	0.01-0.05	5			salage des routes (2 sources)	12	74 éch.		Na
Sr	0.8	ICP-MS	0.0001	5							Sr
K	0.7	ICP-MS	0.1	5							K
Si	2.0	Colorimétrie	0.5	6							Si
Traces	(µg/l)		(µg/l)								Traces
Ba	37.9	ICP-MS	0.1	7							Ba
(Fe)	29.4	ICP-MS	1.-10 (±2)	6	interférence	A1	tuyauterie de cap. (acier, fonte)	13	43 éch.	descriptif	(Fe)
B	27.2	ICP-MS	0.1-1	11	gamme dynamique	A2					B
Li	9.9	ICP-MS	0.1	6							Li
(Br)	4.0	ICP-MS	1.-10 (±2)	12	effet mémoire	A3	tuyauterie de cap. (galvanisé ou laiton)	13	46 éch.	descriptif	(Br)
(Zn)	15.4	ICP-MS	0.1	8						descriptif	(Zn)
Sc	2.0	ICP-MS	0.1	6	interférence	A4				éliminé	Sc
Rb	1.4	ICP-MS	0.1	8							Rb
(Al)	1.6	ICP-MS	0.1	7						descriptif	(Al)
Ni	1.5	ICP-MS	0.1	8						descriptif	Ni
(I)	6.1	ICP-MS	0.5-5 (±1)	10	effet mémoire	A3	pollution dans l'air tuyauterie de cap. (acier inox.)	14	58 éch.	descriptif	(I)
Mn	0.9	ICP-MS	0.1	9							Mn
Cu	1.9	ICP-MS	0.1	7							Cu
Pb	1.2	ICP-MS	0.1	3						éliminé	Pb
U	0.30	ICP-MS	0.1	3			tuyauterie de cap. (laiton) pollution dans l'air	13	54 éch.		U
Cr	0.38	ICP-MS	0.1	6							Cr
V	0.31	ICP-MS	0.1	12	interférence	A5	tuyauterie de cap. (acier inox ou spécial)	13	75 éch.		V
Co	0.29	ICP-MS	0.1	7			tuyauterie de cap. (acier spécial)	13	75 éch.		Co
(La)	0.07	ICP-MS	0.1	10	lim. de détection	A6				descriptif	(La)

REMARQUES (1) Valeurs moyennes des paramètres chimiques de toutes les sources, utilisées que pour déterminer leur fiabilité.
 (2) Méthode d'analyse: HPLC: High Pressure Liquid Chromatography. ICP-MS: Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry.
 (3) La précision des mesures est: Titration et colorimétrie: 1 à 5 %. HPLC: 5 à 8 %. ICP-MS: 2 à 8 %.
 (4) La reproductibilité des analyses est exprimée par le coefficient de variation en %.
 (5) et (6) Les codes sont décrits extensivement dans les chapitres 4.5.2 et 4.5.3. Quant au rôle du sol, il est indiqué dans le chapitre 4.5.4.
 (7) Le traitement "descriptif": indique que les concentrations de ces éléments doivent être considérées comme ordre de grandeur. Quant au "éliminé": sont ceux qui n'ont pas été considérés du tout.

Tableau 4.5 Problèmes analytiques, influences extra-géologiques et choix des éléments.

4.6 LIXIVIATS DE ROCHE ET ANALYSES

Il fallait trouver un point de comparaison pour étudier la dissolution de la roche dans le milieu aquifère : pour ce faire, nous avons procédé à la lixiviation en laboratoire des poudres de roches de plusieurs faciès géologiques des nappes du Niesen et du Gurnigel (cf. chap. 4.4.4), afin de simuler la charge chimique qui pourrait être atteinte par une eau souterraine, en première approximation.

Trente-six échantillons de roches ont été concassés, broyés, puis moulus très finement. 10 g de ces poudres furent dilués avec 200 ml d'eau Millipore et barbotés au CO₂, qui est un des principaux facteurs acides dans les précipitations et dans les sols. Ce barbotage abaisse le pH et favorise la dissolution. La pression de barbotage était maintenue autour de 0.5 atmosphère et le volume de solution à 200 ml. Des mesures de conductivité, de pH et de Eh, ont été systématiquement réalisées durant l'essai. Après 4 jours, les mesures de conductivité ont cessé de croître et sont restées relativement stables. Ceci peut être interprété comme l'état d'équilibre des composés majeurs et mineurs dans les conditions de l'expérience.

Cette méthode de lixiviation a été développée au GEOLEP dans le cadre du projet AQUITYP (1990). Elle a également été conçue en fonction de l'instrumentation de notre laboratoire pour l'analyse des fluides. Les solutions obtenues furent filtrées (0.45 µm) et analysées avec les mêmes méthodes que pour les échantillons d'eau (cf. tabl. 4.4); c'est-à-dire que les bicarbonates ont été analysés par acidimétrie, les anions par chromatographie liquide, les cations, les éléments en trace et en micro-trace par l'ICP-MS.

Les concentrations résultantes sont présentées parallèlement à celles des eaux, en fonction des unités géologiques définies pour les nappes du Niesen et localement du Gurnigel, et font partie de la discussion de l'interaction eau-roche du chapitre 8.3.

4.7 TRAITEMENT ET INTERPRÉTATION DES PARAMÈTRES

Une fois compilées et vérifiées toutes les mesures de terrain et les analyses chimiques des eaux, le traitement et l'interprétation des données ont été faits d'après la méthodologie déjà exposée dans la figure 4.1 et développée ci-dessous :

Représentation et discussion des paramètres physiques et chimiques des eaux souterraines

Les mesures de terrain et les résultats des analyses chimiques des eaux du réseau des sources à répartition spatiale (76 sources) ont permis l'élaboration des *cartes de paramètres*. Leur discussion et un traitement statistique descriptif des données ont permis de déterminer les *concentrations-types* des composés des eaux souterraines des flyschs et des eaux à influence des terrains extra-flysch (cf. chap. 6.2).

Les résultats du réseau à répartition spatio-temporelle (20 sources échantillonnées dans trois cycles hydrodynamiques différents) furent traités statistiquement à l'aide de *l'analyse*

factorielle multivariée. Le but était d'étudier l'évolution temporelle des paramètres pour un important nombre de sources choisies à partir du réseau 1 (cf. 4.4.1). Ce traitement est exposé dans le chapitre 7.4.

Les données du réseau à répartition temporelle (6 sources suivies mensuellement durant deux années et une durant neuf) affichent le *régime hydrologique* des eaux souterraines et l'*évolution des réponses hydrochimiques* (cf. 6.3) sur une longue période.

Traceurs artificiels et vitesse de transfert

L'évaluation des essais de traçage, réalisée précédemment dans la zone d'étude, a permis la définition de la vitesse de transit des écoulements (cf. chap. 5.2). Vu qu'il existe différents types d'aquifères indépendants ou imbriqués, dépendants de la géologie, de la porosité ou de la fissuration du milieu, une généralisation des caractéristiques physiques des aquifères n'est pas applicable directement.

Classification hydrochimique des eaux souterraines

Une classification hydrochimique des eaux souterraines fut réalisée d'après les critères établis par JÄCKLI (1970). Ces critères concernent les composés majeurs. Quant aux autres composés, nous proposons une classification pour chaque élément basée sur leurs concentrations qui dépassent la moyenne plus l'écart type de la distribution de l'élément en question (cf. chap. 7.1).

Caractérisation géologique des sources

La géologie des bassins versants des sources a été étudiée grâce à la documentation existante. L'incidence des diverses unités géologiques et surtout des différents types de flyschs et de terrains extra-flysch fut ainsi déterminée. De cette façon nous proposons une caractérisation géologique de chaque point d'eau échantillonné (cf. chap. 7.2).

Paramètres chimiques des eaux souterraines par type de flysch ou à incidence des terrains extra-flysch

Une fois connues les caractéristiques hydrochimiques de l'eau des sources et l'incidence géologique sur les sources, l'hydrochimie des eaux souterraines par type de flysch ou à incidence des terrains extra-flysch est proposée conjointement à la caractérisation hydrochimique des roches par unités de flysch (cf. chap. 8).

Caractérisation hydrochimique des roches et discussion sur l'hydrochimie des eaux souterraines et des lixiviats de roche

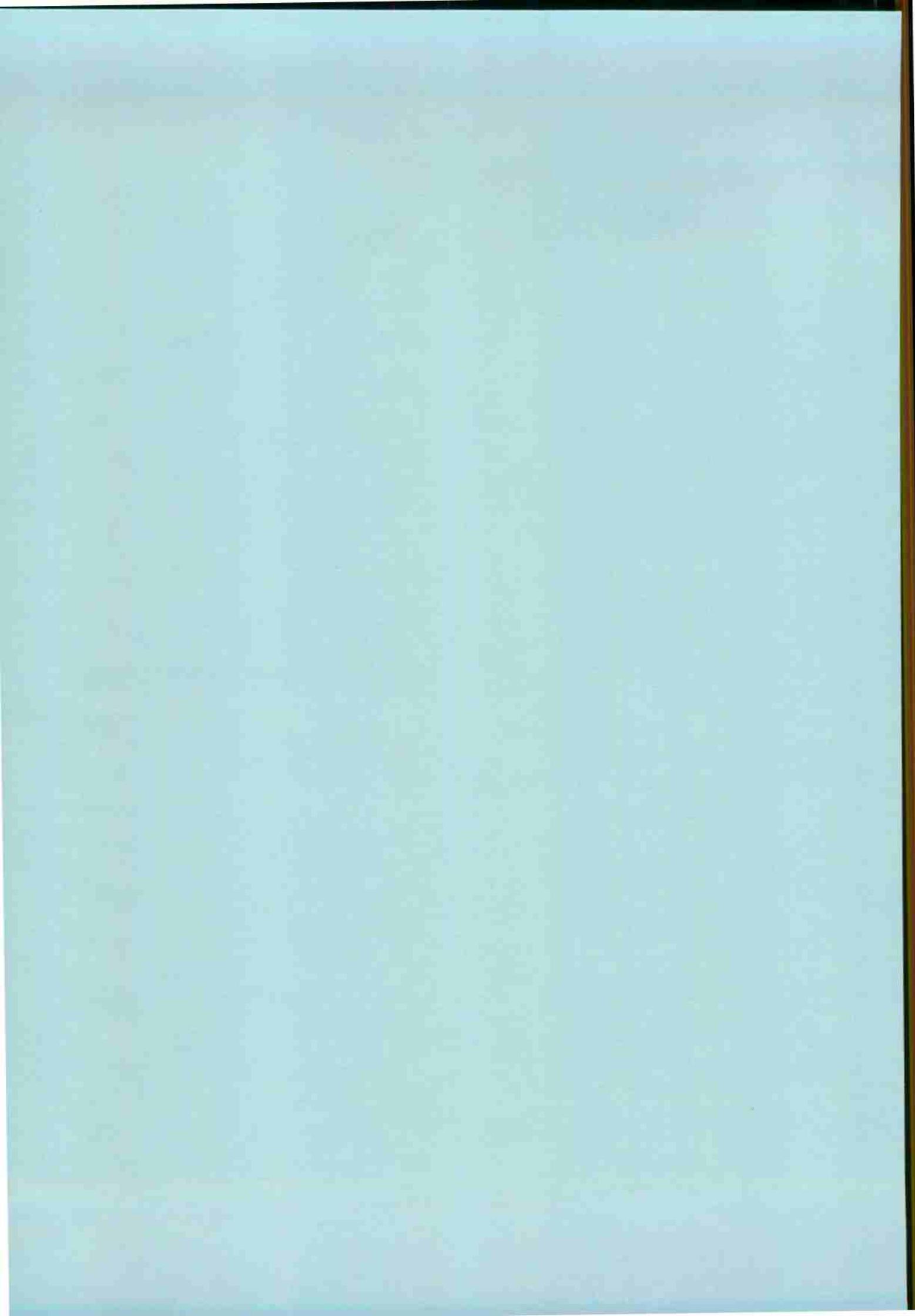
Les analyses des solutions de roche des différents types de flysch sont présentées graphiquement et discutées avec l'hydrochimisme des eaux souterraines dans le chapitre 8, afin d'établir le lien eau-roche.

Comparaison avec le réseau AQUITYP

Cette thèse fait partie du projet AQUITYP qui cherche à dresser une typologie des écoulements souterrains dans différents milieux géologiques. Dans le chapitre 9, nous relient nos résultats à ceux d'AQUITYP.

CHAPITRE 5

HYDROLOGIE ET HYDROGEOLOGIE



5. HYDROLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE

5.1 CONTEXTE HYDROLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE GÉNÉRAL

La nappe du Niesen forme une vaste chaîne montagneuse. Ses pentes sont constituées par de nombreux bassins versants qui contrôlent l'hydrologie locale. En dessous, une géologie très variée et discontinue (cf. chap. 3) ne favorise ni la régionalisation des aquifères, ni les conditions qui permettent l'application des lois sur les écoulements souterrains (cf. chap. 4.1).

En effet, les écoulements dans les flyschs du Niesen vont dépendre principalement :

- De la granulométrie et de la continuité du milieu et, en particulier, des différents faciès des roches sédimentaires.
- De l'existence du ciment (matrice) et du degré de cimentation de ces roches.
- De l'existence et de l'interconnexion de tous types de discontinuités (fissures, diaclases, failles, chenaux ou conduits d'origine karstique).
- De l'alimentation et de l'exutoire des eaux souterraines.

La conjugaison de ces caractéristiques déterminera la formation des aquifères et en conséquence l'apparition des sources. Des essais de traçage existants illustrent quelques zones aquifères de ce type. Leur interprétation et la détermination de la vitesse d'écoulement sont présentées dans le chapitre 5.2.

Bien que les systèmes d'écoulements régionaux dans les flyschs soient peu vraisemblables, une approche des caractéristiques hydrogéologiques d'ensemble est traitée ci-dessous en rapport avec la présence des zones sourcières.

Géomorphologiquement, la nappe du Niesen peut être séparée en trois grands compartiments hydrologiques régionaux (fig. 5.1) :

I Le nord-est entre le lac de Thoune et la Simme.

II Le secteur central entre la Simme et la Sarine.

III Le sud-ouest entre la Sarine et la Grande Eau, du côté du Sépey.

- Dans le secteur **nord-est**, la chaîne du Niesen est continue. Ses versants sont bien définis de part et d'autre des crêtes et sont formés d'une succession de bassins versants de montagne.

Il y a un nombre important de sources localisées sur le versant sud-est. Le flysch de

Frutigen couvre environ 80% du territoire. Les sommets, ainsi qu'une bonne partie du versant nord-ouest, sont constitués par les terrains du flysch du Niesenkulm (fig.3.2). Ainsi, les sources de ce secteur ont des bassins versants surtout sur des terrains du flysch de Frutigen avec influence du flysch du Niesenkulm. Si les sources sont situées près du chevauchement intranappe qui limite le flysch de Frutigen, une incidence des terrains extra flysch du Niesen, et surtout des faciès triasiques du soubassement anté-flysch et de l'Ultrasubalpique environnant, est à considérer (cf. caractéristiques géologiques des sources, chapitre 7.2).

Quant aux sources du versant nord-ouest, les parties supérieures des bassins versants sont situées sur le flysch du Niesenkulm. En descendant, le flysch de Seron apparaît progressivement. Il faut remarquer, surtout dans les parties basses, la présence de moraines locales et régionales. A la limite de la nappe, l'influence de terrains triasiques de la zone Submédiane et des Préalpes Médiannes est à souligner.

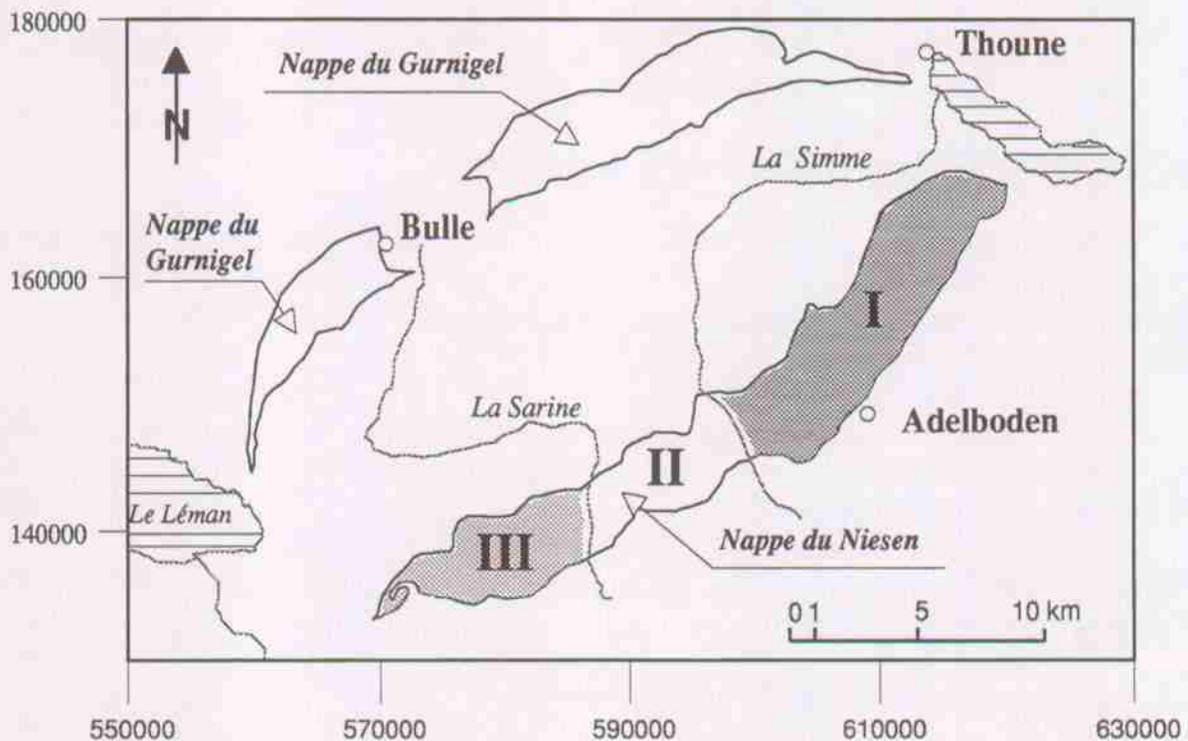


Fig. 5.1 Partage de la nappe du Niesen d'après son contexte hydrologique et hydrogéologique régional.

- Le compartiment **central** (fig.5.1) se différencie de ses voisins, car la nappe du Niesen est découpée à plusieurs reprises. Morphologiquement, elle est entièrement traversée par les vallées de la Simme, du Louibach (affluent de la Sarine) et de la Sarine. Des moraines régionales de l'Helvétique s'y sont déposées et témoignent du passage de ces glaciers à

travers les vallées. La nappe dans ce secteur est moins large. Bien que les affleurements du flysch de Frutigen soient présents du côté sud et ceux du Niesenkulm du côté nord, leur contact est moins régulier que dans le compartiment nord-est du fait du découpage, et leurs influences respectives ne peuvent être élucidées.

Ces entailles topographiques créent des pentes transversales à la lithologie. Une série de bassins versants s'y succèdent au-delà des limites de la nappe du Niesen. Ainsi, les flyschs du Niesen perdent leurs caractéristiques de contour topographiquement isolé et l'influence des unités extra-flysch sur les écoulements souterrains est à prendre en compte, même dans les sources localisées au sein des flyschs. Cette morphologie permet aussi aux terrains triasiques du soubassement de la nappe et des unités environnantes de se trouver à une altitude similaire à celle des flyschs.

- Dans le secteur **sud-ouest**, la continuité de la nappe du Niesen est retrouvée. Elle dessine une chaîne qui a comme crêtes un domaine purement formé par des flyschs. Sa direction singulière est-ouest la différencie du reste de la nappe. Sur le versant sud, les bassins versants sont peu développés, à l'exception de celui d'Isenau. Du côté nord, il faut signaler trois grands bassins : celui du Tschärzibach (exutoire du lac d'Arnon), et ceux de la Tomeresse et de l'Eau Froide d'où proviennent aussi la plupart des sources du pays d'Enhaut.

Cette région est tectoniquement plus complexe que les deux précédentes, hormis le flysch de Frutigen qui domine sur le versant sud. Une convergence des différents accidents structuraux mène à une imbrication des unités de flyschs. Des affleurements de plusieurs faciès des différents flyschs peuvent être trouvés sur une distance relativement courte. Ainsi, de nombreuses sources de ce secteur seront influencées indistinctement par plusieurs types de flysch (Frutigen, Niesenkulm et Seron principalement) et le flux souterrain sera également favorisé par les discontinuités.

Remarques :

Une étude de l'incidence des différentes séquences de flysch sur le bassin hydrogéologique de chaque source a été réalisée. Elle est à la base de la caractérisation géologique des sources (chapitre 7.2).

5.2 TRACEURS ARTIFICIELS

Une compilation des essais de traçage existants dans la région du flysch du Niesen est présentée dans ce chapitre. Nous avons pris en considération des essais associés aux exutoires en étude et qui pourraient nous renseigner sur la vitesse de transfert des écoulements souterrains. La figure 5.2 présente la localisation de ces essais (pour plus de précisions, cf. chap. 4.3.3).

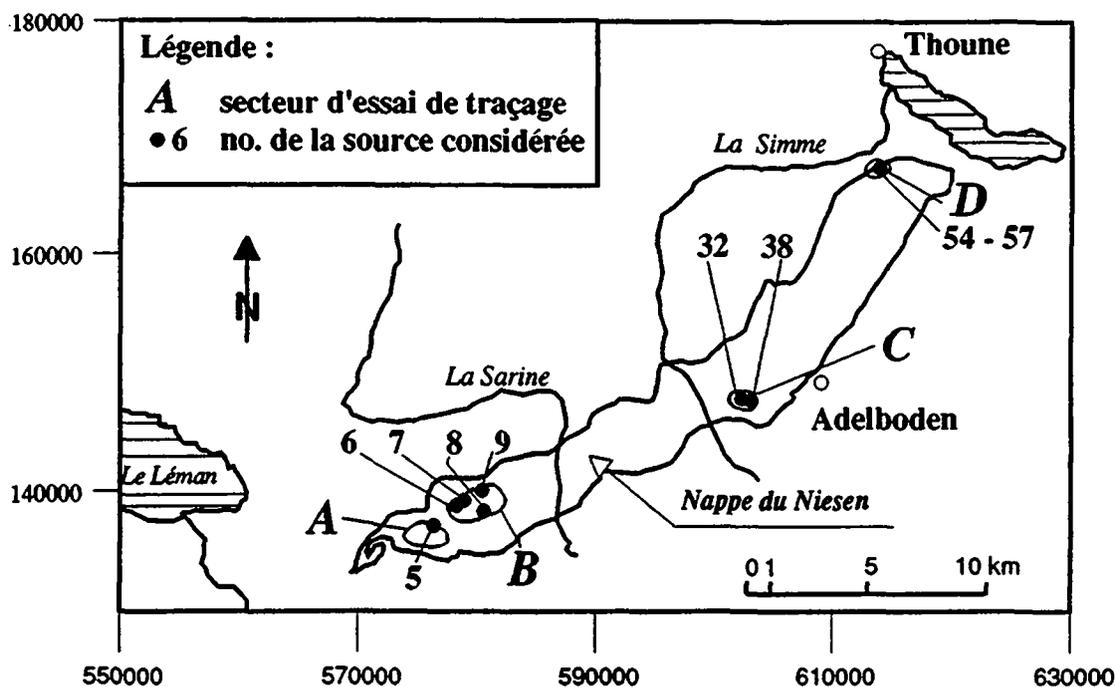


Fig. 5.2 Localisation des essais de traçage dans la nappe du Niesen.
 A : lac Lioson et col de Semeleys, B : sources du pays d'Enhaut,
 C : sources de Weissenberg et D : sources de Zünigwald.

A Essai de traçage au lac Lioson et au col de Semeleys

KUNZ et le GEOLEP ont réalisé en octobre 1986 des essais de traçage dans la région sud-ouest de la nappe du Niesen.

10 kg d'uranine ont été largués à une profondeur de 21 m au milieu du lac Lioson (alt. 1848 m) afin de tester la liaison hydrogéologique entre le lac et la source Lioson (AQUITYP-LLI ou N°5), source dont la chambre de captage est située à une distance de 140 m en aval du lac. Un deuxième essai a été effectué au col de Semeleys (alt. 2300 m) où 1 kg de pyranine a été injecté dans des discontinuités afin de tester la liaison avec les sources du versant sud de la nappe du Niesen entre Chersaule (alt. 1650 m), les Deux Rochers (alt. 1345 m) et Marnex (alt. 1720 m). Des échantillons journaliers d'eau et des fluocapteurs installés dans les sources ont été prélevés pendant un mois et demi.

Les résultats de la première expérience ont montré une arrivée massive de l'uranine dans le captage de la source Lioson. Par ailleurs, cette source a une très importante fluctuation du débit au cours du temps (entre 500 et 5000 l/mn), mais une température assez constante entre 3 et 3.8°C (cf. annexe 3). Nous pouvons interpréter ces faits de la manière suivante : la source Lioson, captée en aval du lac, est alimentée par des apports souterrains du lac Lioson. A ceci s'ajoute une composante d'écoulements souterrains qui est vraisemblablement en équilibre thermique grâce à une grande étendue d'aquifère.

Quant au deuxième essai de traçage, aucun des traceurs n'a été décelé aux sources du versant sud. Ceci montre l'absence d'une liaison hydrogéologique entre le col de Semeleys ou le lac Lioson et les sources en question. Nous pouvons expliquer ce fait géologiquement : le soubassement rocheux de la région est composé de l'alternance des faciès calcaires et turbiditiques du flysch du Niesenkulm et de faciès conglomératiques et pélitiques du flysch de Frutigen. Bien que des discontinuités et un micro-karst soient présents, les couches imperméables du flysch jouent un rôle d'aquiclude, ce qui ne permet pas la liaison régionale des écoulements souterrains.

B Essais de traçage dans les sources du pays d'Enhaut

Le bureau NORBERT a effectué l'étude hydrogéologique des zones de protection des sources du pays d'Enhaut (1988). Cette étude a tenu compte des essais de traçage à la fluorescéine effectués par M. Lugeon en 1903-4, ainsi que des essais effectués en 1987 par ses soins et analysés au GEOLEP. Nous présentons ici l'interprétation des résultats et un aperçu des vitesses de transit. Celles-ci correspondent à l'arrivée du pic maximum du traceur (vitesse modale) et sont désignées comme vecteurs sur la figure 5.3, en indiquant la direction de l'écoulement sur le lieu d'essai.

Les essais qui donnent des renseignements régionaux sont ceux effectués par hélicoptère (H1 à H4) et celui de M. Lugeon (L3). Les essais en fouilles (F1 à F4) ont été réalisés sur un terrain meuble, à proximité des captages.

Les essais L3 et H1 ont servi à tester l'alimentation de la source de la Molaire (code VM ou N° 8). Dans le premier, M. Lugeon a mis en évidence la liaison entre le Gour sur Sazième (alt. 1997 m) et la source de la Molaire (alt. 1410) avec des vitesses de l'ordre de 90 m/h. Dans le deuxième cas, lors de l'essai H1, 2 kg d'uranine ont été largués au NW de l'alpage de Sazième; le traceur a atteint la source avec une vitesse de 15 m/h. Ces vitesses sont très élevées pour le milieu aquifère du flysch, compte tenu de la perméabilité micro-karstique du flysch (cf. aussi régimes hydrologiques chap. 6.3). Elles correspondent plutôt à des discontinuités ouvertes où ont été largués les traceurs. Néanmoins, le soubassement rocheux de la région formé par les faciès conglomératiques calcaires du flysch de Seron et sa structure géologique dans le sens de l'écoulement doivent certainement favoriser le passage des eaux.

L'essai H4 a été effectué pour tester l'alimentation des Becques (VB ou N° 6) et du Plan Pérette (VP ou N° 7). La vitesse de transfert dans le premier cas a été de 7 m/h et de 8 m/h dans le deuxième. Là aussi, le traceur a disparu dans des fractures largement ouvertes dans le faciès calcschiste zoogène du flysch de Seron.

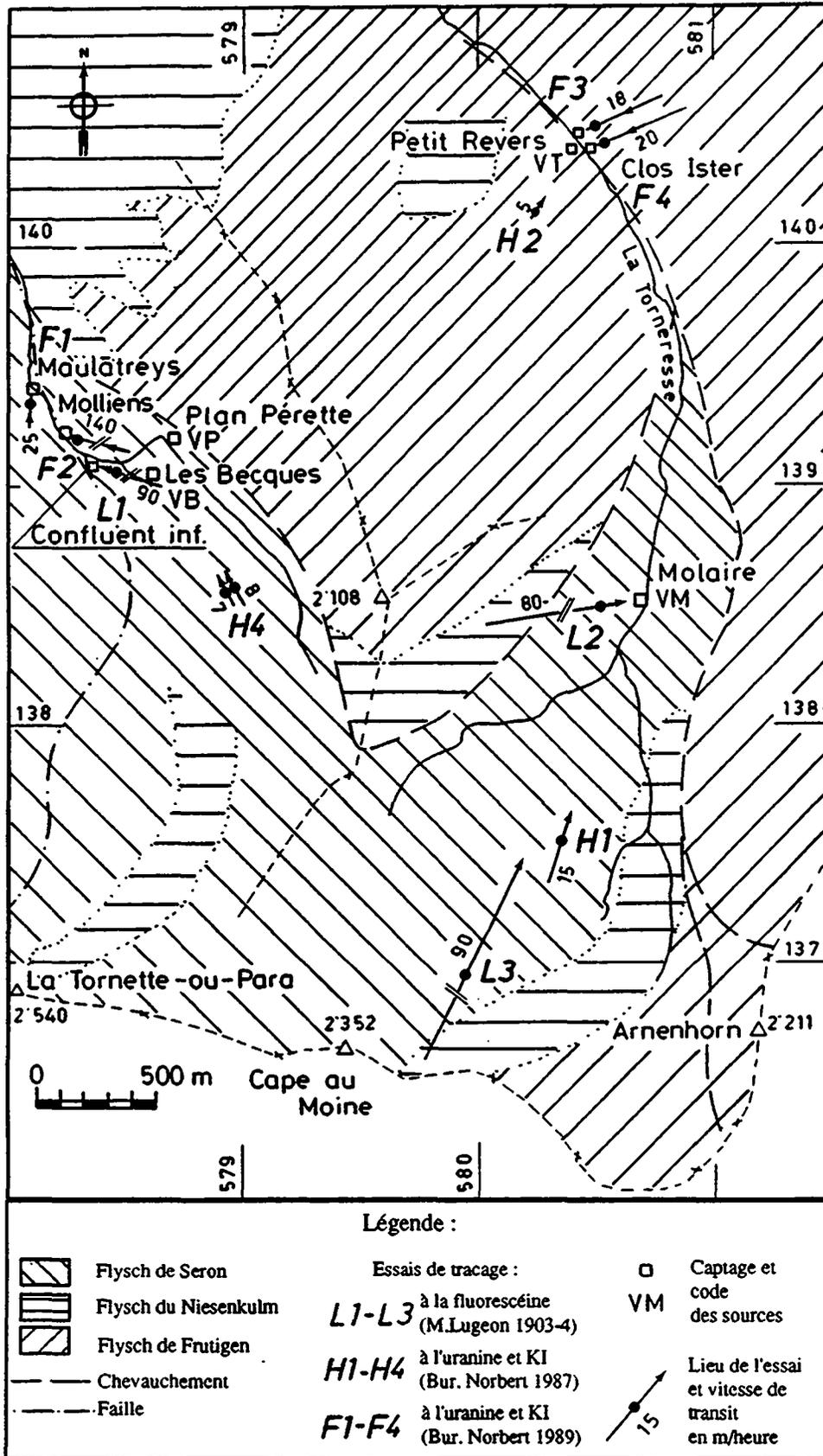


Fig. 5.3 Vecteurs de vitesses de transit (en m/h) des traceurs artificiels sur des sources du pays d'Enghien (fond géologique simplifié du substratum, d'après l'atlas géologique de la Suisse, 1 : 25'000, feuille 1265, Les Mosses).

L'essai H2 a permis de tester l'alimentation du Petit Revers (VT ou N° 9). Les résultats indiquent une vitesse de transit de 5 m/h. La porosité de fissures du flysch de Frutigen, ainsi que les éboulis de pente et les alluvions où se trouve le captage de la source, ont favorisé ces vitesses.

C *Essais de traçage dans les sources de Weissenberg*

Le bureau CSD (Bern) a effectué en 1985 des essais de traçage à la rhodamine et à la fluorescéine pour l'établissement des zones de protection des sources de Weissenberg (secteur C sur la fig. 5.2). Deux de ces sources correspondent aux exutoires étudiés, Wyssberg (N° 38) et Weissenberg (N° 32). Il s'agit d'essais locaux réalisés sur des fouilles à 30 m en amont des captages. Néanmoins les renseignements sont intéressants, car les fouilles ont touché le soubassement rocheux.

Dans le cas de Wyssberg la vitesse de transit fut de 25 m/h et dans le cas de Weissenberg de 10 m/h. Les 25 m/h sont dus à la présence de fissures ouvertes trouvées dans le flysch du Niesen qui affleuraient au fond de fouille. Ceci confirme la porosité de fissures du flysch.

D *Essais de traçage dans les sources de Zünigwald*

Des essais de traçage à la sulforhodamine et à l'uranine ont été réalisés en 1982 par le bureau GEOTEST (Zollikofen) dans la zone de Zünigwald afin d'établir les zones de protection des sources (fig. 5.2, secteur D).

Bien qu'il s'agisse d'essais locaux et dans un secteur bas de la nappe (alt. 840 m), ils ont été considérés pour indiquer la vitesse de transit des écoulements là où la couverture pédologique et quaternaire est importante. Des vitesses modales entre 0.45 et 0.48 m/h ont été mises en évidence par les traceurs sur les exutoires N° 54 à 57 de notre étude.

En conclusion, ce chapitre illustre la variation des vitesses d'écoulement. Le réseau des discontinuités (porosité de fissures) dans le flysch du Niesen est à l'origine d'écoulements rapides qui peuvent atteindre 90 m/h. Par contre le flysch en lui-même, composé d'une alternance de pélites et des turbidites, joue souvent un effet d'aquiclude des écoulements souterrains. Toutefois une perméabilité du type micro-karstique peut être attribuée au flysch détritique à matrice calcaire ou au flysch calcaire.

Une discussion sur le régime hydrologique des eaux souterraines est présentée dans le chapitre 6.3 lors du traitement des variations temporelles des paramètres physiques et chimiques des exutoires. Elle permet de compléter les observations ponctuelles liées aux essais de traçage.

5.3 COMPARAISON DES PARAMÈTRES HYDROCHIMIQUES DES NEIGES ET DES EAUX SOUTERRAINES

Dans la région montagneuse de la nappe du Niesen, les eaux souterraines ne sont alimentées que par les précipitations. Celles-ci, durant la saison tempérée ou chaude (env. mai-novembre), ont lieu sous forme de pluie et font partie du début du cycle hydrologique. Leur infiltration vers la nappe souterraine peut être directe à travers les discontinuités (y compris le micro-karst) de la masse rocheuse dénudée. L'infiltration sera par contre retardée s'il se produit d'abord un écoulement superficiel ou hypodermique .

Pendant la période froide (env. novembre-avril), les précipitations ont lieu en bonne partie sous forme de neige. Une couverture neigeuse est ainsi accumulée et fournira une importante recharge de la nappe souterraine lors du dégel.

Afin de comparer l'alimentation des eaux souterraines avec sa résurgence sous forme de sources, le GEOLEP a créé et exploite un *réseau d'observation* de neige depuis 1987. De 14 à 25 points sont ainsi distribués sur les versants de bassins liés à des aquifères types du projet AQUITYP (PARRIAUX et al. 1990a). Leur échantillonnage est programmé à la fin de la saison hivernale dans le but d'obtenir une accumulation de neige maximale. A cet effet des carottes de neige, de plusieurs mètres parfois, sont extraites à l'aide de sondages à la tarière sur chaque point. L'accès aux points se fait par hélicoptère, pour atteindre plus facilement les zones abruptes et permettre des échantillonnages synchrones.

Deux points de ce réseau appartiennent à la nappe du Niesen. Leurs coordonnées et altitudes sont indiquées dans le tableau 4.2 :

- *Le point N° 13 se trouve dans le secteur supérieur du bassin d'alimentation de la source de la Molaire. Le stockage neigeux a été prélevé dans le site dit Les Marguiers à une altitude de 1670 m. La source de la Molaire, située à 1407 m (localisation : cf. fig. 4.2, source N°8 et tabl. 4.3), est l'exutoire principal de cette région.*
- *Le point N° 14 est localisé au col d'Isenau (alt. 2077 m) au-dessus de la source d'Isenau (cf. fig.4.2, source N°17 et tabl. 4.3). Celle-ci correspond à l'exutoire de ce secteur et est située à 1877 m d'altitude.*

Les eaux des neiges se sont révélées très peu chargées chimiquement lors des premières analyses réalisées au GEOLEP à l'aide de l'ICP-MS. Des précautions ont dû être prises afin de détecter ces bas niveaux de concentration. Les résultats sont comparés graphiquement (fig. 5.4) avec ceux des sources concernées. Les concentrations des eaux des sources correspondent à la série la plus diluée, celle du printemps 1989. Ainsi, la comparaison fait mieux ressortir les éléments anormalement abondants dans les neiges, éléments d'origine atmosphérique qui n'ont rien à voir avec la géochimie des aquifères.

Les cations et le silicium

Une très faible concentration des cations majeurs et du silicium, souvent proche du seuil de détection, est mise en évidence dans les eaux des neiges. Les teneurs des eaux des sources

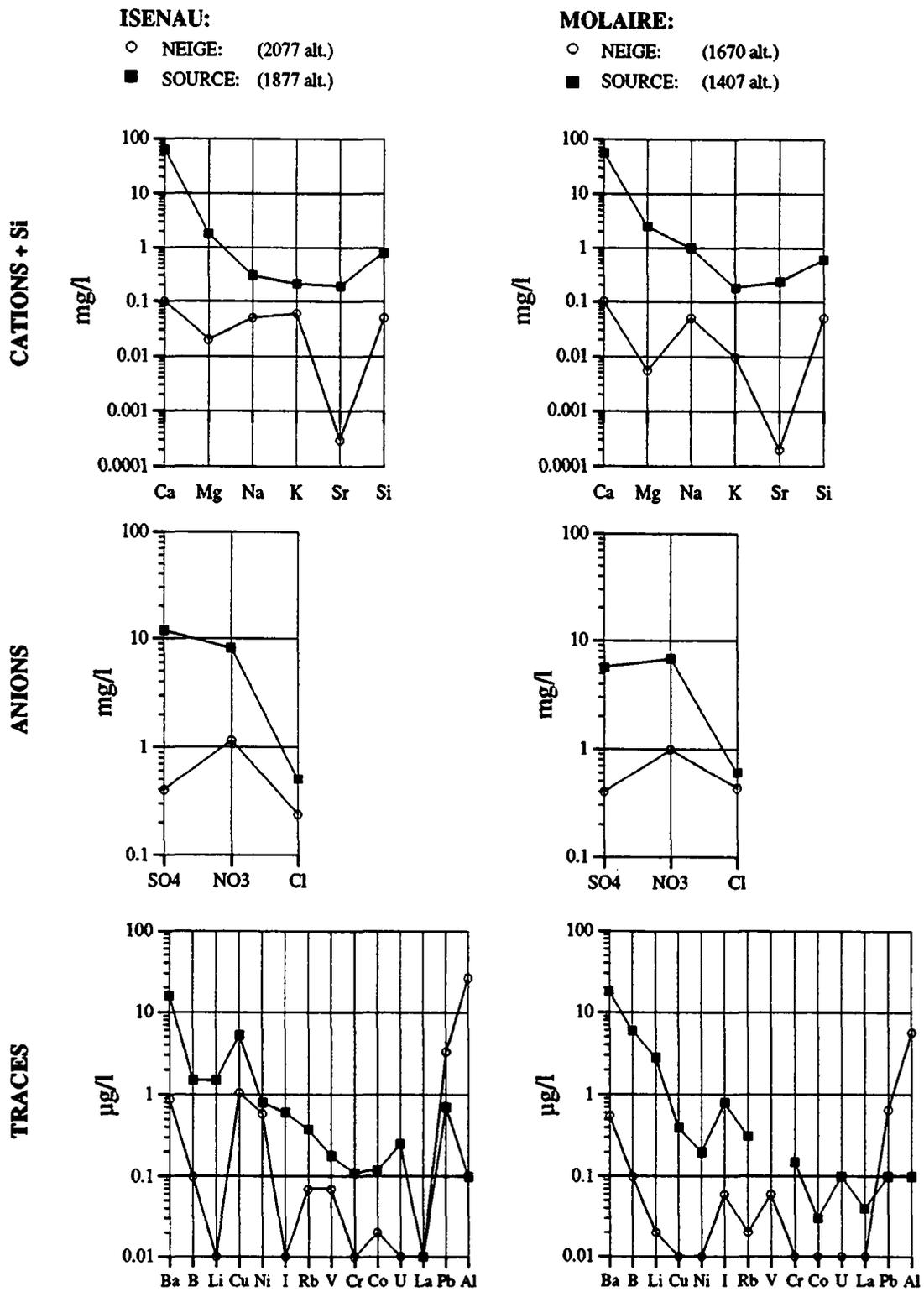


Fig. 5.4 Comparaison de composants chimiques des neiges et des sources prises à l'exutoire du bassin concerné.

sont dans la plupart des cas entre dix et mille fois plus élevées que dans les neiges. Donc, une influence de ces éléments sur la géochimie des eaux souterraines peut être négligée.

Les anions

Les valeurs des neiges en sulfates et en chlorures sont à la limite du seuil de détection. Une faible présence de nitrates (de l'ordre de 1 mg/l) a été détectée. La concentration des nitrates contenue dans les eaux souterraines est plus de huit fois supérieure. Par conséquent, nous pouvons considérer que la provenance des principaux anions dans l'eau souterraine dans ces cas est postérieure aux précipitations. Les valeurs des hydrogénocarbonates n'étaient pas disponibles pour les eaux de neige à cette date, mais des analyses postérieures ont indiqué de très basses concentrations (de l'ordre de 2 mg/l), négligeables par rapport aux concentrations des eaux de sources.

Les éléments en trace

Le contenu des éléments en trace est aussi très limité dans les neiges. La plupart n'ont pas pu être détectés ou se situent à la limite du seuil de détection (entre 0.01 et 0.1 µg/l). Néanmoins, d'importantes anomalies d'aluminium (5.7 et 26.3 µg/l) et de plomb (0.7 et 3.3 µg/l) sont présentes dans les neiges contrairement aux eaux souterraines (fig. 5.4).

Pour le plomb, les analyses des lixiviats de roche (cf. chap. 8.3.5) ont montré une absence complète de cet élément dans la roche encaissante. Ainsi les concentrations de plomb trouvées dans les eaux des sources seraient surtout dues à la pollution atmosphérique. Cet élément est exclu de la classification des écoulements souterrains.

Quant à l'aluminium, il est faiblement présent dans les eaux souterraines (moyenne = 1.3 µg/l, cf. 6.2.21). Les lixiviats de roche en contiennent jusqu'à 21 µg/l (cf. chap. 8.3.5). Nous pouvons en déduire que l'aluminium provenant de l'atmosphère se fixerait totalement ou partiellement dans le sol (quand il existe) lors de la percolation de l'eau. L'aluminium contenu dans les eaux souterraines sera soit d'origine atmosphérique, soit d'origine du milieu aquifère.

Le GEOLEP a aussi pris en considération les éléments qui pourraient être abandonnés par la tarière utilisée à l'époque pour le prélèvement des neiges. La tarière a été plongée dans de l'eau Millipore pendant 24 heures environ. Des échantillons de cette eau furent analysés à l'ICP-MS. Les résultats indiquent d'importantes anomalies (entre 1 et 27 µg/l) de fer, de manganèse, de cuivre, de zinc et de nickel. Leur incidence en tant que composants de l'eau des neiges n'a pas pu être évaluée. Ces éléments font, d'un autre côté, l'objet d'une discussion lors du choix des éléments qui tient compte de l'influence extra-géologique (cf. chap. 4.5.2 et 4.5.3). Comme résultat, ils sont pris d'une façon limitée dans la classification des écoulements souterrains.

D'autres anomalies moindres, de l'ordre de 1 µg/l de baryum, ont aussi été détectées dans "l'eau de la tarière". Cependant, le baryum est l'élément en trace le plus abondant dans les eaux des sources (moyenne = 34.7 µg/l, cf. chapitre 6.2.14). Cette incidence est donc négligeable.

CHAPITRE 6

PARAMETRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry should be supported by a valid receipt or invoice. This not only helps in tracking expenses but also ensures compliance with tax regulations.

In the second section, the author provides a detailed breakdown of the company's revenue for the quarter. It includes a comparison between actual performance and the budgeted figures, highlighting areas where the company exceeded expectations and where it fell short.

The third section focuses on the company's financial health and liquidity. It analyzes the current ratio and debt-to-equity ratio, providing insights into the company's ability to meet its short-term and long-term obligations.

Finally, the document concludes with a summary of the key findings and recommendations for the management team. It suggests several strategies to improve operational efficiency and reduce costs, which could lead to higher profitability in the future.

6. PARAMETRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

6.1 INTRODUCTION

Remarques sur les données

Dans ce chapitre sont décrits les mesures et données physico-chimiques prises in situ et les résultats des analyses chimiques des eaux des sources des réseaux à répartition spatiale (N° 1) et à répartition temporelle (N° 3). Les paramètres du réseau spatio-temporel (N° 2) sont traités dans le chapitre 7.4.

Les données ont été précédemment dépouillées et les analyses contrôlées (cf. chap. 4). Le résumé du choix des éléments est présenté dans le tableau 4.5. Rappelons, néanmoins, le verdict sur les éléments qui ont posé des difficultés d'ordre analytique (limites de détection, interférences, gamme dynamique ou effet mémoire), ou qui ont subi des influences extra-géologiques (pollutions atmosphériques des eaux d'alimentation des nappes dues à la tuyauterie de captage ou au salage de routes) :

- *Eléments éliminés de tout traitement* : les nitrates, le scandium, le plomb et le fluor.
- *Eléments qui ont conduit à diminuer le nombre de sources* : les chlorures, le sodium, le fer, le zinc, le nickel, le cuivre, le chrome et le vanadium.
- *Concentrations des éléments à considérer comme ordre de grandeur*, décrits dans le chapitre 6, mais qui ne font pas partie de la classification chimique des eaux souterraines du chapitre 7.1 : le fer, le brome, le zinc, l'aluminium, l'iode et le lanthane.

Le rôle du sol sur les eaux souterraines est discuté dans le chapitre 4.5.4. Une généralisation de l'influence pédologique n'a pas été possible et elle n'a pas été considérée directement dans le choix des éléments. Les résultats du projet AQUISOL (cf. chap. 4.5.4) sont discutés lors de la description des éléments dans ce chapitre. Une évaluation indirecte du rôle du sol peut ressortir de la comparaison du contenu hydrochimique des eaux souterraines et du squelette rocheux par les tests de lixiviation (cf. chap. 8).

6.2 CARACTÉRISATION PHYSIQUE ET CHIMIQUE RÉGIONALE : CARTES ET HISTOGRAMMES DES PARAMÈTRES (RÉSEAU 1 À RÉPARTITION SPATIALE)

Sources considérées

76 sources constituent le réseau d'observation à répartition spatiale (N° 1). 67 appartiennent à la nappe du Niesen et 9 à la nappe du Gurnigel. Leur localisation et leur numérotation sont signalées dans la figure 4.2. Quant à leur dénomination, leurs coordonnées et leur altitude,

elles se trouvent dans le tableau 4.3. Comme nous l'avons indiqué, le nombre de sources s'est trouvé réduit dans les cas où des anomalies extra-géologiques (tuyauterie de captage ou salage des routes) ont été détectées.

Parmi les sources de la nappe du Niesen, quelques-unes se trouvent à la limite intranappe et trois dans sa périphérie à savoir les N° 18, 41 et 47 (cf. fig. 4.2). En effet, les limites tectoniques de la nappe sont complexes et contiennent souvent des lambeaux ou des écailles du substratum. La nappe du Niesen abrite, par ailleurs, un soubassement anté-flysch (cf. chap. 3.3.2 et 3.3.3). De cette façon, les sources de la périphérie, même si elles ne sont pas caractéristiques du flysch, ont été maintenues afin de préciser l'influence des terrains extra-flysch et de mieux comprendre le comportement des sources qui, malgré leur localisation à l'intérieur de la nappe, présentent des anomalies similaires.

Parmi les terrains nommés extra-flysch, les évaporites du Trias fournissent la principale empreinte hydrochimique aux eaux souterraines. MANDIA (1991) a réalisé la typologie des aquifères évaporitiques du Trias pour les unités tectoniques des Préalpes médianes, de l'Helvétique, de l'Ultraselvétique et du Pennique. Ses résultats qui concernent des eaux sans thermalisme, comme celles de cette étude, sont aussi exposés et servent de repère pour les concentrations maximales de certains composés chimiques des eaux souterraines de la nappe du Niesen qui subissent une influence extra-flysch du type triasique-évaporitique.

Types de représentations

- Des cartes tridimensionnelles de distribution des paramètres pour l'ensemble des nappes du Niesen et du Gurnigel ont été établies. Un fond géographique et géologique a été digitalisé. Les valeurs ou concentrations des paramètres lui ont été superposées.
- L'étude statistique descriptive s'appuie sur des histogrammes en fréquences absolues des concentrations des paramètres et sur des critères statistiques. Ce traitement n'est réalisé qu'avec les données de la nappe du Niesen, sa grande population le permettant. Les points d'eau de la nappe du Gurnigel sont étudiés pour comparaison.

Légendes des graphiques et terminologie

Les cartes de paramètres montrent dans la troisième dimension les concentrations ou valeurs d'un paramètre (échelle verticale).

Avec les histogrammes des paramètres nous indiquons les critères suivants :

N = nombre d'individus = nombre de sources de la nappe du Niesen considérées.

\bar{x} = moyenne arithmétique des concentrations du paramètre en question.

s = écart type des concentrations du paramètre en question.

Cv = $(s / \bar{x}) \cdot 100$ coefficient de variation ou dispersion relative en pour-cent.

Les paramètres physico-chimiques

6.2.1 Le débit (Q en l/mn)

Les mesures de débit des sources sont présentées comme ordre de grandeur dans le cas de ce réseau à répartition spatiale. La grande extension de la zone étudiée n'a pas permis de prendre des mesures synchrones.

A l'échelle régionale, la variabilité spatiale du débit des sources est évidemment considérable (fig. 6.2), du fait de la diversité des zones aquifères. En effet l'intercalation des roches perméables ou non perméables, leur tectonique et degré de discontinuités (y compris le micro-karst) induisent à un large éventail des caractéristiques physiques des aquifères. La vitesse d'écoulement est ainsi variable, déterminant des débits aux exutoires faibles ou forts.

Dans la nappe du Niesen, les valeurs de débit oscillent entre 1 et 2900 l/mn, avec une dispersion de 171 % et une valeur moyenne de 316 l/mn. Ces débits appartiennent au réseau d'observation de l'automne 1988, et sont donc proches de l'étiage. La répartition spatiale des débits des sources (fig. 6.2) et leur histogramme des fréquences (fig. 6.1) mettent en relief :

- Huit émergences qui *dépassent les 500 l/mn*; à savoir :
 - Les sources de la Molaire (N°8) et du Petit-Revers (N°9) dans le pays d'Enhaut, et la source de Lioson (N°5) du projet AQUITYP dans le secteur sud-ouest.
 - Du côté central, Lädiwald (N°24), située près de la haute Sarine.
 - Dans le secteur nord-est, les émergences Gungg sud + Joseli (N°61) et Augant (N°60) à l'extrême nord-est.
- *Pour les débits ≤ 500 l/mn*, l'histogramme relève mieux l'arrangement des classes. Il s'agit d'une distribution de type exponentielle négative, où le poids le plus grand est localisé dans les faibles débits. En effet, 33 échantillons (52 % des sources) ont un débit entre 1 et 140 l/mn, et 22 échantillons (35 % des sources) entre 140 et 500 l/mn.

Les sources à grand débit dans le flysch du Niesen sont situées surtout en montagne, là où la continuité du milieu aquifère (réseau des discontinuités ou du micro-karst) permet une infiltration et un transit rapide de l'eau (cf. aussi traceurs artificiels chap. 5.2). Par ailleurs ces débits sont indicateurs de la taille des bassins d'alimentation.

Les sources à faible débit, dont le temps de séjour souterrain est prolongé, ont une meilleure réponse hydrochimique. Tel est le cas de cinq des six émergences du tunnel d'Arnon (1-3 l/mn) et surtout de la N°67 -Bad Heustrich- (1 l/mn) à l'extrême nord-est de la nappe, qui manifestent des anomalies importantes pour plusieurs éléments (cf. chap. 6.2.31).

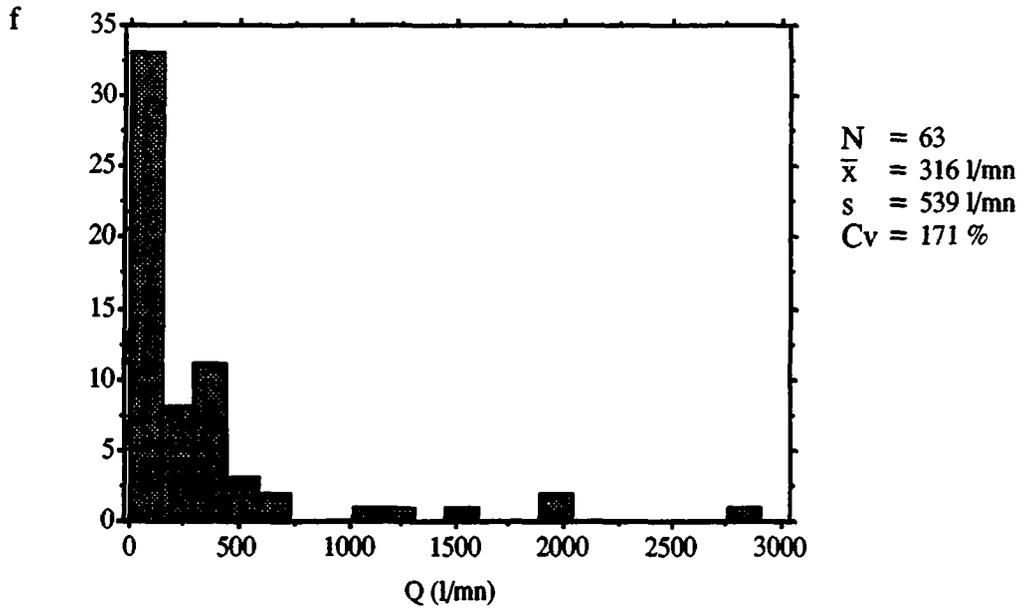


Fig. 6.1 Histogramme des fréquences des débits des sources de la nappe du Niesen (situation correspondant approximativement à l'été).

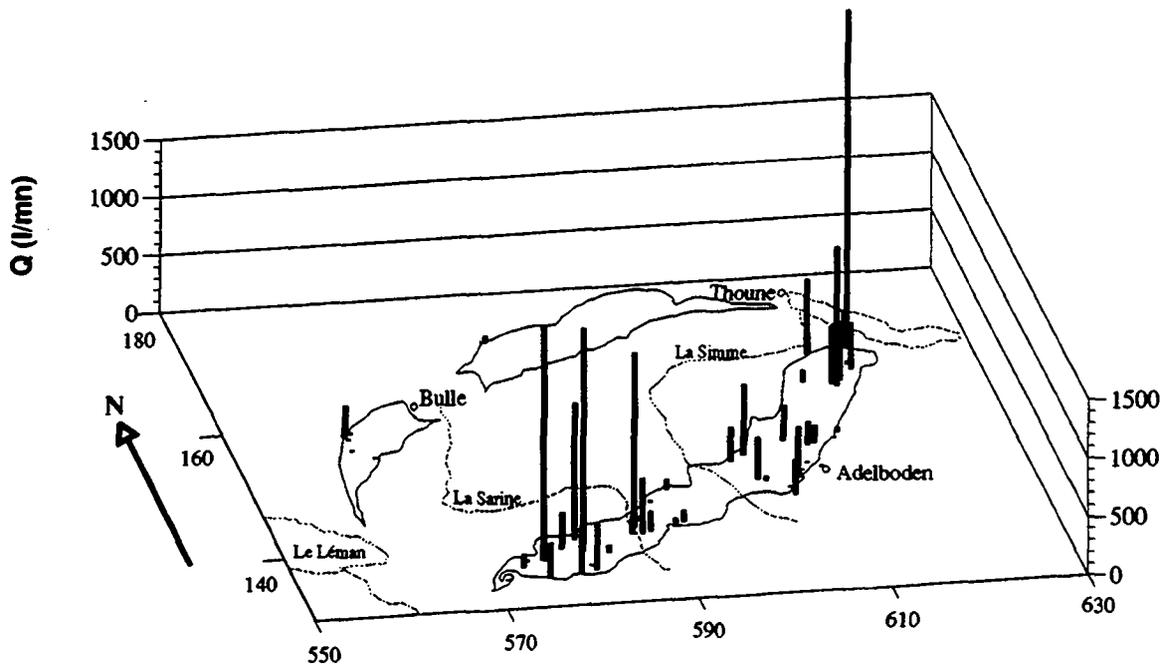


Fig. 6.2 Répartition des débits des sources (situation correspondant approximativement à l'été).

Pour le réseau principal des sources à suivi temporel, le débit a été enregistré en continu pendant deux années, ce qui a permis l'étude de leur régime hydrologique et l'évolution des paramètres hydrochimiques (cf. chap. 6.3).

Les sources de la nappe du Gurnigel présentent des débits inférieurs à 100 l/mn, à l'exception de la source de la Vilette N°71 avec 280 l/mn. Donc, on peut indiquer que le flysch du Gurnigel, en général, a des perméabilités plus faibles que les couches aquifères du flysch du Niesen.

6.2.2 La température (T en °C)

La température des eaux des sources est un paramètre sensible à plusieurs critères tels que l'altitude des émergences et du bassin d'alimentation, le climat de la région, la profondeur et la durée de l'écoulement, la manière dont la source jaillit (source naturelle, captée et type de captage).

De la même manière que pour le débit, ce paramètre doit être considéré comme ordre de grandeur dans ce réseau à répartition spatiale. La surface d'étude, étendue sur plusieurs centaines de km², n'a pas permis des mesures de température synchrones. Quant au régime thermique des principales sources (mesures systématiques pendant deux années), il est présenté dans le chapitre 6.3.

Toutes les sources étudiées présentent des températures inférieures à 10 °C. SCHOELLER (1962) et VUATAZ (1982) indiquent une limite de 12 °C pour les eaux froides.

Dans la nappe du Niesen, 57 échantillons ont été considérés. Leur valeur moyenne est de 5.7 °C, variant entre 1.2 et 8.5 °C. D'après la carte de température des sources (fig. 6.4) et son histogramme des fréquences (fig. 6.3b), nous pouvons déduire :

- Les sources les plus froides (entre 1.2 et 4.2 °C) se trouvent en altitude au milieu de la nappe. Elles correspondent à 11 échantillons, donc au 19 % des émergences considérées.
- Les sources les moins froides (entre 7.2 et 8.5 °C) sont localisées surtout vers les limites, dans le secteur nord-est de la nappe ou dans le tunnel d'Armon. Au total, 9 points d'eau ont manifesté ces caractéristiques.
- Dans le reste de la nappe, une répartition régulière des températures (entre 4.2 et 7.2 °C) peut être constatée et correspond à 65 % d'échantillons.

Pour la nappe du Gurnigel les valeurs acquises lors de la tournée d'octobre 1989 ont été prises en considération. Elles varient entre 4 et 9.8 °C.

Bien qu'il s'agisse d'eaux froides en général, les différentes anomalies peuvent être interprétées de la façon suivante :

- 1) Les basses températures enregistrées dans les exutoires en altitude, par exemple Wyseberg (source N° 38) à 1920 m avec 2.7 °C ou Tschenten (N°46) à 1770 m avec 1.2 °C, indiquent l'influence possible du permafrost dans ces émergences.
- 2) Afin de déceler l'influence de l'altitude sur la température des sources, nous présentons dans la figure 6.3a une corrélation de ces deux paramètres. Bien que le coefficient de corrélation ne soit pas élevé (0.37), une tendance générale à la diminution de la température en fonction de l'altitude peut être relevée. L'effet géothermique n'est pas notable pour la plupart des émergences, ce qui s'explique par des écoulements peu profonds ou rapides, déjà mis en évidence dans le chapitre 5.2.
- 3) Quant aux températures les plus élevées (7.2 à 8.1 °C), les émergences du tunnel d'Arnon situées à 600 m de profondeur, indiquent l'incidence du gradient thermique; ces émergences présentent par ailleurs les plus importantes concentrations en éléments mineurs et en trace parmi les sources du flysch du Niesen (s.s.) et sont les repères pour l'hydrochimie des écoulements profonds.

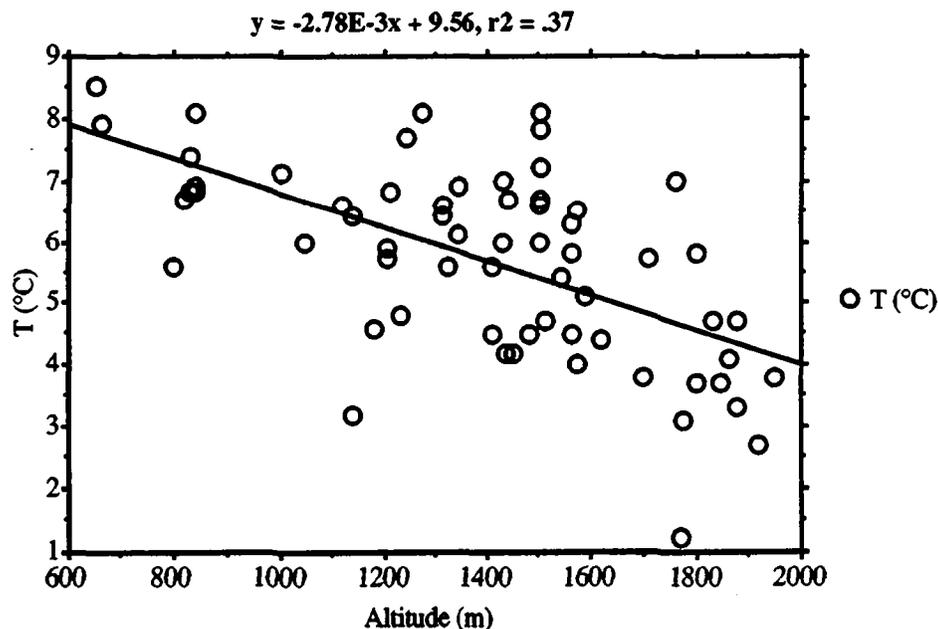


Fig. 6.3a Corrélation de la température et de l'altitude des sources.

- 4) Finalement les températures en général plus élevées des sources de la nappe du Gurnigel, à des altitudes généralement plus basses que celles de la nappe du Niesen, corroborent l'influence de l'altitude sur la température des sources.

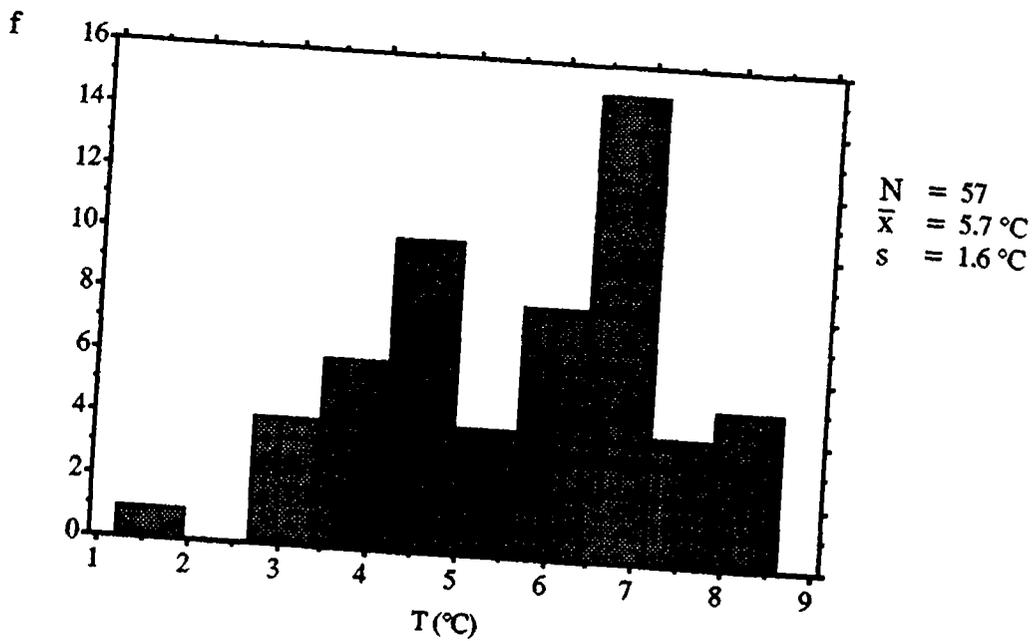


Fig. 6.3b Histogramme des fréquences de la température des eaux des sources de la nappe du Niesen.

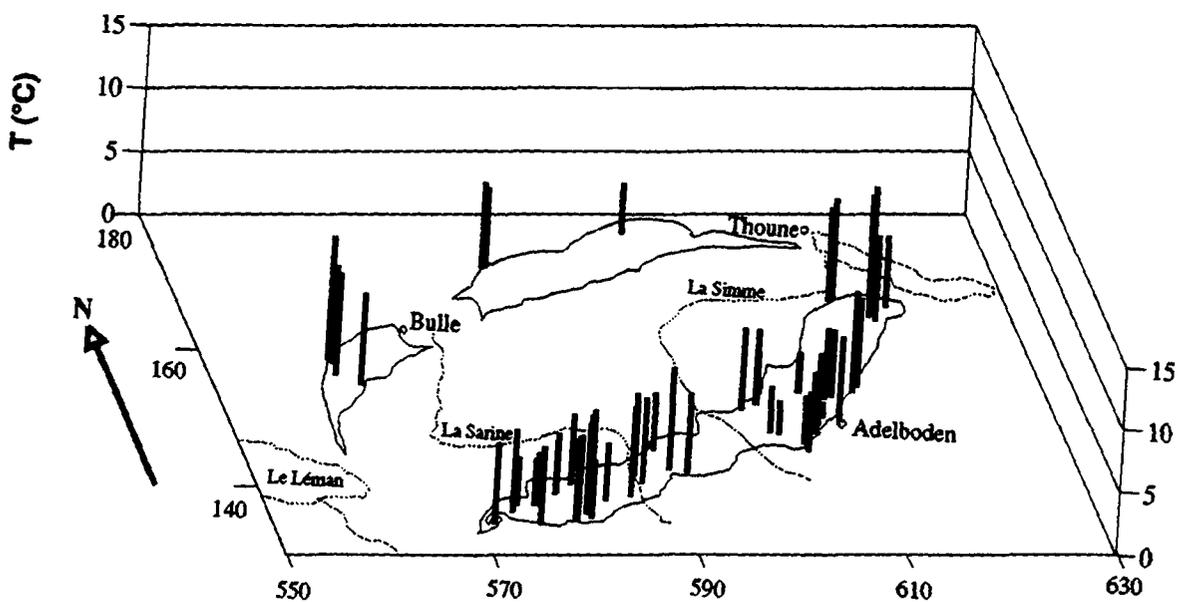


Fig. 6.4 Répartition de la température des eaux des sources.

6.2.3 Le pH

La molécule d'eau est légèrement ionisée en ions H^+ et OH^- . Pour une eau pure, à 25 °C, la neutralité est définie par égalité de leurs concentrations, ainsi : $[H^+] = [OH^-] = 10^{-7}$ mol/l. Le pH varie en fonction de la température et de la force ionique, il est lié à l'Eh (potentiel d'oxydoréduction) dans l'équilibre chimique des eaux.

La difficulté d'obtenir une mesure précise du pH sur le terrain n'est pas inconnue. Dans notre cas, les valeurs ont été déterminées à l'aide du papier indicateur MERCK, dont la précision peut être de ± 0.2 à ± 0.5 unités pH. Sur le terrain, ces mesures ont été les plus fiables. Bien qu'elles n'aient pas une grande précision, ces valeurs, prises toujours de la même façon, peuvent être comparables entre elles. Les conditions météorologiques et la saison hivernale n'ont pas favorisé les mesures avec le pH mètre (cf. aussi chap. 4.4.3).

Le pH acide est influencé par les acides forts (pluies acides) et par la quantité de CO_2 emmagasinée par l'eau en traversant l'atmosphère (précipitations) et le sol. Dans le milieu souterrain, le caractère basique de l'eau est influencé principalement par les carbonates mis en solution.

Dans la nappe du Niesen, 60 échantillons ont été considérés. Une apparente homogénéité du pH peut être relevée sur la carte à répartition spatiale (fig. 6.6). Néanmoins, les valeurs oscillent entre 6 et 7.5 avec une moyenne de 6.7.

L'histogramme des fréquences absolues (fig. 6.5) révèle mieux la dispersion des valeurs. Plusieurs classes peuvent être distinguées :

- Un ensemble de dix sources (les deux premières classes) a les valeurs les plus acides, de l'ordre de 6 à 6.2.
- Un deuxième groupe de 33 échantillons (55 % des sources considérées) peut être assemblé entre les pH 6.3 et 6.9.
- 16 sources ont des valeurs entre 7 et 7.4 et une source atteint un pH de 7.5.

Pour la nappe du Gurnigel, le pH varie entre 6.5 et 7.4; il est donc en moyenne moins acide que les exutoires de la nappe du Niesen.

La tendance acide de ces eaux peut être expliquée par le fait que la quantité d'acide emmagasinée (CO_2 , pluie acides) avant l'infiltration souterraine n'a pas complètement réagi avec les carbonates existants dans la roche, à cause du temps de parcours rapide mis en évidence dans le chapitre 5.2.

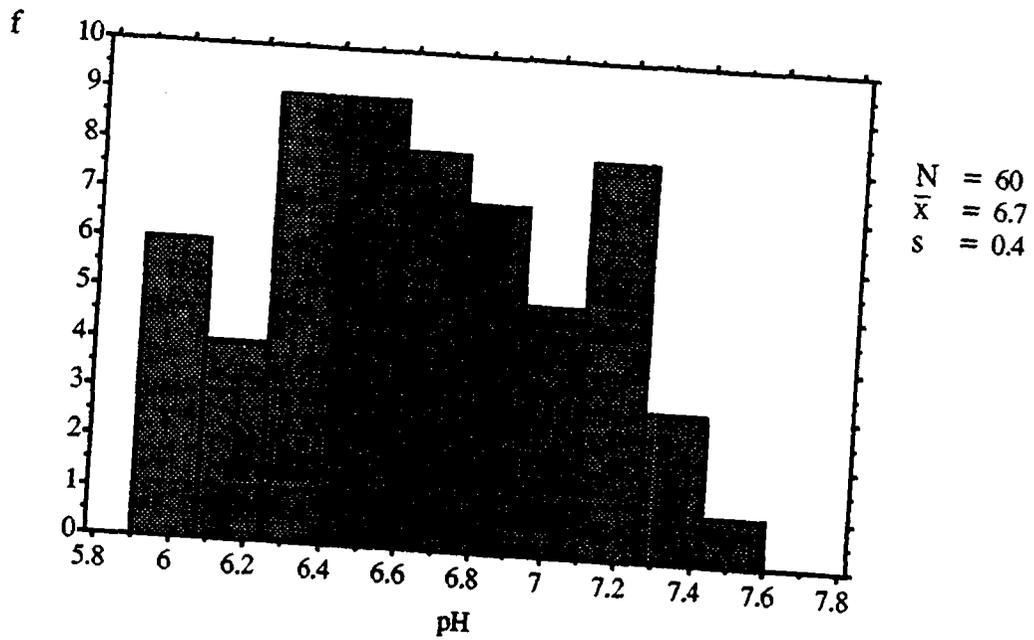


Fig. 6.5 Histogramme des fréquences du pH des eaux des sources de la nappe du Niesen.

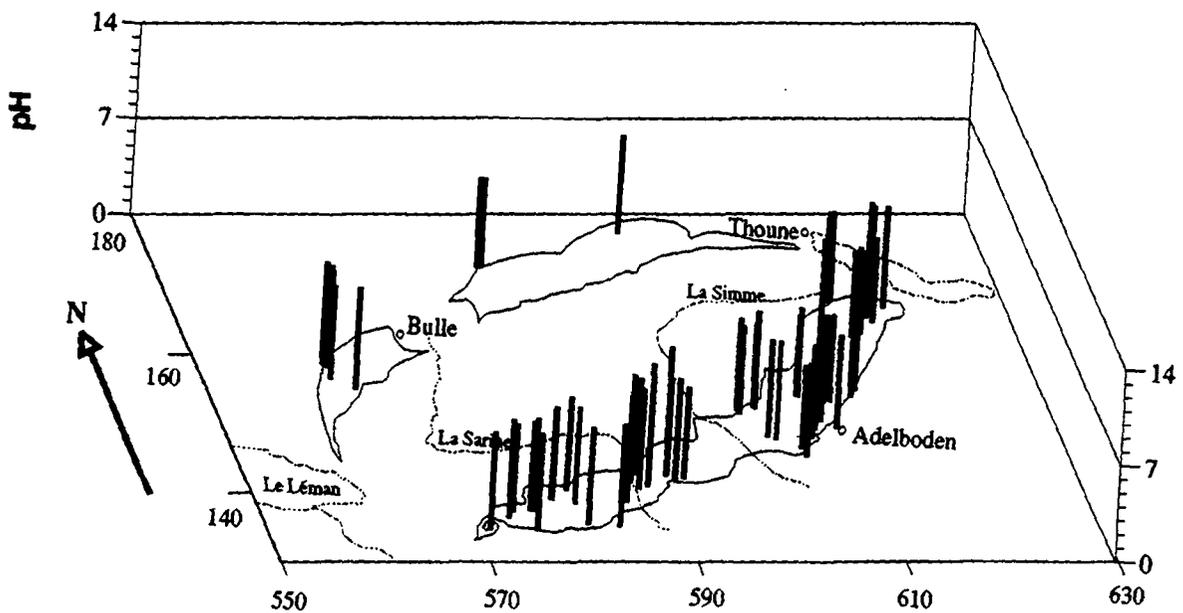


Fig. 6.6 Répartition du pH des eaux des sources.

6.2.4 La minéralisation totale (TSD en mg/l)

La minéralisation totale (TSD = total des sels dissous) est la somme en mg/l des concentrations des composés majeurs et mineurs des eaux. Ce paramètre est calculé et peut être contrôlé par la balance ionique. Ainsi, il est plus fiable que les mesures de conductivité électrique prises sur le terrain et que les valeurs de la dureté totale obtenues en laboratoire. Rappelons que la conductivité électrique ne fournit qu'une approximation de la minéralisation globale de l'eau (RODIER 1978). La dureté totale, quant à elle, traduit la somme des ions alcalino-terreux, dont les plus abondants sont le calcium et le magnésium.

Nappe du Niesen

L'étude des caractéristiques statistiques descriptives de la minéralisation totale (TSD) indique une valeur moyenne de 349 mg/l, et des valeurs extrêmes de 164 et 1888 mg/l. Du fait des hautes et des basses concentrations, la dispersion relative atteint 70 %.

L'histogramme de distribution en fréquences absolues (fig. 6.7) fait aussi ressortir deux parties. La première comporte 48 échantillons (72 %) variant entre 164 et 340 mg/l. La deuxième se compose de 14 émergences prenant des valeurs entre 340 et 480 mg/l. Cinq autres sources ont des concentrations très variées, avec des valeurs supérieures à 500 mg/l.

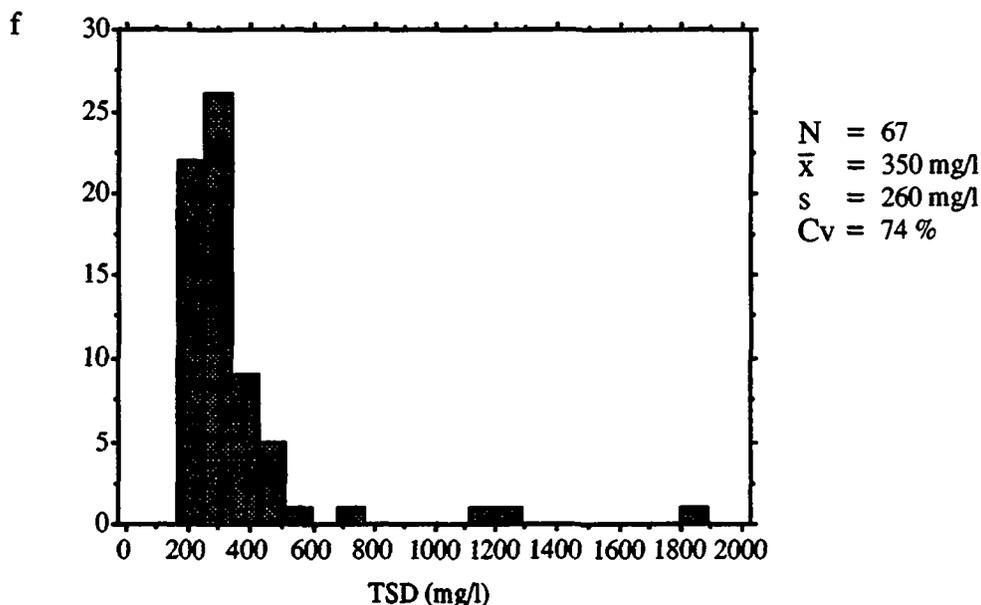


Fig. 6.7 Histogramme des fréquences de la minéralisation totale des eaux des sources de la nappe du Niesen.

Parmi les cinq sources à plus haute minéralisation totale, *au-delà de 500 mg/l* (fig. 6.7 et 6.8), deux sont situées à la périphérie de la nappe (N° 47 et 41) et trois vers les limites sud-est (N° 29, 51 et 67). Ces points d'eau servent de repère pour élucider l'influence des terrains extra-flysch sur les eaux souterraines. Ce type d'influence peut être de type évaporitique du Trias, correspondant aux terrains localisés dans la nappe du Niesen (intranappe) ou dans son substratum :

- La source N° 47 près d'Adelboden atteint la valeur maximale de 1888 mg/l. La source N° 41 a 1146 mg/l. Il s'agit d'eaux très sulfatées calciques (cf. chap. 6.2.6 et 6.2.8). MANDIA (1991) indique un TSD moyen de 1807 mg/l pour les eaux évaporitiques froides du Trias, variant entre 733 et 2761 mg/l. Ainsi, les deux émergences de la périphérie de la nappe fournissent les concentrations possibles dues aux terrains évaporitiques du Trias environnant.
- Les points d'eau N°29 et 51 ont un TSD de 683 et 526 mg/l respectivement. Ils sont localisés près du chevauchement intranappe du côté sud-est. Ces concentrations indiquent ainsi les valeurs qui peuvent être atteintes par les sources à cause de l'influence des terrains extra-flysch et surtout des terrains évaporitiques du soubassement de la nappe du Niesen.

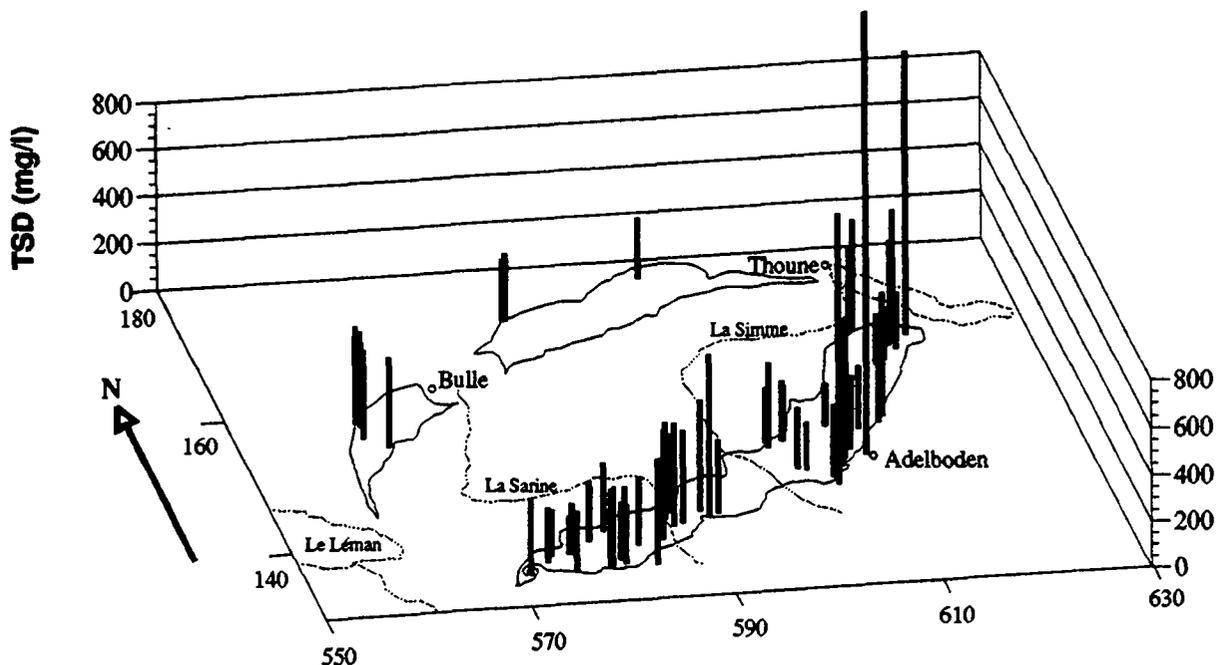


Fig. 6.8 Répartition de la minéralisation totale des eaux des sources.

- La source N° 67, placée à l'extrême nord-est, a une valeur de 1213 mg/l. Bien qu'elle manifeste la deuxième charge chimique en importance, ses valeurs relativement basses en sulfates et en calcium signalent un comportement différent des autres sources à forte incidence extra-flysch. Il s'agit d'une eau bicarbonatée sodique qui, du fait de concentrations particulières, forme un groupe chimique à part (cf. chap. 6.2.31). La présence importante d'halogènes (p. ex. Cl, Br, I) met en évidence l'influence évaporitique mais différente de celle fortement sulfatée.

La carte de répartition du TSD (fig. 6.8), nous donne les renseignements suivants :

- Dans le *secteur nord-est* de la nappe se trouve la plus grande variabilité des concentrations : d'une part les plus fortes déjà décrites et d'autre part de très faibles situées spécialement en altitude. La source du Niesen-A (N° 65) avec 168 mg/l est la moins chargée de cette zone. Toutefois, la plupart des sources ont des teneurs de l'ordre de 200 à 360 mg/l.
- Dans le *secteur central*, quelques anomalies importantes sont présentes là où la nappe est recoupée par la haute Sarine. Une composante des écoulements latéraux avoisinants, à empreinte extra-flysch, affecte certaines sources qui atteignent des valeurs entre 400 et 683 mg/l. Néanmoins, la majeure partie des émergences montrent des concentrations entre 233 et 357 mg/l.
- Du *côté sud-ouest*, les valeurs sont en général plus homogènes. Elles varient normalement entre 200 et 340 mg/l. Dans cette région, les différentes unités de flysch du Niesen sont imbriquées et forment conjointement les bassins d'alimentation des sources. Leurs exutoires sont placés sur des terrains de flysch indépendants de l'influence triasique. La source LLI (N°5, localisation exacte cf. fig. 4.2), en aval du lac Lioson fournit une teneur de 164 mg/l. C'est l'émergence à plus faible minéralisation totale.

En conclusion, les valeurs de minéralisation totale entre 200 et 350 mg/l peuvent être considérées comme les plus représentatives des eaux des flyschs du Niesen. Ces teneurs pourraient se voir accrues en fonction de l'influence des terrains extra-flysch du soubassement de la nappe du Niesen ou des unités tectoniques environnantes.

Quant aux sources de la nappe du Gurnigel, elles présentent des concentrations entre 259 et 410 mg/l. C'est-à-dire 20 % de plus que les valeurs attribuées aux eaux souterraines des flyschs de la nappe du Niesen. Ceci peut être expliqué par des écoulement plus lents (cf. 6.2.1) dans la région du Gurnigel. Cette région, qui par ailleurs se trouve à une altitude plus basse, a une couverture pédologique plus importante; l'activité du CO₂ sera ainsi majeure, facilitant la mise en solution des minéraux.

Les anions principaux

6.2.5 Les hydrogénocarbonates (HCO_3 en mg/l)

Les molécules et anions contenant du carbone (CO_2 , HCO_3^- et CO_3^{2-}) qui se trouvent dans les eaux souterraines proviennent, d'une part du gaz carbonique que l'eau capte ou dissout à partir des différents milieux (air, sol -combustion de matières organiques- ou eaux souterraines), et d'autre part des carbonates que l'eau met en solution.

La solubilité des carbonates est principalement influencée par la $p\text{CO}_2$, la température, la force ionique, la pression totale et le pH (HOEFS 1969). Pour les eaux souterraines à pH normal (6-9) le HCO_3^- est l'espèce carbonatée dominante (FREEZE 1979).

Lors de l'étude des balances ioniques (cf. chap. 4.5.2.2), on a pu constater qu'un grand nombre de concentrations d'hydrogénocarbonates est équilibré par les ions Ca principalement et Mg, indiquant leur origine carbonatée calcaire et en moindre quantité dolomitique. Des cas particuliers ont aussi été trouvés; ainsi dans la source N°67 les hydrogénocarbonates sont équilibrés par le Na.

Dans la nappe du Niesen, une valeur moyenne de 209 mg/l avec des extrêmes entre 117 et 671 mg/l a été enregistrée. La dispersion est relativement faible avec un coefficient de variation de 35 % (cf. fig. 6.9).

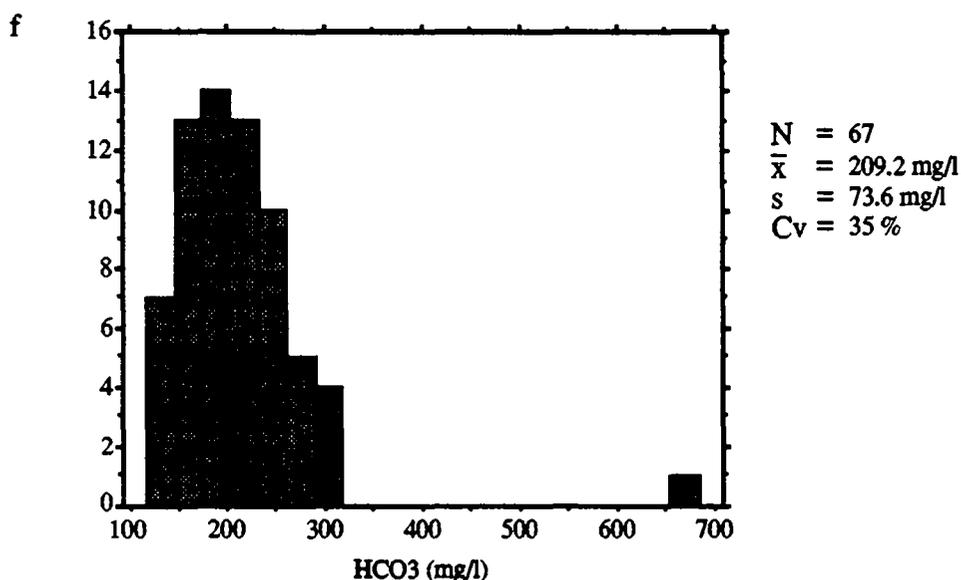


Fig. 6.9 Histogramme des fréquences des concentrations en hydrogénocarbonates des eaux des sources de la nappe du Niesen.

L'histogramme des fréquences (fig. 6.9) illustre une distribution de type χ^2 semblable à celle du calcium (fig. 6.15). En effet, il s'agit dans la plupart des cas d'eaux bicarbonatées calciques.

La distribution affichée par les hydrogénocarbonates (fig. 6.9), forme un grand ensemble qui peut être réparti en trois groupes :

- 1) La plus grande concentration d'individus (50 échantillons, soit 75 % des sources) est localisée entre 145 et 255 mg/l (fig. 6.9). Ils correspondent aux points d'eau situés à l'intérieur de la nappe (influence des terrains extra-flysch éloignés) et aux sources du tunnel d'Arnon, à écoulements profonds (fig. 6.10). Ainsi, nous considérons ces valeurs comme une caractéristique normale des eaux des flyschs du Niesen.

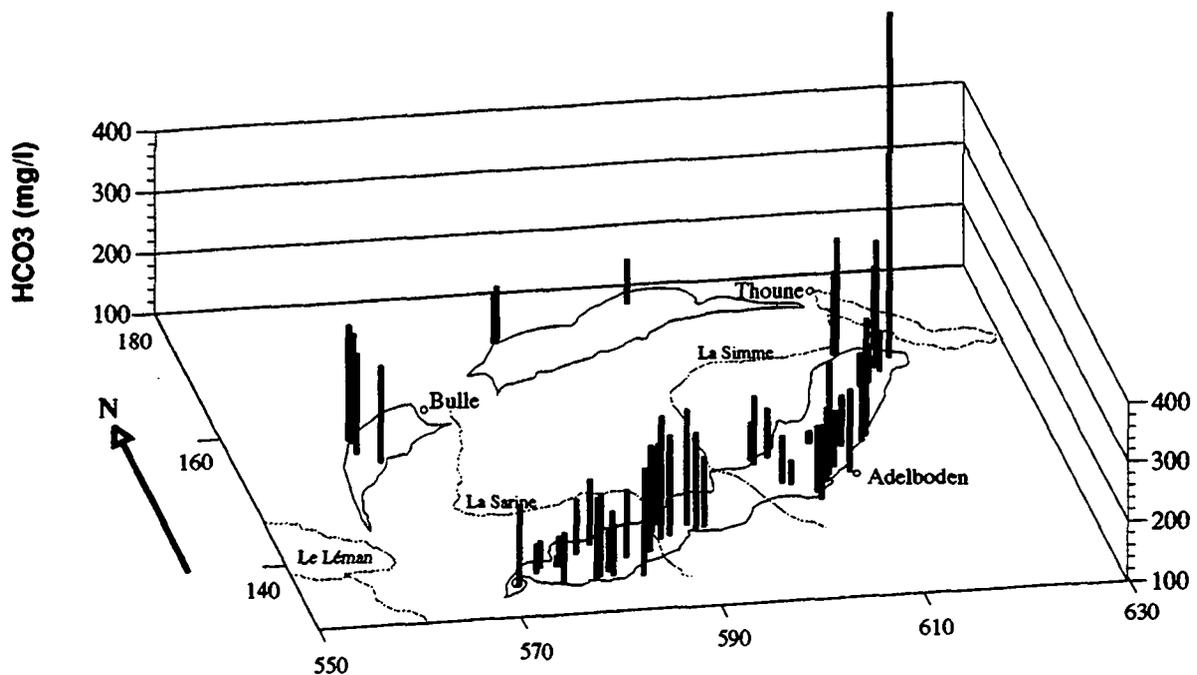


Fig. 6.10 Répartition des concentrations en hydrogénocarbonates des eaux des sources.

- 2) Dans l'histogramme, un intervalle avec 7 émergences comporte les valeurs les plus faibles, entre 117 et 145 mg/l (fig. 6.9). Celles-ci sont plus aisément discernables sur la carte (fig. 6.10). Elles correspondent aux sources d'altitude (milieu de la nappe) dans les secteurs nord-est et sud-ouest. Ces basses concentrations suggèrent un temps de séjour plus court des eaux. Elle peuvent aussi être expliquées par la faible présence des sols,

donc peu d'activité du CO₂ et par conséquent peu de capacité de dissolution du calcaire.

- 3) Deux intervalles avec 5 et 4 échantillons, à côté du grand ensemble, tendent vers les hautes concentrations (fig. 6.9). Leurs valeurs oscillent entre 255 et 310 mg/l et correspondent aux sources placées vers les limites de la nappe ou dans le secteur central, où la haute Sarine et le Louibach découpent les crêtes (fig. 6.10). Dans ce cas, une incidence des terrains extra-flysch sur cet élément peut être envisagée. Cette influence est mieux identifiée par d'autres éléments majeurs comme les sulfates, les chlorures, le magnésium ou le sodium (cf. chap. 6.2.6 à 6.2.10).
- 4) Finalement, un échantillon (source N° 67) présente la plus forte concentration, 671 mg/l et s'écarte complètement du reste de la distribution. Sur la carte de répartition spatiale, cette émergence se distingue nettement à l'extrême nord-est de la nappe. Il s'agit d'un point d'eau à incidence extra-flysch particulière. Il est caractérisé par plusieurs composés qui sont discutés ci-après.

Les sources de la nappe du Gurnigel affichent des valeurs un peu plus élevées que celles relevées pour les flyschs du Niesen. Elles oscillent entre 173 mg/l (source N° 76) dans le secteur est, et 294 mg/l (source N°72) dans le secteur sud-ouest.

6.2.6 Les sulfates (SO₄ en mg/l)

MANDIA (1991) a étudié les sulfates comme un des principaux traceurs naturels des eaux évaporitiques froides du Trias. Il en indique une concentration moyenne de 1040 mg/l et des extrêmes de 165 et 1620 mg/l.

Dans le cadre de cette étude, les fortes concentrations en sulfates des eaux sont considérées comme la marque de l'influence des terrains extra-flysch et spécialement des ceux de type évaporitique du Trias. N'oublions cependant pas que l'oxydation de la pyrite peut être aussi à l'origine de l'anion SO₄, minéral présent dans les roches sédimentaires et magmatiques des flyschs.

Les sources de la nappe du Niesen ont une valeur moyenne de 48 mg/l et des extrêmes de 2.3 et 1027 mg/l. L'histogramme des fréquences (fig. 6.11) présente une forte population parmi les basses concentrations et des valeurs éparpillées vers les hautes concentrations, ce qui détermine une dispersion de 300 %.

Une classification de ces points d'eau en fonction de la présence de sulfates est indiquée ci-dessous :

- Les sources N°47 et 41 situées à la périphérie de la nappe affichent les valeurs extrêmes de 1027 et 578 mg/l respectivement (fig. 6.12). Elles constituent les émergences les plus influencées par des terrains évaporitiques du Trias.
- Les points d'eau N° 29 avec 227 mg/l et N° 67 avec 190 mg/l se trouvent vers le chevauchement intranappe. Une composante souterraine à influence triasique peut être suggérée.
- Quatre autres émergences localisées vers les limites de la nappe (N° : 18, 51, 58 et 60) présentent des valeurs entre 60 et 100 mg/l. Il faut remarquer que la source N° 24 (du réseau temporel), située à l'intérieur de la nappe à côté de la haute Sarine, affiche aussi une anomalie de cet ordre qui peut être liée à des écoulements transversaux à la nappe qui touchent des terrains extra-flysch évaporitiques de la périphérie de la nappe.
- Pour les sources à faible concentration en sulfates, l'histogramme des fréquences (fig. 6.11) permet de mieux faire ressortir les familles. Ainsi sept sources présentent des valeurs entre 30 et 50 mg/l.
- Les 51 émergences restantes (76 % des sources de la nappe du Niesen) ont des valeurs entre 2.3 et 30 mg/l. Ces points d'eau sont situés à l'intérieur de la nappe (fig. 6.12) et sont ainsi exempts de l'influence triasique. Il faut remarquer que les émergences localisées dans le tunnel d'Arnon présentent aussi des caractéristiques de cet ordre.

En conclusion, des concentrations inférieures à 30 mg/l peuvent être admises comme normales pour les eaux des flyschs du Niesen. Quelques sources situées vers les limites de la nappe présentent une influence évaporitique modérée (<100 mg/l) et les quatre émergences localisées à la périphérie de la nappe voient augmenter cette influence et atteignent des concentrations entre 190 et 1029 mg/l, déjà caractéristiques des eaux froides du type évaporitique du Trias (MANDIA 1991).

Les points d'eau de la nappe du Gurnigel ont des valeurs plutôt homogènes : entre 5 et 16 mg/l. Les fortes anomalies dues aux terrains évaporitiques du Trias n'ont pas été repérées.

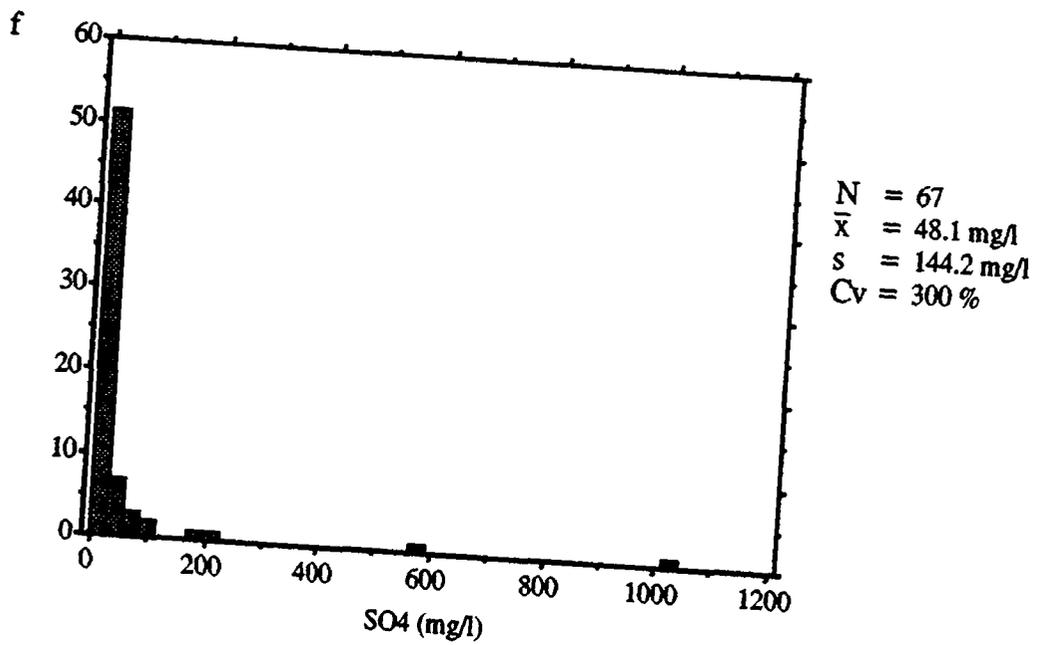


Fig. 6.11 Histogramme des fréquences des concentrations en sulfates des eaux des sources de la nappe du Niesen.

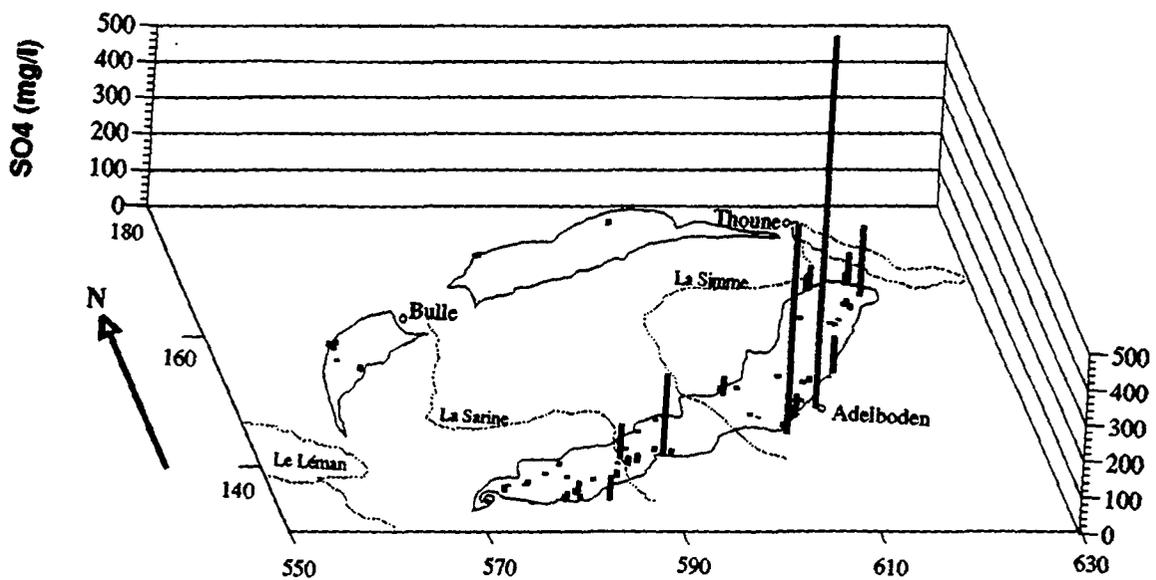


Fig. 6.12 Répartition des concentrations en sulfates des eaux des sources.

6.2.7 Les chlorures (Cl en mg/l)

D'une manière générale, les concentrations en chlorures se sont révélées très faibles. Deux émergences ont manifesté des anomalies dues au salage des routes (cf. chap. 4.5.3). Ces valeurs ont été exclues en réduisant à 74 le nombre de points d'eau considérés. Dans les eaux de neiges, des concentrations encore plus faibles ont été constatées, excluant ainsi une pollution atmosphérique (cf. chap. 5.3).

Comme référence, citons MANDIA (1991) qui indique une moyenne de 7 mg/l de chlorures et des variations entre 1 et 76 mg/l pour les eaux évaporitiques froides du Trias.

Dans la nappe du Niesen, une moyenne de 1.1 mg/l et des extrêmes de 0.1 et 10 mg/l ont été observés. L'histogramme des fréquences (fig. 6.13) affiche une courbe exponentielle négative avec une dispersion de 136 % favorisée par les valeurs élevées. Cet histogramme fait ressortir:

- Un grand pôle de 48 échantillons, avec des concentrations très basses entre 0.1 et 1.1 mg/l, aux limites du seuil de détection (cf. tabl. 4.5) et un deuxième pôle de 10 échantillons entre 1.1 et 2.1 mg/l. Ces deux familles représentent le 87 % des sources et se localisent surtout à l'intérieur de la nappe (fig. 6.14).
- Sept sources ont des anomalies entre 2.1 et 6 mg/l. Cinq sont situées vers les limites de la nappe (fig. 6.14) et correspondent aux anomalies des sulfates (cf. fig. 6.12), ce qui indique une incidence évaporitique. Mais les deux restantes (jusqu'à 3,5 mg/l en chlorures), situées l'une dans le tunnel d'Arnon et l'autre au nord-est d'Adelboden, correspondent aux écoulements dans les flyschs du Niesen.
- La sources N° 67 à l'extrême nord-est de la nappe (fig. 6.14) montre la plus forte anomalie de chlorures avec 10 mg/l. Il s'agit d'une eau bicarbonatée sodique avec fortes concentrations d'autres éléments, dont les chlorures. Elle est influencée par des terrains extra-flysch peu sulfatés.

En conclusion, des concentrations basses de chlorures (entre 0.1 et 2.1 mg/l) peuvent être attribuées aux eaux souterraines des flyschs du Niesen. Quelques sources, répondant aux écoulements plus profonds, peuvent atteindre 3.5 mg/l. Quant aux eaux à influence extra-flysch, elles peuvent avoir jusqu'à 6 mg/l si l'influence est du type évaporitique et jusqu'à 10 mg/l si elle est du type sodique.

Quant aux sources de la nappe du Gurnigel, elles ont des valeurs entre 0.9 et 3.7 mg/l, donc un peu plus élevées que celles attribuées aux flyschs du Niesen.

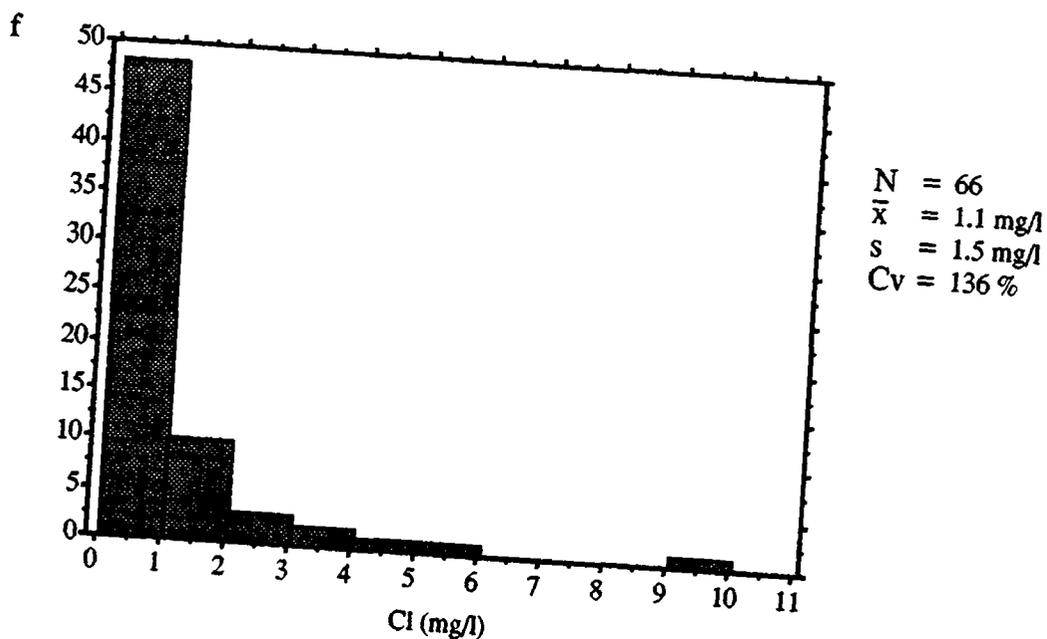


Fig. 6.13 Histogramme des fréquences des concentrations en chlorures des eaux des sources de la nappe du Niesen.

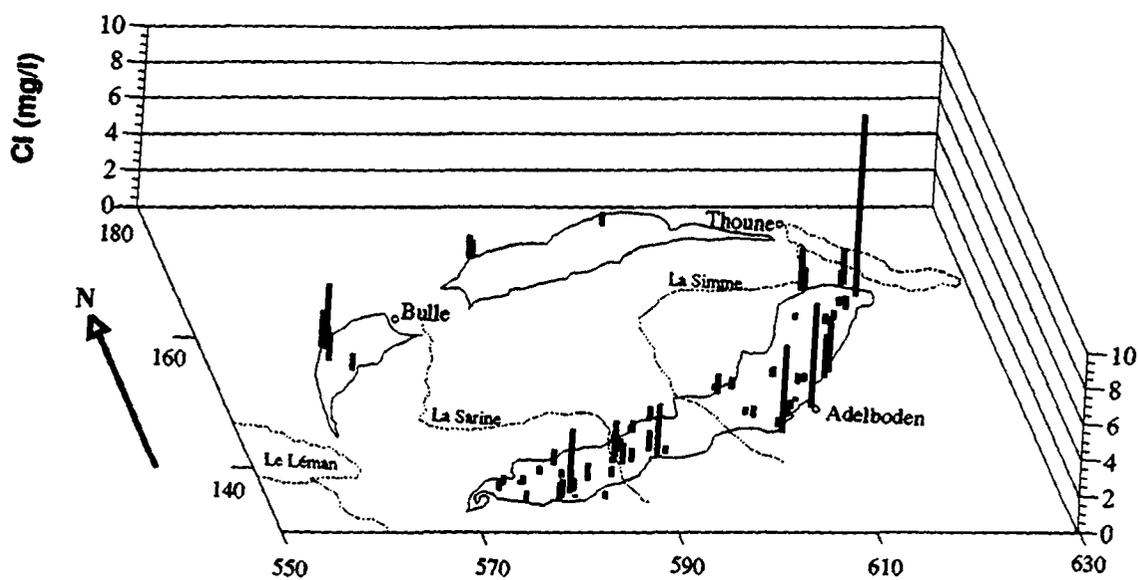


Fig. 6.14 Répartition des concentrations en chlorures des eaux des sources.

Les cations principaux et le silicium

6.2.8 Le calcium (Ca en mg/l)

Mise à part la source N° 67, le calcium est le cation le plus abondant des eaux souterraines analysées.

Dans la nappe du Niesen il présente une moyenne de 72.4 mg/l et les valeurs extrêmes de 4.2 et 577.2 mg/l. Une dispersion relative de 100 %, favorisée par les hautes concentrations, peut être remarquée dans l'histogramme.

La distribution en fréquences absolues du calcium (fig. 6.15) fait ressortir un groupe de 61 échantillons (91 % des sources) entre 35 et 100 mg/l. Cette famille, exempte de valeurs extrêmes, correspond aux sources réparties à l'intérieur de la nappe, y compris celles du tunnel d'Arnon (fig. 6.16). Nous proposons ces concentrations en calcium comme caractéristiques des eaux des flyschs du Niesen.

Quant aux concentrations extrêmes en calcium :

- la source N° 67, localisée à l'extrême nord-est, a la plus faible concentration avec 4.2 mg/l. Cette émergence, qui présente aussi les plus fortes anomalies en hydrogénocarbonates, chlorures, sodium, fer, bore, lithium, brome, iode, chrome et lanthane, est l'émergence la plus particulière de celles situées à la base de la nappe. Une très forte influence des terrains extra-flysch peut être suggérée, mais qui serait toutefois différente de celle à forte empreinte sulfatée. Leur différence hydrochimique est traitée dans la chapitre 7.1.
- Deux émergences, localisées dans le tunnel d'Arnon (N° 14 et 15), ont des concentrations de 27 et 24 mg/l respectivement. Elles sont donc plus faibles que celles retenues pour les flyschs du Niesen.
- Pour trois sources, les concentrations sont les plus fortes : les sources N°29 avec 163 mg/l, N°41 avec 297 mg/l et N° 47 avec 577 mg/l. Elles sont écartées de l'ensemble des échantillons dans l'histogramme des fréquences (fig. 6.15) et correspondent aux sources des bords sud-est de la nappe (fig. 6.16). Par ailleurs, MANDIA (1991) indique une concentration moyenne de 419 mg/l et des extrêmes de 114 et 577 mg/l de calcium pour les eaux froides évaporitiques du Trias. Ainsi, l'influence des terrains extra-flysch du type évaporitique peut justifier ces valeurs.

Pour les points d'eau de la nappe du Gurnigel, des concentrations entre 56 et 87 mg/l ont été relevées, elle se situent dans la fourchette de valeurs attribuées aux flyschs du Niesen.

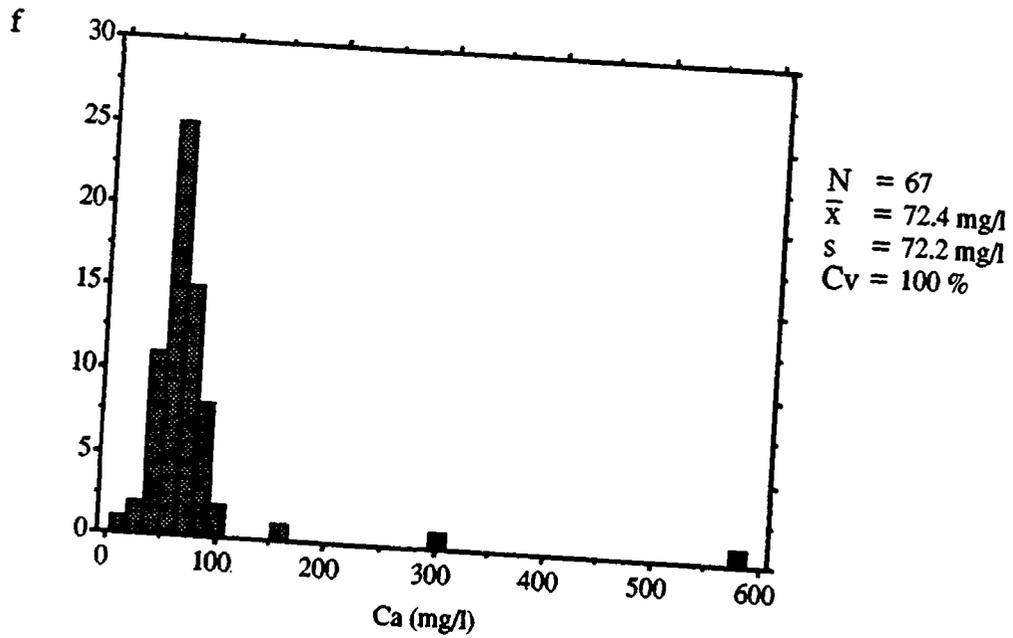


Fig. 6.15 Histogramme des fréquences des concentrations en calcium des eaux des sources de la nappe du Niesen.

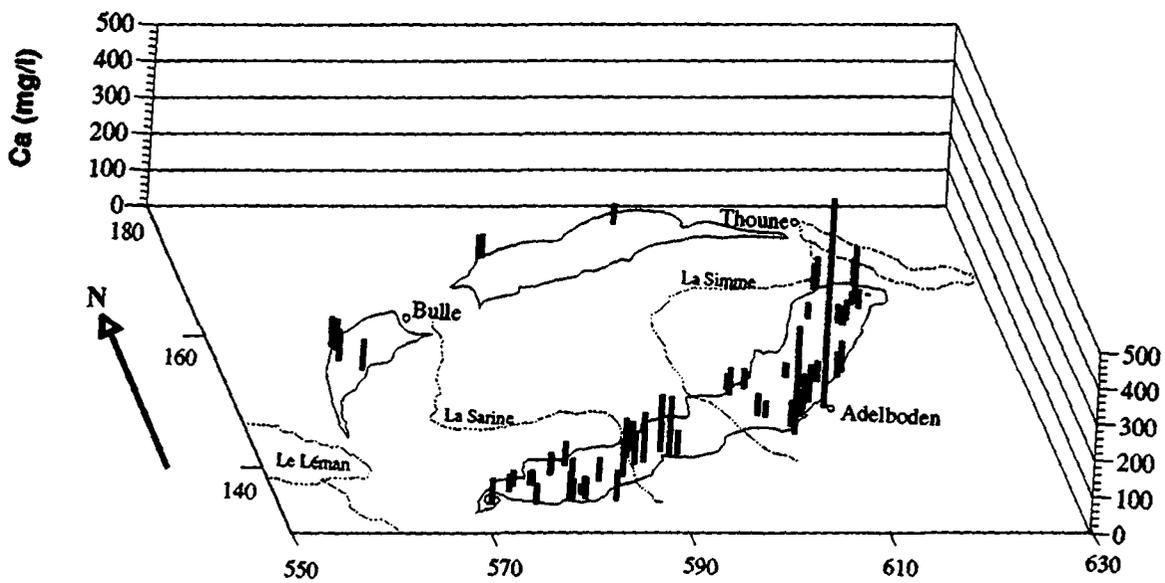


Fig. 6.16 Répartition des concentrations en calcium des eaux des sources.

6.2.9 Le magnésium (Mg en mg/l)

Le magnésium est le deuxième cation le plus abondant dans les eaux des sources.

Pour la nappe du Niesen, une moyenne de 7.1 mg/l a été enregistrée avec des extrêmes de 1.2 mg/l à l'intérieur de la nappe et 28.1 mg/l dans sa périphérie. Le coefficient de variation de 88% rend compte de la dispersion des valeurs. Celle-ci est aussi observée dans l'histogramme des fréquences (fig. 6.17).

La carte des concentrations en magnésium (fig. 6.18) montre des anomalies vers les limites et à l'intérieur de la nappe. Une distinction précise entre la teneur en magnésium des eaux de flysch et celle des terrains à influence triasique n'est donc pas évidente.

MANDIA (1991) dans son étude des eaux évaporitiques froides du Trias, indique une valeur moyenne de 67 mg/l avec des extrêmes de 16 et 216 mg/l.

Compte tenu de ces antécédents, l'évaluation de la concentration en magnésium pour les eaux souterraines de la nappe du Niesen est la suivante :

- Deux points d'eau (N° 41 et 51) situés à la périphérie de la nappe présentent les valeurs les plus élevées, près de 28 mg/l. Une influence triasique est manifeste.
- Neuf sources, placées vers les limites de la nappe (fig. 6.18), ont des teneurs entre 9.7 et 21.5 mg/l.
- Quatre des six émergences localisées dans le tunnel d'Arnon (altitude, env. 1500 m) présentent des valeurs entre 14.4 et 23.5 mg/l. Ceci peut indiquer à priori une incidence triasique. Cependant, ces sources ne montrent pas d'anomalies en sulfates, principale composante des eaux évaporitiques du Trias, et le contenu en magnésium peut être attribué aux éléments dolomitiques des flyschs.
- Les 52 sources restantes (78 % d'échantillons), présentent des concentrations entre 1.2 et 9.5 mg/l (fig. 6.17). Elles sont situées à l'intérieur de la nappe (fig. 6.18).

En conclusion, les concentrations en magnésium entre 1.2 et 9.5 mg/l peuvent être considérées comme typiques des eaux souterraines des flyschs du Niesen. Mais des teneurs jusqu'à 24 mg/l peuvent être atteintes si les écoulements ont eu un temps de séjour relativement important dans des flyschs dolomitiques, ou si une composante à influence triasique est présente.

Pour les points d'eau de la nappe du Gurnigel, des concentrations entre 2.5 et 10 mg/l ont été enregistrées. Elles sont concordantes avec celles des flyschs du Niesen.

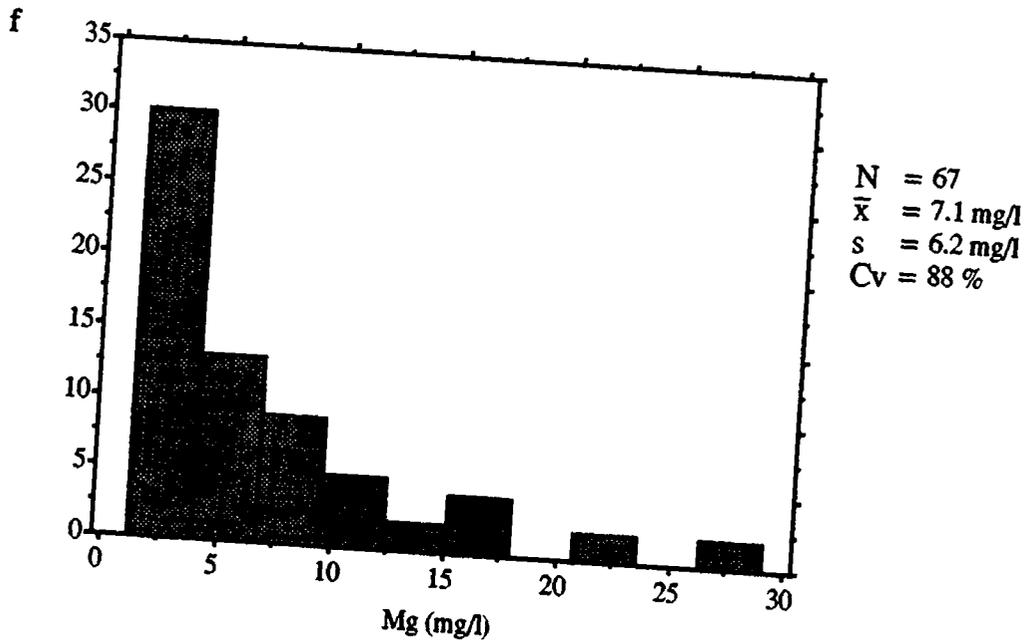


Fig. 6.17 Histogramme des fréquences des concentrations en magnésium des eaux des sources de la nappe du Niesen.

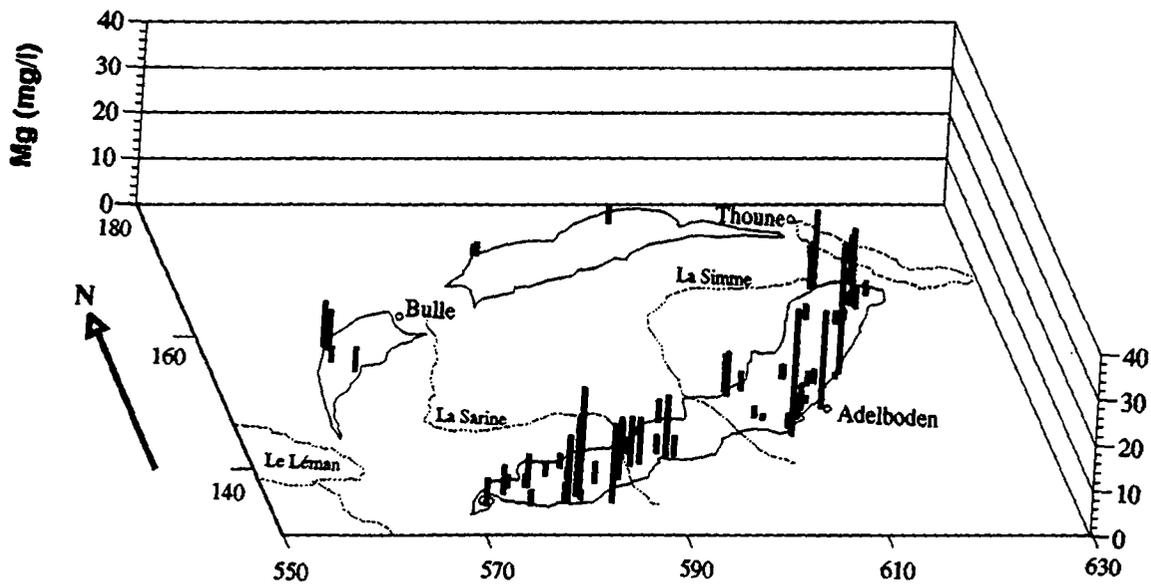


Fig. 6.18 Répartition des concentrations en magnésium des eaux des sources.

6.2.10 Le sodium (Na en mg/l)

Le sodium est un cation mineur des eaux des sources. Deux émergences ont manifesté des anomalies dues au salage des routes (cf. chap. 4.5.3). Ces valeurs ont été exclues en réduisant à 74 le nombre des points d'eau considérés.

Pour la nappe du Niesen, une moyenne de 1.8 mg/l avec des extrêmes de 0.2 et 10.2 mg/l a été enregistrée. Le coefficient de variation de 107 % illustre la dispersion des valeurs (fig. 6.19). Il faut signaler que l'analyse statistique descriptive exclut l'extraordinaire anomalie de 330.6 mg/l trouvée dans l'extrême nord-est de la nappe. Sur la carte des concentrations en sodium (fig. 6.20), elle a été tronquée afin de faire ressortir d'autres anomalies relativement importantes vers les limites et à l'intérieur de la nappe.

Comme référence, citons MANDIA (1991) qui obtient une valeur moyenne de 5.8 mg/l de sodium avec des extrêmes de 1 et 30 mg/l pour les eaux triasiques.

Les concentrations en sodium dans la nappe du Niesen peuvent être résumées de la façon suivante :

- La source N° 67 avec 330.6 mg/l fournit une anomalie extrême qui n'a pas de rapport avec les eaux du flysch, ni les évaporites du Trias. Son groupe hydrochimique est discuté dans le chapitre 7.1.
- Quatre sources sises vers les limites de la nappe, côté sud-est (fig. 6.20) ont des teneurs entre 4 et 7.5 mg/l.
- Dans le secteur sud-ouest de la nappe, trois des six émergences localisées dans le tunnel d'Arnon (altitude, env. 1500 m) ont des valeurs entre 3.8 et 10.2 mg/l. La source N°24 du réseau temporel, située à l'intérieur et proche de la Sarine, a une teneur de 3.7 mg/l (fig. 6.20).
- La majorité des sources (soit 56, ou 84 %) montrent des concentrations entre 0.2 et 3.5 mg/l (fig. 6.19). Elles sont situées à l'intérieur de la nappe (fig. 6.20).
- L'histogramme des fréquences et la carte de répartition de sodium sont semblables à ceux des chlorures (fig. 6.19-20 et 6.13-14).

En conclusion, les valeurs entre 0.2 et 3.5 mg/l peuvent être considérées comme typiques des eaux souterraines des flyschs du Niesen. Des teneurs allant jusqu'à 10 mg/l sont atteintes vers les limites de la nappe, ou lorsque les écoulements sont lents.

Pour les points d'eau de la nappe du Gurnigel, des concentrations entre 1.9 et 5.2 mg/l ont été relevées. Elles sont concordantes avec celles des flyschs du Niesen.

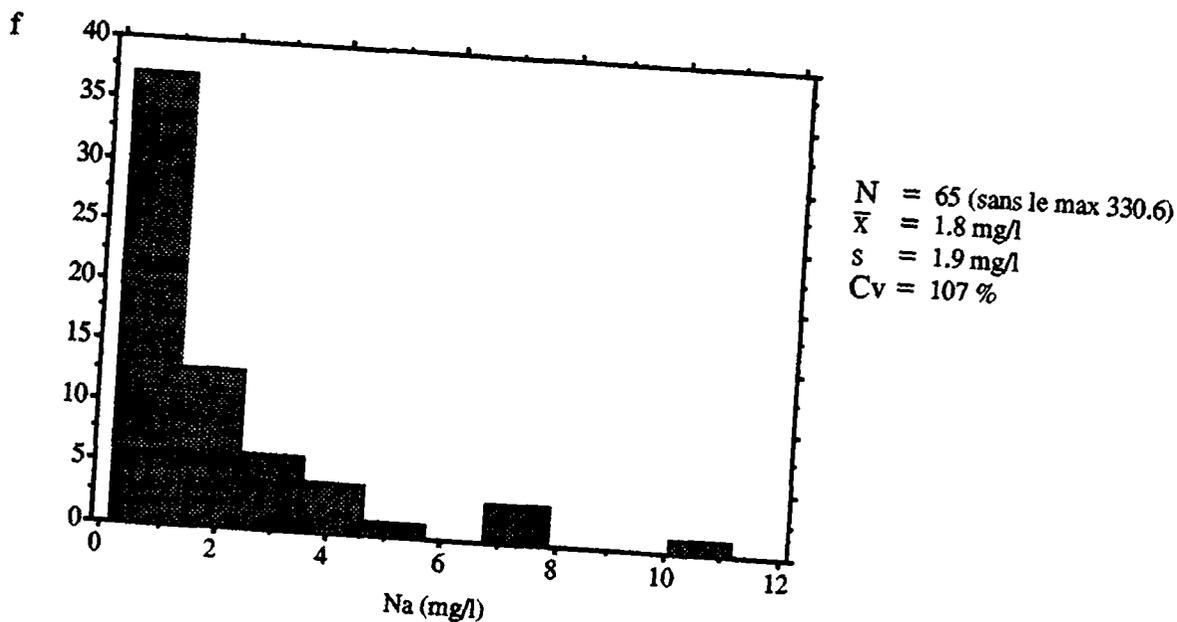


Fig. 6.19 Histogramme des fréquences des concentrations en sodium des eaux des sources de la nappe du Niesen.

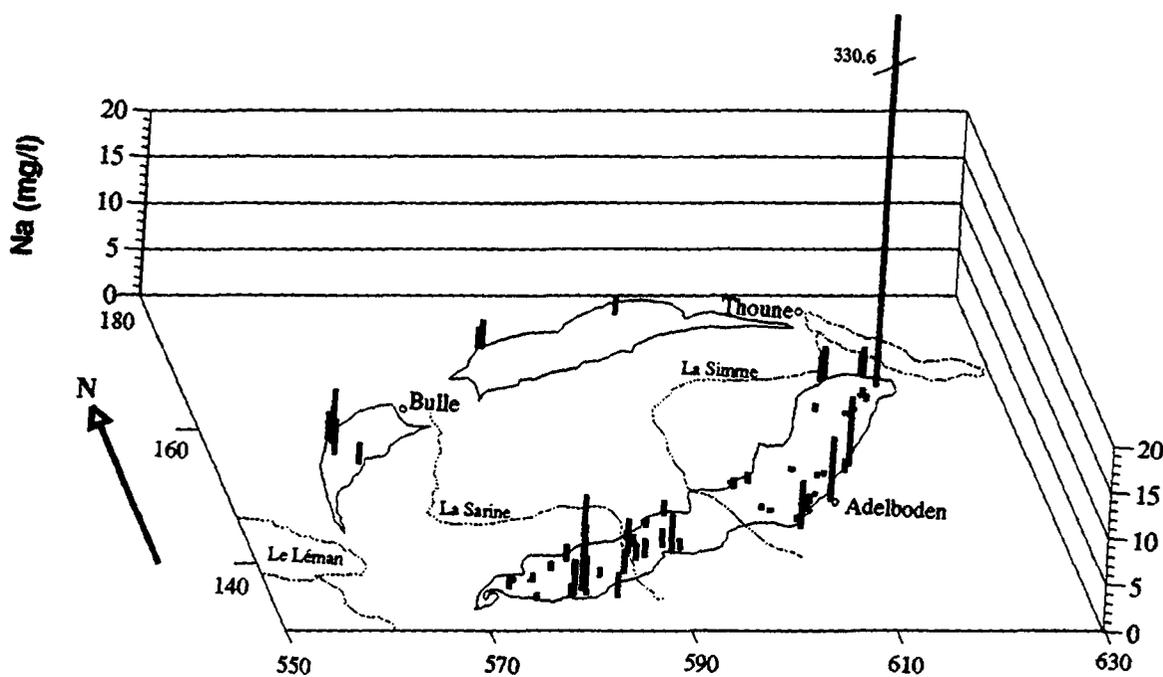


Fig. 6.20 Répartition des concentrations en sodium des eaux des sources.

6.2.11 Le strontium (Sr en mg/l)

Le strontium est un des cations mineurs des eaux des sources.

Pour la nappe du Niesen, une moyenne de 0.8 mg/l avec des extrêmes de 0.1 et 6.9 mg/l a été enregistrée. L'histogramme des fréquences (fig. 6.21) montre une courbe exponentielle négative avec un grand nombre d'échantillons vers les faibles concentrations et une dispersion ($C_v = 135\%$) vers les valeurs relativement hautes.

La carte de répartition (fig. 6.22), même s'il s'agit de faibles concentrations, signale une large variabilité spatiale du strontium.

MANDIA (1991) obtient, pour les eaux évaporitiques du Trias, une valeur moyenne de 7.9 mg/l et des extrêmes de 1 et 15 mg/l. Il indique cet élément comme un des marqueurs naturels des eaux évaporitiques du Trias.

Les concentrations en strontium dans la nappe du Niesen peuvent être commentées de la façon suivante :

- Les deux sources situées à la périphérie de la nappe, le N° 41 avec 4 mg/l et le N° 47 avec 7 mg/l (fig. 6.22), présentent les concentrations les plus élevées. Elles constituent le repère d'une forte incidence triasique.
- Cinq émergences fournissent des concentrations intermédiaires de l'ordre de 2 à 3 mg/l (fig. 6.21 et 6.22). L'une se trouve à la limite de la nappe et les autres appartiennent au tunnel d'Arnon.
- La plupart des points d'eau (60 points, soit 90 % des échantillons) fournissent des teneurs entre 0.1 et 1.5 mg/l. Ils sont situés surtout à l'intérieur de la nappe (fig. 6.22).
- Il faut noter que la source "particulière" N° 67, à très fortes anomalies de plusieurs éléments, présente une concentration très basse en strontium (0.3 mg/l).

En conclusion, les valeurs entre 0.1 et 1.5 mg/l peuvent être considérées comme représentatives des eaux souterraines des flyschs du Niesen. Des teneurs allant jusqu'à 3 mg/l peuvent être atteintes vers les limites de la nappe ou si les écoulements dans les flyschs sont lents et profonds.

Pour les points d'eau de la nappe du Gurnigel des concentrations entre 0.3 et 0.9 mg/l furent enregistrées. Elles sont, donc, concordantes avec les valeurs accordées aux flyschs du Niesen.

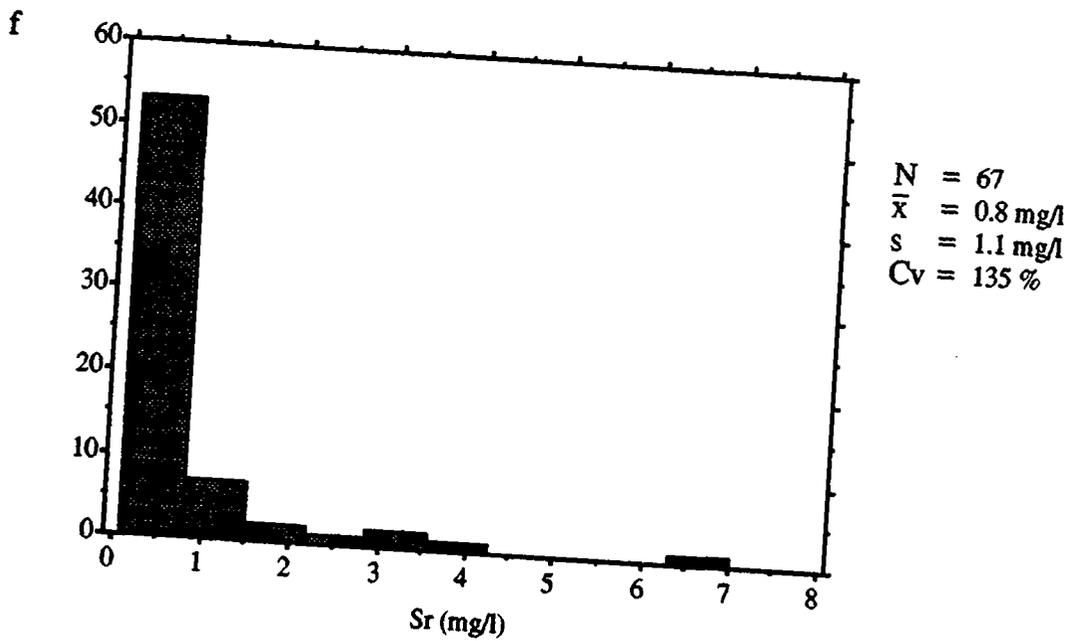


Fig. 6.21 Histogramme des fréquences des concentrations en strontium des eaux des sources de la nappe du Niesen.

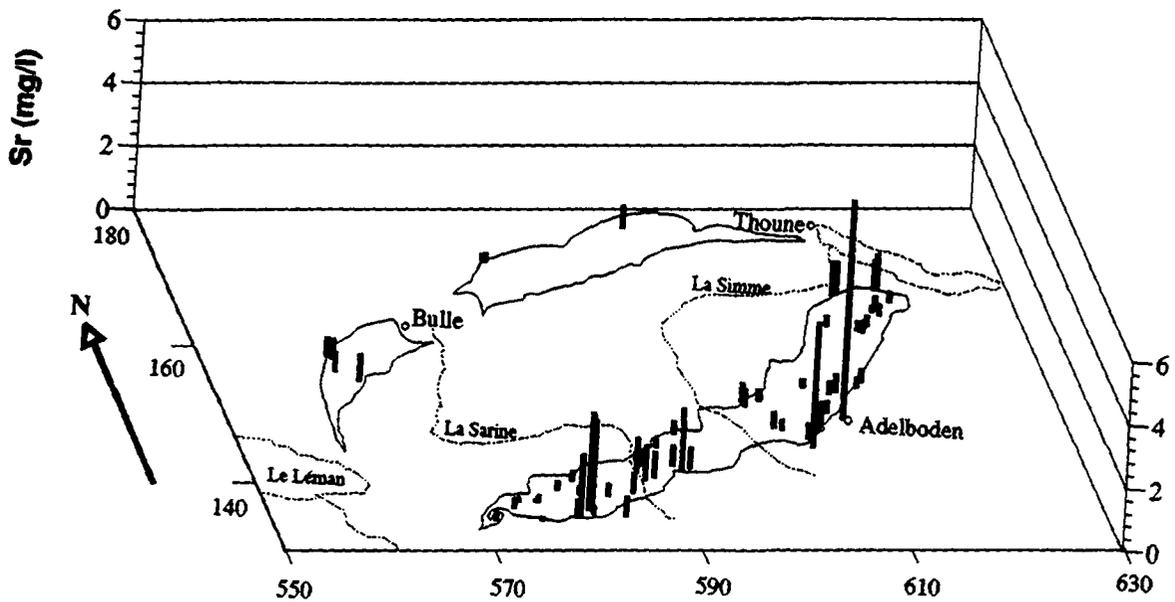


Fig. 6.22 Répartition des concentrations en strontium des eaux des sources.

6.2.12 Le potassium (K en mg/l)

Le potassium est un des cations mineurs des eaux souterraines. En préambule, il faut indiquer que cet élément peut aussi avoir une origine pédologique, étant donné qu'il est un élément constitutif des végétaux qui se fixent dans les sols (ATTEIA 1992). Néanmoins, les concentrations les plus élevées en potassium se trouvent là où les écoulements sont les plus profonds (tunnel d'Arnon et Linter tunnel) et il a aussi été détecté avec des fortes teneurs dans les lixiviats de roche (cf. chap. 8.3.3). Par conséquent, la roche peut fournir à l'eau du potassium qui y restera si l'eau n'entre pas en contact avec les argiles lors de son transit.

Pour la nappe du Niesen, une moyenne de 0.7 mg/l avec des extrêmes de 0.09 et 3.18 mg/l a été enregistrée. L'histogramme des fréquences (fig. 6.23) manifeste une courbe exponentielle négative avec un grand nombre d'échantillons dans les faibles concentrations et une dispersion (92%) de quelques échantillons vers des valeurs plus hautes.

La carte de répartition du potassium (fig. 6.24) fait ressortir une variabilité spatiale dans de faibles concentrations.

Des références du potassium sont données par MANDIA (1991) pour les eaux évaporitiques du Trias : moyenne de 2.7 mg/l et des extrêmes de 0.4 et 38.6 mg/l .

Les concentrations en potassium dans la nappe du Niesen peuvent être résumées de la façon suivante :

- Deux sources, situées vers la limite intranappe ou dans sa périphérie, côté sud-est (fig. 6.24), présentent les concentrations les plus élevées, 3 et 3.2 mg/l. Elles indiquent l'influence maximale des terrains extra-flysch sur cet élément.
- Huit émergences ont des valeurs entre 1 et 2.9 mg/l. Quatre de ces points se trouvent dans le tunnel d'Arnon et le reste vers les limites de la nappe. Ainsi, ces concentrations correspondent, soit aux écoulements souterrains plus profonds dans les flyschs, soit à ceux qui subissent une incidence extra-flysch.
- La plupart des émergences (au nombre de 57, soit 85 % des échantillons) ont des teneurs entre 0.1 mg/l (limite de détection) et 1 mg/l. Elles sont situées surtout à l'intérieur de la nappe (fig. 6.24).

En conclusion, les valeurs entre 0.1 et 1 mg/l peuvent être considérées comme représentatives des eaux souterraines des flyschs du Niesen. Des teneurs allant jusqu'à 3 mg/l pourraient être atteintes vers les limites de la nappe ou là où les écoulements dans les flyschs sont lents et profonds.

Pour les points d'eau de la nappe du Gurnigel, des concentrations entre 1.6 et 1.4 mg/l furent relevées; elles sont légèrement au-dessus des valeurs accordées aux flyschs du Niesen.

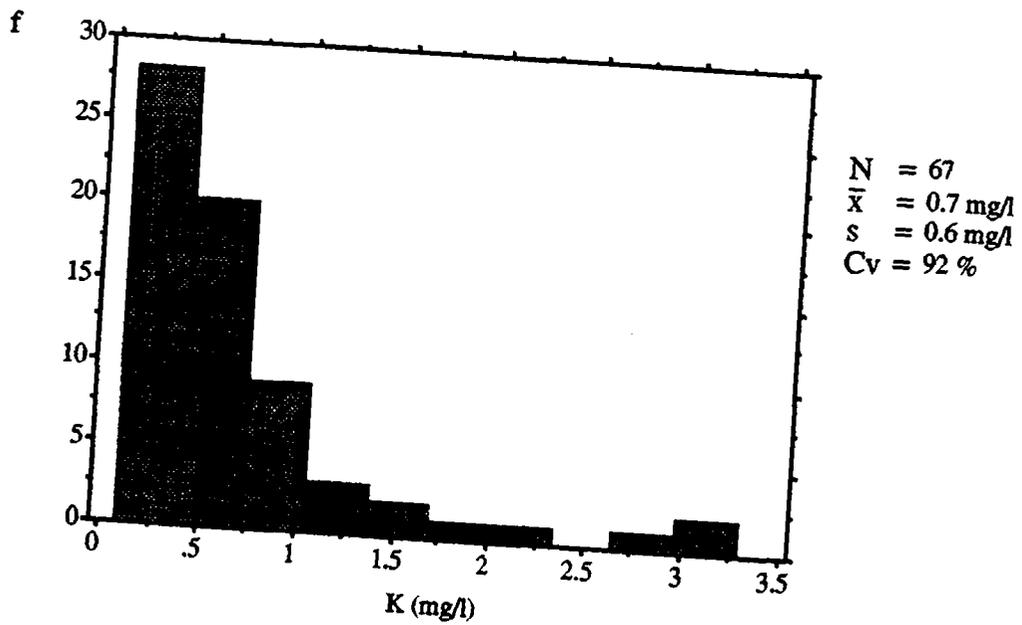


Fig. 6.23 Histogramme des fréquences des concentrations en potassium des eaux des sources de la nappe du Niesen.

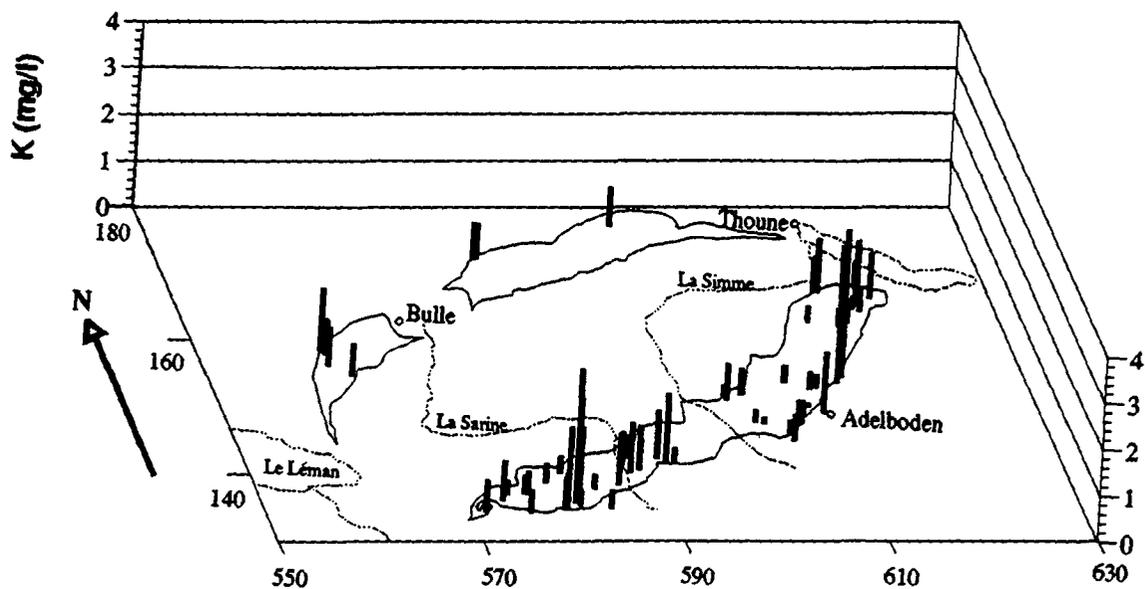


Fig. 6.24 Répartition des concentrations en potassium des eaux des sources.

6.2.13 Le silicium (Si en mg/l)

Le silicium est présent principalement sous forme de H_4SiO_4 dans l'eau.

Pour la nappe du Niesen, une moyenne de 2 mg/l a été enregistrée avec des extrêmes de 0.3 et 4.6 mg/l. Le coefficient de variation, de 48 %, nous rend compte de l'homogénéité de cet élément.

L'histogramme des fréquences (fig. 6.25) affiche une courbe type χ^2 avec les classes suivantes:

- Une source présente la concentration la plus faible : de 0.3 mg/l.
- 51 points d'eau (75 % du total) se situent entre 0.8 et 3 mg/l.
- 8 échantillons ont des teneurs relativement élevées, entre 3.1 et 4.6 mg/l.

Les faibles concentrations appartiennent aux émergences localisées vers le milieu de la nappe, en altitude (fig. 6.26), ou aux sources à fort débit, comme c'est le cas dans le pays d'Enhaut.

Quant aux concentrations élevées (jusqu'à 4.6 mg/l) elles correspondent aux points d'eau situés, soit vers les limites de la nappe, soit dans le tunnel d'Arnon.

A titre de référence, citons MANDIA (1991) qui signale une valeur moyenne de 3.2 mg/l et des extrêmes de 0 et 9.4 mg/l pour les eaux évaporitiques froides du Trias.

En conclusion, les valeurs entre 0.8 et 3 mg/l peuvent être considérées comme représentatives des eaux souterraines des flyschs du Niesen. Des teneurs allant jusqu'à 4.6 mg/l pourraient être atteintes vers les limites de la nappe ou là où les écoulements dans les flyschs sont lents et profonds.

Les points d'eau de la nappe du Gurnigel mettent en évidence des concentrations allant de 1.5 à 2.5 mg/l, donc en concordance avec les valeurs attribuées pour les flyschs du Niesen.

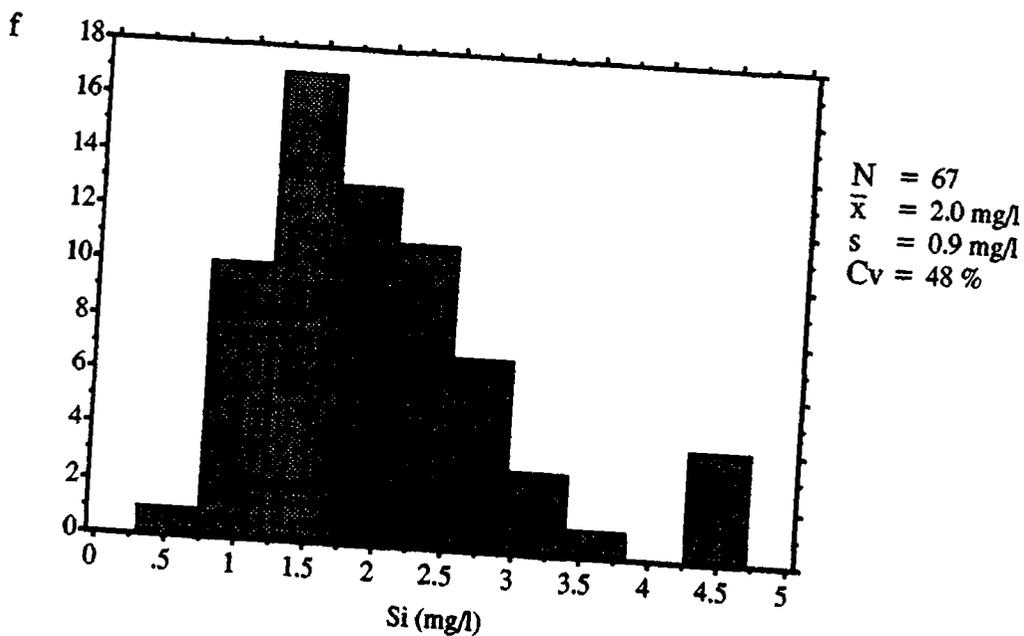


Fig. 6.25 Histogramme des fréquences des concentrations en silicium des eaux des sources de la nappe du Niesen.

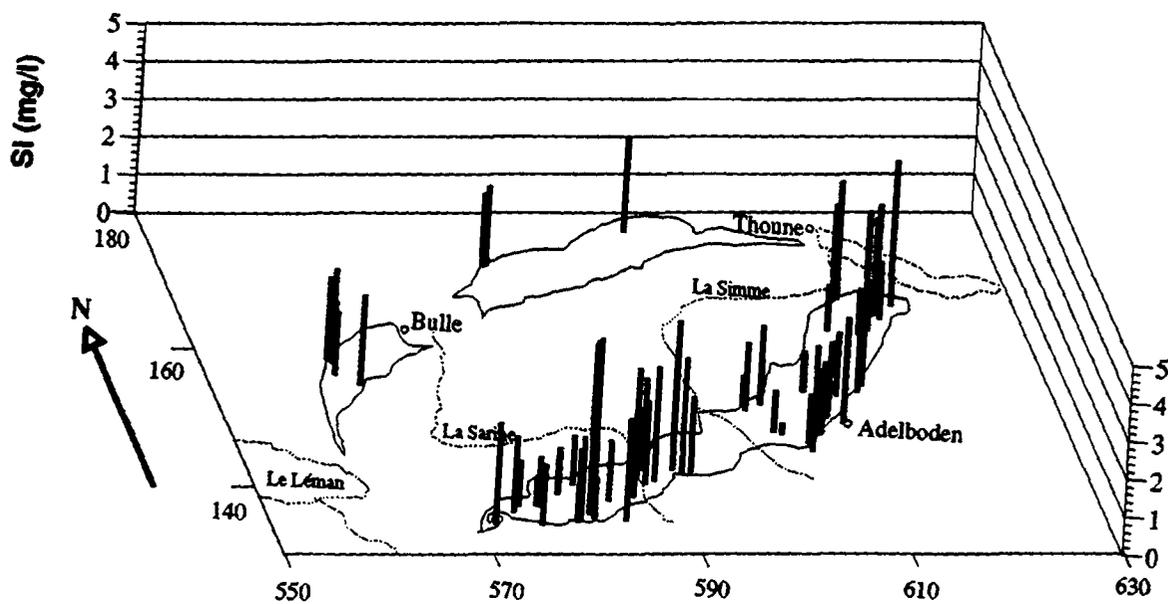


Fig. 6.26 Répartition des concentrations en silicium des eaux des sources.

Les éléments en trace

6.2.14 Le baryum (Ba en $\mu\text{g/l}$)

Le baryum s'est révélé comme l'élément en trace à la plus haute concentration dans les eaux souterraines.

Pour la nappe du Niesen, une moyenne de $35 \mu\text{g/l}$, avec des extrêmes de 4 et $112 \mu\text{g/l}$, a été enregistrée. Le coefficient de variation de 69 %, nous indique la dispersion modérée de cet élément.

L'histogramme des fréquences (fig. 6.27) manifeste approximativement une courbe de type χ^2 , ayant comme principaux groupes :

- 12 sources avec les plus faibles concentrations entre 4 et $15 \mu\text{g/l}$.
- 39 points d'eau (58 % du total) se situent entre 15 et $48 \mu\text{g/l}$.
- 16 échantillons ont les teneurs les plus élevées, entre 48 et $112 \mu\text{g/l}$.

La carte des concentrations en baryum (fig. 6.28) nous indique que :

- Les sources situées aux limites de la nappe ou à la périphérie, souvent marquées par des anomalies en éléments majeurs, ne présentent pas d'anomalies en baryum. Elles manifestent des concentrations plutôt basses entre 8 et $20 \mu\text{g/l}$.
- Une répartition hétérogène du baryum est visible dans la nappe du Niesen. Les valeurs basses sont surtout localisées dans le secteur nord-est, alors que les concentrations les plus élevées sont situées dans le secteur sud-est (jusqu'à $76 \mu\text{g/l}$) et spécialement dans le tunnel d'Arnon (jusqu'à $112 \mu\text{g/l}$).

A titre de comparaison, citons MANDIA (1991) qui signale une valeur moyenne de $10.6 \mu\text{g/l}$ et des extrêmes de 1.3 et $38.4 \mu\text{g/l}$ pour les eaux évaporitiques froides du Trias.

En conclusion, les sources à influence extra-flysch n'ont pas présenté d'anomalies de baryum. Des concentrations entre 4 et $76 \mu\text{g/l}$, voire $112 \mu\text{g/l}$ pour les sources du tunnel d'Arnon à écoulement profond, peuvent caractériser les eaux souterraines des flyschs du Niesen. Globalement, les teneurs les plus fortes ont été localisées dans le secteur sud-ouest de la nappe (cf. fig. 6.28). Ainsi le baryum sera un élément distinctif des eaux du flysch du Niesen surtout dans le secteur sud-ouest.

Les points d'eau de la nappe du Gurnigel manifestent des concentrations entre 36 et $141 \mu\text{g/l}$ qui sont environ 30 % plus élevées que celles des flyschs du Niesen.

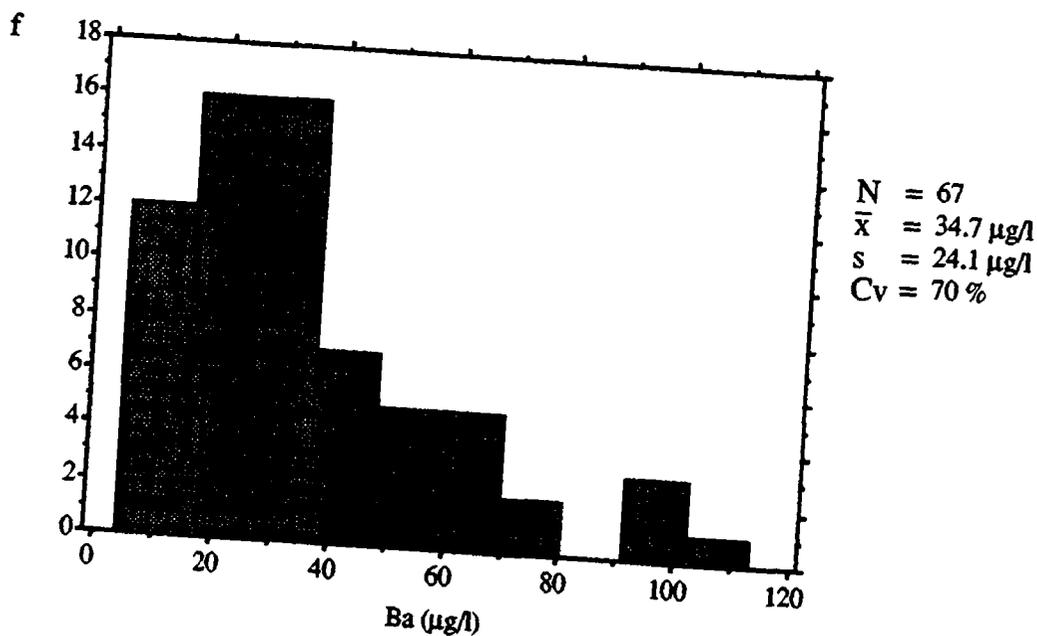


Fig. 6.27 Histogramme des fréquences des concentrations en baryum des eaux des sources de la nappe du Niesen.

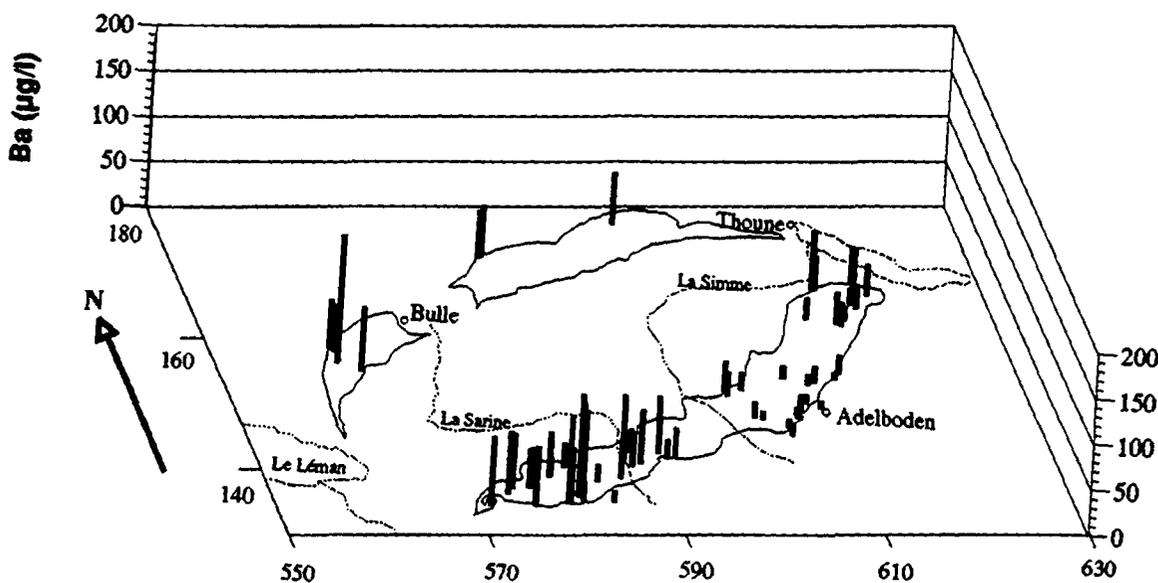


Fig. 6.28 Répartition des concentrations en baryum des eaux des sources.

6.2.15 Le fer (Fe en $\mu\text{g/l}$) "*traitement descriptif*"

Pour la détermination du fer provenant des eaux souterraines, il a fallu prendre en compte quelques considérations importantes (cf. incidences extra-géologiques, chapitre 4.5.3) :

1. La tuyauterie de captage de certaines sources a provoqué quelques anomalies de fer qui n'ont pas été pris en considération. Ainsi, le nombre total d'émergences considérées pour cet élément s'est réduit de 76 à 43.
2. Au niveau de l'analyse chimique, des problèmes d'interférence spectrale du fer avec des composantes d'argon montent le seuil de détection à 1 voire 10 $\mu\text{g/l}$, avec une précision de l'ordre de 2 $\mu\text{g/l}$.
3. Par rapport aux différents milieux, le fer a un comportement variable (retenu, lixivié) en fonction du type de sol (ATTEIA 1992).

Compte tenu de ces incertitudes, les concentrations en fer obtenues sont discutées dans ce chapitre comme ordre de grandeur et n'entrent pas dans la classification chimique des eaux souterraines du chapitre 7.1.

Pour la nappe du Niesen, une moyenne de 18 $\mu\text{g/l}$ avec des extrêmes de 0 et 49.8 $\mu\text{g/l}$ a été enregistrée dans 40 points d'eau, avec une dispersion de 62 %.

La source N° 67 (particulière), située à l'extrême nord-est de la nappe, affiche une forte anomalie de 284 $\mu\text{g/l}$ (fig. 6.30). Le reste des points d'eau, situé aux limites de la nappe ou à la périphérie, ne présente pas d'anomalies de fer au-delà des concentrations des eaux des flyschs. Quant aux sources des flyschs (s.s.), elles ont des concentrations jusqu'à 39 $\mu\text{g/l}$, voire 50 $\mu\text{g/l}$ pour les points d'eaux du tunnel d'Arnon.

Du point de vue statistique, la grosse anomalie (283.9 $\mu\text{g/l}$) n'a pas été prise en considération, afin de faire apparaître le reste des valeurs. L'histogramme des fréquences (fig. 6.29) manifeste une courbe du type χ^2 . Ses classes ou ensembles peuvent être interprétées ainsi :

- 2 sources du secteur sud-est présentent les concentrations les plus faibles < 5 $\mu\text{g/l}$. Celle des Deux Roches (N° 10) a une valeur nulle, tandis que Lioson (LLI = N° 5) a 2.2 $\mu\text{g/l}$.
- 24 points d'eau (58 %) se situent entre 5 et 20 $\mu\text{g/l}$.
- 14 échantillons ont des teneurs relativement plus élevées, entre 20 et 50 $\mu\text{g/l}$.

En conclusion, les sources à influence extra-flysch n'ont pas présenté d'anomalies de fer au-delà de celles des flyschs, exception faite pour la source particulière N° 67 (284 $\mu\text{g/l}$) de l'extrême nord-est de la nappe; dans ce cas-ci, il s'agirait d'une eau à circulation profonde et pauvre en oxygène. Quant aux eaux souterraines des flyschs du Niesen, des concentrations entre 0 (ou 1, vu son seuil de détection) et 39 $\mu\text{g/l}$ y ont été trouvées. Ces valeurs peuvent atteindre 50 $\mu\text{g/l}$ pour les sources à écoulement profond dans les flyschs. Notons que les eaux du flysch du Niesen avec un pH moyen de 6.7 et un Eh d'environ 200 mV entrent dans le domaine des eaux stables (FREEZE et al. 1979).

Les deux points d'eau retenus de la nappe du Gurnigel manifestent des teneurs entre 8.8 et 21.3 $\mu\text{g/l}$, donc concordantes à celles accordées pour les flyschs du Niesen.

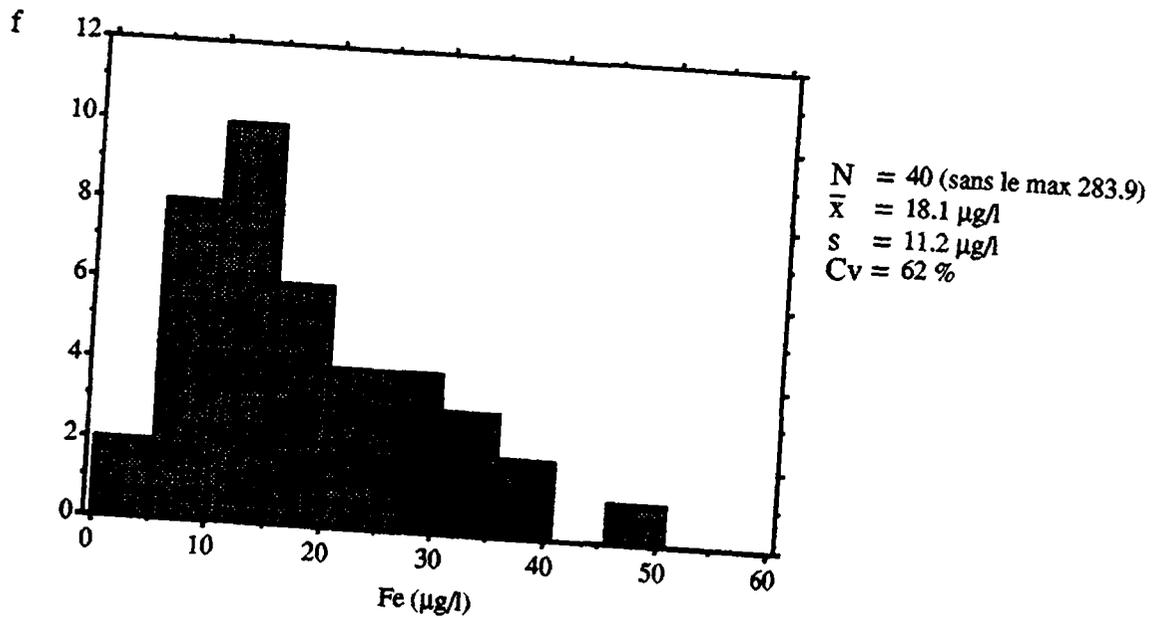


Fig. 6.29 Histogramme des fréquences des concentrations en fer des eaux des sources de la nappe du Niesen.

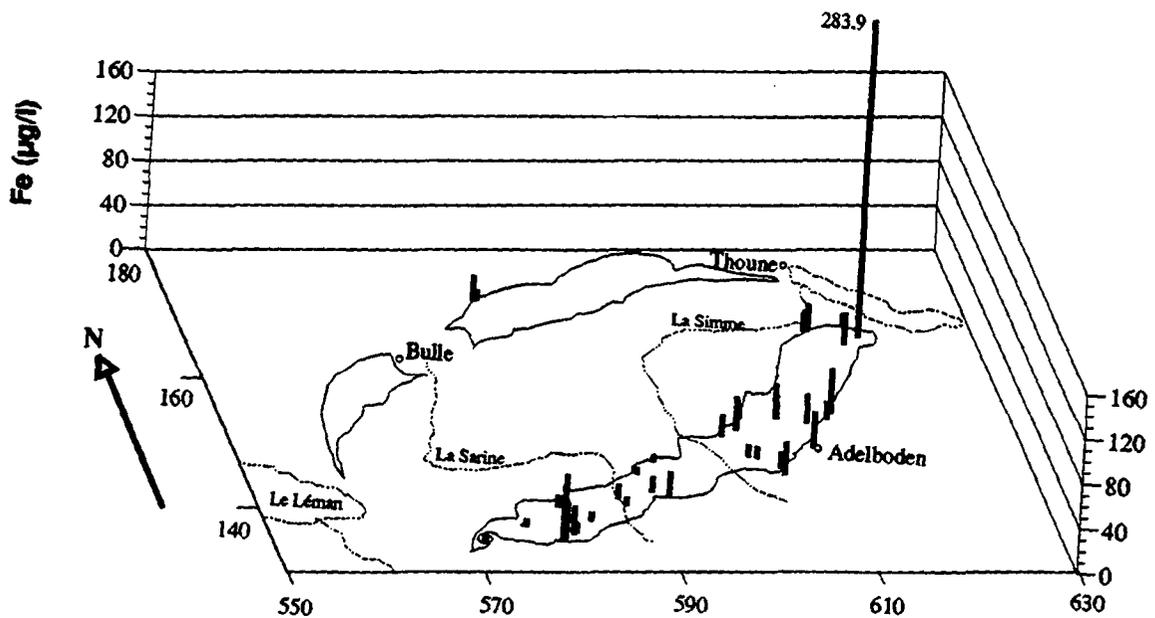


Fig. 6.30 Répartition des concentrations en fer des eaux des sources.

6.2.16 Le bore (B en $\mu\text{g/l}$)

Le bore est l'un des éléments en trace principaux des eaux souterraines.

Pour la nappe du Niesen, une moyenne de $12.6 \mu\text{g/l}$ a été enregistrée, avec des extrêmes de 1.4 et $59.5 \mu\text{g/l}$. Le coefficient de variation de 96% nous révèle la dispersion de cet élément. La source N° 67 (particulière) située à l'extrême nord-est de la nappe présente une anomalie très forte de $950 \mu\text{g/l}$. Celle-ci est évaluée, mais n'a pas été prise en compte dans l'analyse statistique descriptive, car elle masquerait les valeurs restantes.

L'histogramme des fréquences (fig. 6.31) manifeste une courbe à tendance exponentielle négative. Ses classes ou ensembles peuvent être interprétées ainsi :

- 47 sources (71%) présentent les concentrations les plus faibles, entre 1.4 et $13 \mu\text{g/l}$.
- 14 points d'eau (21%) se situent entre 13 et $37 \mu\text{g/l}$.
- 5 échantillons ont les teneurs relativement les plus élevées entre 37 et $60 \mu\text{g/l}$.

L'évaluation de la carte des concentrations du bore (fig. 6.32) nous indique que :

- L'émergence N°67 (particulière), située à l'extrême nord-est de la nappe, procure une anomalie tellement forte ($950.2 \mu\text{g/l}$), qu'elle n'a aucune relation avec les autres sources étudiées.
- Le reste des points d'eau, situé vers les limites de la nappe ou à la périphérie, ne présente pas d'anomalies de bore au-delà de ceux des flyschs.
- Les sources des flyschs manifestent toute la gamme de valeurs entre 1.4 et $59.5 \mu\text{g/l}$. La valeur minimale se trouve en altitude et le maximum dans le tunnel d'Arnon.

En conclusion, les sources à influence extra-flysch n'ont pas présenté d'anomalies de bore au-delà de celles des flyschs. Toute la gamme des concentrations de $1.4 \mu\text{g/l}$ à $60 \mu\text{g/l}$ a été rencontrée dans les eaux souterraines des flyschs du Niesen. Les plus fortes teneurs correspondent aux écoulements lents et profonds dans les flysch. Une très forte anomalie de $950 \mu\text{g/l}$ a été trouvée à l'extrême nord-est de la nappe.

Les points d'eau de la nappe du Gurnigel manifestent des teneurs entre 13.4 et $72.8 \mu\text{g/l}$; elles sont environ 15% plus élevées que celles des flyschs du Niesen.

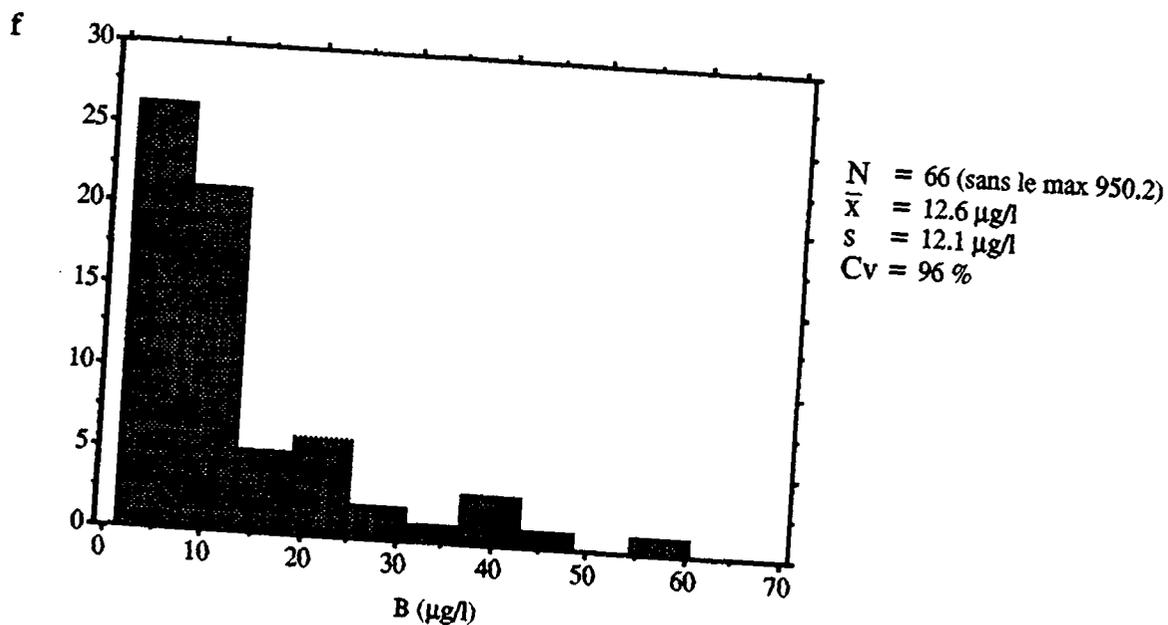


Fig. 6.31 Histogramme des fréquences des concentrations en bore des eaux des sources de la nappe du Niesen.

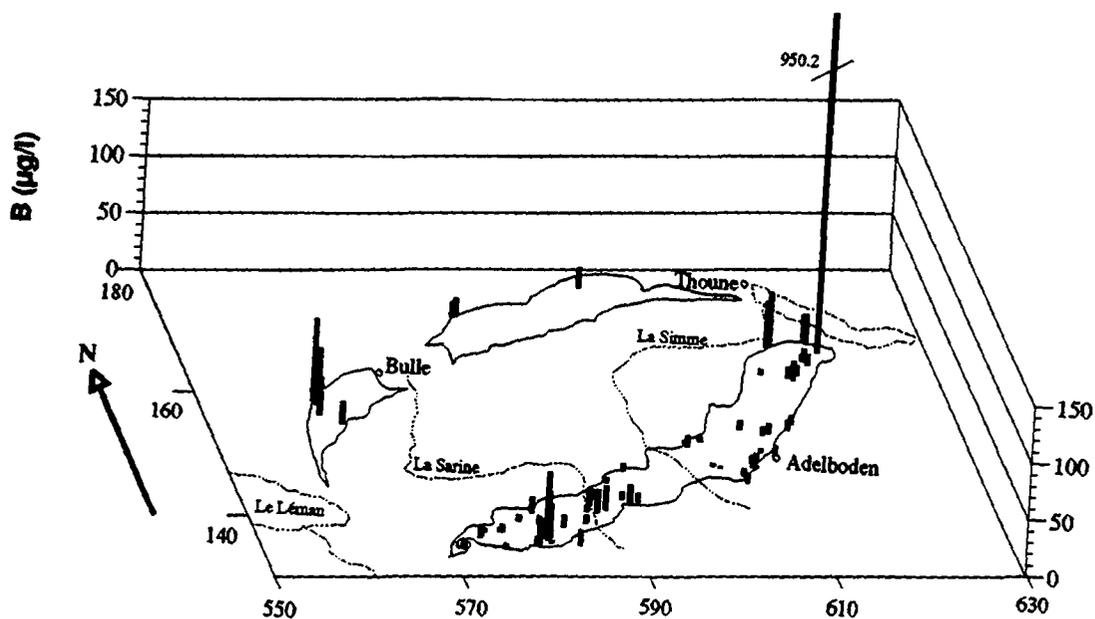


Fig. 6.32 Répartition des concentrations en bore des eaux des sources.

6.2.17 Le lithium (Li en $\mu\text{g/l}$)

Le lithium est un des éléments à concentration moyenne parmi les traces minérales trouvées dans les eaux souterraines.

Pour la nappe du Niesen, une moyenne de $6.5 \mu\text{g/l}$ avec des extrêmes de 0.5 et $30.8 \mu\text{g/l}$ a été enregistrée. Le coefficient de variation de 99% , nous signale la dispersion considérable de cet élément. La source N° 67 (particulière) située à l'extrême nord-est de la nappe présente une anomalie très forte de $277 \mu\text{g/l}$. Celle-ci est évaluée, mais n'a pas été prise en compte dans l'analyse statistique descriptive, car elle masquerait les contrastes entre les valeurs restantes.

L'histogramme des fréquences (fig. 6.33) manifeste une courbe à tendance exponentielle négative. Ses classes ou ensembles peuvent être interprétés ainsi :

- 33 sources (50%) présentent les concentrations les plus faibles, entre 0.5 et $3.6 \mu\text{g/l}$.
- 29 points d'eau (44%) se situent entre 3.6 et $16 \mu\text{g/l}$.
- Les 4 échantillons restants ont les teneurs relativement les plus élevées, entre 20 et $31 \mu\text{g/l}$.

L'évaluation de la carte des concentrations du lithium (fig. 6.34) révèle que :

- L'émergence N°67 (particulière), située à l'extrême nord-est de la nappe, manifeste une anomalie tellement forte ($277.2 \mu\text{g/l}$), qu'elle n'a aucune relation avec les autres sources étudiées.
- Le reste des points d'eau, situé aux limites de la nappe ou à la périphérie, ne présente pas d'anomalies importantes au-delà des concentrations des flyschs.
- Les sources des flyschs représentent toute la gamme de valeurs entre $0.5 \mu\text{g/l}$ en altitude et $28.6 \mu\text{g/l}$ dans le tunnel d'Arnon.

En conclusion, les sources à influence extra-flysch n'ont pas présenté d'anomalies importantes de lithium au-delà de celles des flyschs. Toute la gamme des concentrations de $0.5 \mu\text{g/l}$ à $28.6 \mu\text{g/l}$ a été rencontrée dans les eaux souterraines des flyschs du Niesen. Les plus fortes teneurs correspondent aux écoulements lents et profonds dans les flyschs. Une très forte anomalie de $277 \mu\text{g/l}$ a été trouvée à l'extrême nord-est de la nappe.

Les points d'eau de la nappe du Gurnigel manifestent des teneurs entre 2.6 et $10.5 \mu\text{g/l}$, donc concordantes à celles accordées pour les flyschs du Niesen.

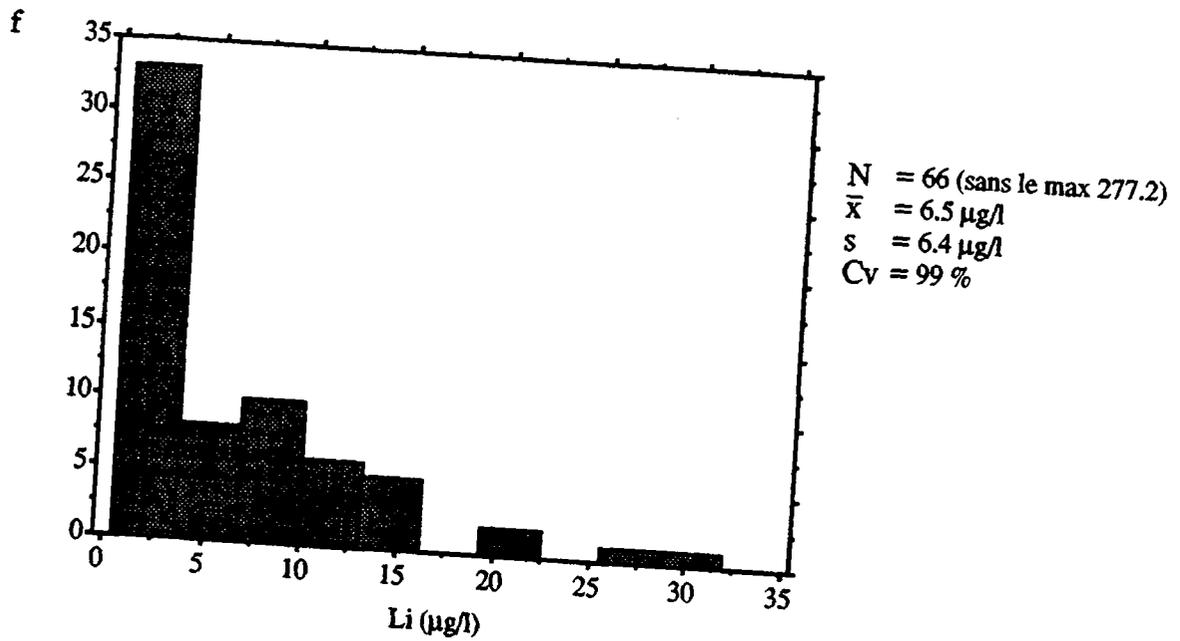


Fig. 6.33 Histogramme des fréquences des concentrations en lithium des eaux des sources de la nappe du Niesen.

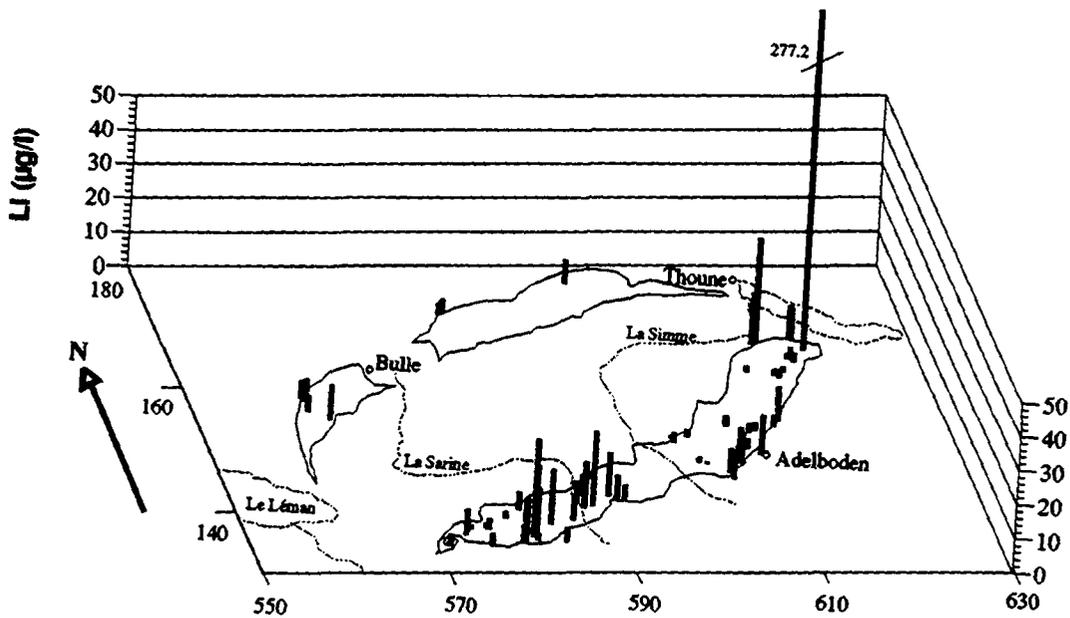


Fig. 6.34 Répartition des concentrations en lithium des eaux des sources.

6.2.18 Le brome (Br en $\mu\text{g/l}$) "*traitement descriptif*"

Parmi les éléments en traces des eaux étudiées, la concentration en brome est en général modérée (de l'ordre de $4 \mu\text{g/l}$). Du côté analytique, des inconvénients (effet mémoire cf. Chap. 4.5.2.3) ont provoqué l'augmentation du seuil de détection à 1 voire $10 \mu\text{g/l}$. Par conséquent, les concentrations en brome doivent être prises comme ordre de grandeur et n'entrent pas dans la classification chimique des eaux souterraines du chapitre 7.1.

Pour la nappe du Niesen, une moyenne de $3.8 \mu\text{g/l}$ avec des extrêmes de 0 et $27.3 \mu\text{g/l}$ a été enregistrée. Le coefficient de variation de 93 %, nous indique une dispersion considérable de cet élément.

L'histogramme des fréquences (fig. 6.35) manifeste une courbe centrée dans les valeurs basses :

- 27 sources (40 %) présentent les concentrations les plus faibles, entre 0 et $2.8 \mu\text{g/l}$.
- 32 points d'eau (48 %) se situent entre 2.8 et $5.7 \mu\text{g/l}$.
- 6 échantillons ont des teneurs plus élevées, entre 5.7 et $8.5 \mu\text{g/l}$.
- 2 échantillons manifestent les plus hautes concentrations, entre 13.4 et $27.4 \mu\text{g/l}$.

La carte du brome (fig. 6.36) localise ces concentrations et signale :

- Une répartition assez homogène de ce paramètre, à l'exception des deux fortes anomalies qui sont placées vers les limites de la nappe. $13.4 \mu\text{g/l}$ pour l'émergence N°51 au nord-est d'Adelboden et $27.4 \mu\text{g/l}$ pour la source N° 67 (particulière) à l'extrême nord-est de la nappe.
- Le reste des points d'eau, situé aux limites de la nappe ou à la périphérie, ne présente pas d'anomalies de brome au-delà de ceux des flyschs.
- Les sources des flyschs (s.s.) indiquent des valeurs entre 0 et $8 \mu\text{g/l}$.

Comme référence, citons MANDIA (1991) qui signale une valeur moyenne de $10.6 \mu\text{g/l}$ et des extrêmes de 0 et $58 \mu\text{g/l}$ pour les eaux évaporitiques froides du Trias.

En conclusion, les sources à influence extra-flysch peuvent atteindre des anomalies de brome jusqu'à $14 \mu\text{g/l}$, voire $28 \mu\text{g/l}$ pour la source particulière N° 67 à l'extrême nord-est de la nappe. Des concentrations entre 0 (ou 1, vu son seuil de détection) et $8 \mu\text{g/l}$ ont été trouvées dans les eaux souterraines des flyschs du Niesen. Aucune incidence des écoulements lents et profonds dans les flysch n'a été décelée.

Les points d'eau de la nappe du Gurnigel manifestent des teneurs entre 3.4 et $7.9 \mu\text{g/l}$ qui, en moyenne, sont légèrement plus élevées que celles des flyschs du Niesen.

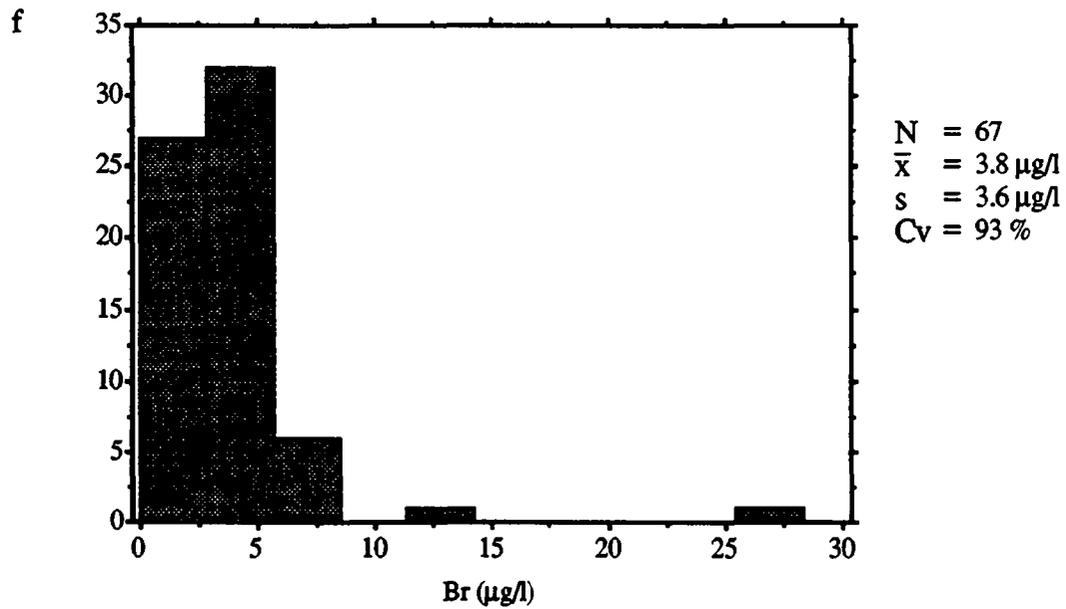


Fig. 6.35 Histogramme des fréquences des concentrations en brome des eaux des sources de la nappe du Niesen.

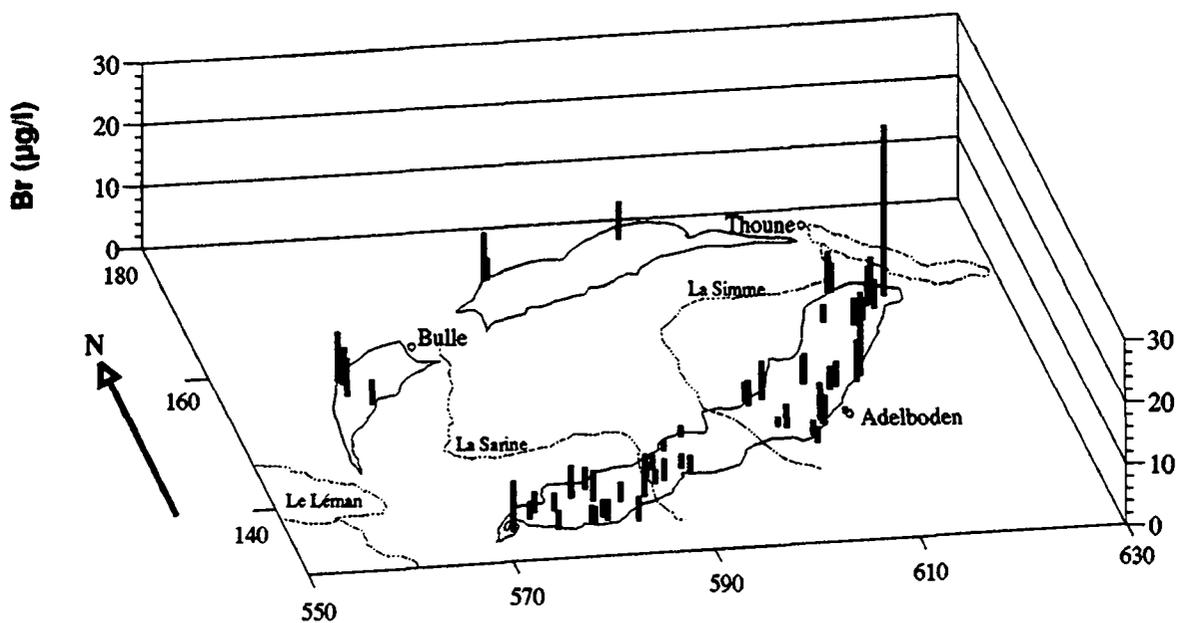


Fig. 6.36 Répartition des concentrations en brome des eaux des sources.

6.2.19 Le zinc (Zn en $\mu\text{g/l}$) "*traitement descriptif*"

La présence de zinc dans les eaux souterraines est faible par rapport aux autres éléments en traces décelés dans les eaux. Le nombre total d'émergences considérées pour cet élément a été réduit de 76 à 46 à cause des perturbations dues à la tuyauterie de captage (cf. incidences extra-géologiques, chapitre 4.5.3). Les concentrations traitées ci-dessous doivent être considérées comme ordre de grandeur et elles n'interviennent pas dans la classification chimique des écoulements souterrains du chapitre 7.1.

Pour la nappe du Niesen, une moyenne de $1.6 \mu\text{g/l}$ avec des extrêmes de 0 et $7.1 \mu\text{g/l}$ a été enregistrée dans 44 points d'eau. Le coefficient de variation de 102 %, révèle la dispersion considérable de cet élément.

Sur l'histogramme des fréquences (fig. 6.37), nous apercevons une courbe exponentielle négative. Ses classes ou ensembles peuvent être interprétés ainsi :

- 27 échantillons (61 % sources) présentent les concentrations les plus faibles, entre 0 et $1.5 \mu\text{g/l}$.
- 15 points d'eau (34 % du total) se situent entre 1.5 et $5 \mu\text{g/l}$.
- 2 échantillons ont les teneurs les plus élevées, de 5.9 et de $7.1 \mu\text{g/l}$.

La carte des concentrations en zinc (fig. 6.38) nous indique que :

- Les deux plus hautes concentrations correspondent aux émergences du tunnel d'Arnon.
- Les sources situées vers les limites de la nappe ou à la périphérie ne contiennent pas d'anomalies de zinc au-delà de celles des points d'eau des flyschs.
- Les sources du flysch manifestent toute la gamme de valeurs entre $0 \mu\text{g/l}$ pour la source de Lioson N°5 et le maximum de $7.1 \mu\text{g/l}$ dans le tunnel d'Arnon.
- La source dite particulière, à l'extrême nord-est de la nappe, indique une valeur très faible de $0.5 \mu\text{g/l}$.

En conclusion, les eaux souterraines des flyschs du Niesen peuvent être caractérisées par des valeurs entre 0 et $7.1 \mu\text{g/l}$. Les plus fortes teneurs correspondent aux écoulements lents et profonds dans les flyschs. Les terrains extra-flysch n'ont pas présenté d'anomalies de zinc au-delà des valeurs des eaux des flyschs.

Les deux points d'eau retenus de la nappe du Gurnigel manifestent des teneurs entre 0.8 et $5.3 \mu\text{g/l}$; elles concordent avec celles accordées pour les flyschs du Niesen.

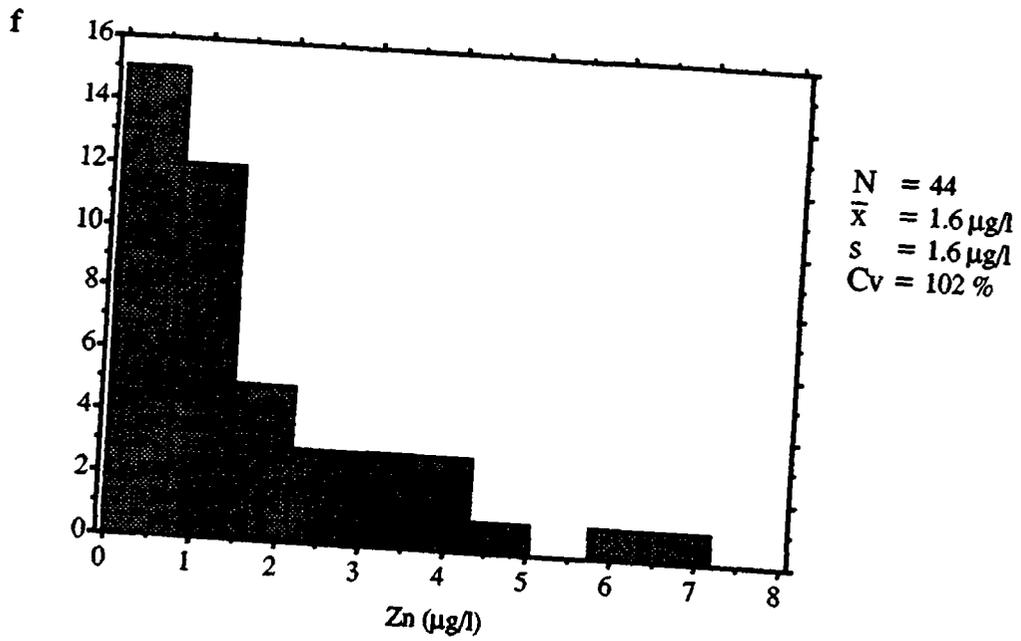


Fig. 6.37 Histogramme des fréquences des concentrations en zinc des eaux des sources de la nappe du Niesen.

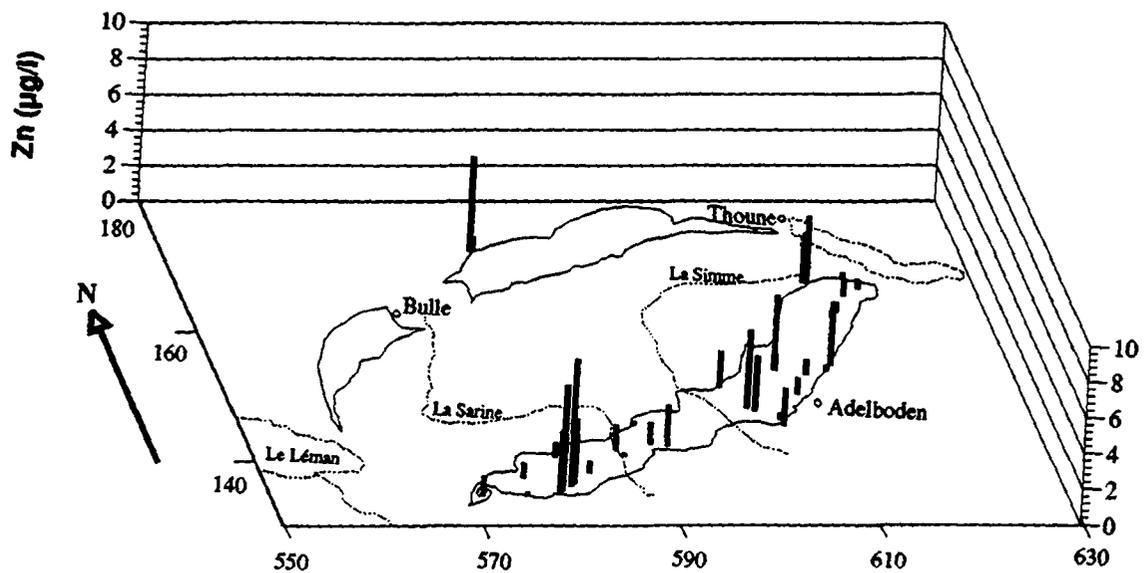


Fig. 6.38 Répartition des concentrations en zinc des eaux des sources.

6.2.20 Le rubidium (Rb en $\mu\text{g/l}$)

Le rubidium est un des éléments en trace à faible concentration dans les eaux souterraines. En préambule, il faut indiquer que cet élément peut aussi être libéré par différents types de sols (ATTEIA 1992). Néanmoins, les concentrations les plus élevées se trouvent là où les écoulements sont les plus profonds (tunnel d'Arnon et Linter tunnel) et il a été fortement détecté dans les lixiviats de roche (cf. chap. 8.3.5). Par conséquent, un important apport venant de la roche aquifère peut être retenu.

Pour la nappe du Niesen, une moyenne de $1.5 \mu\text{g/l}$ avec des extrêmes de 0.3 et $13.8 \mu\text{g/l}$ a été enregistrée. Le coefficient de variation de 162% , montre l'importante dispersion de cet élément, dispersion provoquée par quelques éléments à forte concentration.

L'histogramme des fréquences (fig. 6.39) manifeste une courbe exponentielle négative, particulièrement focalisée dans les faibles concentrations. Les principales classes sont définies ci-dessous, à l'aide aussi de la carte de répartition du rubidium (fig. 6.40) :

- 56 échantillons (84%) ont les plus faibles concentrations, entre 0.3 et $1.7 \mu\text{g/l}$. Ils se situent surtout à l'intérieur de la nappe.
- 5 points d'eau fournissent des valeurs de $1.7 \mu\text{g/l}$ à $3.2 \mu\text{g/l}$. Ils se trouvent soit vers les limites de la nappe, soit dans le secteur central.
- 3 des 6 émergences du tunnel d'Arnon fournissent des teneurs plus importantes, entre 3.7 et $6 \mu\text{g/l}$.
- 2 sources situées à la périphérie de la nappe et une à sa limite, dans le secteur nord-est, procurent les concentrations les plus élevées, entre 9 et $13.8 \mu\text{g/l}$.
- La source N°67, à influence extra-flysch mais pas typiquement évaporitique, affiche une teneur modérée de $2.7 \mu\text{g/l}$.

Comme comparaison, citons MANDIA (1991) qui calcule une valeur moyenne de $18.3 \mu\text{g/l}$ et des extrêmes de 2.3 et $53.3 \mu\text{g/l}$ pour les eaux évaporitiques froides du Trias.

En conclusion, les concentrations entre 0.3 et $6 \mu\text{g/l}$ observées dans la plupart des points peuvent être considérées comme caractéristiques des eaux souterraines des flyschs du Niesen. Les plus fortes valeurs correspondent aux écoulements lents et profonds dans les flyschs. Les sources à influence extra-flysch de type évaporitique de la nappe du Niesen ou de ses environs présentent les anomalies les plus importantes de rubidium, entre 9 et $14 \mu\text{g/l}$. Elles correspondent aux teneurs des évaporites du Trias indiquées par MANDIA (1991).

Les points d'eau de la nappe du Gurnigel manifestent des concentrations entre 0.7 et $2 \mu\text{g/l}$ qui sont plus faibles que celles accordées pour les flyschs du Niesen.

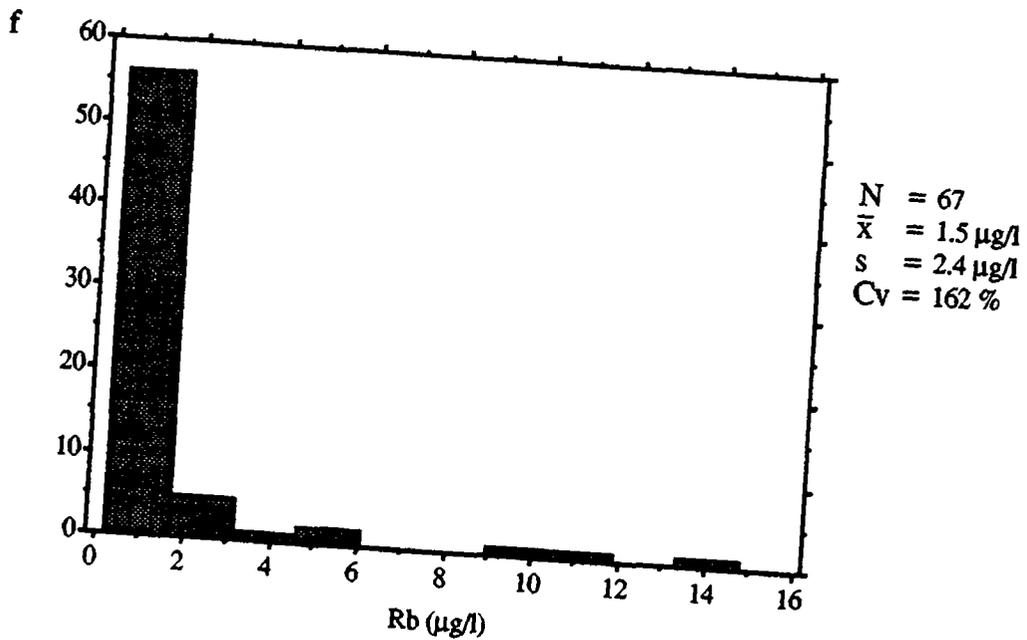


Fig. 6.39 Histogramme des fréquences des concentrations en rubidium des eaux des sources de la nappe du Niesen.

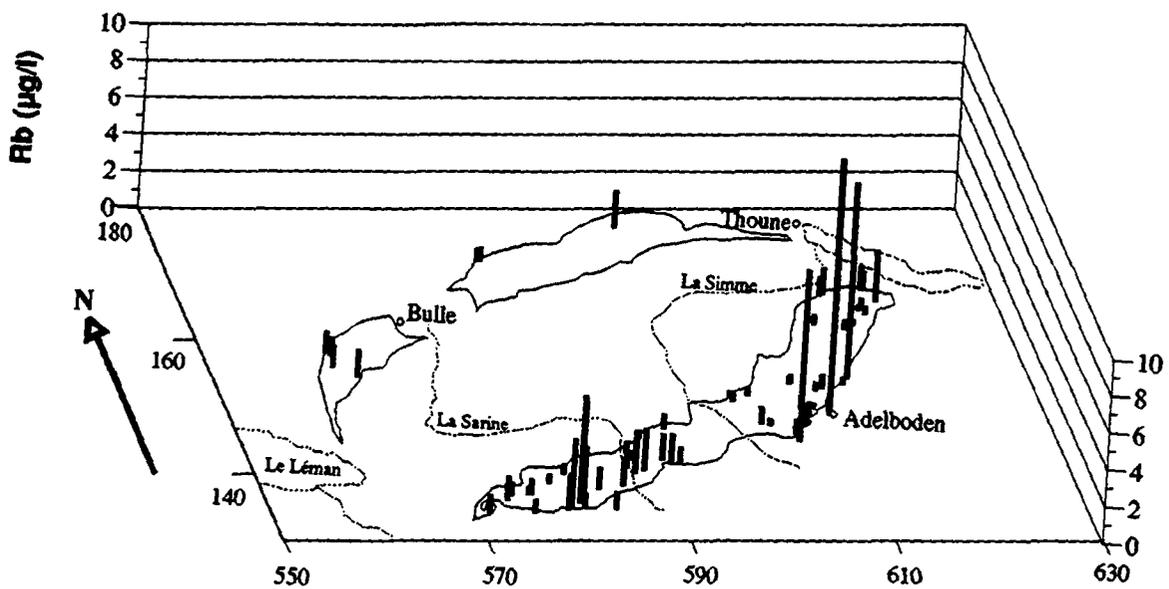


Fig. 6.40 Répartition des concentrations en rubidium des eaux des sources.

6.2.21 L'aluminium (Al en $\mu\text{g/l}$) "*traitement descriptif*"

L'aluminium contenu dans les eaux s'est avéré être une trace minérale avec un bruit de fond faible et homogène dans la plupart des cas. Les anomalies de 6 et 26 $\mu\text{g/l}$ trouvées dans les eaux de neige (cf. chap. 5.3) ne se manifestent presque pas dans les eaux des sources. Cet élément qui peut aussi subir des influences de la turbidité des écoulements et qui a un comportement variable (retenu, lixivié) en fonction du type pédologique (ATTEIA 1992), est discuté d'une façon descriptive, mais il n'est pas pris en compte dans la classification chimique des eaux souterraines du chapitre 7.1.

Pour la nappe du Niesen, une moyenne de 1.2 $\mu\text{g/l}$ avec des extrêmes de 0.1 et 11.4 $\mu\text{g/l}$ a été enregistrée. Le coefficient de variation de 168 %, révèle la dispersion provoquée par quelques fortes concentrations.

L'histogramme des fréquences (fig. 6.41) manifeste une courbe exponentielle négative, qui regroupe la majeure partie des échantillons dans des classes à faibles concentrations. La carte de répartition de l'aluminium (fig. 6.42) nous indique leur localisation :

- 52 échantillons (78%) présentent de faibles teneurs entre 0.1 et 1.3 $\mu\text{g/l}$. Ils sont répartis indistinctement sur l'ensemble de la nappe.
- 13 points d'eau (19%) varient entre 1.3 et 4.3 $\mu\text{g/l}$. La plupart de ces valeurs appartiennent à des émergences à l'intérieur de la nappe et surtout dans le tunnel d'Arnon où l'écoulement est plus profond et caractéristique des flyschs. Une anomalie de ce genre a aussi été décelée vers la limite de la nappe.
- 2 échantillons révèlent des pics de l'ordre de 11 $\mu\text{g/l}$. Il s'agit de sources en altitude (au-delà de 1700 m) dans le secteur nord-est de la nappe (fig. 6.42). Ces anomalies peuvent être expliquées par l'apport d'écoulements superficiels qui contiendraient de l'aluminium dissous ou en suspension. Celui-ci peut aussi passer en solution lors de l'acidification en laboratoire.
- Les émergences à influence extra-flysch ne montrent pas d'anomalies d'aluminium (fig. 6.42) en général.

En conclusion, la gamme des concentrations entre 0.1 et 4.3 $\mu\text{g/l}$ correspond aux eaux souterraines des flyschs du Niesen. Les plus fortes valeurs se rapportent aux écoulements lents et profonds dans les flyschs. Les sources à influence extra-flysch n'ont pas révélé d'anomalies d'aluminium au-delà de celles des eaux des flyschs.

Les points d'eau de la nappe du Gurnigel font apparaître des concentrations entre 0.6 et 4.1 $\mu\text{g/l}$; elles sont donc similaires à celles indiquées pour les flyschs du Niesen.

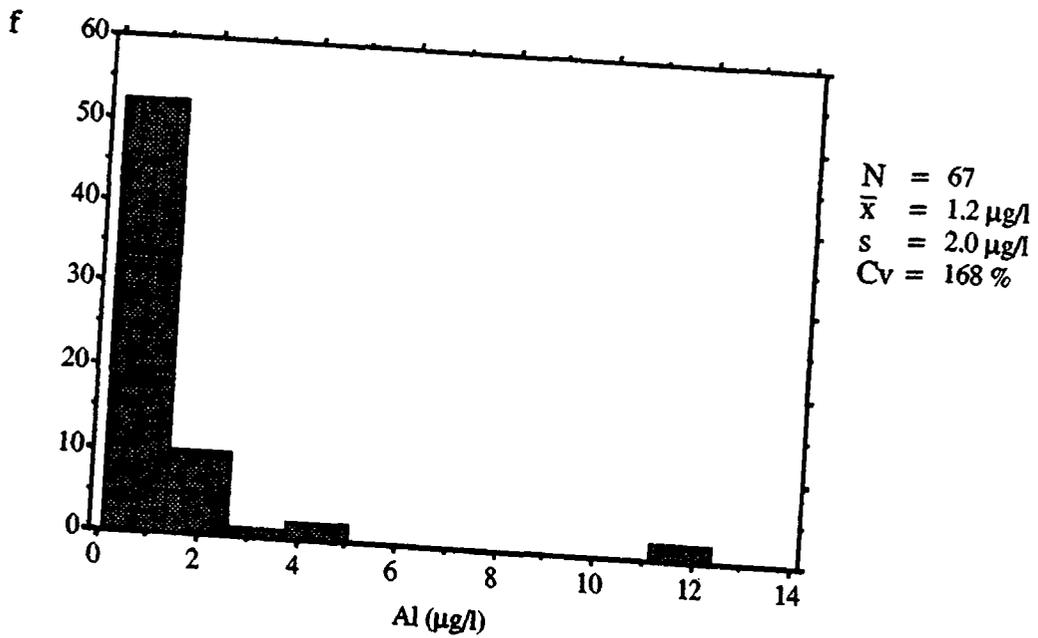


Fig. 6.41 Histogramme des fréquences des concentrations en aluminium des eaux des sources de la nappe du Niesen.

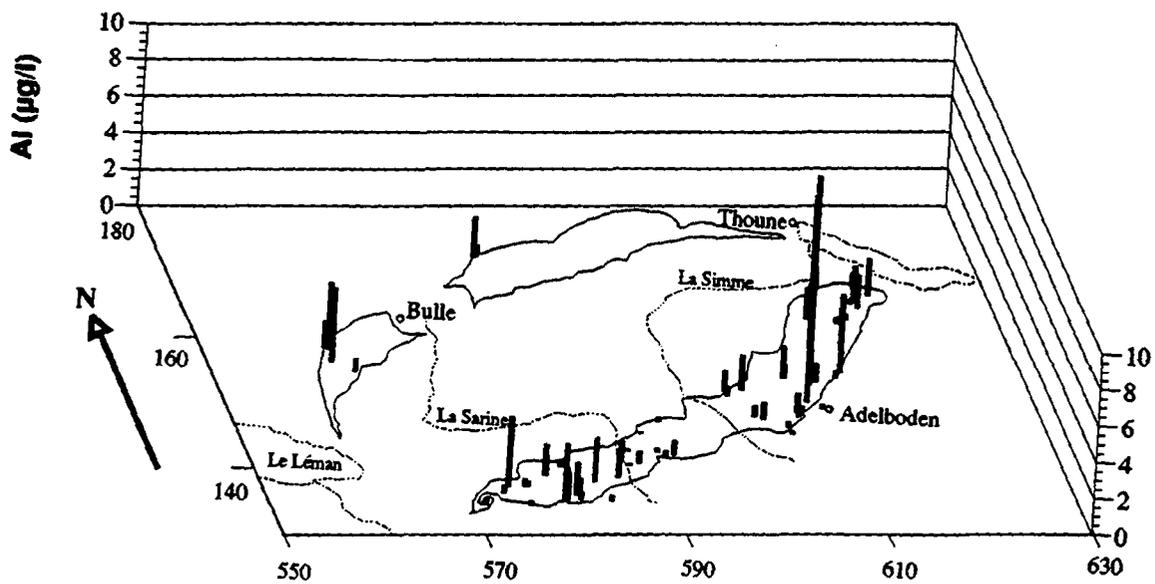


Fig. 6.42 Répartition des concentrations en aluminium des eaux des sources.

6.2.22 Le nickel (Ni en $\mu\text{g/l}$)

La présence de nickel dans les eaux souterraines est faible. Après l'étude des influences extra-géologiques, il s'est avéré que certaines anomalies avaient été influencées par la tuyauterie de captage (cf. chap. 4.5.3). Le nombre total d'émergences considérées ici a donc été réduit de 76 à 58.

Pour la nappe du Niesen, une moyenne de $1 \mu\text{g/l}$ avec des extrêmes de 0 et $4 \mu\text{g/l}$ a été enregistrée dans 55 points d'eau. Bien que les valeurs soient toutes modérées, une dispersion relative de 92 % est atteinte.

L'histogramme des fréquences (fig. 6.43) manifeste une courbe du type χ^2 , qui met en évidence les populations suivantes :

- 48 échantillons (87 %) ont de faibles concentrations, entre 0 et $1.6 \mu\text{g/l}$.
- 7 points d'eau indiquent les valeurs les plus fortes, entre 1.6 et $4 \mu\text{g/l}$.

La carte de répartition du nickel (fig. 6.44) met en relief :

- Les hautes concentrations situées vers les limites de la nappe et surtout à l'intérieur, dans le secteur sud-est y compris le tunnel d'Arnon. Par conséquent, une éventuelle influence des terrains extra-flysch sur les eaux n'est pas visible dans ce cas.
- Le reste des valeurs, faibles et modérées, réparties sur toute la nappe du Niesen, y compris à ses limites.

Comme référence, MANDIA (1991) indique aussi de faibles valeurs pour les eaux froides des évaporites du Trias, avec une moyenne de $3.8 \mu\text{g/l}$.

En conclusion, toute la gamme de concentrations enregistrées (de 0 à $4 \mu\text{g/l}$) peut être associée aux eaux souterraines des flyschs du Niesen. Les plus fortes teneurs correspondent aux écoulements lents et profonds dans les flysch. Les sources à influence extra-flysch n'ont pas présenté d'anomalies de nickel au-delà de celles attribuées au flyschs du Niesen.

Les trois points d'eau retenus de la nappe du Gurnigel manifestent des teneurs entre 0.5 et $0.8 \mu\text{g/l}$; elles sont donc inférieures à celles attribuées aux flyschs du Niesen.

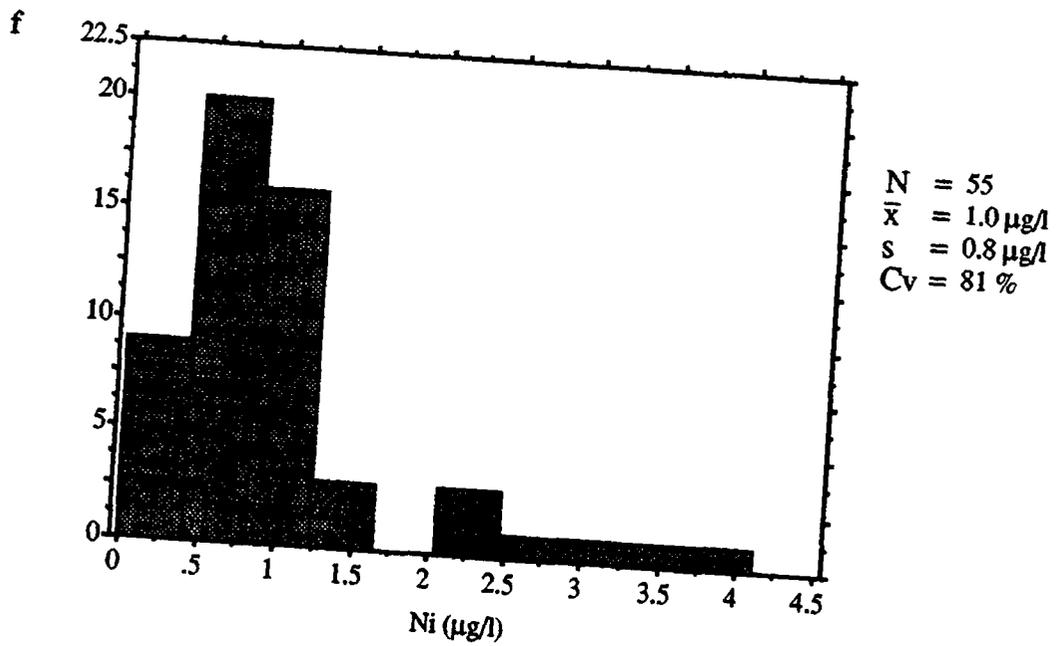


Fig. 6.43 Histogramme des fréquences des concentrations en nickel des eaux des sources de la nappe du Niesen.

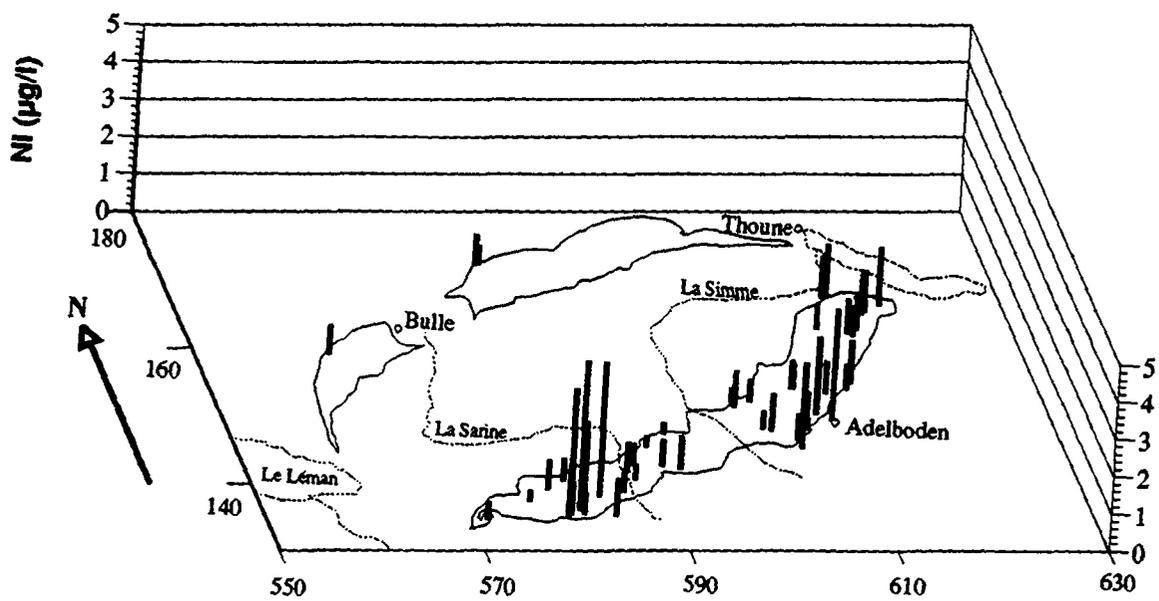


Fig. 6.44 Répartition des concentrations en nickel des eaux des sources.

6.2.23 L'iode (I en $\mu\text{g/l}$) "*traitement descriptif*"

L'iode est l'un des éléments en trace à très faible concentration dans les eaux souterraines (de l'ordre de $1 \mu\text{g/l}$). Des problèmes analytiques (effet mémoire, cf. chapitre 4.5.2.3) ont fait augmenter le seuil de détection à 0.5 voire $5 \mu\text{g/l}$. Les concentrations traitées ci-dessous doivent être considérées comme ordre de grandeur et elles n'interviennent pas dans la classification chimique des écoulements souterrains du chapitre 7.1.

Pour la nappe du Niesen, une valeur moyenne de $0.92 \mu\text{g/l}$ et des extrêmes de 0.1 et $2.8 \mu\text{g/l}$ ont été enregistrées. La dispersion est modérée (64 %). La source N° 67 (particulière) située à l'extrême nord-est de la nappe présente une anomalie très élevée de $387 \mu\text{g/l}$. Celle-ci est reportée sur la carte, mais n'a pas été prise en compte dans l'analyse statistique descriptive, car elle éclipsait les valeurs restantes.

L'histogramme des fréquences (fig. 6.45) correspond à une courbe du type χ^2 , qui met en évidence les populations suivantes :

- 7 échantillons présentent les concentrations les plus faibles ($<0.4 \mu\text{g/l}$).
- 51 points d'eau (77 %) se situent entre 0.4 et $1.5 \mu\text{g/l}$.
- 8 échantillons ont les teneurs les plus élevées, entre 1.5 et $2.8 \mu\text{g/l}$.

L'examen de la carte des concentrations en iode (fig. 6.46) nous indique que :

- A part l'émergence N°67 ($386.9 \mu\text{g/l}$), les points d'eau situés vers les limites de la nappe ne présentent pas d'anomalies au-delà de celles des eaux des flyschs.
- Les sources des flyschs manifestent toute la gamme de valeurs entre 0.1 et $2.8 \mu\text{g/l}$. Une vision générale fait remarquer que les concentrations faibles se trouvent plutôt dans le secteur nord-est de la nappe. La valeur maximale a été localisée dans le tunnel d'Arnon.

Des références pour l'iode des eaux évaporitiques du Trias sont indiquées par MANDIA (1991), qui donne une valeur moyenne de $18.2 \mu\text{g/l}$ et des extrêmes entre 0 et $570 \mu\text{g/l}$.

En conclusion, les concentrations d'iode entre 0.1 (plutôt 0.5 , vu son seuil de détection) et $2.8 \mu\text{g/l}$ correspondent aux eaux souterraines des flyschs du Niesen. Les sources à influence extra-flysch n'ont pas présenté d'anomalies au-delà de celles des flyschs. Une très forte anomalie de $387 \mu\text{g/l}$ a tout de même été trouvée à l'extrême nord-est de la nappe, ce qui peut être expliqué par la présence d'halogénures d'iode dans les évaporites des terrains extra-flysch de cette région.

Les points d'eau de la nappe du Gurnigel manifestent des teneurs entre 1 et $4.6 \mu\text{g/l}$, donc plus élevées que celles des flyschs du Niesen.

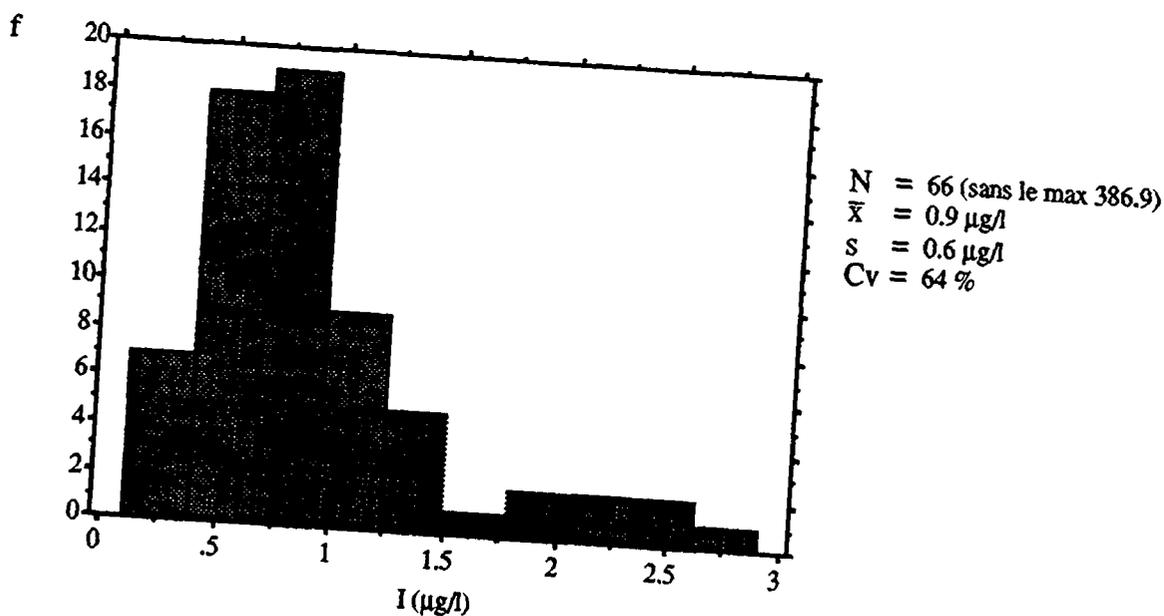


Fig. 6.45 Histogramme des fréquences des concentrations en iode des eaux des sources de la nappe du Niesen.

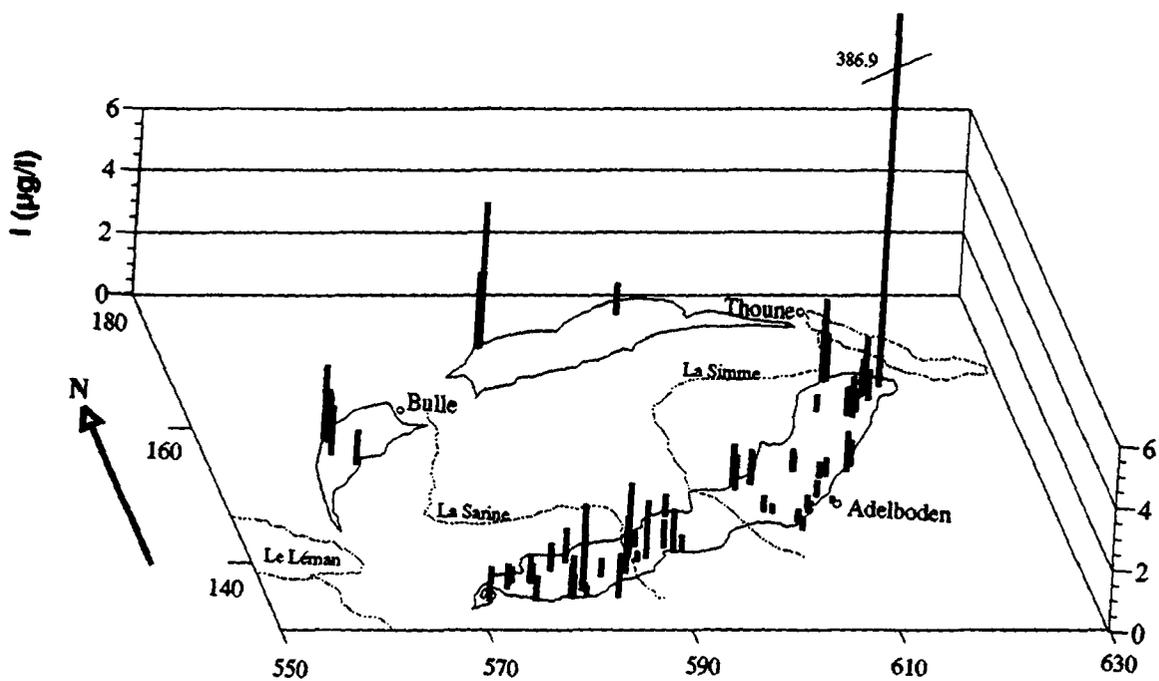


Fig. 6.46 Répartition des concentrations en iode des eaux des sources.

6.2.24 Le manganèse (Mn en $\mu\text{g/l}$)

La présence de manganèse dans les eaux souterraines est assez faible ($< 1 \mu\text{g/l}$). Comme considération générale et à part l'origine géologique, il faut indiquer que cet élément peut également être libéré par des sols à pH au-dessous de 5 (ATTEIA 1992). Sa solubilité est nettement plus élevée en milieu réducteur.

Pour la nappe du Niesen, les concentrations en manganèse oscillent autour de $0.76 \mu\text{g/l}$ avec des extrêmes de 0 et $4.9 \mu\text{g/l}$. Une dispersion de 147 % indique la relative variabilité de cet élément.

L'histogramme des fréquences (fig. 6.47) manifeste une courbe exponentielle négative, qui différencie les classes suivantes :

- 55 émergences réparties dans toute la nappe (fig. 6.48) présentent les concentrations les plus faibles ($< 1 \mu\text{g/l}$).
- 7 échantillons ont des valeurs intermédiaires entre 1 et $2.4 \mu\text{g/l}$, dont 5 correspondent à des sources situées à l'intérieur de la nappe et 2 dans le tunnel d'Arnon.
- Les plus hautes concentrations sont affichées par 5 émergences. 2 d'entre elles sont situées en altitude (4 et $4.9 \mu\text{g/l}$) et 3 sont localisées dans le tunnel d'Arnon (jusqu'à $4.2 \mu\text{g/l}$) et dans le "Linter Tunnel" à la limite de la nappe ($4.7 \mu\text{g/l}$). La carte des concentrations en manganèse (fig. 6.48) fait mieux ressortir ces anomalies.
- Les points d'eau, situés aux limites de la nappe ou à la périphérie, présentent de très faibles valeurs de manganèse. La source N°67 (particulière) placée à l'extrême nord-est de la nappe, caractéristique d'une eau profonde et à très fortes anomalies pour plusieurs éléments, affiche une valeur nulle.

Les références du manganèse pour les eaux évaporitiques du Trias ont une valeur moyenne de $12.3 \mu\text{g/l}$ et des extrêmes de 0 et $31.2 \mu\text{g/l}$ (MANDIA 1991).

En conclusion, une certaine influence des sols et des milieux réducteurs peut être à l'origine de quelques anomalies de manganèse (max. $4.9 \mu\text{g/l}$). Les sources à l'intérieur de la nappe du Niesen ont présenté des valeurs jusqu'à $2.4 \mu\text{g/l}$, et des anomalies jusqu'à $4.2 \mu\text{g/l}$ quand les écoulements sont plus profonds (tunnel d'Arnon). Ces dernières valeurs peuvent être attribuées aux eaux souterraines des flyschs du Niesen. Quant aux sources qui subissent une influence des terrains extra-flysch, elles ont des valeurs très faibles ($< 1 \mu\text{g/l}$).

Les deux points d'eau retenus de la nappe du Gurnigel manifestent des teneurs entre 0.9 et $4.5 \mu\text{g/l}$.

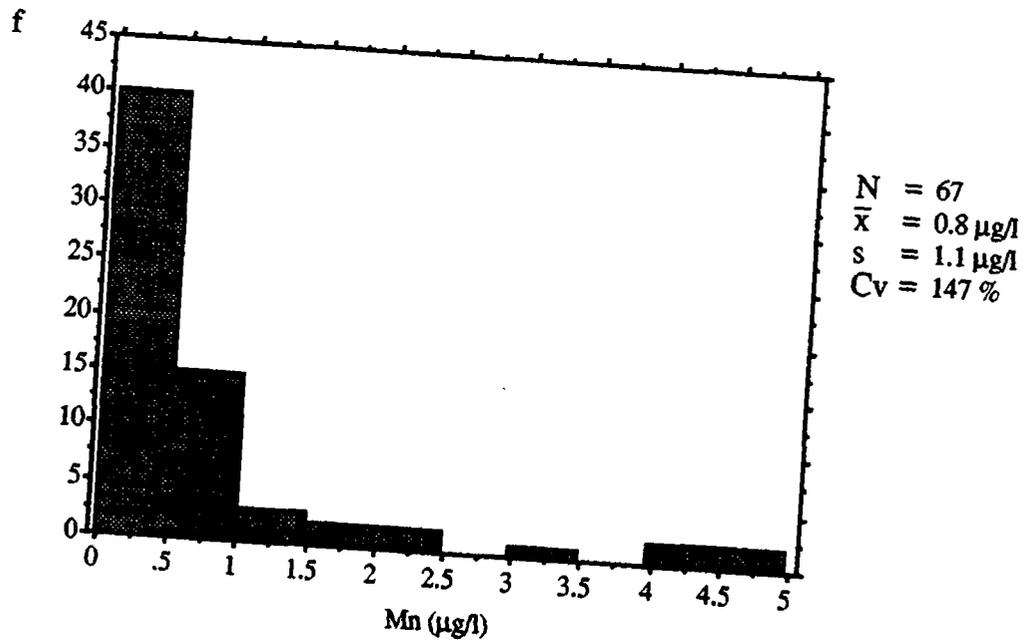


Fig. 6.47 Histogramme des fréquences des concentrations en manganèse des eaux des sources de la nappe du Niesen.

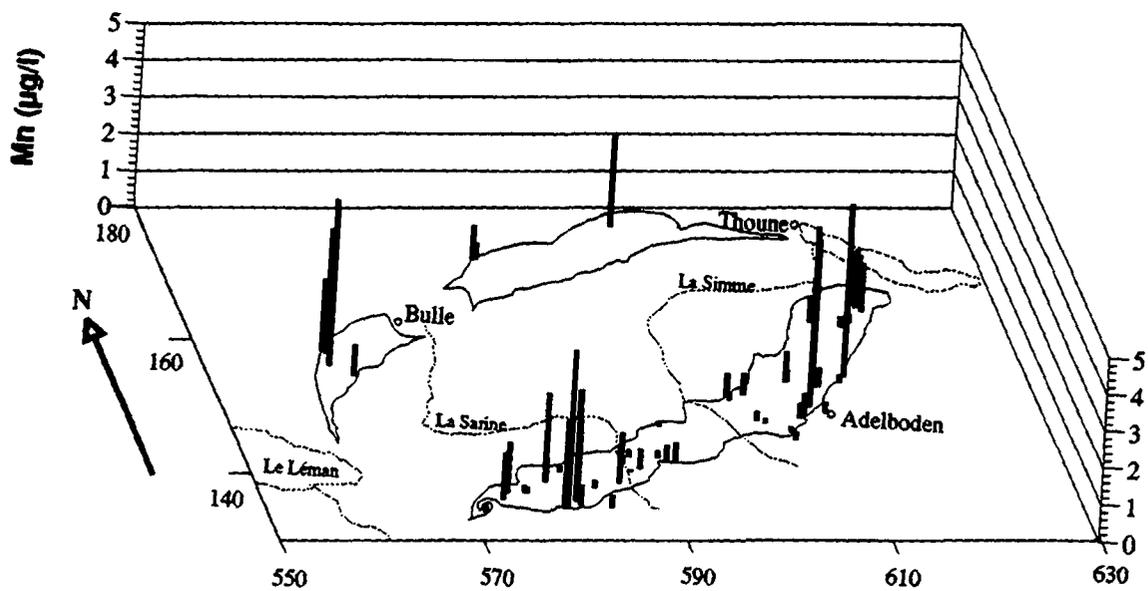


Fig. 6.48 Répartition des concentrations en manganèse des eaux des sources.

6.2.25 Le cuivre (Cu en $\mu\text{g/l}$)

Le cuivre s'est révélé une trace minérale à présence assez modérée ($< 1 \mu\text{g/l}$) dans les eaux souterraines. Quelques concentrations en cuivre sont affectées par la tuyauterie de captage de certaines sources. Ces anomalies ont été éliminées, et réduisent ainsi les points d'eau considérés de 76 à 54 (cf. incidences extra-géologiques, chapitre 4.5.3).

Pour la nappe du Niesen, une moyenne de $0.7 \mu\text{g/l}$ avec des extrêmes de 0 et $3.1 \mu\text{g/l}$ a été enregistrée dans 52 points d'eau. Le coefficient de variation de 96 %, suggère une dispersion relativement élevée.

L'histogramme des fréquences (fig. 6.49) manifeste une courbe à décroissance exponentielle. Ses classes peuvent être regroupées ainsi :

- 42 échantillons (81 % des sources) présentent les concentrations les plus faibles ($< 1 \mu\text{g/l}$); ces valeurs correspondent à des sources réparties indistinctement dans la nappe (fig.6.50).
- 10 échantillons (19 %) possèdent des valeurs entre 1 et $3.1 \mu\text{g/l}$. Il s'agit de points d'eau situés soit vers les limites de la nappe, donc à influence extra-flysch, soit dans le tunnel d'Armon ou le Linter tunnel, là où l'écoulement dans les flyschs est considéré à plus grande profondeur.

Des références pour les eaux froides évaporitiques du Trias sont indiquées par MANDIA (1991), avec une valeur moyenne de $3.1 \mu\text{g/l}$ et des extrêmes de 0 et $14.4 \mu\text{g/l}$.

En conclusion, les concentrations en cuivre entre 0 et $3.1 \mu\text{g/l}$ correspondent aux eaux souterraines des flyschs du Niesen. Les sources à influence extra-flysch ont présenté des anomalies de cuivre, mais pas au-delà des maxima trouvés dans les eaux des flyschs.

Les deux points d'eau retenus dans la nappe du Gurnigel manifestent des teneurs entre 0.4 et $2.7 \mu\text{g/l}$, donc concordantes avec celles accordées aux flyschs du Niesen.

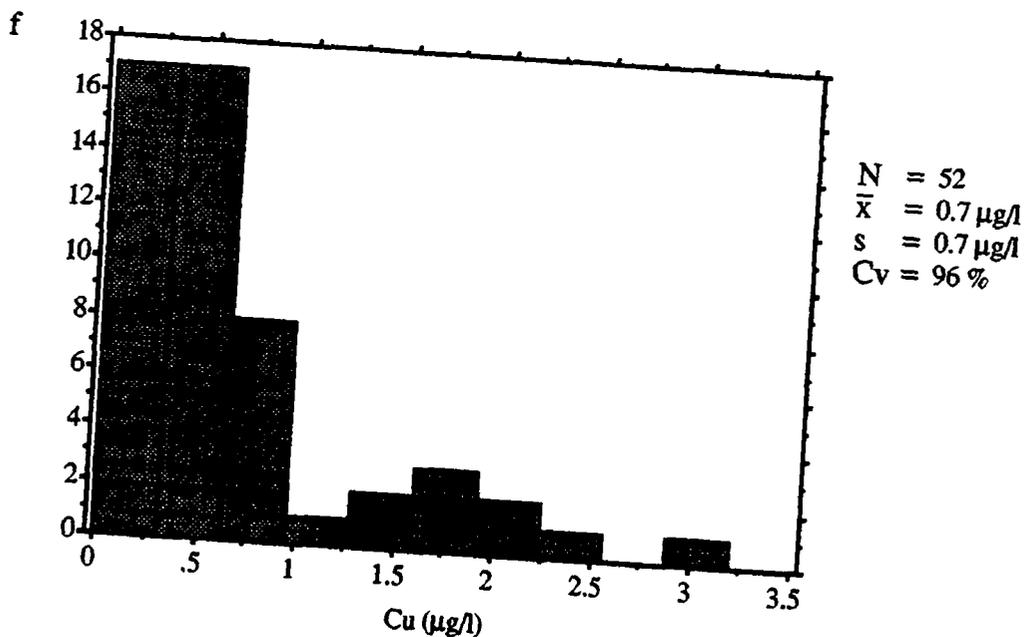


Fig. 6.49 Histogramme des fréquences des concentrations en cuivre des eaux des sources de la nappe du Niesen.

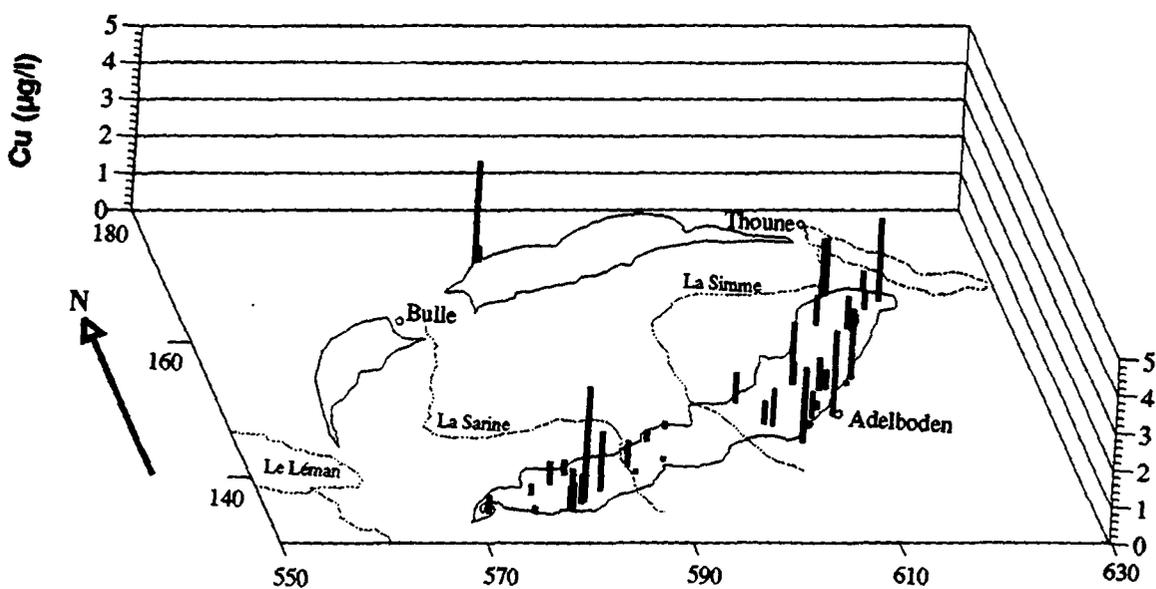


Fig. 6.50 Répartition des concentrations en cuivre des eaux des sources.

6.2.26 L'uranium (U en $\mu\text{g/l}$)

L'uranium est l'une des traces minérales à plus faible présence dans les eaux souterraines des flyschs ($< 1 \mu\text{g/l}$). Ses concentrations n'ont rien à voir avec les valeurs moyennes de $117 \mu\text{g/l}$ trouvées par DUBOIS (1992) pour les eaux du cristallin. MANDIA (1991) indique des valeurs autour de $1.7 \mu\text{g/l}$ pour les eaux évaporitiques de l'Ultraschweiz.

Pour la nappe du Niesen, une moyenne de $0.3 \mu\text{g/l}$ avec des extrêmes de 0 et $1.7 \mu\text{g/l}$ a été enregistrée.

L'histogramme des fréquences (fig. 6.51) décrit une courbe du type χ^2 avec une dispersion de 83 %. Quant aux différentes classes, elles peuvent être regroupées ainsi :

- 65 échantillons (97 % des sources) présentent les concentrations les plus faibles ($< 1 \mu\text{g/l}$); ces concentrations correspondent à des sources réparties indistinctement dans toute la nappe (fig. 6.52).
- 2 sources situées à la limite de la nappe du côté d'Adelboden ont les plus hautes concentrations (1.2 et $1.7 \mu\text{g/l}$); elles correspondent plutôt à l'influence des terrains extra-flysch.

En conclusion, de très faibles concentrations en uranium ($< 1 \mu\text{g/l}$) peuvent être accordées aux eaux souterraines des flyschs du Niesen. Les sources à influence extra-flysch ont présenté des anomalies jusqu'à $1.7 \mu\text{g/l}$, donc similaires à celles indiquées par MANDIA pour les eaux évaporitiques de l'Ultraschweiz .

Les points d'eau de la nappe du Gurnigel manifestent aussi des teneurs d'uranium inférieures à $1 \mu\text{g/l}$.

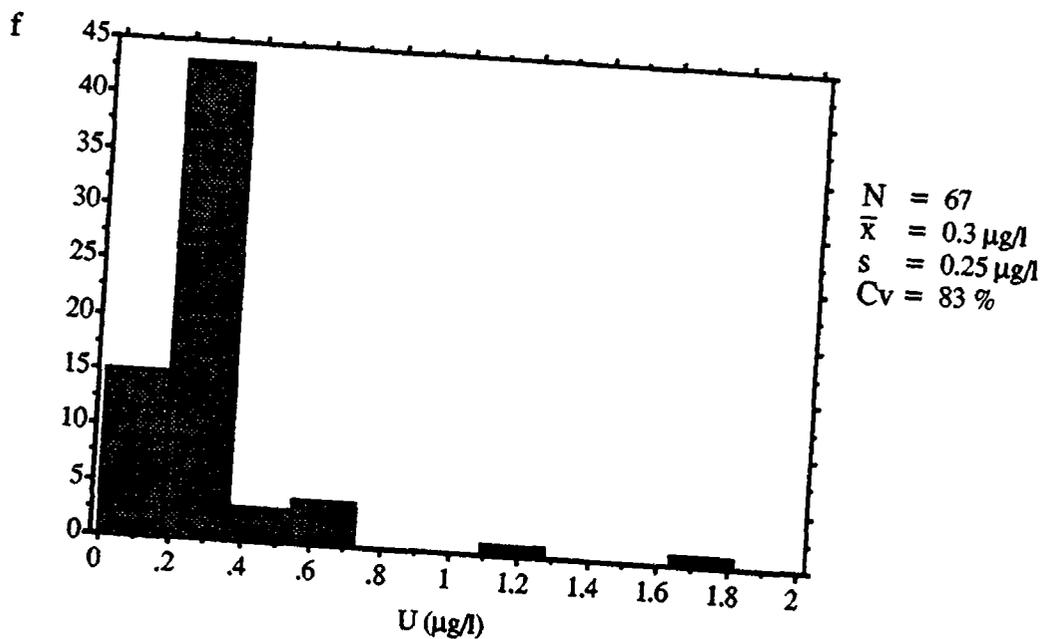


Fig. 6.51 Histogramme des fréquences des concentrations en uranium des eaux des sources de la nappe du Niesen.

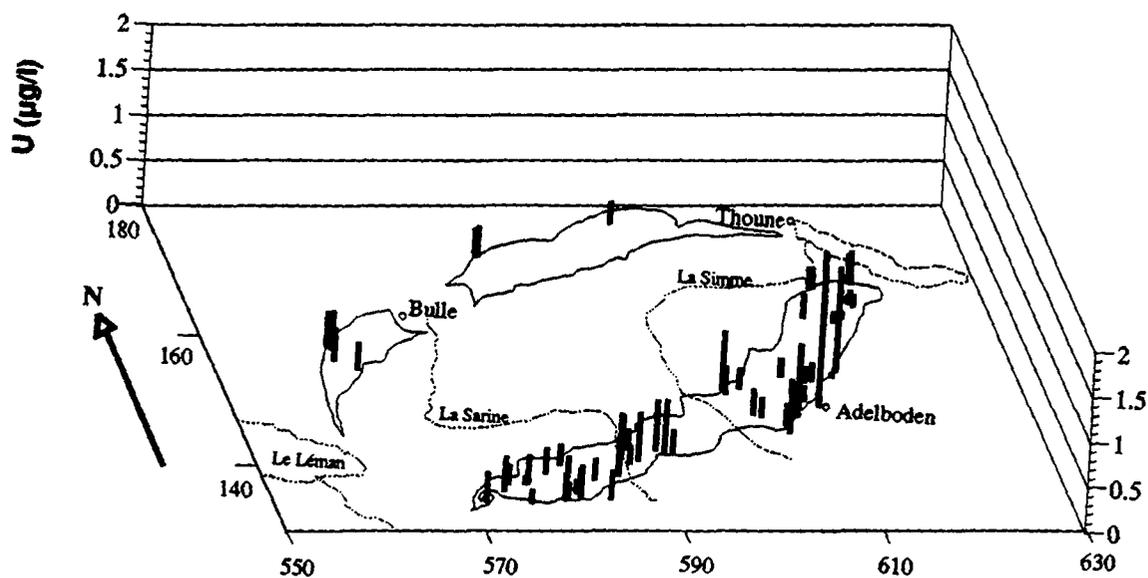


Fig. 6.52 Répartition des concentrations en uranium des eaux des sources.

6.2.27 Le chrome (Cr en $\mu\text{g/l}$)

Le chrome s'est révélé être une des cinq traces minérales (avec l'uranium, le chrome, le vanadium, le cobalt et le lanthane) à plus faible concentration ($< 0.5 \mu\text{g/l}$). Aussi, quelques considérations préliminaires doivent être établies :

- Le nombre d'échantillons considérés a été réduit de 76 à 75, car une source a présenté une anomalie due à la tuyauterie (cf. incidences extra-géologiques, chapitre 4.5.3).
- Par ailleurs, le chrome peut aussi être libéré par différents types de sols sujets à une lixiviation lente et indépendante du pH (ATTEIA 1992).
- Néanmoins, les concentrations les plus élevées en chrome dans les eaux étudiées se trouvent là où les écoulements sont les plus profonds (tunnel d'Arnon et Linter tunnel).
- Des concentrations relativement importantes en chrome ont été détectées dans les lixiviats de roches traversées par les eaux souterraines. (cf. chap. 8.3.5). Une importante composante venant de l'aquifère peut ainsi être retenue.

Pour la nappe du Niesen, une moyenne de $0.28 \mu\text{g/l}$ avec des extrêmes de 0 et $1.42 \mu\text{g/l}$ a été enregistrée dans 65 sources. La source N° 67 (particulière) située à l'extrême nord-est de la nappe a présenté une anomalie relativement élevée ($6.6 \mu\text{g/l}$) qui n'est pas prise en compte dans le traitement statistique descriptif, afin de mieux apprécier le reste des valeurs.

L'histogramme des fréquences (fig. 6.53) manifeste une courbe du type χ^2 , distribuée ainsi :

- 55 échantillons (85 %) présentent les concentrations les plus faibles ($< 0.5 \mu\text{g/l}$). Elles appartiennent à des sources réparties indistinctement dans toute la nappe (fig. 6.54).
- 10 sources indiquent des concentrations plus élevées, entre 0.5 et $1.5 \mu\text{g/l}$. Elles sont situées soit vers les limites de la nappe, soit dans le tunnel d'Arnon, là où les écoulements souterrains sont plus profonds (cf. fig. 6.54).

Comme référence, citons MANDIA (1991) qui indique aussi des très basses concentrations en chrome (moy. $0.3 \mu\text{g/l}$) pour les eaux évaporitiques du Trias.

En conclusion, les eaux souterraines des flyschs du Niesen présentent normalement des concentrations en chrome inférieures à $0.5 \mu\text{g/l}$. Si les écoulements sont profonds, ces valeurs peuvent atteindre jusqu'à $1.5 \mu\text{g/l}$. Les sources à influence extra-flysch de type évaporitique n'ont pas fourni des teneurs au-delà de ces chiffres. La source particulière N°67, à influence extra-flysch, présente la plus haute anomalie en chrome ($6.6 \mu\text{g/l}$).

Les points d'eau de la nappe du Gurnigel ont des concentrations en chrome de 0.1 à $0.65 \mu\text{g/l}$, donc du même ordre de grandeur que pour les flyschs du Niesen.

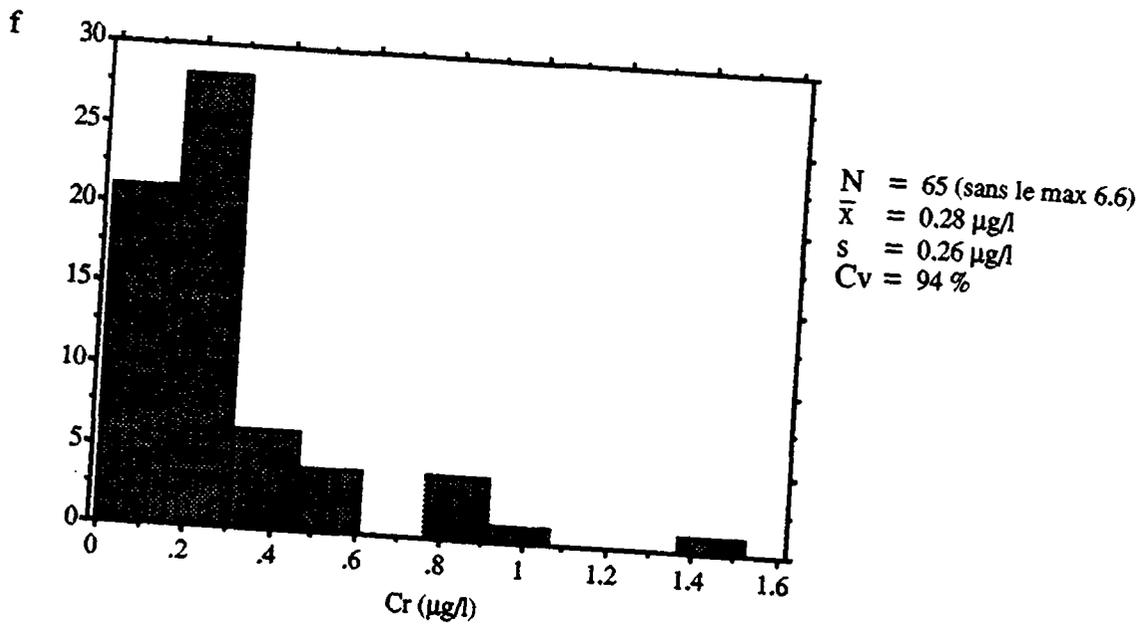


Fig. 6.53 Histogramme des fréquences des concentrations en chrome des eaux des sources de la nappe du Niesen.

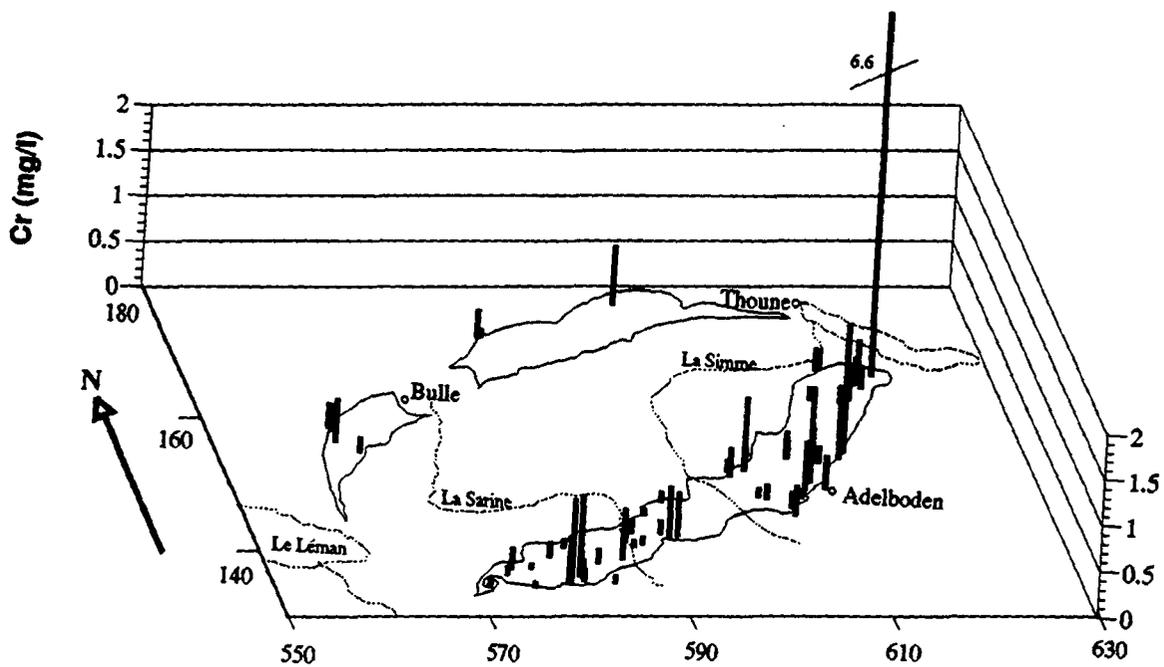


Fig. 6.54 Répartition des concentrations en chrome des eaux des sources.

6.2.28 Le vanadium (V en $\mu\text{g/l}$)

La présence de vanadium est très limitée dans les eaux souterraines ($< 0.5 \mu\text{g/l}$). Il faut prendre en compte quelques considérations préliminaires :

- Le nombre d'échantillons retenus a été réduit de 76 à 75, car une source a présenté une anomalie due à la tuyauterie (cf. incidences extra-géologiques, chapitre 4.5.3).
- Quant à son origine naturelle, le vanadium peut aussi être libéré par différents types de sols sujets à une lixiviation lente et indépendante du pH (ATTEIA, 1992).
- Néanmoins, des concentrations similaires de vanadium ont été détectées dans les lixiviats des roches traversées, ce qui nous permet de supposer une origine rocheuse également.

Les 67 sources de la nappe du Niesen ont des valeurs voisines de $0.28 \mu\text{g/l}$ avec des extrêmes de 0 et $0.7 \mu\text{g/l}$. Ces très faibles teneurs sont généralisées à l'ensemble de la nappe et définissent une répartition assez homogène (fig. 6.56).

Même s'il n'y a pas une grande différence de concentrations, deux groupes ont pu être dégagés de l'histogramme des fréquences (fig. 6.55) :

- 63 échantillons (94 %) présentent les concentrations les plus faibles ($< 0.5 \mu\text{g/l}$). Celles-ci correspondent à des sources réparties indistinctement dans toute la nappe (fig. 6.56). Les eaux des flyschs à écoulements profonds (tunnel d'Arnon), n'ont pas présenté d'anomalies.
- Les 4 sources restantes, situées vers les limites de la nappe, donc sous l'influence des terrains extra-flysch, contiennent entre 0.5 et $0.7 \mu\text{g/l}$ de vanadium.

Comme référence, citons MANDIA (1991) qui a aussi indiqué de très basses concentrations en vanadium (moy. $0.5 \mu\text{g/l}$) pour les eaux évaporitiques du Trias.

En conclusion, les eaux souterraines des flyschs du Niesen présentent normalement des concentrations en vanadium inférieures à $0.5 \mu\text{g/l}$, même si les écoulements sont profonds. Les sources à influence extra-flysch évaporitique ont fourni des teneurs entre 0.5 et $0.6 \mu\text{g/l}$. La source particulière N°67, à influence extra-flysch, possède la plus haute anomalie de vanadium avec $0.7 \mu\text{g/l}$.

Les points d'eau de la nappe du Gurnigel livrent des concentrations en vanadium entre 0.36 et $0.53 \mu\text{g/l}$, donc dans la fourchette de celles accordées pour les flyschs du Niesen.

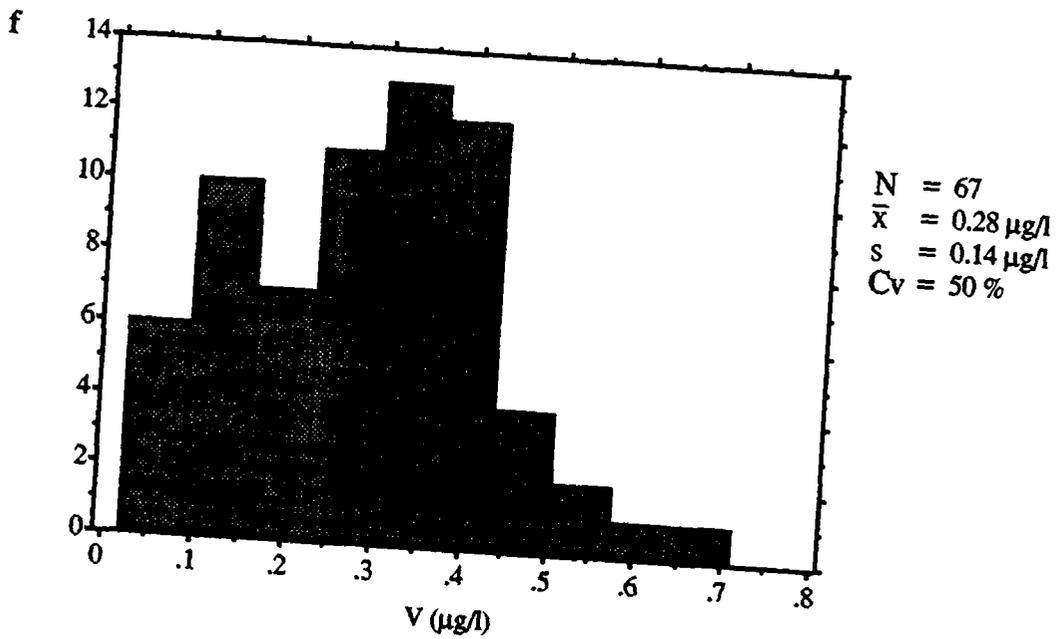


Fig. 6.55 Histogramme des fréquences des concentrations en vanadium des eaux des sources de la nappe du Niesen.

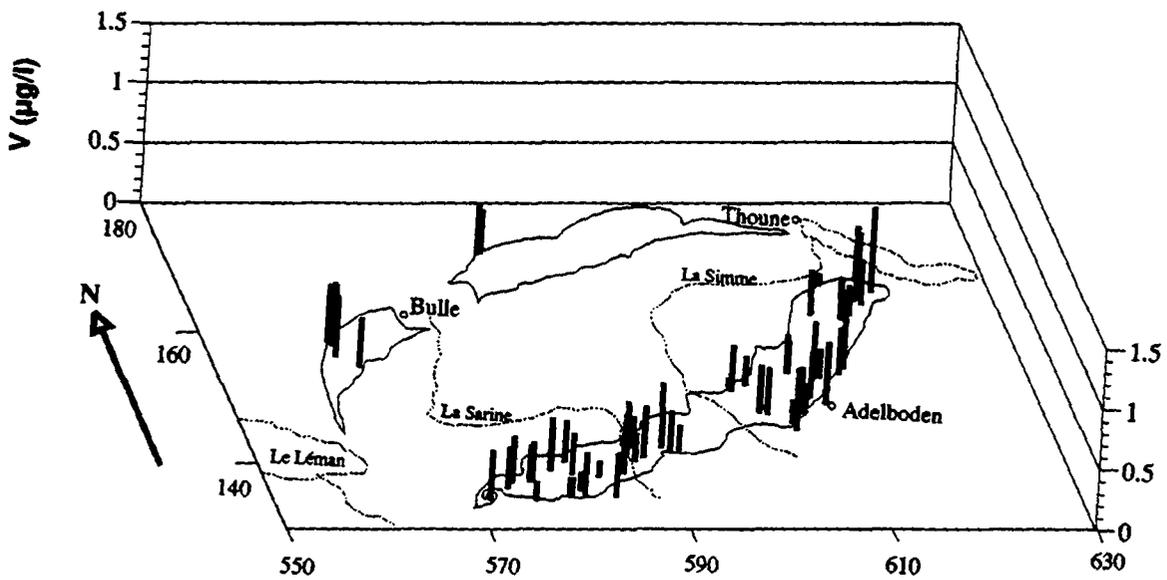


Fig. 6.56 Répartition des concentrations en vanadium des eaux des sources.

6.2.29 Le cobalt (Co en $\mu\text{g/l}$)

Du point de vue de la concentration, le cobalt est l'avant-dernier élément en traces saisi dans le spectre des eaux analysées par l'ICP-MS.

Pour la nappe du Niesen, une concentration moyenne de $0.27 \mu\text{g/l}$ comprise entre 0 et $0.9 \mu\text{g/l}$ a été décelée. Ces très faibles teneurs sont généralisées à l'ensemble de la nappe (fig. 6.58).

Malgré la faible différence des concentrations, l'histogramme des fréquences (fig. 6. 57) laisse apparaître deux groupes :

- 65 échantillons (97 %) présentent les concentrations les plus faibles ($< 0.6 \mu\text{g/l}$). Il s'agit de sources réparties indistinctement dans toute la nappe (fig. 6.58). Les eaux des flyschs à écoulements profonds (tunnel d'Arnon), n'ont pas présenté d'anomalies.
- Les 2 sources restantes contiennent entre 0.77 et $0.9 \mu\text{g/l}$. Elles sont situées à la limite de la nappe, du côté d'Adelboden. Une influence de cet ordre de grandeur due aux terrains extra-flysch peut donc être retenue.

En conclusion, les eaux souterraines des flyschs du Niesen présentent des concentrations en cobalt inférieures à $0.6 \mu\text{g/l}$, même si les écoulements sont profonds. Les sources à influence extra-flysch évaporitique peuvent atteindre $0.9 \mu\text{g/l}$.

Les points d'eau de la nappe du Gurnigel manifestent des concentrations entre 0.27 et $0.67 \mu\text{g/l}$, donc assez similaires à celles accordées aux flyschs du Niesen.

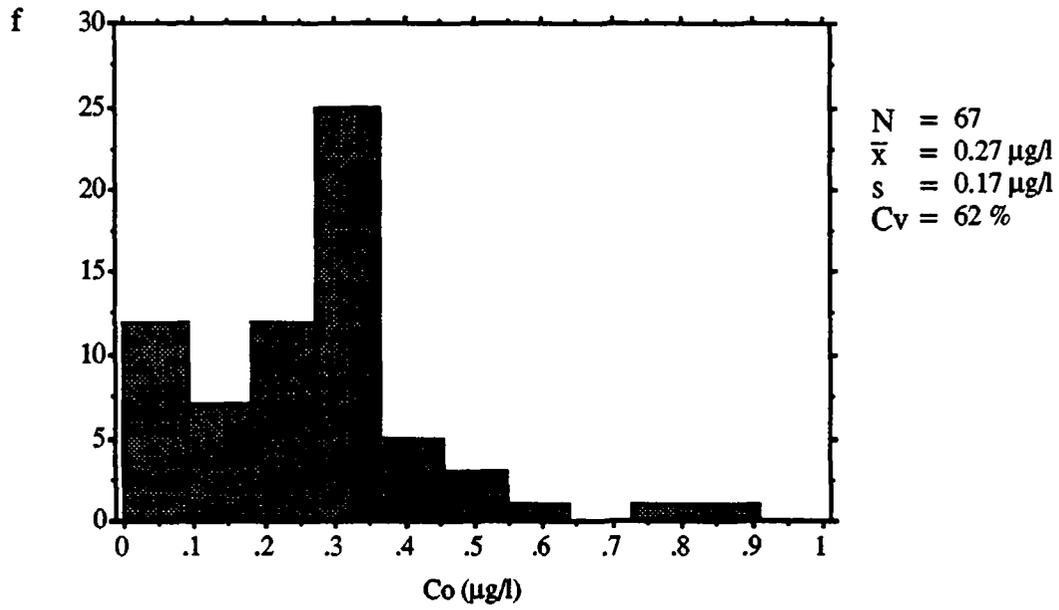


Fig. 6.57 Histogramme des fréquences des concentrations en cobalt des eaux des sources de la nappe du Niesen.

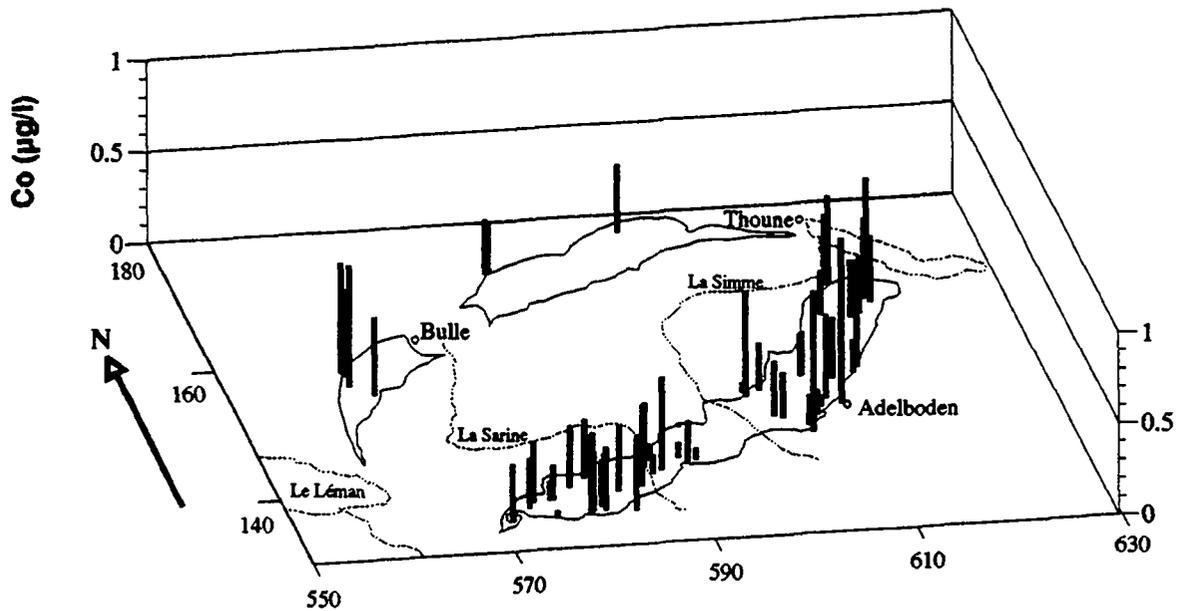


Fig. 6.58 Répartition des concentrations en cobalt des eaux des sources.

6.2.30 Le lanthane (La en $\mu\text{g/l}$) "*traitement descriptif*"

Les spectres résultant des analyses par ICP-MS ont révélé le lanthane comme étant l'élément à plus faible concentration des eaux souterraines analysées (de l'ordre de $0.1 \mu\text{g/l}$). Son seuil de détection est de $0.1 \mu\text{g/l}$ (cf. tabl. 4.5); les concentrations en lanthane ne peuvent donc être considérées que comme ordre de grandeur.

Pour la nappe du Niesen, une valeur moyenne de $0.06 \mu\text{g/l}$ et variant entre 0 et $0.7 \mu\text{g/l}$ a été obtenue.

L'histogramme des fréquences (fig. 6.59) forme une courbe à décroissance exponentielle et laisse dégager :

- Un grand groupe de 40 échantillons (60 % des sources) avec moins de $0.07 \mu\text{g/l}$ de lanthane.
- 26 échantillons (39 %) exposent des concentrations entre 0.07 et $0.23 \mu\text{g/l}$.
- Une anomalie de $0.7 \mu\text{g/l}$ est présentée par la source N°67 à influence extra-flysch particulière (fig. 6.60).

Malgré les très faibles concentrations en lanthane, on arrive à préciser les variations de cet élément dans le contexte de la nappe du Niesen (fig. 6.60) :

- Les très faibles concentrations sont localisées surtout dans les secteurs central et nord-est de la nappe, à l'exception de la grand anomalie de la source N°67 située à l'extrême nord-est.
- Dans le secteur sud-ouest, des teneurs moins faibles peuvent être constatées. On remarque un comportement analogue pour le baryum (cf. chap. 6.2.14).
- Les sources significatives de l'influence des terrains extra-flysch de type évaporitique (vers les limites de la nappe) sont presque dépourvues de lanthane.

En conclusion, bien que les concentrations en lanthane soient infimes, des valeurs jusqu'à $0.3 \mu\text{g/l}$ peuvent être trouvées dans les eaux souterraines des flyschs du Niesen, surtout dans le secteur sud-ouest. Les sources influencées par les terrains extra-flysch de type évaporitique sont quasiment exemptes de lanthane. L'émergence N° 67 à influence extra-flysch particulière présente la seule anomalie ($0.7 \mu\text{g/l}$).

Les points d'eau de la nappe du Gurnigel livrent des concentrations entre 0.10 et $0.22 \mu\text{g/l}$; celles-ci sont donc assez similaires aux concentrations accordées aux flyschs du Niesen.

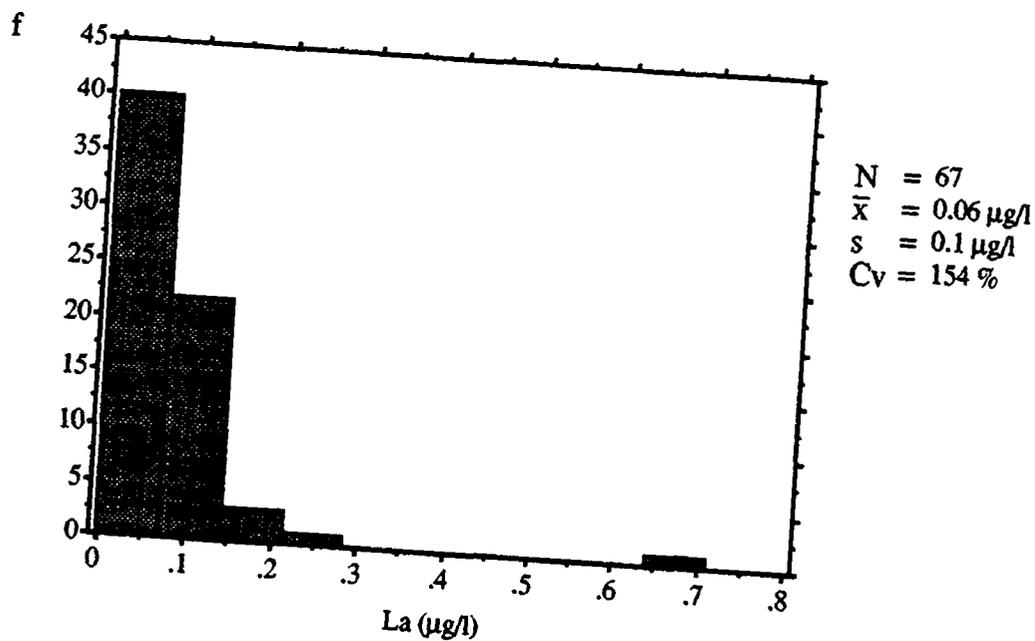


Fig. 6.59 Histogramme des fréquences des concentrations en lanthane des eaux des sources de la nappe du Niesen.

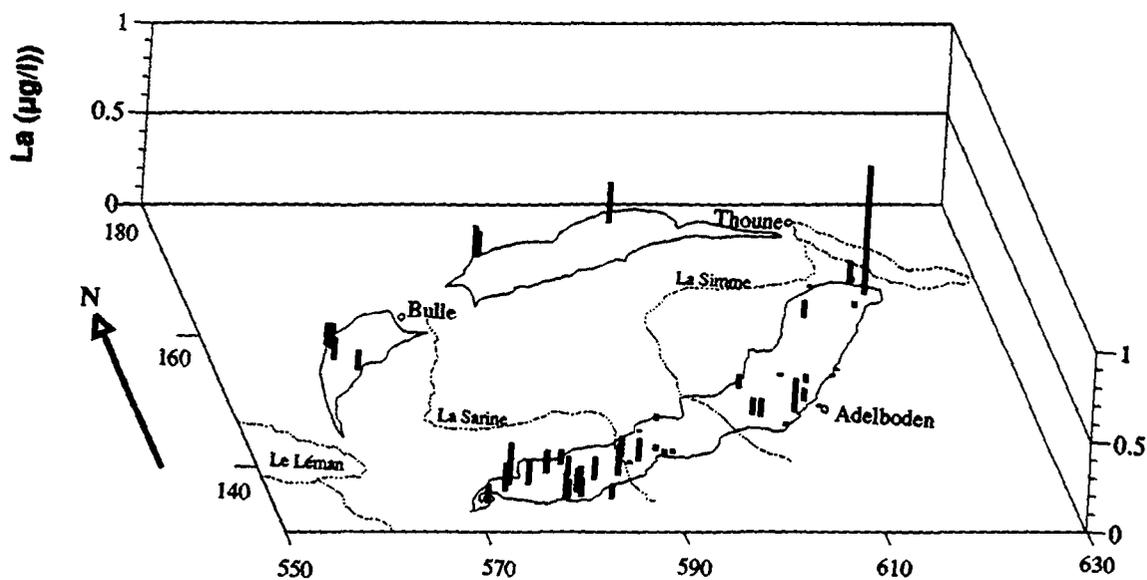


Fig. 6.60 Répartition des concentrations en lanthane des eaux des sources.

6.2.31 Résumé de la caractérisation hydrochimique régionale des eaux souterraines

Nous présentons ici un résumé de la caractérisation physique et chimique des eaux souterraines de la nappe du Niesen et du Gurnigel traitée dans les chapitres 6.2.1 à 6.2.30. Les cartes à répartition spatiale et l'étude statistique descriptive des paramètres ont permis de définir la caractérisation hydrochimique régionale des eaux souterraines.

Vu qu'il s'agit d'une unité tectonique régionale, ces cartes ont aussi été très utiles pour déterminer l'incidence des terrains extra-flysch situés vers les limites tectoniques complexes de la nappe du Niesen ou dans les formations environnantes. Ainsi, les sources qui subissent l'influence des terrains extra-flysch montrent clairement leurs anomalies sur les cartes de paramètres.

De cette manière, trois types d'influence extra-flysch sur les sources ont été détectés :

- Deux sources (N° 29 et 51, cf. fig. 4.2), situées vers le chevauchement intranappe dans le côté SE de la nappe du Niesen, subissent une influence modérée des terrains évaporitiques du Trias. Ces exutoires sont également nommés à influence extra-flysch des limites de la nappe ou des limites intranappe. Leurs anomalies ont aussi servi à déceler le degré d'influence des terrains extra-flysch sur des exutoires se situant à l'intérieur de la nappe.
- Trois sources (N° 18, 41 et 47, cf. fig. 4.2) sont sises dans la périphérie SE de la nappe du Niesen. Leurs anomalies chimiques, parfois proches des concentrations des eaux des aquifères évaporitiques du Trias (MANDIA 1991), indiquent l'influence maximale de ces terrains sur les écoulements souterrains dans la nappe du Niesen. Par ailleurs, elles délimitent clairement les aquifères-types régionaux dans ce secteur, un des buts du projet AQUITYP.
- Une source (N° 67), localisée à l'extrême NE de la nappe du Niesen, présente l'influence la plus particulière des terrains extra-flysch. Elle a de très fortes anomalies chimiques, complètement différentes de celles des sources précitées. Sa teneur modérée en sulfates la différencie aussi des autres sources à influence évaporitique de la nappe du Niesen.

Afin d'obtenir une vue d'ensemble de la caractérisation hydrochimique régionale des eaux des flyschs et de l'influence extra-flysch, nous présentons ci-dessous une compilation des résultats des chapitres précédents (tabl. 6.1). Les valeurs minima-maxima des eaux des flyschs sont comparées avec les anomalies maxima qui peuvent atteindre les sources à influence extra-flysch. La figure 6.61 illustre ces différences.

Paramètres	Sources des flyschs du Niesen		Valeurs maxima des sources à influence extra-flysch		
	(y c. les sources du tunnel d'Arnon)		Type évaporitique-triasique	Source N° 67	
	min.	max.	Limite intranappe	Périphérie de la nappe	"particulière"
Met m (mg/l)					
TSD	200	350	683	1888	1213
HCO3	145	255	294.9	279	670.6
SO4	2.3	30	227	1027	190
Cl	0.1	3.5	3.1	5.8	10
Ca	35	100	163.3	577.2	4.2
Mg	1.2	23.5	28.1	27.8	3.06
Na	0.2	10.2	7.5	7.1	330.6
Sr	0.1	3.11	1.99	6.93	0.31
K	0.1	2.88	3.18	1.33	0.98
Si	0.8	4.6	4.6	2.8	3.8
Traces (µg/l)					
Ba	4	112	20	14	35
(Fe)	1	49.8	39.8	32.2	283.9
B	1.4	59.5	17	13.8	950.2
Li	0.5	28.6	10.1	11.5	277.2
(Br)	1	8.2	13.4	3.9	27.3
(Zn)	0	7.1	3.5	2.1	0.5
Rb	0.3	5.8	10.6	13.8	2.7
(Al)	0.1	3.9	4.3	0.3	2
Ni	0	4	1.2	3	1.5
(I)	0.5	2.8	1.4	1.4	386.9
Mn	0	4.23	4.68	0.32	0
Cu	0	3.1	1.9	2.3	2.2
U	0	1	1.16	1.72	0
Cr	0	0.5	1.42	0.37	6.6
V	0	0.5	0.58	0.51	0.7
Co	0	0.6	0.27	0.9	0
(La)	0	0.3	0.03	0.08	0.7

Tableau 6.1 Récapitulation des réponses chimiques des eaux souterraines des flyschs de la nappe tectonique du Niesen et des terrains à influence extra-flysch.

Commentaire de la fig. 6.61

Toutes les sources à influence extra-flysch atteignent des teneurs en sels dissous bien supérieures à celles des sources du Niesen (s.s.). Celles des limites intranappe ont des teneurs deux fois plus élevées. La source N° 67 est environ quatre fois plus chargée et celles de la périphérie atteignent jusqu'à six fois la charge des eaux des flyschs.

Les eaux des flyschs du Niesen comportent aussi les sources du tunnel d'Arnon, qui ont fourni les particularités des eaux souterraines à écoulement plus profond dans les flyschs.

Les sources de la périphérie se caractérisent par leurs très fortes anomalies en sulfates (1027 mg/l) et en calcium (577 mg/l), typiques des eaux évaporitiques du Trias (MANDIA 1991). D'autres anomalies en strontium, en rubidium, en uranium et en cobalt peuvent également être relevées, ce qui détermine leur différenciation d'avec les eaux souterraines du flysch du Niesen (s.s.).

La source N° 67 est effectivement particulière. Son anomalie modérée en sulfates (190 mg/l) et sa charge dérisoire en calcium (4.2 mg/l) l'opposent au reste des sources à influence évaporitique du Trias. Par contre, elle est très riche en sodium (331 mg/l), en fer (284 µg/l), en bore (950 µg/l), en lithium (278 µg/l), en iode (387 µg/l) et en chrome (6.6 µg/l), par rapport à toutes les autres sources. Des anomalies en bicarbonates (671 mg/l) et en brome (27 µg/l) peuvent aussi être relevées.

De même les sources des limites intranappe atteignent effectivement, pour certains paramètres, des concentrations intermédiaires entre les eaux à forte incidence des terrains extra-flysch et les eaux des flyschs du Niesen. C'est le cas des concentrations en sulfates (295 mg/l), en calcium (163 mg/l), en brome (13 µg/l), en rubidium (11 µg/l) et en chrome (1.4 µg/l). Le reste des concentrations correspond aux fourchettes de valeurs rencontrées dans les sources des flyschs. Ce groupe identifie ainsi les incidences de la zone de mélange des eaux souterraines sise entre les flyschs du Niesen et les terrains triasiques de la nappe du Niesen ou de l'Ultrahelvétique.

En conclusion, l'analyse des réponses physiques et chimiques des eaux souterraines a permis la différenciation et la typologie hydrochimique régionale des écoulements souterrains des flyschs, ce qui est l'un des buts du projet AQUITYP. Ainsi le flysch du Niesen ressort comme une unité à caractéristiques hydrochimiques propres qui le distinguent des eaux évaporitiques du Trias environnant. Entre les deux, une zone tampon de mélange des eaux s'installe vers la limite intranappe du flysch du Niesen.

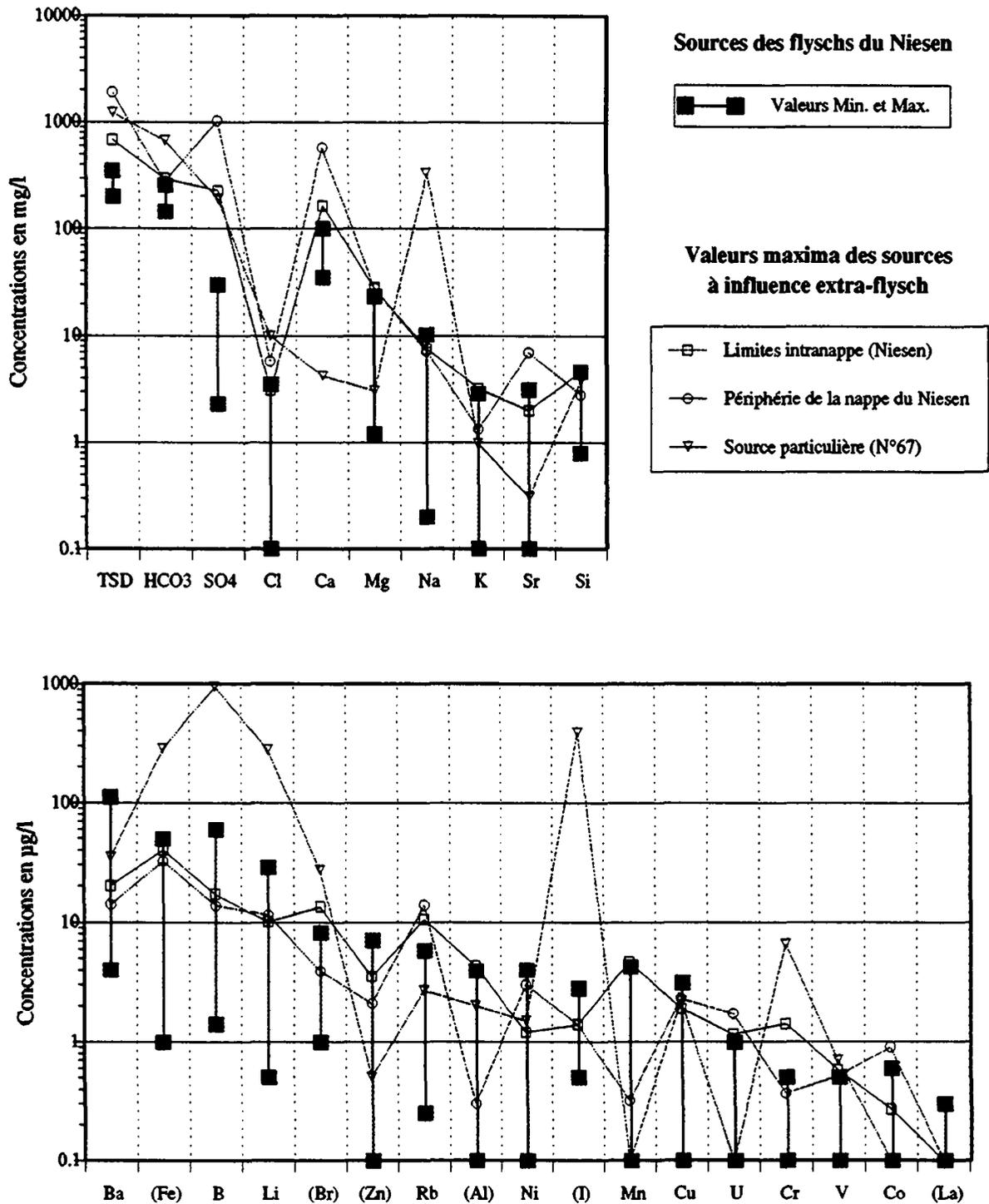


Fig. 6.61 Récapitulation des réponses chimiques des eaux souterraines des flyschs de la nappe tectonique du Niesen et des terrains à influence extra-flysch.

6.3 VARIATION TEMPORELLE DES PARAMÈTRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES (RÉSEAU N° 3)

Dans le but de présenter le régime hydrologique des exutoires du flysch du Niesen, ainsi que le comportement des différents paramètres physiques et chimiques au cours du temps, nous avons retenu 6 exutoires appartenant au réseau d'observation temporelle N° 3.

Cinq exutoires sont repartis dans la nappe du Niesen et un dans la nappe du Gurnigel. Ils ont été suivis et échantillonnés mensuellement pendant deux années, de l'automne 88 à décembre 90. A ce groupe s'ajoute l'exutoire Lioson-AQUITYP, qui fait le lien avec ce projet; ses données ont été dépouillées entre 1981 et 1989.

Les exutoires considérés ici correspondent aussi aux principales classes chimiques (type JÄCKLI 1970) établies pour les eaux souterraines de la nappe du Niesen (cf. tabl. 7.1). Seules les eaux à composant sodique n'ont pas pu être représentées, comme dans le cas des sources du tunnel d'Arnon, car la galerie est vidée tous les quatre ans. Les types d'eau et les sources retenues sont :

- Eaux bicarbonatées calciques : exutoires "Les Becques" (N°6 ou VB) et "Treyvaux - Joux gauche" (N°74 ou GJ). Ce dernier fait partie de la nappe du Gurnigel.
- Eaux bicarbonatées calciques magnésiennes : exutoires "Lioson" (N°5 ou LLI) et "Albristhübel A" (N°36 ou SL).
- Eaux bicarbonatées calciques sulfatées : exutoire "Stigelbach" (N°45 ou AS).
- Eaux bicarbonatées calciques sulfatées magnésiennes : exutoires "Mani" (N°59 ou WM) et Lädiwald (N°24 ou TL).

La localisation exacte de ces sources a déjà été précisée dans le chapitre 4 (cf. fig. 4.2 et tabl. 4.3). Les données physiques et chimiques obtenues sont représentées graphiquement dans les figures 6.62 à 6.64 et dans l'annexe 3.

Les régimes hydrologiques ont été obtenus dans la plupart des cas en installant des limnigraphes ou des enregistreurs électroniques MADD (cf. aussi équipement des sources chap. 4.4.2). Les valeurs pluviométriques et celles de la température de l'air correspondent aux stations fédérales les plus proches des exutoires (pour plus de précisions cf. chap. 4.3.2). Les noms de ces stations sont également indiqués sur les graphiques.

Régimes hydrologiques

Les débits maxima des sources du réseau d'observation temporelle (N°3) sont de l'ordre de 5000 l/mn.

La source Lädiwald est une des sources qui atteignent cette limite. Ses fluctuations de débit peuvent être considérées en deux parties pour la durée d'enregistrement : l'une entre juin 89 et février 90 avec des variations de 1300 à 2600 l/mn, donc d'un facteur 2; l'autre, pendant le

reste de l'année 1990, année qui se distingue nettement car les précipitations ont été plus importantes. Dans cette période les fluctuations varient entre 2000 et 5000 l/mn, donc d'un facteur 2.5 (fig. 6.62). Cet exutoire est situé dans le secteur central de la nappe du Niesen. Son bassin d'alimentation a comme substratum le flysch de Frutigen et celui du Niesenkulm, à alternances surtout de conglomérats, pélites et calcaire.

La source Mani suit en importance avec un débit de pointe de 3700 l/mn et des fluctuations entre 800 et 2200 l/mn, donc d'un facteur 2.8 pour la première période et entre 1300 et 3700 l/mn (facteur 2.8) pour la deuxième (fig. 6.63). Cet exutoire situé vers la limite nord-est de la nappe du Niesen a comme bassin d'alimentation les faciès calcaires du flysch du Niesenkulm et les faciès conglomératiques et gréseux calcaires du flysch de Frutigen.

Les sources les Becques (fig. 6.64) et Albristhübel (annexe 3) présentent des fluctuations entre 250 et 1500 l/mn. Ces variations individuelles sont de l'ordre d'un facteur 3. L'émergence Stigelbach (annexe 3) est la seule source du réseau temporel à très faible débit. Elle varie entre 4 et 20 l/mn avec également des fluctuations d'un facteur 3 par période hydrologique.

En synthèse, les régimes hydrologiques étudiés indiquent des fluctuations maxima du débit de l'ordre d'un facteur 3. Ces fluctuations relativement faibles correspondent aux écoulements dans un milieu à porosité de fissures comprenant le micro-karst, qui servirait de réservoir. Ce fait explique par ailleurs les débits d'étiage de l'ordre de 1000 à 1500 l/mn des exutoires les plus importants. Comme référence pour les sources typiquement karstiques, citons la source de l'Areuse qui présente de très grandes fluctuations, comme par exemple entre juin et juillet 1963, lorsque son débit a varié d'un facteur 40 (BURGER 1983). Ainsi une nette différence entre les sources typiquement karstiques et celles du flysch du Niesen peut être établie. En effet, le calcaire du Niesen (p. ex. celui du Niesenkulm), à la différence du karst, est formé de bancs décimétriques de calcaire avec alternances irrégulières de turbidites, pélites ou conglomérats. Ceci limite la continuité régionale du réseau karstique.

En ce qui concerne la source de Lioson du projet AQUITYP, son débit temporel varie entre 500 et 5000 l/mn (annexe 3). Ce fait ainsi que sa liaison avec le lac Lioson ont déjà été mis en évidence dans le chapitre 5.2.A.

Quant à l'exutoire dans le flysch du Gurnigel, il a un débit moyen de 700 l/mn avec un facteur de variation de 2.5 par période hydrologique (annexe 3). Ce facteur, légèrement inférieur à celui du flysch du Niesen, peut être expliqué par la perméabilité moins élevée des faciès grésocalcaires du Gurnigel.

Par ailleurs, nous aurions pu envisager la présentation globale des paramètres physiques et chimiques de toutes les sources du réseau N°1 (à répartition spatiale) en fonction du débit. Ce type de représentation n'a pas montré d'intérêt en raison de l'hétérogénéité hydrogéologique de chaque exutoire étudié. Il n'y a pas, de ce point de vue, de caractéristiques communes à l'ensemble des aquifères. Ceux-ci ont un comportement singulier déjà développé dans le chapitre 5 et ils ne font pas partie d'un seul aquifère régional, mais d'aquifères isolés, là où les conditions hydrogéologiques et tectoniques permettent les écoulements souterrains.

Régimes thermiques

L'étude des variations temporelles de la température des eaux a révélé d'une manière générale une très grande stabilité de ce paramètre (fig. 6.62 à 6.64 et annexe 3).

L'émergence à température la plus élevée est Mani, localisée à 660 m d'altitude; sa température est quasi constante à 8°C pendant les deux années de mesures (fig. 6.63). Les autres sources ont des valeurs entre 4 et 8°C. Individuellement, elles sont thermiquement stables avec des variations inférieures à 1°C. Ceci indique que les eaux souterraines des flyschs ont eu généralement le temps d'atteindre un équilibre thermique lors de leur circulation.

Quant à la source de Lioson du projet AQUITYP, elle est la plus froide avec des températures variant entre 3 et 3.8°C. Ces valeurs ont déjà été considérées dans le chapitre 5.2.A lors de la discussion sur les traceurs artificiels.

Régimes géochimiques

Les variations de la minéralisation dépendent en règle générale de celles du débit : une augmentation de celui-ci entraîne une baisse de la teneur en sels dissous dans les eaux. Cependant, nous notons globalement une certaine stabilité des réponses chimiques dans les eaux au cours du temps. Ces constatations basées sur les régimes géochimiques des sources sont détaillées ci-dessous.

Comme il a déjà été indiqué, les sept sources à régime temporel font partie des principaux faciès hydrochimiques détaillés dans le chapitre 7.1.1. Ces faciès varient aussi en fonction de leur contenu chimique plus ou moins important. Nous tenons compte également de ces faciès dans la description des régimes géochimiques des eaux.

Les exutoires Les Becques et Treyvaux - Joux gauche font partie du faciès hydrochimique bicarbonaté calcique (N°1, cf. chap. 7.1.1) des eaux du flysch (s.s.). La source des Becques (VB) est située dans la nappe du Niesen. Son TSD (total des sels dissous) varie entre 180 et 320 mg/l (fig. 6.64). Une diminution de la charge chimique globale et des composés majeurs peut être relevée en hautes eaux. Les composés mineurs et en trace (annexe 3) ont des fluctuations moins importantes. Ces faits peuvent être expliqués d'un côté par l'alimentation rapide de cette source, mise en évidence dans le chapitre 5.2-B, et d'un autre côté par l'existence du réservoir micro-karstique qui fournit les débits à l'étiage et maintient également la charge chimique de l'eau.

La source Treyvaux (GJ) est localisée dans la nappe du Gurnigel. Ses fluctuations de débit sont notoires et oscillent généralement entre 500 et 1300 l/mn (annexe 3). Cependant, les régimes géochimiques des composés majeurs, mineurs et en traces se sont révélés très constants, à l'exception de quelques variations ponctuelles. Ces régimes nous indiquent l'importance du réservoir aquifère du flysch grésocalcaire du Gurnigel qui permet les débits à l'étiage et la continuité du chimisme dans ce cas.

L'exutoire Albristhübel (SL), situé dans le secteur central de la nappe du Niesen, fait partie du faciès hydrochimique bicarbonaté calcique magnésien (N°2, cf. chap. 7.1.1) des eaux du flysch du Niesen (s.s.). Son chimisme peut être considéré assez constant (annexe 3). Le TSD présente une variation maximale entre 250 et 300 mg/l qui se reflète aussi dans les composés majeurs. Les composés mineurs et en traces suivent en général la même règle. Les quelques augmentations ponctuelles du chimisme sont liées à la période des basses eaux.

L'exutoire Stigelbach (AS) comporte le faciès hydrochimique N°4A des eaux bicarbonatées calciques sulfatées (cf. tabl. 7.1). Il s'agit d'une eau souterraine du flysch du Niesen subissant une incidence faible des terrains extra-flysch. Son TSD tourne autour de 420 mg/l avec des variations de 30 mg/l. Ces variations modérées peuvent aussi être remarquées dans les autres composés chimiques (cf. annexe 3). Quelques anomalies lors de la campagne de mai 89 sont liées à des pollutions extra-géologiques, car le jour du prélèvement, le captage de la source avait été dérangé.

Les exutoires Mani (WM) et Lädiwald (TL) font partie du faciès hydrochimique bicarbonaté calcique sulfaté magnésien (cf. tabl. 7.1). Il s'agit des eaux souterraines du flysch du Niesen qui ont également une incidence faible des terrains extra-flysch (cf. fig. 7.2).

Pour la période 89-90, la source Mani présente un TSD quasi stable autour de 340 mg/l; le TSD atteint les 400 mg/l lors de l'étiage d'hiver (janvier 90, cf. fig. 6.63). Pour l'année 90 (plus pluvieuse) il a une variabilité entre 340 et 400 mg/l; une seule fois le TSD est descendu à 270 mg/l, ce qui correspond aux crues du printemps (avril 90). Les autres composés suivent la même logique avec des augmentations du chimisme lors de la saison des basses eaux.

L'exutoire Lädiwald, quant à lui, présente des variations du TSD entre 350 et 500 mg/l pour les périodes 1989 et 1990 (fig. 6.62). Aussi une augmentation du chimisme général lors de la période des basses eaux et vice versa peut être remarquée.

On peut donc conclure que les variations de la minéralisation dépendent en règle générale de celles du débit. Une augmentation du débit entraîne une baisse modérée du chimisme des eaux. Néanmoins, une composition chimique de base est maintenue, qui peut être expliquée par l'existence d'un réservoir-aquifère (micro-karstique) dans les flyschs, réservoir déjà évoqué comme une des caractéristiques des aquifères du flysch dans le chapitre 5.2. Quant aux sources à charge chimique plus élevées, elles répondent à un cheminement profond et lent des écoulements souterrains.

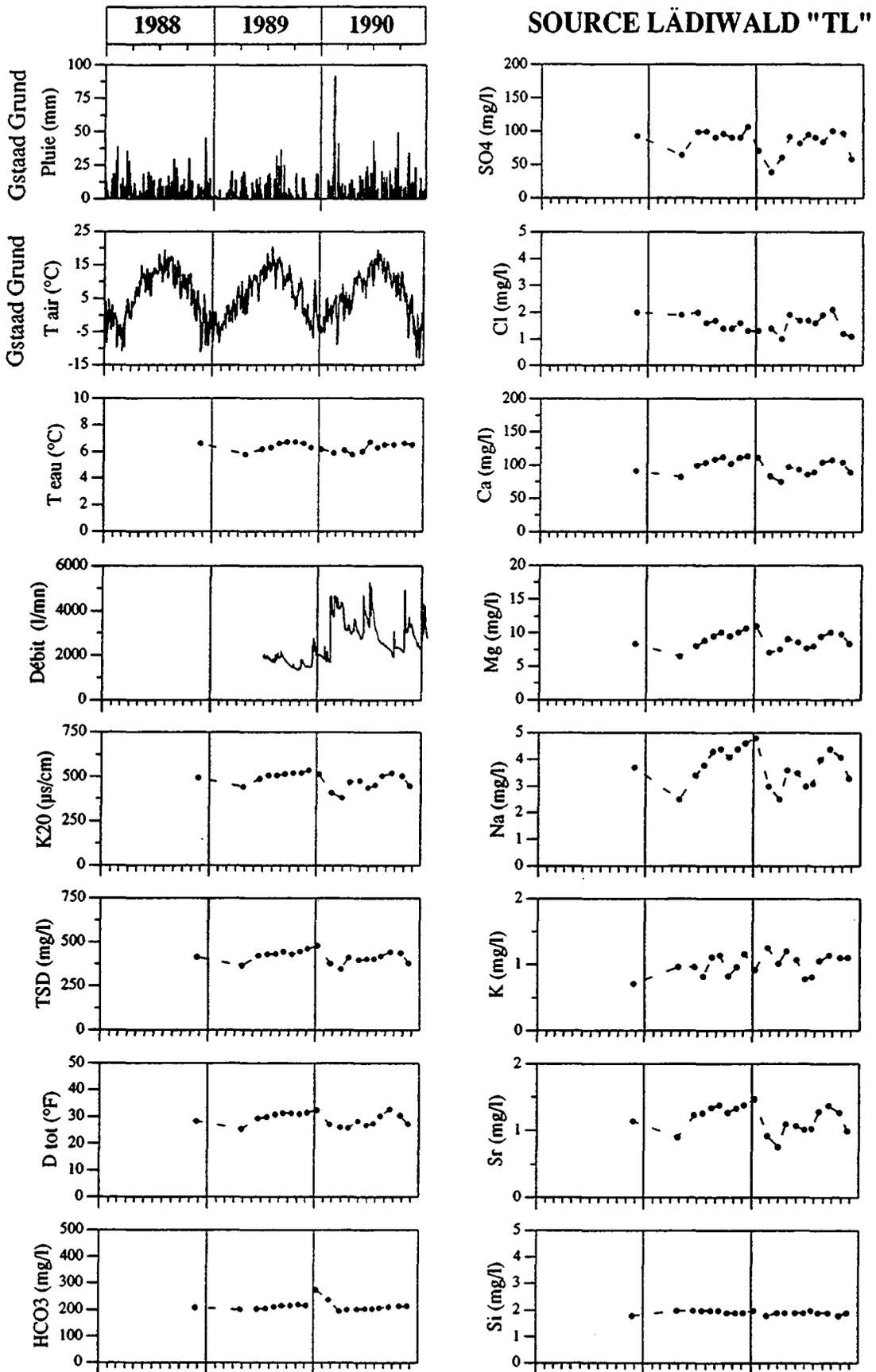


Fig. 6.62 Variations temporelles des caractéristiques physiques et chimiques de la source Lädiwald située dans le secteur central de la nappe tectonique du Niesen

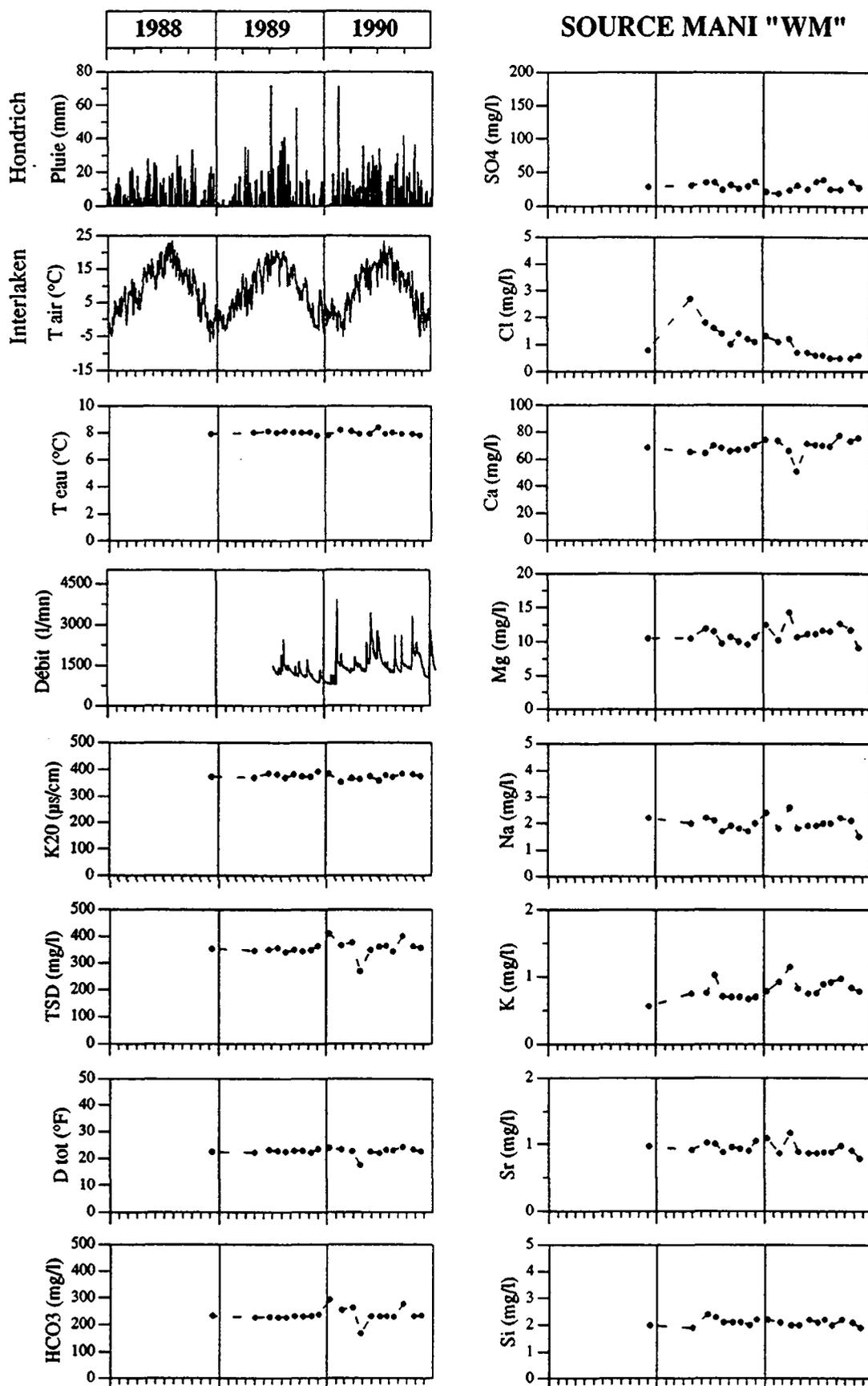


Fig. 6.63 Variations temporelles des caractéristiques physiques et chimiques de la source Mani située dans le secteur NE de la nappe tectonique du Niesen

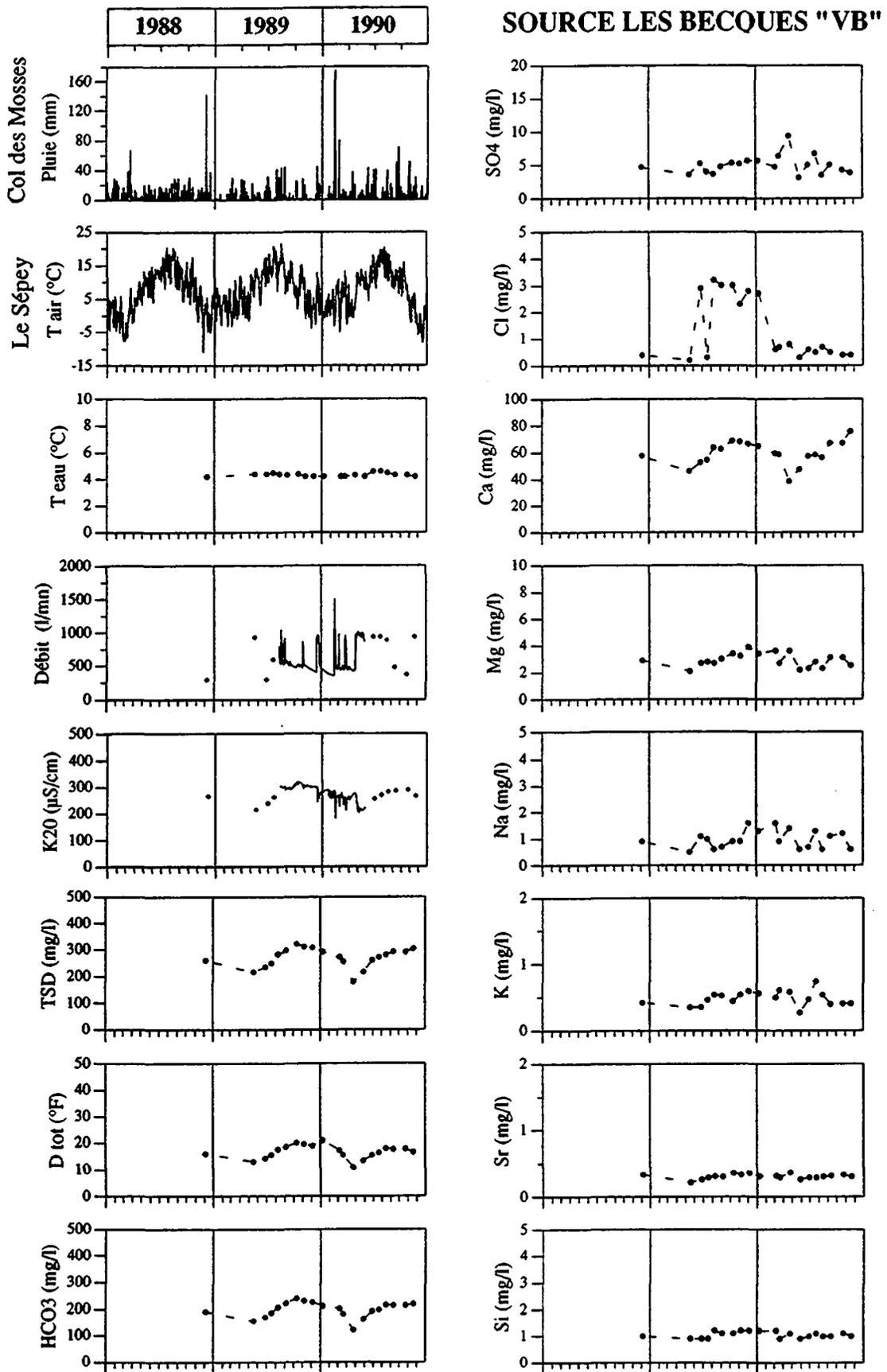


Fig. 6.64 Variations temporelles des caractéristiques physiques et chimiques de la source les Becques située dans le secteur SW de la nappe tectonique du Niesen

CHAPITRE 7

**CLASSIFICATION CHIMIQUE DES EAUX
SOUTERRAINES ET CARACTERISATION
GEOLOGIQUE DES BASSINS**



7. CLASSIFICATION CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES ET CARACTERISATION GEOLOGIQUE DES BASSINS

7.1 CLASSIFICATION CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES

Toutes les eaux des sources analysées, appartenant au réseau à répartition spatiale (N° 1), ont été classées chimiquement. Cette classification est basée sur l'abondance des composés chimiques dans l'eau et tient compte de deux méthodes : la première concerne les éléments majeurs et la deuxième les éléments mineurs et en traces.

Pour les éléments majeurs, les critères de la classification de JÄCKLI (1970) ont été adoptés. Ainsi, la concentration d'un cation ou d'un anion est donnée en pour-cent par rapport à la somme des cations et des anions, calculée séparément. Toutes les opérations sont réalisées en méq/l.

Le tableau 7.1 résume cette classification pour toutes les sources. Les cations (ou anions) soulignés sont ceux qui dépassent les 50 % de la concentration cationique (ou anionique) totale. Les ions écrits normalement ont une concentration de 20 à 50 %; ceux entre parenthèse ont une teneur entre 10 et 20 %. Les composés chimiques avec une charge cationique ou anionique inférieure à 10 % ne sont pas pris en considération. C'est de cette manière que les faciès hydrochimiques ont été définis.

Pour les éléments mineurs et en trace, une méthode qui tend à déterminer les valeurs anormalement élevées de ces éléments a été développée. Les concentrations qui dépassent la valeur moyenne de plus d'un écart-type ont été retenues. Dans ce but, nous avons tenu compte des distributions des concentrations de chaque composé chimique. Ces distributions ont déjà été décrites dans le chapitre 6.2.

Afin de mieux préciser le critère utilisé, nous l'illustrons graphiquement sur une courbe théorique de Gauss (fig. 7.1), où la zone significative considérée est mise en évidence.

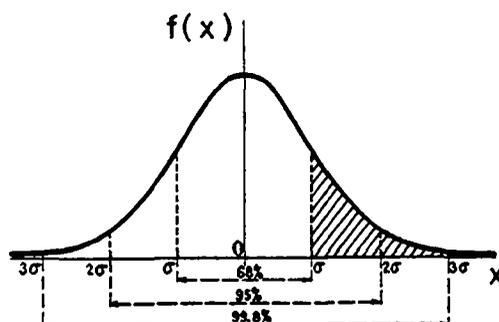


Fig. 7.1 Identification statistique (en hachuré) de la zone des concentrations retenues dans la classification des éléments mineurs et en trace.

Ce critère a été choisi car à plus d'un écart-type au-dessus de la moyenne la population retenue attacherait trop d'importance aux valeurs extrêmes, et à moins d'un écart-type au-dessus de la moyenne, la discrimination serait moins significative.

Le tableau 7.2 résume la classification des éléments mineurs et en trace. Le nombre des sources (population) considérées est de 76, sauf pour les éléments qui ont dû être écartés du traitement statistique (cf. tabl. 4.5). Dans ce cas, le nombre des sources prises en compte est inscrit à côté de l'élément dans l'en-tête. Par ailleurs, les concentrations qui ont été exclues sont signalées par un astérisque à l'intérieur du tableau.

La caractérisation géologique des sources est décrite dans le chapitre 7.2. Néanmoins, comme les critères de la classification hydrochimique sont étroitement liés à la géologie des sources, nous présentons le résumé de la caractérisation géologique conjointement à la classification hydrochimique dans le tableau 7.1.

7.1.1 Faciès hydrochimiques des eaux (composés majeurs)

En suivant la classification mentionnée ci-dessus, nous identifions six faciès hydrochimiques et sept sous-faciès.

Eaux bicarbonatées calciques (faciès N° 1)

Toutes les eaux étudiées, à l'exception de quatre d'entre elles situées vers les limites intranappe ou à la périphérie de la nappe du Niesen, ont des concentrations en calcium et en hydrogénocarbonates au delà du 50 % du contenu cationique et anionique (tabl. 7.1). Trois des sources qui font exception restent bicarbonatées calciques mais avec un contenu d'hydrogénocarbonates entre 10 et 50 %. Donc, les terrains calcaires des flyschs seront les principaux fournisseurs de sels dissous dans les eaux considérées.

Pour 36 % du total des sources, le calcium et les hydrogénocarbonates sont les seuls composants majeurs. Ils sont situés dans un environnement de flyschs du Niesen (Frutigen, Niesenkulm ou Seron) ou dans les faciès grés-argileux des flyschs de la nappe du Gurnigel (tabl. 7.1).

Eaux bicarbonatées calciques magnésiennes (faciès N° 2A et 2B)

A part le calcium et les hydrogénocarbonates qui forment les composés principaux (> 50 %), ce groupe possède comme troisième cation majeur le magnésium, à plus de 10 %. Ses anomalies peuvent être modérées (10 à 20 %) ou fortes (20 à 50 %). Ainsi, à part les ions dus à la dissolution des terrains calcaires, le magnésium indique déjà une provenance des éléments dolomitiques contenus dans les flyschs.

Les sources à concentration modérée en magnésium sont regroupées dans le *faciès hydrochimique 2A*. Elles se situent dans un entourage géologique de flyschs, et surtout dans

ceux de Frutigen et du Niesenkulm pour la nappe du Niesen et dans ceux des faciès grésocalcaires pour la nappe du Gurnigel (tabl. 7.1).

La famille à anomalie magnésienne forte forme le *faciès hydrochimique 2B*; elle comporte deux émergences. La première est la source N° 13 située dans le tunnel d'Arnon et ayant un écoulement profond dans la nappe du Niesen; la deuxième, celle d'Alpenrose (N° 35) est localisée dans le secteur central de la nappe vers sa limite NW. La zone d'alimentation de cette émergence se situe dans le flysch du Seron, mais elle peut être aussi influencée par les terrains extra-flysch de la zone Submédiane ou des Préalpes médianes.

Eaux bicarbonatées calciques magnésiennes et sodiques (faciès N° 3)

Pour deux émergences situées à peu près au milieu du tunnel d'Arnon (à 2 km de l'entrée du Torrent), l'hydrogénocarbonate demeure l'anion principal (> 50 %). Mais au calcium et au magnésium, compris entre 20 et 50%, vient s'ajouter une forte proportion de sodium entre 10 et 20 %. Ces eaux, qui par ailleurs font partie de l'écoulement le plus profond étudié dans les flyschs du Niesen (~600 m de recouvrement sur le tunnel), suggèrent non seulement la mise en solution des carbonates (de calcium ou de magnésium), mais aussi, entre autres, l'hydrolyse des silicates des composants détritiques des flyschs, processus qui libérerait le sodium. (cf. aussi chap. 8.3.3).

Eaux bicarbonatées calciques sulfatées (faciès N° 4A et 4B)

Ce groupe est formé de trois émergences.

Deux d'entre elles, les N° 44 et 45, ont une composante bicarbonatée calcique au delà de 50 % pour chaque ion, mais aussi une présence modérée en sulfates (10 % à 20 %). Elles composent le *faciès hydrochimique N° 4A*. Bien que ces sources soient situées dans le flysch de Frutigen, les contacts intranappe de la nappe du Niesen ne sont pas loin. Ainsi, une incidence des terrains extra-flysch évaporitiques, à l'intérieur de la nappe, peut être à l'origine des sulfates. Ceux-ci peuvent aussi provenir de l'oxydation des sulfures et notamment de la pyrite (FeS₂) des roches des flyschs.

La source N° 47 forme le *faciès N° 4B*. Elle appartient bien au groupe 4, mais la distribution de la charge ionique est différente du faciès 4A. Il s'agit d'une eau sulfatée calcique (20 à 50% d'anions et autant de cations) avec un contenu modéré d'hydrogénocarbonates (10 à 20 %). Cette émergence, située dans la périphérie de la nappe du Niesen, près d'Adelboden, avait déjà été classée comme une eau à forte incidence évaporitique du Trias (cf. chap. 6.2.31).

Eaux bicarbonatées calciques sulfatées magnésiennes (faciès N° 5A, 5B, 5C, 5D, 5E et 5F)

Ce groupe chimique comporte 6 faciès. Tous ont la particularité d'être bicarbonatés, calciques, sulfatés et magnésiens d'après la classification de type JÄCKLI (1970), mais l'abondance de ces composés diffère suivant les faciès.

Chapitre 7

N° source	Code	Nom des sources	Altitude	Réseau	CAR. GEOL.	Choix	CLASSIFICATION CHIMIQUE (Jäckli)			Facès
6	VB	Les Becques	1450	N°1,2,3	S (N)	1	Ca		HCO ₃	1 **
7	VP	Planpérette	1510	N°1,2	F (S)		Ca		HCO ₃	1
8	VM	Molaire	1407	N°1,2	S (N)	1	Ca		HCO ₃	1
9	VT	Petit-Revers	1325	N°1,2	F	3	Ca		HCO ₃	1
10	VR	Deux Roches	1345	N°1	F (z)		Ca		HCO ₃	1
11	YA	Tunnel d'Amon A	1502	N°1	F (N,S)	4	Ca		HCO ₃	1
12	YB	Tunnel d'Amon B	1502	N°1	F (N,S)	4	Ca		HCO ₃	1
17	VII	Isenau	1877	N°1,2	F	3	Ca		HCO ₃	1
21	TS	Mülischtüpfli	1230	N°1	F N		Ca		HCO ₃	1
25	TC	Chlösterli	1400	N°1	F M (m)		Ca		HCO ₃	1
28	LS	Stalde	1240	N°1	F (m,f)		Ca		HCO ₃	1
32	LW	Weissenberg	1800	N°1	F (N) (m)		Ca		HCO ₃	1
37	SA	Albristhubel B	1435	N°1	S N	1	Ca		HCO ₃	1
38	LT	Wysseberg	1920	N°1	F	3	Ca		HCO ₃	1
42	AD	Hindersiller	1950	N°1	F	3	Ca		HCO ₃	1
43	AU	Uderstalde	1620	N°1,2	F s	3	Ca		HCO ₃	1
46	AC	Tschenten	1770	N°1	F	3	Ca		HCO ₃	1
48	FR	Aborni	1710	N°1	F N		Ca		HCO ₃	1
49	FM	Almi	1540	N°1,2	F	3	Ca		HCO ₃	1
50	FL	Ladholz	1270	N°1	F M		Ca		HCO ₃	1
61	FG	Gungg sud+Joseli	1490	N°1	N F	2	Ca		HCO ₃	1
62	FN	Gungg nord	1700	N°1	N (F)	2	Ca		HCO ₃	1
63	RL	Lehenweide	1400	N°1	F N (m)		Ca		HCO ₃	1
68	GE	L'Essert	1238	N°1	G-ga	6	Ca		HCO ₃	1
69	GH	Chäh	1342	N°1	G-ga	6	Ca		HCO ₃	1
74	GJ	Joux A (gauche)	1204	N°1,2,3	G-ga	6	Ca		HCO ₃	1
75	GT	Joux B (droit)	1204	N°1	G-ga	6	Ca		HCO ₃	1
1	VE	Les Evoëttes	1140	N°1	F	3	Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
3	VC	Champillon	1700	N°1	F	3	Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
5	LLI	Lioson-AQUITYP	1845	N°1,2,3	F N		Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
19	YG	Suedeli	1560	N°1	F m		Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
20	TW	Gschwändleni	1590	N°1,2	F	3	Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
22	TF	Fangweid	1210	N°1,2	F m (M)		Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
23	TM	Moos	1500	N°1,2	F m		Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
27	TO	Trom2	1180	N°1	N m (M,Zs)		Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
30	LC	Chillerebrunnen	1560	N°1,2	F f		Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
31	TT	Turbach	1410	N°1,2	N m	2	Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
36	SL	Albristhubel A	1430	N°1,2,3	S N	1	Ca	(Mg)	HCO ₃	2A **
39	DR	Mittelberg A (source r.)	1775	N°1	N m	2	Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
40	DM	Mittelberg B (captage)	1880	N°1,2	N m	2	Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
52	DO	Otenschwand	1520	N°1,2	N m	2	Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
64	RS	Stutzweid	1440	N°1,2	F N (m)		Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
65	RN	Niesen A (Quelle)	1760	N°1	N	2	Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
66	RR	Niesen B (source r.)	1800	N°1	N	2	Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
70	GR	La Cierne	1025	N°1	G-gc	6	Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
71	GV	Villene	930	N°1	G-gc	6	Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
72	GM	Moyon	915	N°1	G-gc	6	Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
73	GC	Les Côtes	1050	N°1	G-gc	6	Ca	(Mg)	HCO ₃	2A
13	YC	Tunnel d'Amon C	1502	N°1	F (N,S)	4	Ca	Mg	HCO ₃	2B **
35	SR	Alpenrose	1490	N°1	S (Zs,Pm)		Ca	Mg	HCO ₃	2B
14	YD	Tunnel d'Amon D	1503	N°1	F (N)	4	Ca	Mg (Na)	HCO ₃	3 **
15	YE	Tunnel d'Amon E	1503	N°1	F (N)	4	Ca	Mg (Na)	HCO ₃	3
44	AA	Allebach 3	1480	N°1	F a		Ca		HCO ₃ (SO ₄)	4A
45	AS	Stigelbach	1560	N°1,2,3	F f		Ca		HCO ₃ (SO ₄)	4A **
47	AT	Suterbachli	1430	N°1	F i (périphérie)	5	Ca		(HCO ₃) SO ₄	4B
2	VN	Mimon	1570	N°1,2	F z (i)	5	Ca	(Mg)	HCO ₃ (SO ₄)	5A **
26	TG	Grund	1140	N°1	N m (M,i)	5	Ca	(Mg)	HCO ₃ (SO ₄)	5A
33	SB	Birchlouene A (gauche)	1315	N°1	S N i (Zs,Pm)	5	Ca	(Mg)	HCO ₃ (SO ₄)	5A
53	WC	Zünigwald C	830	N°1	S M (N,i)	5	Ca	(Mg)	HCO ₃ (SO ₄)	5A
54	WA	Zünigwald A	840	N°1	S N i M	5	Ca	(Mg)	HCO ₃ (SO ₄)	5A
55	WB	Zünigwald B	840	N°1	S N i M	5	Ca	(Mg)	HCO ₃ (SO ₄)	5A
56	WD	Zünigwald D	830	N°1	S N i M	5	Ca	(Mg)	HCO ₃ (SO ₄)	5A
76	GS	Schwarzenbühl	1570	N°1	G-gc	6	Ca	(Mg)	HCO ₃ (SO ₄)	5A
4	VL	Lioson	1860	N°1,2	F S		Ca	Mg	HCO ₃ (SO ₄)	5B
59	WM	Mani	660	N°1,2,3	N F (i)		Ca	Mg	HCO ₃ (SO ₄)	5B **
16	YF	Tunnel d'Amon F	1503	N°1	F (N)	4	Ca	Mg	HCO ₃ (SO ₄)	5C **
24	TL	Lädiwald	1120	N°1,2,3	F N i	5	Ca	(Mg)	HCO ₃ SO ₄	5D **
34	SM	Birchlouene B (milieu)	1315	N°1	S N i (Zs,Pm)	5	Ca	(Mg)	HCO ₃ SO ₄	5D
57	WE	Zünigwald E	820	N°1	S N i M	5	Ca	(Mg)	HCO ₃ SO ₄	5D
60	WP	Augant	650	N°1	N F (a,i)	5	Ca	(Mg)	HCO ₃ SO ₄	5D
18	TR	Gridi	1430	N°1	uH (F) (périphérie)	5	Ca	Mg	HCO ₃ SO ₄	5E
51	FT	Lanter Tunnel	1000	N°1	F i (lim. intranappe)	5	Ca	Mg	HCO ₃ SO ₄	5E
58	WQ	Zünigwald privé	840	N°1	S u (Zs) (N)	5	Ca	Mg	HCO ₃ SO ₄	5E
29	LH	Wülbhorn	1370	N°1	F i (lim. intranappe)	5	Ca	(Mg)	HCO ₃ SO ₄	5F
41	AG	Geils	1830	N°1	F i (périphérie)	5	Ca	(Mg)	HCO ₃ SO ₄	5F
67	AH	Bad Heustrich	800	N°1	F i (extrême NE)	5		Na	HCO ₃ SO ₄	6

Tableau 7.1 Classification chimique des eaux (éléments majeurs) et caractérisation géologique des sources (pour la légende cf. chap. 7.2).

Classification chimique des eaux souterraines et caractérisation géologique des bassins

N° source	Nom des sources	Na 74	Cl 74	Sr	K	Si	Ba	B	Li	Rb	Ni 58	Mn	Cu 54	U	Cr 75	V 75	Co
6	Les Becques											Mn				V	
7	Planpérene										*						
8	Molaire										Ni						
9	Petit-Revers																
10	Deux Roches																
11	Tunnel d'Arnon A						Ba					Mn					
12	Tunnel d'Arnon B						Ba								Cr		
17	Isenau												*				
21	Mülschüpfi										*		*				
25	Chlösterli												*				
28	Stalde													U			
32	Weissenberg																
37	Albristhubel B																
38	Wysseberg																
42	Händersiller																
43	Understalde																
46	Tschenten										Ni	Mn			Cr		
48	Abomi										*	Mn				V	
49	Almi																
50	Ladholz		Cl		K										Cr		
61	Gungg sud+Joseli																
62	Gungg nord																
63	Lehenweide																
68	L'Essen	Na					Ba	B			*	Mn	*		Cr	V	Co
69	Chäh						Ba				*		*				
74	Joux A (gauche)																
75	Joux B (droit)												Cu				
1	Les Evoättes	*	*			Si	Ba				*		*				
3	Champillon										*		*				
5	Lioson-AQUITYP																
19	Stuedeli								Li		Ni		Cu				
20	Gschwändleni												*			V	
22	Fangweid								Li	Rb							
23	Moos								Li	Rb	*		*			V	Co
27	Trom 2																
30	Chillerebrunnen														Cr		
31	Turbach					Si											
36	Albristhubel A										*		*		Cr		
39	Mittelberg A (source r.)												Cu				
40	Mittelberg B (captage)																
52	Ottenschwand																
64	Stutzweid										*		*				
65	Niesen A (Quelle)												*				
66	Niesen B (source r.)																
70	La Cierne	Na	Cl					B			*	Mn	*	U		V	Co
71	Villene		Cl								*		*			V	
72	Moyon	*	*		K			B			*		*	U		V	Co
73	Les Côtes	Na						B					*			V	
13	Tunnel d'Arnon C	Na		Sr	K				Li	Rb		Mn			Cr		
35	Alpenrose												*	U			
14	Tunnel d'Arnon D	Na	Cl	Sr	K	Si	Ba	B	Li	Rb	Ni	Mn			Cr		
15	Tunnel d'Arnon E	Na		Sr	K	Si	Ba	B	Li	Rb							
44	Allebach 3												*		*		
45	Stügelbach										*			U	Cr		
47	Suterbachli	Na	Cl	Sr	K	Si				Rb	Ni		Cu	U		V	Co
2	Mimon						Ba				*		*	U			
26	Grund										*						
33	Birchlouene A (gauche)																
53	Zünigwald C		Cl					B									
54	Zünigwald A		Cl					B	Li				Cu				
55	Zünigwald B		Cl					B	Li								
56	Zünigwald D							B									
76	Schwarzenbühl										*	Mn	*		Cr	*	
4	Lioson																
59	Mani															V	
16	Tunnel d'Arnon F	Na		Sr	K	Si	Ba	B	Li	Rb	Ni		Cu				
24	Lädiwald	Na	Cl												U	V	
34	Birchlouene B (milieu)																Co
57	Zünigwald E																
60	Augant		Cl								*		*				Co
18	Gridi												*				
51	Linter Tunnel	Na	Cl		K	Si				Rb		Mn	Cu	U	Cr	V	
58	Zünigwald privé	Na				Si		B	Li				Cu				Co
29	Wildhorn	Na	Cl	Sr	K	Si					*		*	U	Cr		
41	Geils	Na	Cl	Sr		Si				Rb	Ni		Cu	U		V	Co
67	Bad Heustrich	Na	Cl			Si		B	Li	Rb			Cu		Cr	V	

Tableau 7.2 Classification chimique des eaux (éléments mineurs et en trace).

En général, la provenance des sels dissous de ce groupe peut être attribuée à la dissolution des terrains calcaires et dolomitiques des flyschs, et également à celle des évaporites des terrains extra-flysch plus ou moins présents. Par ailleurs, les sulfates peuvent trouver une seconde origine dans l'oxydation des sulfures des roches des flyschs. Les différentes incidences extra-flysch sont indiquées dans la caractérisation géologique des sources (tabl. 7.1 et chap. 7.2).

Le faciès 5A regroupe des eaux bicarbonatées calciques (> 50 % d'anions et de cations), magnésiennes et sulfatées en moindre quantité (10 à 20 %). Ces sources sont surtout situées sur le versant NW de la nappe, en aval des flyschs de Seron et du Niesenkulm. Nous avons aussi retenu dans la caractérisation géologique des sources (tabl. 7.1) la possibilité d'une incidence des terrains morainiques "de vallée", ou des évaporites du Trias de la zone Submédiane.

Le faciès 5B a les mêmes caractéristiques que le faciès 5A, mais le contenu en magnésium représente 20 à 50 % du total cationique. Deux sources témoignent de ce faciès. La source N°4 située en amont du lac Lioson, entourée de terrains des flyschs de Frutigen et du Seron, et la source N° 59 (Mani, qui est par ailleurs une des sources à répartition temporelle), sise dans le versant NE du Niesen où affluent surtout les flyschs du Niesenkulm et de Frutigen. Ces sources indiquent ainsi que les eaux des flyschs du Niesen peuvent atteindre un contenu magnésien important (20 à 50 %) et modérément sulfaté (10 à 20 %), qui proviendrait des composants dolomitiques et sulfureux des flyschs.

Le faciès 5C comporte une seule émergence, la N° 16 qui jaillit au milieu du tunnel d'Arnon à 2.5 km de l'entrée du Torrent, donc un écoulement profond dans les flyschs du Niesen. Cette source a une composition identique à celles du faciès 5B, à l'exception de son contenu en calcium qui est plus faible (20 à 50 %). L'origine de ses sels dissous peut être rapprochée de celle du faciès 5B.

Le faciès 5D varie par rapport au faciès 5A par son contenu sulfaté plus élevé (entre 20 et 50 %). Il s'agit de quatre sources. Parmi elles, trois (N° 34, 57 et 60) subirait une incidence des terrains évaporitiques du Trias du fait de leur localisation vers les limites de la nappe (tabl. 7.1). La quatrième (N°24) se trouve à l'intérieur de la nappe, dans la zone où la Sarine la recoupe. Cependant, son contenu en sulfates est plus important que celui attribué aux sources des flyschs du Niesen. Cette anomalie peut être expliquée par l'existence d'écoulements latéraux qui toucheraient les lambeaux du Trias situés dans le même versant à environ 1.5 km au N-NW de l'exutoire de la source. Quant aux minéraux sulfureux des flyschs, ils peuvent contribuer aux concentrations en sulfates.

Le faciès 5E se distingue du faciès 5A par son important contenu en magnésium et en sulfates (20 à 50 % des totaux cationique et anionique). Ce faciès comporte trois points d'eau situés soit dans la périphérie (N° 18), soit vers les limites de la nappe (N° 51 et 58). Une influence évidente des terrains extra-flysch évaporitiques se révèle et confirme les conclusions du chapitre 6.2 (cf. chap. 6.2.31).

Le faciès 5F se différencie du faciès 5A par une teneur plus faible en hydrogénocarbonates (20 à 50 %) et très élevée en sulfates (>50 % d'anions). Il comporte deux sources (N° 29 et N°41) déjà classées comme ayant une incidence évaporitique du Trias (cf. chap. 6.2.31).

Eaux bicarbonatées sodiques sulfatées (faciès N° 6)

La source N° 67, sise à l'extrême NE de la nappe du Niesen, à environ 100 m au-dessus de la plaine de la Kander, présente une composition chimique très spéciale. Elle est riche en hydrogénocarbonates et en sodium (>50 % d'anions et de cations) et sa teneur en sulfates est modérée (10 à 20 %). Parmi les éléments en trace, elle affiche de fortes concentrations en fer, en bore, en lithium, en iode, en chrome, et de fortes concentrations en brome et en lanthane (cf. chap. 6.2.31).

Cette émergence a déjà été définie comme "particulière" dans le chapitre 6.2.31. Elle présente la plus forte influence des terrains extra-flysch, mais il s'agit d'une influence particulière qui diffère de celle des terrains évaporitiques fortement sulfatés. Cette eau dégage une odeur d'hydrogène sulfuré (H₂S) propre à un milieu réducteur.

En effet, les phénomènes d'oxydation peuvent se produire avec des sels réduits, dont le plus abondant est la pyrite (FeS₂). Celle-ci peut se trouver aussi bien dans les apports cristallins des roches sédimentaires que comme minéral secondaire de ces roches. Différents oxydes apparaîtront avec dégagement de SO₂. Ce dernier se transforme en acide sulfurique qui va attaquer la roche et libérer des cations comme le sodium des plagioclases (SPALTENSTEIN 1980). La présence d'hydrocarbures et de bactéries sur le trajet de l'émergence peut expliquer la réduction ultérieure du sulfate selon le schéma : $SO_4^{--} + C_2H_2 \rightarrow H_2S + 2CO_2 + 2e^-$ (GABUS communications orales).

Résumé des faciès hydrochimiques majeurs

Faciès hydrochimiques des exutoires des flyschs et à faible incidence extra-flysch

Les faciès hydrochimiques 1 et 2 peuvent être considérés comme caractéristiques des sources à influence des flyschs de la nappe du Niesen ou du Gurnigel. Dans le cas des écoulements plus profonds dans les flyschs du Niesen (p. ex. du tunnel d'Armon), les compositions chimiques des faciès 3, 5B et 5C peuvent être atteintes. Au total, ces faciès regroupent 73 % des sources étudiées.

Les faciès hydrochimiques 4A, 5A, et 5D appartiennent aussi aux sources des flyschs. Néanmoins, une incidence des terrains évaporitiques (due à des écoulements transversaux dans la nappe, à la présence de moraines glaciaires ou à la proximité des limites intranappe) est repérable dans la caractérisation géologique de ces sources. Elle est suggérée aussi par leur contenu modéré en sulfates. Parmi les sources enregistrées, 18 % présentent ce comportement chimique.

La différence entre ces faciès peut être observée dans la figure 7.2. Une source par faciès a été choisie, et leur contenu en éléments majeurs et mineurs sont comparés dans un graphique de type Schöller. Les traits continus désignent les sources caractéristiques des flyschs du Niesen, les traits discontinus les émergences qui auraient une influence extra-flysch. Sur le tableau 7.1, les sources sélectionnées sont suivies d'un double astérisque.

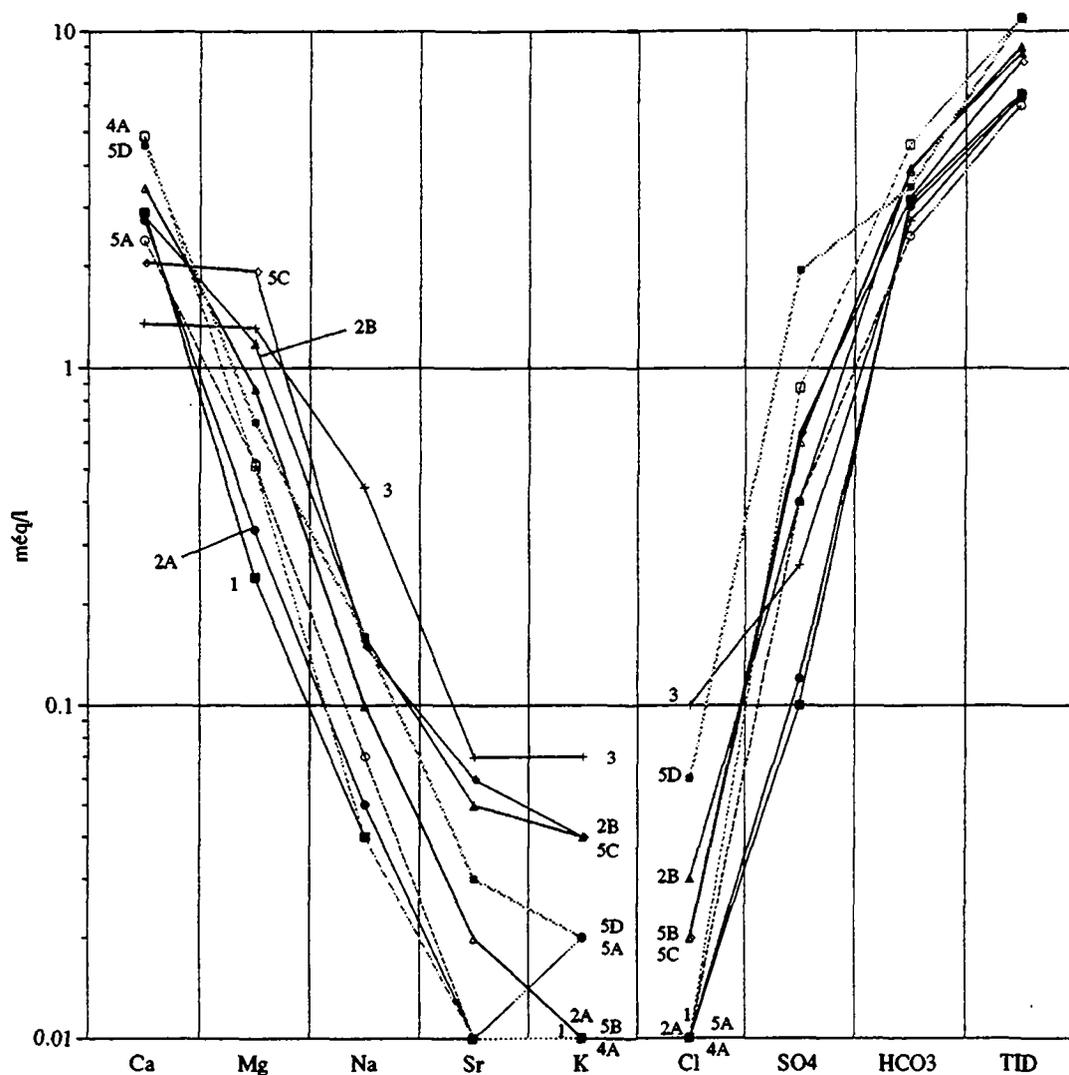


Fig. 7.2 Exemples de faciès hydrochimiques des sources des flyschs du Niesen (trait continu) ou à faible incidence extra-flysch (trait discontinu).

En général, une similitude dans la composition chimique de ces deux groupes peut être soulignée, à l'exception du contenu plus élevé en calcium et en sulfates pour les faciès 4A et 5D. Cette différence est bien moins importante que celle signalée dans le chapitre 6.2.31 pour les eaux des sources situées vers les limites de la nappe ou dans sa périphérie. Donc, la

composition chimique (majeure et mineure) des sources des faciès 4A, 5A et 5D est plus proche de celle des sources des flyschs (s.s.).

La figure 7.2 montre aussi les variations du contenu chimique qui était à la base de la distinction des faciès hydrochimiques. Citons par exemple les faciès 1 et 2A qui ont le plus bas contenu en magnésium et en sulfates, ou les faciès 3 et 5C, dont le contenu en sodium et en magnésium respectivement est le plus important.

Faciès hydrochimiques des exutoires à incidence extra-flysch

Les faciès 4B, 5E, 5F et 6 appartiennent aux six sources situées vers les limites de la nappe du Niesen ou dans sa périphérie. Ces émergences possèdent la véritable empreinte des terrains extra-flysch. La différence entre la composition chimique de ces sources et les valeurs trouvées dans les eaux des flyschs a déjà été discutée dans le chapitre 6.2.31.

7.1.2 Composés mineurs et en trace

Les composés mineurs et en trace des eaux des sources ont été largement décrits dans le chapitre 6.2. Une comparaison des résultats a été établie dans le chapitre 6.2.31. Nous cherchons à identifier ici les exutoires dont les sels dissous présentent des concentrations au-delà de la moyenne plus un écart-type, car l'homogénéité des eaux souterraines du flysch du Niesen (s.s.) ne permet pas une classification des éléments en trace contrastée. Nous rappelons que dans cette typologie, les éléments en trace (Fe, Br, Zn, Al, I, et La) n'interviennent pas. Leur teneur a été considérée comme ordre de grandeur (cf. tabl. 4.5).

Le tableau 7.2 résume les résultats obtenus. Les émergences du milieu du tunnel d'Arnon (N° 14, 15 et 16), localisées à une profondeur d'environ 600 m, présentent les plus fortes concentrations en éléments mineurs et en trace. Les plus caractéristiques sont : le sodium, le strontium, le potassium, le silicium, le baryum, le bore, le lithium, le rubidium et même le nickel pour les N° 14 et 16. Ces éléments peuvent être considérés comme les traceurs naturels des écoulements profonds dans les flyschs du Niesen.

Les sources à influence extra-flysch (N°47, 18, 51, 29, 41 et 67) présentent des anomalies, surtout en chlorures, en silicium, en rubidium, en cuivre et en vanadium. Trois de ces sources ont de fortes présences en strontium et en uranium.

Le baryum, qui est par ailleurs l'élément en trace le plus abondant des eaux étudiées, est présent comme anomalie dans presque toutes les émergences du tunnel d'Arnon (tabl. 7.2). Parallèlement, il est absent dans notre typologie. Cet élément n'apparaît pas dans les sources à influence extra-flysch. Il est donc distinctif des eaux des flyschs, surtout de celles à écoulement profond.

7.2 CARACTÉRISATION GÉOLOGIQUE DES BASSINS

Afin de déterminer l'influence géologique sur les eaux des sources, une étude du bassin d'alimentation de chaque émergence a été réalisée. La délimitation de ces bassins, effectuée sur les cartes topographiques au 1:25.000, est complétée avec la cartographie géologique existante ou en élaboration. Cette dernière a pu être utilisée grâce à l'autorisation du Service Hydrologique et Géologique National. Cette documentation est décrite dans le chapitre 4.3.4.

La géologie et la tectonique de la nappe du Niesen sont complexes. Il ne suffit pas simplement de déterminer la géologie des bassins d'alimentation des exutoires, mais il faut aussi préciser les influences possibles des terrains environnants en fonction de la tectonique (pendage, plissement, chevauchement, etc.), ainsi que de l'existence des discontinuités qui traversent les différentes couches géologiques.

De cette façon, une caractérisation géologique des exutoires a été obtenue. Son résumé, fait à partir de codes, est présenté dans le tableau 7.1. Pour une source, un code peut être composé d'une ou plusieurs lettres. La première lettre est l'abréviation du terrain géologique qui forme le principal environnement géologique d'un exutoire. La deuxième, si elle existe, sera celle du terrain qui suit en importance, et ainsi de suite. Si la lettre est entre parenthèses, cela indique l'influence éventuelle d'un terrain géologique supplémentaire. Dans le cas des sources de la nappe du Gurnigel (G), les abréviations de ses faciès sont présentées à la suite (p. ex. G-ga). Les abréviations utilisées dans cette caractérisation sont décrites ci-dessous :

Flyschs du Niesen, ACKERMANN (1986) :

- S flysch de Seron
- N flysch du Niesenkulm
- F flysch de Frutigen

Terrain extra-flysch de la nappe du Niesen :

- a soubassement anté-flysch ACKERMANN (1986), zone cataclastique ou "Gipszone" BORNHAUSER (1929)
- t terrain triasique
- z écaille de Murgaz
- i abréviation générale pour décrire une influence possible des terrains extra-flysch

Unités tectoniques environnantes :

- Pm Préalpes médianes
- Zs Zone Submédiane

uH Ultrahelvétique

Terrains quaternaires :

- a alluvions
- m moraine locale
- M moraine de vallée (Talmoräne)
- f tuf calcaire

Les éboulis ou cônes de déjection locaux issus des flyschs sont considérés sous la terminologie des flyschs.

Flyschs du Gurnigel :

- G-ga faciès grés-argileux
- G-gc faciès grés-calcaire

Comme *conclusion de la caractérisation géologique des exutoires*, nous pouvons dire que les flyschs de la nappe du Niesen, déversés, plissés, faillés et parfois imbriqués entre eux, ne permettent pas une distinction précise des eaux souterraines par unité de flysch.

Néanmoins, l'étude des bassins a défini les exutoires qui pourraient le mieux représenter les terrains géologiques traités. Ces exutoires ont été choisis et numérotés de 1 à 6 (cf. tabl. 7.1 à côté de la caractérisation géologique). Les choix 1 à 3 correspondent aux exutoires à empreinte majeure des flyschs de Seron, du Niesenkulm et de Frutigen, le choix 4, aux émergences du tunnel d'Arnon à écoulement plus profond dans le flysch du Niesen de manière générale. Sous le nom choix 5 ont été groupés les exutoires à incidence des terrains extra-flysch; cette incidence peut être de divers degrés. Finalement, le choix 6 regroupe les exutoires situés dans la nappe du Gurnigel.

Ce groupement est utilisé dans les chapitres 7.3 et 8. Les exutoires des choix 1 à 4 sont jugés comme représentatifs du flysch du Niesen (s.s.).

7.3 ANALYSE DE CORRÉLATION DES COMPOSÉS CHIMIQUES DES EAUX

Afin de détecter les liaisons possibles entre les composés chimiques des eaux, nous avons procédé à des analyses de corrélation de ces composés. Vu la complexité de l'influence géologique sur les eaux souterraines, l'analyse a été réalisée en deux étapes :

- La première sur les 28 exutoires représentatifs des flyschs du Niesen (s.s.), y compris les émergences du tunnel d'Arnon (choix 1 à 4, cf. conclusion du chap. 7.2)

- La deuxième à titre comparatif sur les 17 exutoires à influence variable des terrains extra-flysch (choix 5). Le N°67 en a été exclu à cause de ses fortes concentrations qui introduisaient un biais dans l'analyse de corrélations.

Les matrices résultantes sont présentées dans l'annexe 4.

Les liaisons détectées font ressortir non seulement des couples cations-anions, mais aussi des comportements similaires ou affinités entre différents composés chimiques des eaux.

Les principales liaisons pour les eaux des flyschs (s.s.) ont été trouvées avec un coefficient de corrélation $r \geq 0.9$. Ce sont les liaisons hydrogénocarbonates - calcium (eaux bicarbonatées calciques), fer - manganèse (éléments régis par le Eh) et zinc - cuivre. Un r de 0.8 à 0.9 est obtenu entre magnésium - silicium, sodium - baryum et aluminium - chrome.

Les liaisons entre composés sont plus nombreuses pour les exutoires à influence extra-flysch. Un $r \geq 0.95$ souligne la liaison des sulfates avec le calcium et le strontium, le calcium avec le strontium et finalement le potassium avec le manganèse et le chrome. Il existe un nombre important de liaisons présentant un r entre 0.9 et 0.95. Celles-ci marquées par les eaux à forte influence extra-flysch, ne sont cependant pas représentatives de l'ensemble.

Ces résultats contribuent à la définition du lien eau-roche du chapitre 8.

7.4 EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE (RÉSEAU N° 2) DES ÉLÉMENTS MAJEURS ET MINEURS BASÉE SUR L'ANALYSE MULTIVARIÉE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

L'analyse multivariée est une méthode statistique qui permet la représentation d'un grand nombre d'observations en fonction de l'interdépendance de n variables rapportées à des axes factoriels représentatifs. La méthode est basée sur la liaison linéaire entre variables, et admet donc comme base de données une matrice de coefficients de corrélation entre variables standardisées, c'est-à-dire centrées et réduites, ce qui leur donne des "poids" comparables.

Les valeurs ainsi calculées sont positionnées dans un espace multidimensionnel. Il en résulte un nuage de points, projetés sur des axes factoriels (facteurs), qui correspondent aux directions d'allongement du nuage dans l'espace. Ainsi, le premier facteur est l'axe sur lequel le nuage est le plus allongé; le deuxième, qui lui est perpendiculaire, est celui qui admet la plus grande variabilité après le premier, etc.... (MUDRY et al. 1979).

Il faut constater que les résultats de l'analyse multivariée ne permettent pas de saisir quantitativement les composés chimiques des eaux. Il s'agit d'une représentation globale de ces paramètres. Nous considérons que cette méthode est un bon outil pour distinguer la mobilité, surtout temporelle, des nombreuses réponses chimiques des eaux en fonction de différentes phases hydrodynamiques. Ainsi, nous appliquons cette méthode aux composés chimiques majeurs et mineurs (variables) des exutoires (observations) du réseau spatio-temporel (N° 2).

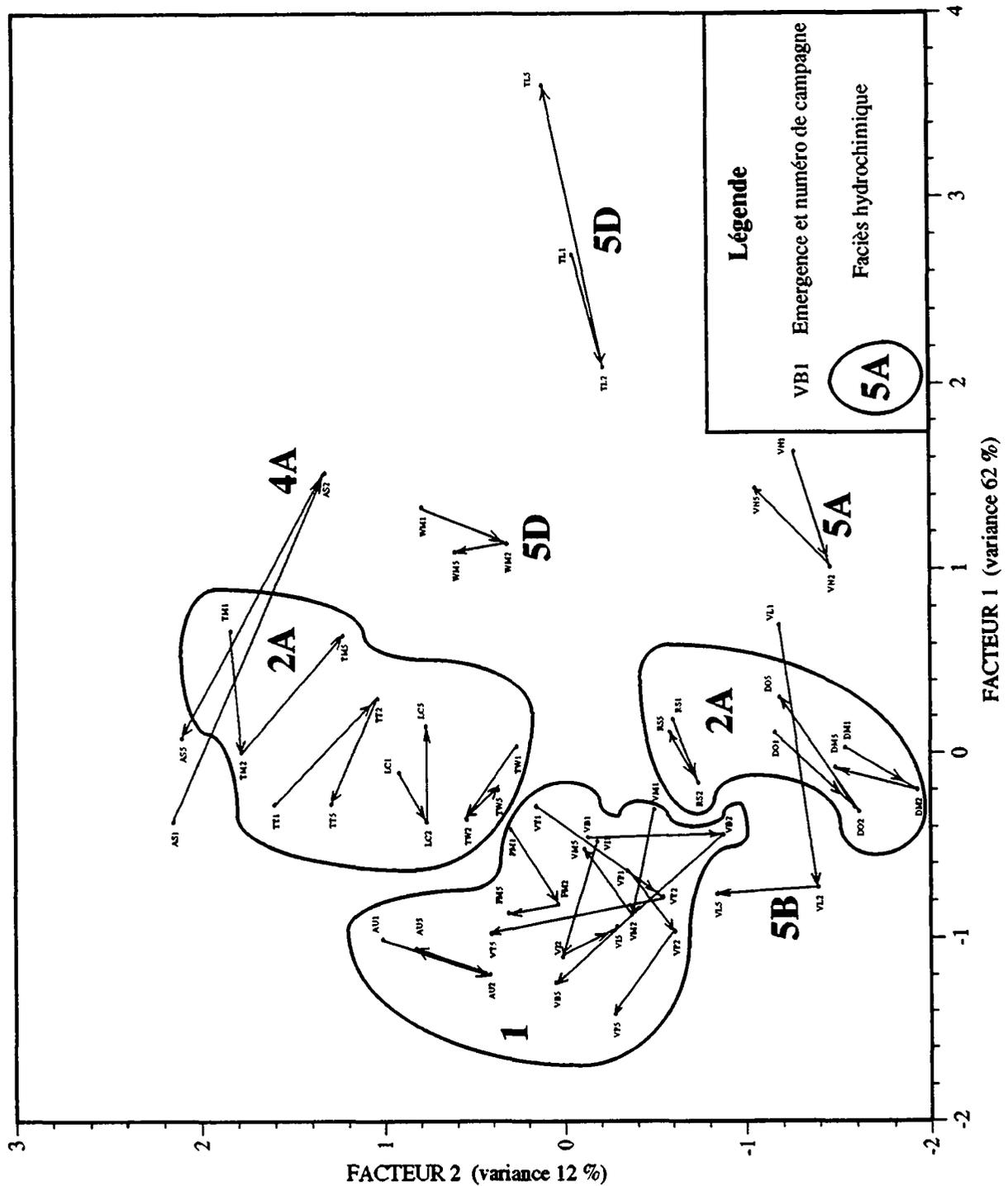


Fig. 7.3 Analyse multivariée en composantes principales. Plan factoriel 1-2. Evolution des émergences du réseau N°2 au cours des 3 campagnes et comparaison avec les faciès hydrochimiques des eaux obtenus lors de leur classification chimique (cf. chap. 7.1.1).

Le réseau N° 2 consiste en 19 exutoires du flysch du Niesen. Ceux-ci ont été échantillonnés durant trois cycles hydrologiques différents qui correspondent aux campagnes suivantes : 1) Automne 1988 (octobre - décembre), 2) Hautes eaux 1989 (avril - juin) et 5) Etiage d'été 1989 (août - septembre). Les résultats des analyses chimiques sont présentés dans l'annexe 2.

Résultats et interprétation

La figure 7.3 résume les résultats de l'analyse multivariée. Voici quelques indications :

- Les exutoires sont identifiés par leur code accompagné du numéro de campagne d'échantillonnage.
- Deux facteurs ont été sélectionnés. Le facteur 1, avec une variance de 62 %, représente dans les abscisses, surtout le potassium (0.86), les sulfates (0.84), le sodium (0.8), le magnésium (0.77), le strontium (0.7), et aussi le silicium (0.53) et le calcium (0.42).

Le facteur 2, avec une variance de 12 %, représente dans les ordonnées, surtout les hydrogénocarbonates (0.97), le calcium (0.83), et aussi le silicium (0.58), le strontium (0.58) et le magnésium (0.46). Quant aux chlorures, ayant une des plus faibles présences parmi les composés mineurs, ils sont peu représentés dans les deux facteurs (< 0.2).

Les représentations de chaque exutoire au cours du temps (au nombre de trois) ont été liées graphiquement afin de mieux visualiser leur mobilité chimique. La plupart des émergences montrent une certaine dilution entre les campagnes 1 et 2, pour revenir vers les premières représentations lors de la campagne 5. Ainsi, le cycle hydrochimique global est souvent compensé.

Nous avons jugé opportun de comparer les présents résultats avec ceux de la classification hydrochimique quantitative du chapitre 7.1. Les faciès hydrochimiques correspondant à chaque émergence ont ainsi été reportés sur la figure 7.3.

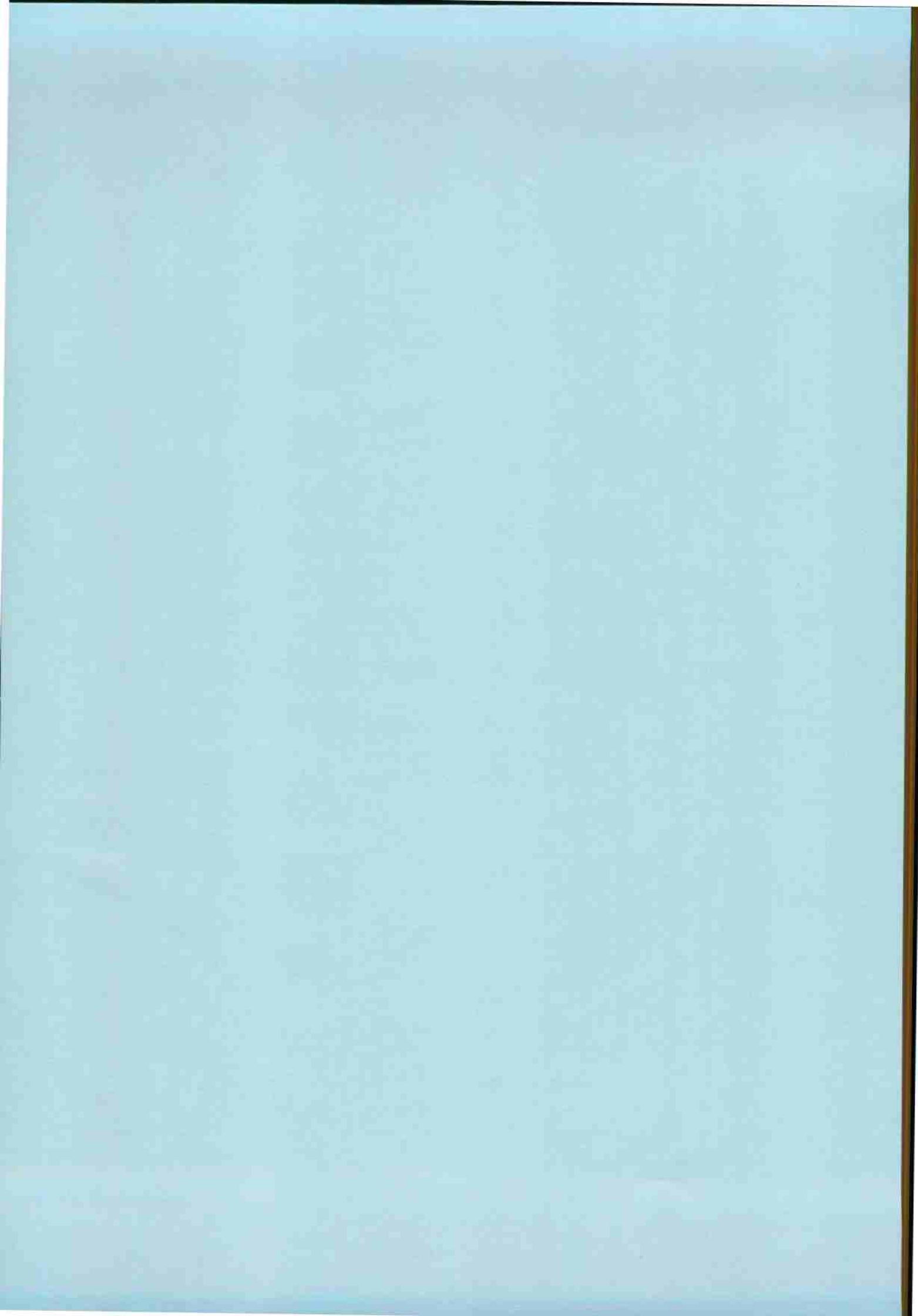
Les faciès 1 et 2A, qui comportent la plupart des eaux du flysch, affichent des pôles assez bien définis, surtout vers les basses "concentrations". Le faciès 2A se divise en deux noyaux, un vers les basses valeurs du facteur 2, qui correspondent bien à des exutoires d'altitude dans le secteur NE de la nappe, et l'autre vers les hautes valeurs, qui contiennent des sources du secteur central, là où des écoulements transversaux à la nappe peuvent avoir lieu.

Les faciès 4A, 5B et 5D, caractérisés par de faibles incidences des terrains extra-flysch, apparaissent effectivement séparés des faciès 1 et 2A et dispersés, surtout vers les hautes "concentrations".

En résumé, l'analyse multivariée en composantes principales a permis de vérifier les faciès hydrochimiques des composés majeurs et mineurs obtenus lors de la classification chimique des eaux (cf. chap. 7.1.1), cette fois-ci en fonction des cycles hydrologiques de hautes et basses eaux, faisant apparaître l'amplitude du cycle dilution-concentration.

CHAPITRE 8

DISCUSSION SUR L'HYDROCHIMIE DES EAUX ET DES ROCHES



8. DISCUSSION SUR L'HYDROCHIMIE DES EAUX ET DES ROCHES

8.1 EAUX SOUTERRAINES CONSIDÉRÉES

Le lien eau-roche est un sujet difficilement abordable lorsque le squelette aquifère est formé par une très grande hétérogénéité pétrographique et minéralogique, comme dans le cas des flyschs. Afin que la comparaison eau-roche soit le plus représentative possible des différents terrains géologiques, les points d'eau retenus sont ceux qui manifestent une influence dominante d'un type de terrain (cf. tabl. 8.1, choix 1 à 6), d'après la caractérisation géologique des bassins traitée dans le chapitre 7.2.

Ces points d'eau sont : 28 sources à influence des flyschs du Niesen (s.s.), dont 22 ont leur exutoire en surface et 6 correspondent aux émergences souterraines dans le tunnel d'Arnon. L'analyse de 18 exutoires à influence variable des terrains extra-flysch complète la discussion pour la nappe du Niesen. Enfin, nous examinons 9 exutoires situés dans le flysch du Gurnigel. Ces groupes et les codes correspondants en fonction du type d'influence géologique sont spécifiés dans le tableau 8.1. Ces codes sont utilisés au chapitre 8.3. Rappelons que des analyses de corrélation (cf. chap. 7.3) ont été effectuées avec le groupe des exutoires du flysch du Niesen (s.s.) et celui des émergences à influence extra-flysch.

Choix, caractérisation géologique des exutoires (cf. tabl 7.1)	Exutoires	Code sur les graphiques du chap. 8.3
Flysch du Niesen (s.s.)		
1	subissant une incidence principale du flysch de Seron (4 échantillons)	S
2	subissant une incidence principale du flysch du Niesenkulm (8 éch.)	N
3	subissant une incidence principale du flysch de Frutigen (10 éch.)	F
4	souterrains dans le tunnel d'Arnon, à écoulement plus profond et lent, et à incidence du flysch du Niesen en général et surtout du flysch de Frutigen (6 échantillons)	F(N,S)
à infl. extra-flysch		
5	à incidence des différents terrains de la nappe du Niesen, qui ont la particularité de subir aussi une incidence des terrains extra-flysch à différents degrés (18 échantillons)	i(t)
Flysch du Gurnigel		
6	exutoires situés dans les faciès gréso-argileux ou gréso-calcaires du flysch du Gurnigel (9 échantillons)	G

Tableau 8.1 Exutoires retenus pour la comparaison eaux souterraines-lixiviats de roches.

8.2 ECHANTILLONS DE ROCHE ET COMPOSITION HYDROCHIMIQUE DES LIXIVIATS

Dans la discussion eau-roche, pour ce qui concerne la roche exclusivement, nous utilisons les résultats des essais de lixiviation de roches (méthodologie, cf. chap. 4.6). Les échantillons de roches correspondent aux principaux flyschs du Niesen (Frutigen, Niesenkulm et Seron). Quelques échantillons ont aussi été récoltés dans le tunnel d'Arnon et dans la nappe du Gurnigel (points d'échantillonnage, cf. chap. 4.4.4).

Les essais de lixiviation en laboratoire ont consisté à simuler la dissolution de la partie soluble des roches dans des conditions simples, mais le plus proche possible du milieu naturel. La dissolution maximale a été contrôlée par la stabilisation de la conductivité électrique du lixiviat. Les solutions ainsi obtenues (lixiviats) ont été analysées par les mêmes méthodes que pour les eaux souterraines. Ainsi nous avons obtenu la composition chimique (en éléments majeurs, mineurs et en trace) des lixiviats de roches, appelée aussi composition "hydrochimique" des roches, car il s'agit des composés de la partie soluble des roches. Les résultats bruts des analyses des lixiviats sont présentés dans l'annexe 5.

Le contenu hydrochimique des eaux et des lixiviats de roches est traité dans le chapitre 8.3, à l'aide des graphiques de concentrations classées à l'intérieur des groupes géologiques. Les groupes de lixiviats sont codés de la même manière que les groupes des eaux. Les roches des formations extra-flysch n'ont pas été considérées.

Nous présentons ici les outils qui serviront à la discussion eau-roche du chapitre 8.3, à savoir:

- La description et la désignation des échantillons de roches (tabl. 8.2).
- Les représentations graphiques de la composition hydrochimique des roches (fig. 8.1a à 8.1e)
- La matrice qui résume l'analyse de corrélation de tous les composés hydrochimiques des roches (tabl. 8.3).

Remarques sur la représentativité des échantillons de roche

Les échantillons des flyschs ont été collectés dans quelques faciès des flyschs du Niesen. L'épaisseur totale de ces derniers varie entre 400 et 1300 m. Nos échantillons n'ont par conséquent pas la prétention d'être représentatifs des milieux aquifères des flyschs. Ce chapitre a été conçu dans le but de comparer la charge chimique des eaux naturelles avec la possible charge chimique abandonnée par les roches des différentes unités géologiques et de pouvoir discuter ainsi, avec une vision globale, la provenance des sels minéraux dissous.

Etant donné que le milieu aquifère des flyschs est formé de roches détritiques et organogènes, dans ce chapitre, les échantillons de roches ont été codés: 1 pour les détritiques grossiers, 3 pour les organogènes et 2 pour les détritiques fins calcaires (tabl.8.2). Ainsi, la distinction des composés hydrochimiques par groupe de roche peut se faire facilement sur les graphiques.

Unité géologique	N° échantillon	Description de l'échantillon de roche	Code chap. 8.2
Flysch de Frutigen	F1	Conglomérat polygénique à ciment calcaire	1
	F2	Schiste marneux	2
	F3	Grès schisteux & veine de calcite	2
	F4	Schiste ardoisier peu calcaire	2
	F5	Grès calcaire schisteux	2
	F6	Microconglomérat polygénique à ciment calcaire	1
	F7	Schiste ardoisier peu calcaire	2
	F8	Conglomérat polygénique (séd., r. vertes) à ciment calcaire	1
	F9	Conglomérat polygénique à ciment calcaire	1
	F10	Grès grossier calcaire	2
Flysch du Niesenkulm	N1	Microconglomérat polygénique à ciment calcaire	1
	N2	Grès calcaire schisteux	2
	N3	Calcaire plaqueté	3
	N4	Microbrèche à ciment calcaire	3
	N5	Calcaire plaqueté	3
	N6	Schiste marneux	2
Flysch de Seron	S1	Marne	2
	S2	Dépôt de fissure (argile & calcaire)	2
	S3	Schiste marneux	2
	S4	Calcaire compact	3
	S5	Brèche polygénique à ciment calcaire	1
	S6	Conglomérat polygénique à ciment calcaire	1
	S7	Schiste marneux	2
	S8	Calcaire silteux plaqueté	2
	S9	Calcarénite	3
	S10	Schiste marneux	2
Flysch du Niesen en général (Tunnel d'Arnon)	F(N,S)1 = A1	Schiste calcaire	3
	F(N,S)2 = A2	Tuf calcaire de fissures	3
	F(N,S)3 = A3	Calcaire massif & plaqueté	3
	F(N,S)4 = A4	Calcaire plaqueté & schiste marneux	2
Flysch du Gurnigel	G1	Grès fin calcaire	2
	G2	Grès fin, peu calcaire	2
	G3	Grès fin calcaire et schiste marneux	2
	G4	Schiste gréseux calcaire	2
	G5	Marne & grès calcaire	2
	G6	Grès fin, peu calcaire	2

Tableau 8.2 Désignation et description des échantillons de roches des flyschs.

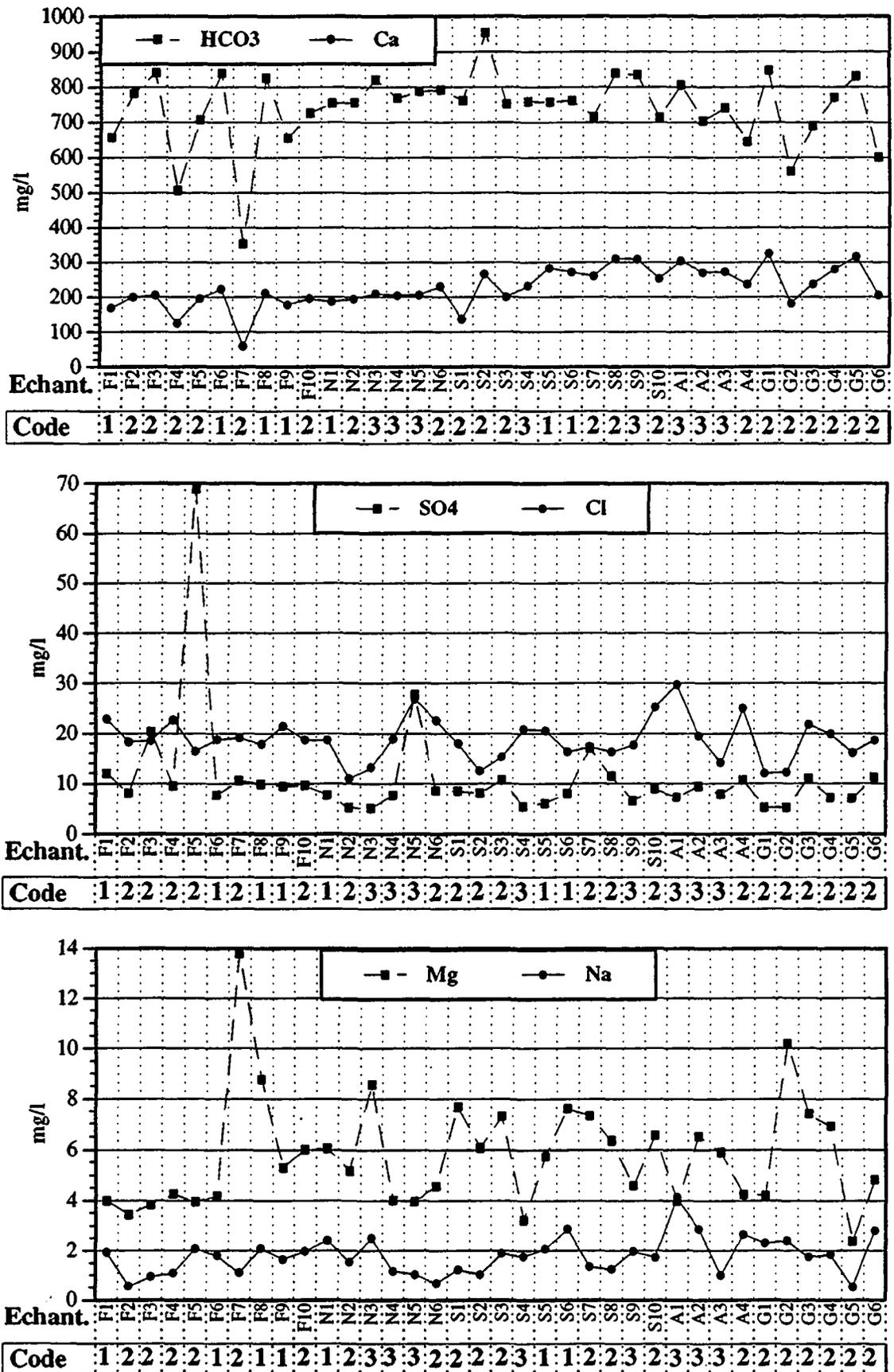


Fig. 8.1a Composés chimiques (majeurs et mineurs) des lixiviats de roches.

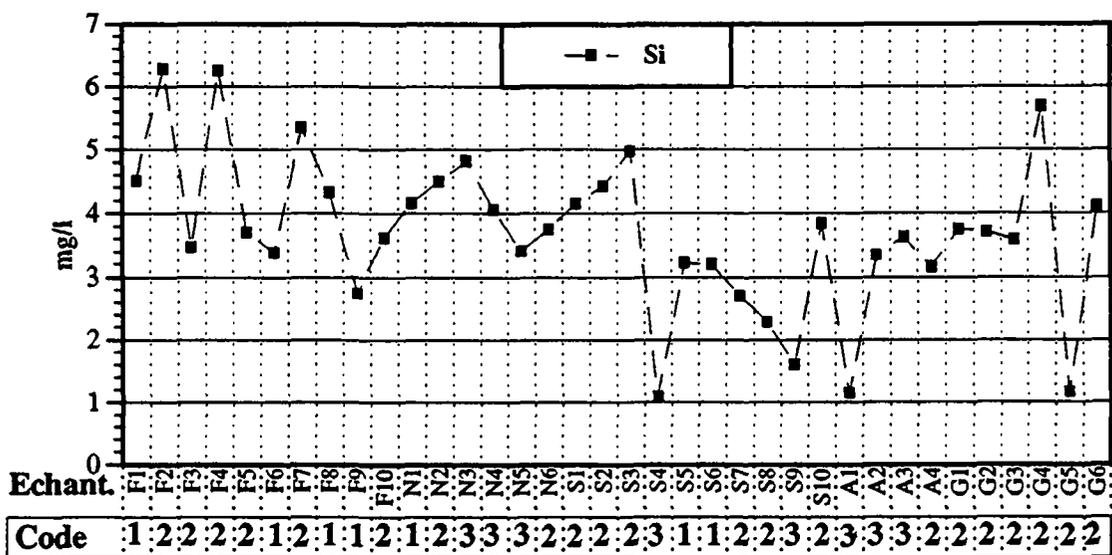
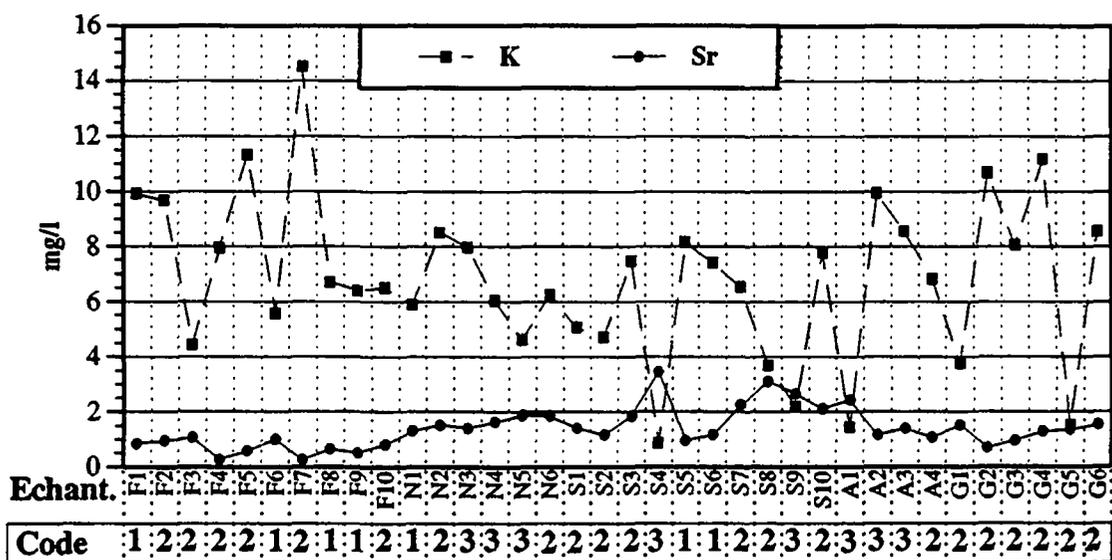


Fig. 8.1b Composés chimiques (majeurs et mineurs) des lixivats de roches.

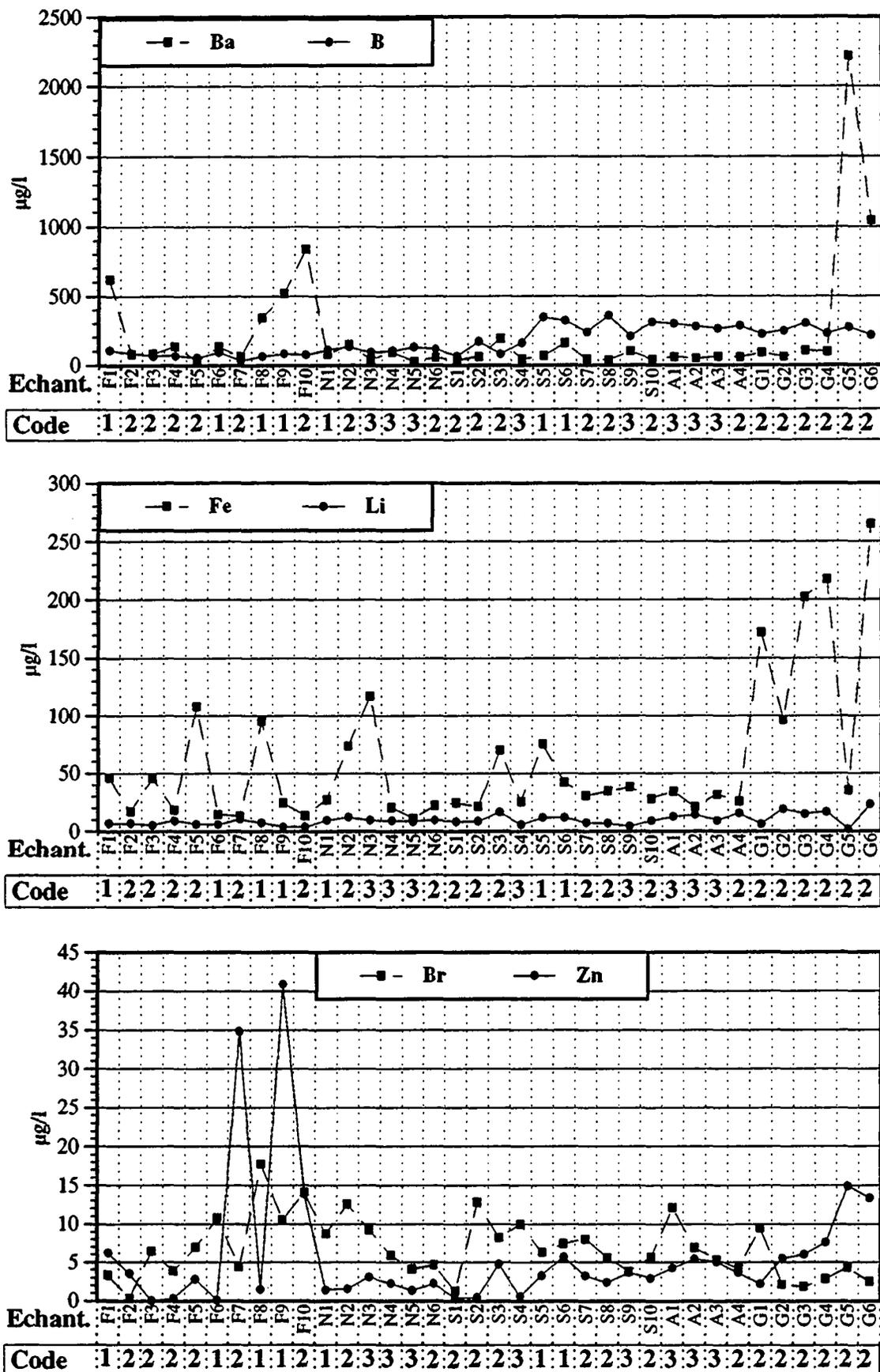


Fig. 8.1c Composés chimiques (éléments en trace) des lixiviats de roches.

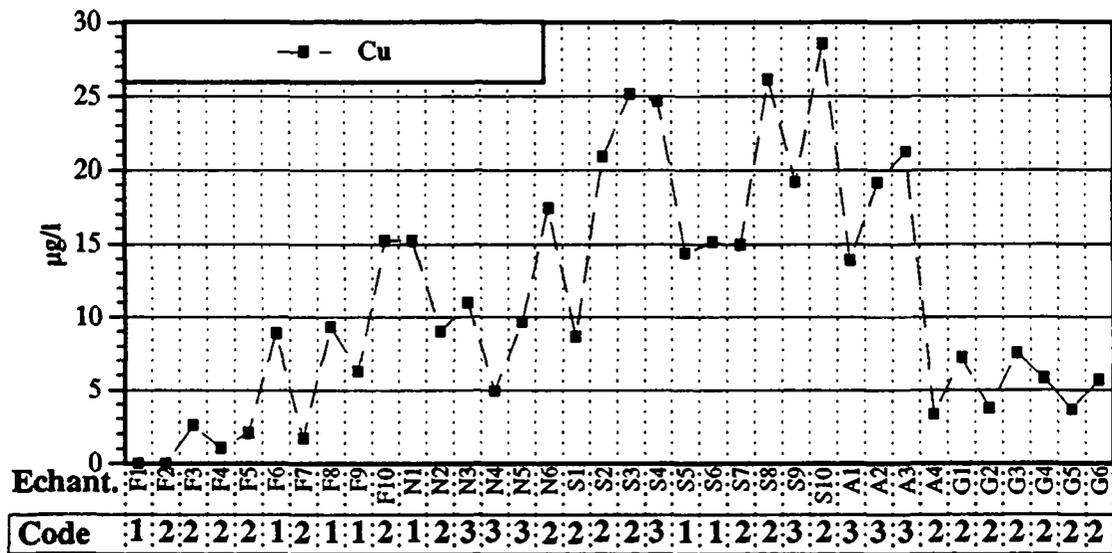
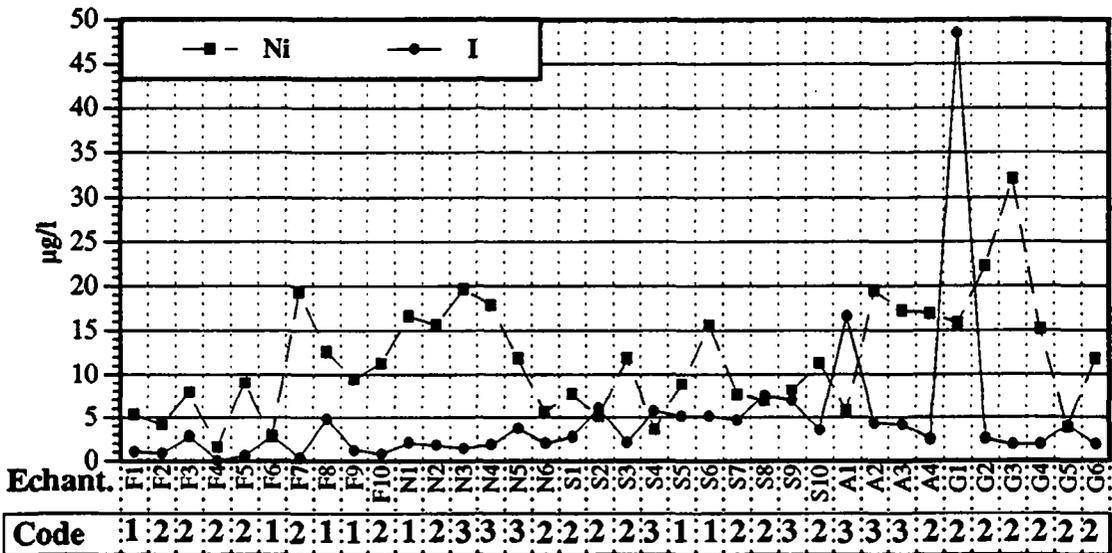
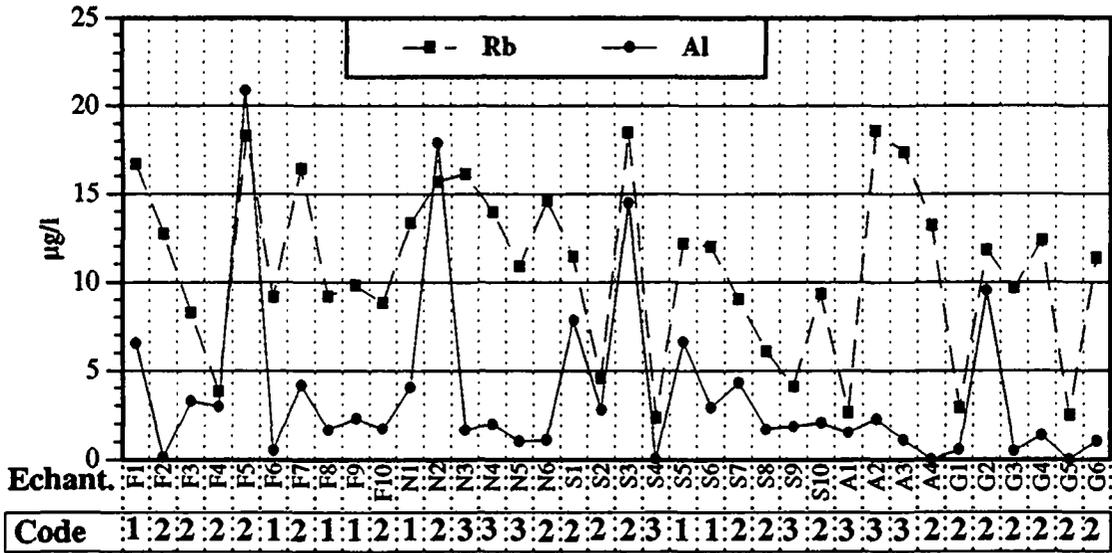


Fig. 8.1d Composés chimiques (éléments en trace) des lixiviats de roches.

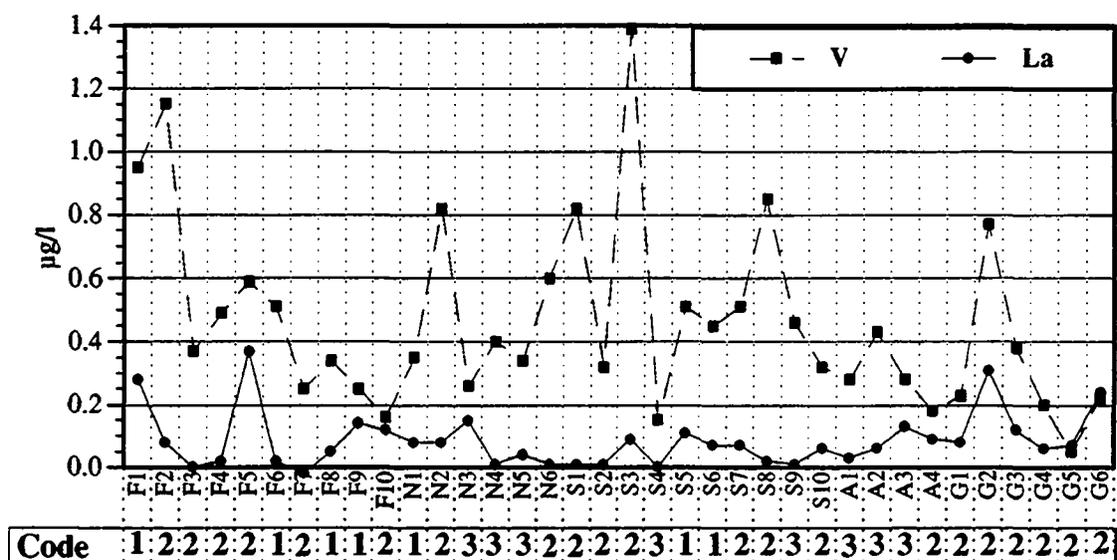
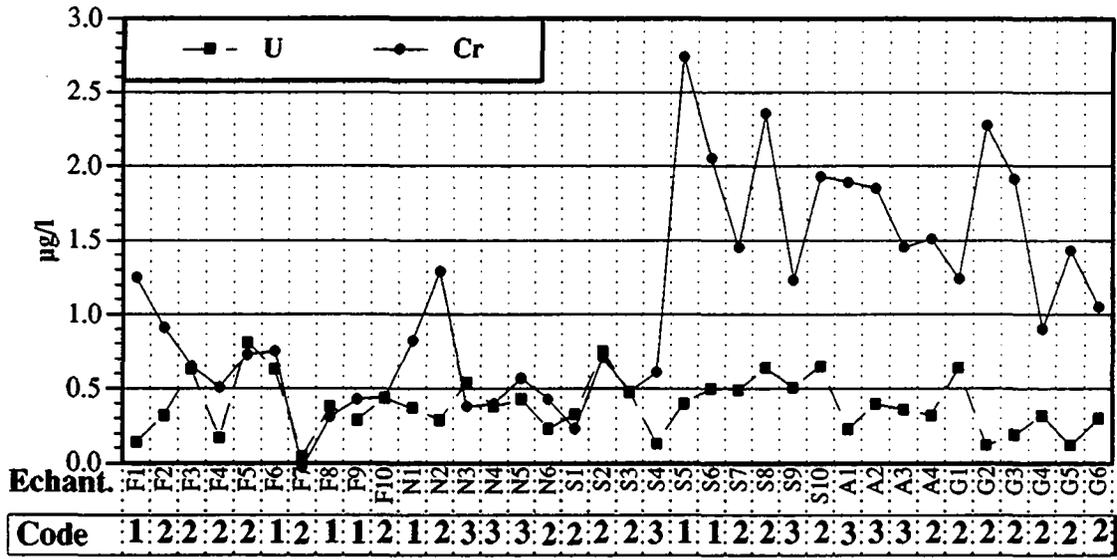
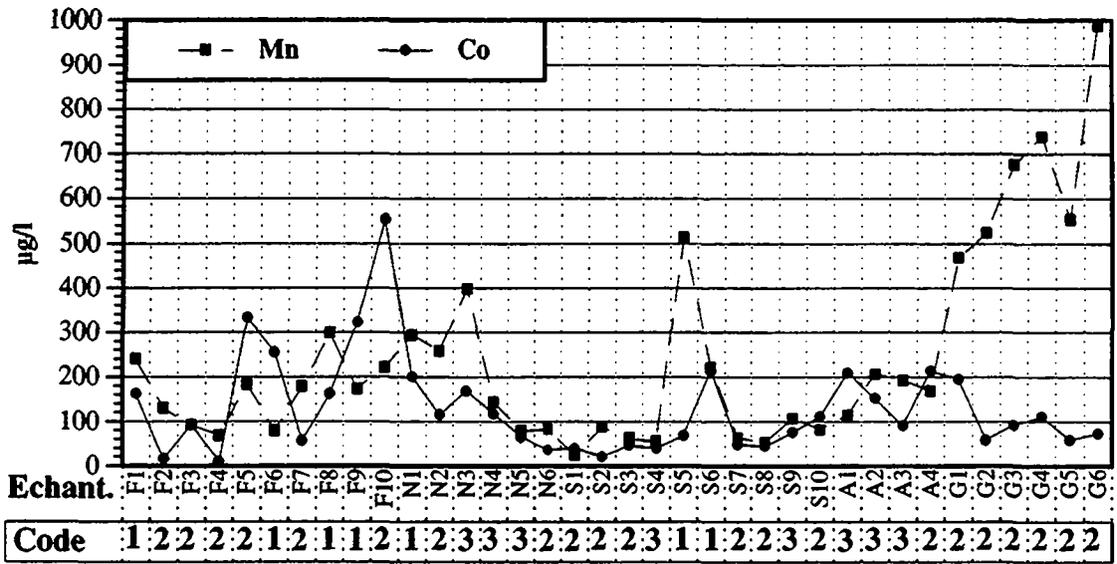


Fig. 8.1e Composés chimiques (éléments en trace) des lixiviats de roches.

	HCO3	SO4	NO3	Cl	Ca	Mg	Na	K	Sr	Si	TSD	Ba	(Fe)	(Zn)	B	Li	(Br)	Cu	(Al)	Ni	(I)	Rb	Mn	V	Cr	Co	U
HCO3	1																										
SO4	-0.07	1																									
NO3	0.36	-0.08	1																								
Cl	-0.26	0.01	-0.30	1																							
Ca	0.66	-0.12	0.10	0.00	1																						
Mg	-0.39	-0.18	0.01	-0.32	-0.33	1																					
Na	0.05	-0.04	-0.23	0.26	0.36	0.02	1																				
K	-0.63	0.25	-0.13	-0.22	-0.52	0.46	-0.14	1																			
Sr	0.44	-0.19	-0.09	0.08	0.60	-0.23	0.08	-0.69	1																		
Si	-0.33	-0.01	0.17	-0.28	-0.66	0.28	-0.44	0.67	-0.65	1																	
TSD	0.96	-0.02	0.32	-0.18	0.84	-0.41	0.17	-0.62	0.52	-0.47	1																
Ba	-0.14	-0.11	-0.07	0.04	-0.24	-0.02	0.08	0.10	-0.38	0.08	-0.20	1															
Fe	0.20	0.34	-0.11	-0.41	0.07	0.15	0.29	0.21	-0.11	0.10	0.19	-0.03	1														
Zn	-0.59	-0.06	-0.11	0.09	-0.41	0.44	-0.03	0.37	-0.38	0.02	-0.58	0.42	-0.19	1													
B	0.20	-0.23	-0.04	0.18	0.80	-0.07	0.40	-0.24	0.47	-0.54	0.43	-0.31	-0.09	-0.21	1												
Li	-0.18	-0.19	-0.03	0.07	0.09	0.22	0.39	0.26	-0.02	0.17	-0.10	-0.36	0.13	-0.14	0.36	1											
Br	0.32	-0.10	0.24	-0.22	0.17	0.13	0.37	-0.23	-0.03	-0.23	0.28	0.36	0.31	0.06	-0.07	-0.08	1										
Cu	0.41	-0.29	0.15	-0.14	0.63	0.10	0.14	-0.41	0.69	-0.45	0.50	-0.19	-0.06	-0.21	0.56	0.14	0.23	1									
Al	-0.11	0.54	-0.04	-0.39	-0.24	0.05	0.02	0.38	-0.18	0.22	-0.13	-0.01	0.56	-0.06	-0.25	0.21	0.06	-0.14	1								
Ni	-0.23	-0.07	-0.23	-0.25	-0.09	0.51	0.26	0.42	-0.19	0.13	-0.21	-0.08	0.22	0.23	0.09	0.46	0.07	0.02	0.07	1							
I	0.43	-0.19	0.11	0.28	0.71	-0.12	0.52	-0.62	0.58	-0.70	0.56	-0.26	-0.05	-0.22	0.62	0.14	0.26	0.45	-0.26	-0.20	1						
Rb	-0.28	0.24	-0.25	-0.29	-0.30	0.28	-0.03	0.75	-0.40	0.46	-0.29	0.01	0.33	0.15	-0.19	0.43	-0.24	-0.21	0.46	0.62	-0.54	1					
Mn	-0.05	-0.10	-0.14	-0.20	0.02	0.23	0.37	0.38	-0.40	0.14	-0.03	0.21	0.57	0.11	0.10	0.18	0.26	-0.16	0.13	0.47	-0.13	0.39	1				
V	0.07	0.04	-0.08	-0.26	-0.10	-0.09	-0.24	0.21	0.05	0.39	0.01	0.02	0.16	-0.18	-0.14	0.17	-0.36	-0.05	0.47	-0.27	-0.19	0.32	-0.17	1			
Cr	0.17	-0.12	-0.13	0.12	0.73	-0.15	0.41	-0.08	0.31	-0.42	0.38	-0.21	0.04	-0.24	0.92	0.32	-0.10	0.38	-0.05	0.02	0.52	-0.07	0.23	0.06	1		
Co	-0.04	0.25	-0.21	0.07	-0.04	-0.07	0.47	0.08	-0.35	-0.19	-0.03	0.65	0.11	0.32	-0.13	-0.23	0.46	-0.16	0.07	0.19	-0.11	0.10	0.30	-0.32	-0.07	1	
U	0.57	0.40	0.36	-0.39	0.45	-0.09	-0.01	-0.12	0.07	-0.08	0.61	-0.21	0.29	-0.35	0.19	-0.14	0.20	0.32	0.20	-0.02	0.07	-0.05	-0.07	-0.01	0.21	0.14	1
La	-0.13	0.56	-0.16	-0.18	-0.09	-0.03	0.27	0.54	-0.36	0.19	-0.08	0.28	0.62	0.04	-0.11	0.01	0.02	-0.25	0.54	0.18	-0.34	0.57	0.47	0.20	0.09	0.43	0.19

Tableau 8.3 Matrice de corrélation des composés chimiques des lixiviats de roches.

8.3 COMPARAISON EAUX SOUTERRAINES - LIXIVIATS DE ROCHES

8.3.1 Considérations générales

La comparaison eau-roche est présentée par des graphiques contenant les composés hydrochimiques des eaux, avec en regard ceux des roches. Les concentrations des différents composés sont classées par ordre croissant en ordonnées et par unités géologiques en abscisses (fig. 8.2 à 8.12).

Nous pouvons constater d'une façon générale un contenu plus élevé en sels dissous dans les lixiviats de roches que dans les eaux naturelles. Ce fait peut être expliqué ainsi:

- Les concentrations des composés des lixiviats de roches correspondent à la stabilisation de la conductivité, atteinte lors de l'essai en laboratoire.
- Dans le cas des eaux froides naturelles, la saturation n'est pas souvent obtenue, soit par manque de matière dans la phase solide (déjà lessivée), soit parce que l'équilibre n'a pas eu le temps de se faire en raison de la vitesse rapide des écoulements.
- Par ailleurs, lors des essais de lixiviation (à base des poudres de roches), la surface de contact eau-roche est plus élevée que dans la nature.

8.3.2 Minéralisation totale

Le total des sels dissous (TSD) correspond à la somme des cations et des anions majeurs et mineurs analysés, dont l'essentiel de la charge est fourni par les hydrogénocarbonates et le calcium.

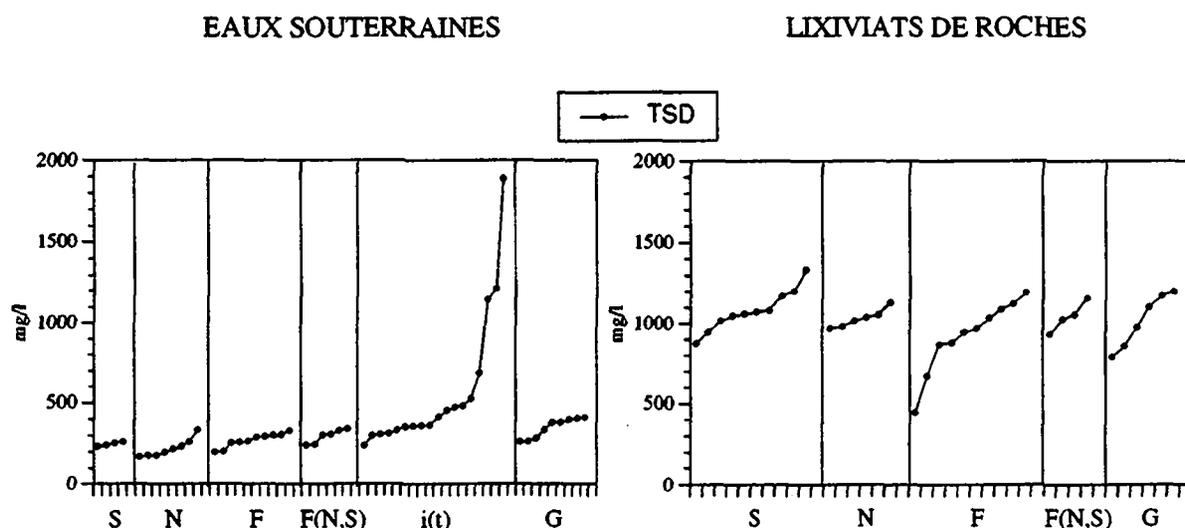


Fig. 8.2 Comparaison de la minéralisation totale des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].

Les lixiviats de roches atteignent un TSD (moy. 1000 mg/l) deux, voire quatre fois supérieur à celui des eaux souterraines (fig. 8.2). Les eaux étudiées sont donc en déficit en sels minéraux majeurs (surtout HCO_3 et Ca) par rapport aux lixiviats de roches. Ce fait peut être expliqué par les conditions générales d'essai décrites ci-dessus (cf. chap.8.3.1).

Les exutoires à très forte incidence extra-flysch ont en général un TSD supérieur à celui des roches des flyschs (code i(t) sur la fig. 8.2). Ceci confirme la composante hydrochimique extra-flysch de ces eaux.

Dans la figure 8.2, nous pouvons aussi constater la ressemblance entre les minéralisations totales des eaux à l'intérieur du flysch du Niesen (Seron, Niesenkulm et Frutigen). Cette ressemblance peut aussi être notée dans le cas des lixiviats de roches, soit sur la figure 8.2 ou, mieux encore, sur la figure 8.1a pour les composés majeurs des lixiviats.

Une explication à ce fait peut être trouvée dans la structure plissée des flyschs du Niesen et dans l'alternance des faciès à l'échelle métrique ou décimétrique (conglomérats, pélites, turbidites ou calcaires) qui ne permettent pas d'écoulements différenciés par unité de flysch. Par contre, une distinction claire intervient à la limite du flysch du Niesen, où les eaux souterraines se rapprochent très nettement de celles à influence des terrains extra-flysch.

Les eaux souterraines du flysch du Gurnigel ont un TSD un peu plus élevé que celles des flyschs du Niesen (fig. 8.2). Par contre leurs lixiviats de roches ont un TSD similaire. Ceci indique un temps de séjour plus élevé pour les eaux souterraines du flysch du Gurnigel. Par ailleurs, le débit de ces sources est moins important (cf. chap. 6.2.1). On peut expliquer hydrogéologiquement cela par une perméabilité moindre des aquifères du flysch du Gurnigel (gréso-calcaire), par rapport à celle à porosité de fissures (y compris le micro-karst) du flysch du Niesen.

8.3.3 Les composés majeurs et mineurs

Les hydrogénocarbonates et le calcium sont les ions les plus abondants des eaux souterraines et des lixiviats de roches (fig. 8.3). Leur présence dans les lixiviats de roches est de 2 à 3 fois plus importante que dans les eaux, comme le souligne aussi le TSD. Ce fait peut être expliqué par les conditions générales d'essai (cf. chap. 8.3.1), et par la tendance acide des eaux de flysch (cf. chap. 6.2.3) qui témoigne que l'eau n'a pas complètement réagi avec les carbonates existants dans la roche. Par ailleurs l'origine du HCO_3 et du Ca liée aux carbonates, surtout de calcium (calcite) dans les eaux des flyschs (s.s.) est corroborée par leur coefficient de corrélation $r = 0.98$ (cf. annexe 4A), et par des variations similaires de ces deux composés dans les lixiviats des roches (cf. fig. 8.1a).

Les eaux à forte influence des terrains extra-flysch se différencient de celles des flyschs par leur anomalie très élevée en calcium (fig. 8.3). Le Ca des eaux à influence extra-flysch est bien corrélé avec les SO_4 ($r = 1$, cf. annexe. 4B), ce qui illustre leur provenance gypseuse.

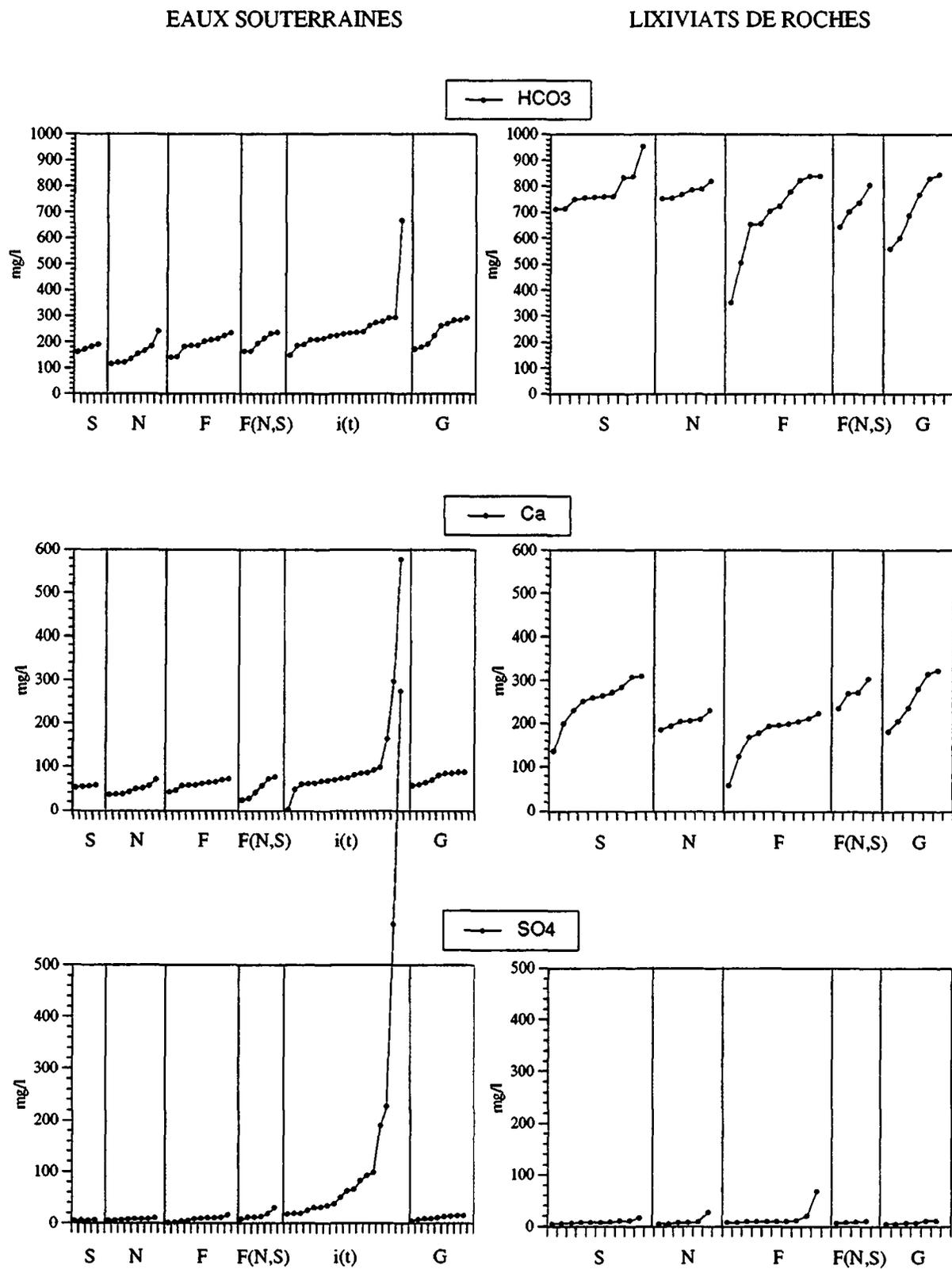


Fig. 8.3 Contenu en hydrogénocarbonates, calcium et sulfates des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].

Les *sulfates* des eaux et des lixiviats de roches des flyschs présentent généralement des teneurs très faibles (fig.8.3). Les émergences du tunnel d'Arnon [F(N,S)] atteignent les valeurs maximales de l'ordre de 30 mg/l, qui peuvent être rapprochées des valeurs maximales de 28 ou 69 mg/l trouvées dans un échantillon de calcaire plaqueté et dans un grès calcaire schisteux des flyschs (cf. fig. 8.1a, échantillons N5 et F5). Ces basses concentrations ne sont pas indicatrices d'une origine évaporitique. Elles doivent être essentiellement liées à l'oxydation des sulfures comme la pyrite présente dans les éléments cristallins et sédimentaires des flyschs.

Les fortes concentrations en sulfates des sources à incidence extra-flysch (code i(t) sur la figure 8.3) n'ont aucune relation avec les roches des flyschs. Elles proviennent surtout de la dissolution des sulfates des évaporites du Trias. A part la forte corrélation entre les sulfates et le calcium, $r = 1$, déjà indiquée, l'analyse présente un $r = 0.99$ entre les sulfates et le strontium, dont l'origine la plus probable est la célestine (SrSO_4). En outre, le strontium a déjà été signalé comme un des traceurs naturels des eaux évaporitiques du Trias (MANDIA 1991).

Le *magnésium*, deuxième cation le plus abondant des eaux, a un comportement intéressant. Dans les exutoires des flyschs (codes S, N et F, fig. 8.4), les teneurs ne dépassent pas 6 mg/l. Par contre, dans les émergences du tunnel d'Arnon où les flyschs sont confondus (code F(N,S)), le magnésium atteint des valeurs de 24 mg/l. Donc, les eaux souterraines à écoulement plus profond et lent dans les flyschs s'enrichissent en magnésium. Les lixiviats de roches ont des teneurs entre 4 et 6 mg/l, à l'exception d'un échantillon de schiste ardoisier (F7) du flysch de Frutigen qui a fourni 14 mg/l (cf. fig. 8.1a). Ainsi, le magnésium des eaux profondes proviendrait des éléments dolomitiques des roches des flyschs, lesquels sont moins représentés dans les échantillons des roches testées.

Bien que la dissolution des dolomies soit la principale source du magnésium, une partie de celui-ci peut être attribuée à l'altération des minéraux ferro-magnésiens (amphiboles, pyroxènes, olivine, etc.) des roches basiques ou de minéraux argileux comme la glauconite et la Fe-chlorite existant dans les flyschs.

Les exutoires à influence des terrains extra-flysch peuvent atteindre des valeurs de 29 mg/l, qui entrent dans la fourchette des concentrations que présentent les eaux froides des évaporites du Trias déjà évoquées dans le chapitre 6.2.9. Quant aux eaux et lixiviats de roches du flysch du Gurnigel, ils ont des teneurs allant jusqu'à 10 mg/l.

Le *sodium* a une présence globalement faible (< 4 mg/l) dans les eaux et dans les lixiviats de roches des flyschs (fig. 8.4). Si les écoulements sont plus profonds (cas du tunnel d'Arnon -F(N,S)-), les concentrations en sodium augmentent jusqu'à 10 mg/l.

L'origine du sodium est essentiellement liée à l'hydrolyse des feldspaths (p. ex. l'albite) ou à l'altération des clinopyroxènes, clin amphiboles, zéolites ou de la paragonite (COCCO & al. 1978), contenus dans les roches des flyschs du Niesen.

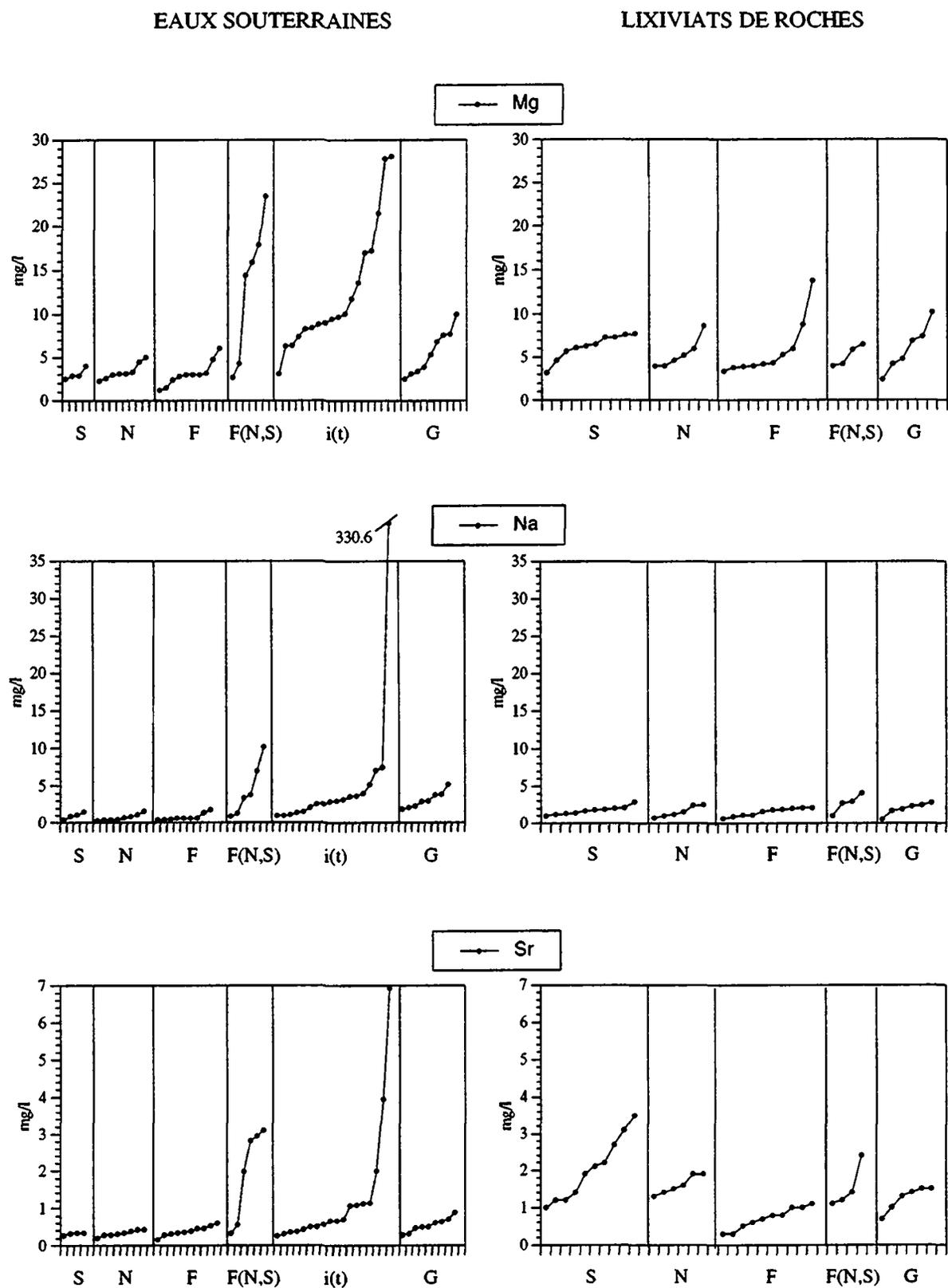


Fig. 8.4 Contenu en magnésium, sodium et strontium des eaux souterraines et des lixiviats de roches par flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].

Pour les eaux à influence extra-flysch, la très forte concentration en sodium (330.6 mg/l) de la source N° 67 a déjà été évoquée dans le chapitre 7.1.1. Cet exutoire, situé à la périphérie de la nappe du Niesen, est celui à plus forte incidence des terrains extra-flysch. Par ailleurs, le coefficient de corrélation Na-Cl pour les eaux de ce type est de 0.83 (cf. annexe 4B), ce qui confirme leur origine évaporitique.

Le *strontium* est un des éléments mineurs des eaux et des lixiviats de roches des flyschs du Niesen. Sa présence est très faible (< 0.6 mg/l) dans les exutoires situés en surface (S, N, et F, cf. fig. 8.4). S'il s'agit d'écoulements plus profonds et plus lents (cas du tunnel d'Arnon, code F(N,S)), les concentrations peuvent être multipliées par 5. Les solutions de roches simulées en laboratoire atteignent des teneurs de 3.5 mg/l. Ainsi, les eaux à écoulements profonds avoisinent l'"équilibre" eau-roche, alors que celles à exutoire superficiel sont en déficit selon un facteur 3. Quant aux émergences du flysch du Gurnigel, leurs eaux montrent aussi un déficit, de l'ordre d'un facteur 2.

L'origine du strontium peut être très diverse. Il fait partie des feldspaths alcalins, plagioclases, micas, amphiboles, pyroxènes, olivine et grenat (STUEBER & al. 1978) que l'on trouve dans les apports détritiques des flyschs. Il est également présent dans les sédiments pélagiques sous forme de fractions carbonatées, glauconites ou autres (PETERMAN & al. 1978).

Les fortes concentrations en strontium des exutoires à influence extra-flysch n'ont pas de relation avec les résultats obtenus des lixiviats de roches des flyschs. Leur provenance liée aux sulfates (p. ex. la célestine) a déjà été signalée et mise en évidence par un coefficient de corrélation SO_4 -Sr de 0.99 (cf. annexe 4B).

La présence du *silicium* dans les eaux des exutoires des flyschs du Niesen situés en surface (S, N, F, fig. 8.5) varie notamment entre 1 et 3 mg/l.

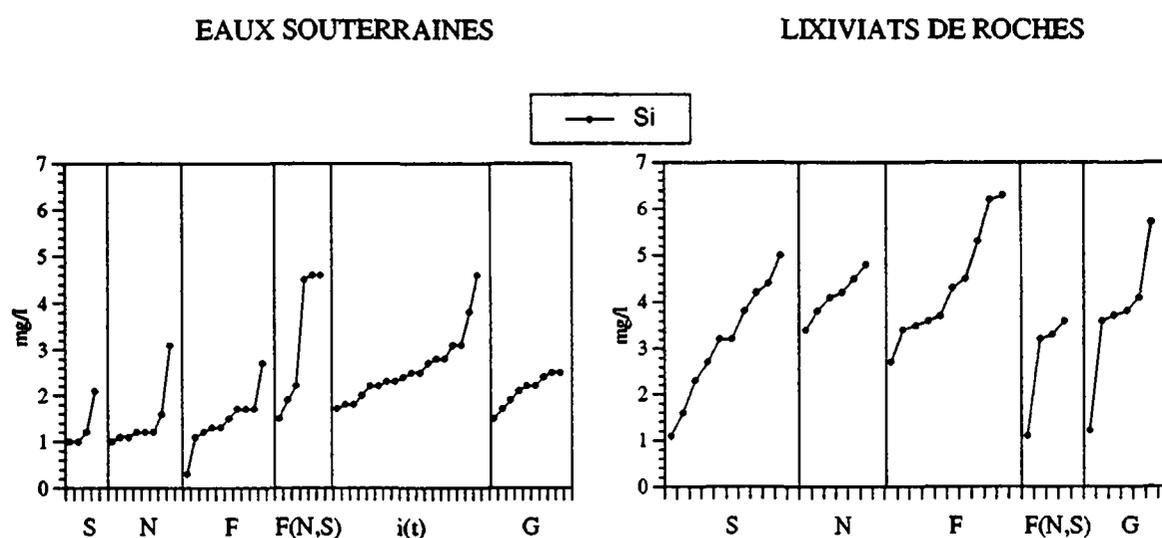


Fig. 8.5 Contenu en silicium des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].

Les eaux à écoulement plus lent et plus profond dans les flyschs du Niesen (F(N,S), fig. 8.5) peuvent atteindre des concentrations de 4.6 mg/l.

Quant aux lixiviats de roches, ils ont un contenu en silicium entre 2 et 6 mg/l pour la plupart des cas (fig. 8.5). Un accord des concentrations entre les eaux et les lixiviats de roches peut donc être relevé, surtout dans le cas des eaux souterraines à écoulement profond.

Les sources subissant l'influence des terrains extra-flyschs ne présentent pas davantage de silicium. Leur concentration est conforme à celle des terrains évaporitiques du Trias (moy. 3.2 mg/l, MANDIA 1991).

Le silicium se trouve dans l'eau surtout sous forme de H_4SiO_4 . Ce composé forme la charpente minérale des roches silicatées et il se trouve principalement sous forme peu soluble (quartz), ou comme composant des silicates. L'hydrolyse de ceux-ci libérera la silice dans l'eau. Dans les flyschs du Niesen, la plupart des fragments détritiques sont des roches silicatées.

Le contenu en *chlorures* des lixiviats de roches des flyschs oscille entre 10 et 30 mg/l, alors que les eaux des flyschs ont des concentrations assez basses (< 1.5 mg/l), à l'exception d'une émergence à écoulement plus profond qui atteint 3.5 mg/l (fig. 8.6). Cet important déficit des chlorures dans les eaux peut être expliqué par les conditions de l'essai de lixiviation. Des échantillons de roche saine ont été mis en solution, leur surface de contact eau-roche est plus étendue que dans la nature. En outre, la mobilité de cet élément est connue, ainsi dans le milieu aquifère du flysch du Niesen (à porosité surtout de fissures), les chlorures seraient partiellement lessivés.

Le potassium présente le même type de déficit lixiviat de roche - eaux que les chlorures. Néanmoins la liaison entre ces deux composés n'a pas été déterminée dans l'analyse de corrélation. Un coefficient de -0.22 pour les lixiviats et de -0.02 pour les eaux des flyschs (s.s.) ont été trouvés (cf. tabl. 8.3 et annexe 4A). Ceci confirme également l'absence de sel gemme dans les flyschs, roches détritiques terrigènes déposées en pentes marines profondes.

Par conséquent, ces basses concentrations en chlorures des eaux des flyschs peuvent plutôt être liées à l'altération des micas ou des amphiboles (LEELANADAM (1969c) in FUGE (1978)) des roches des flyschs .

Les exutoires à forte influence extra-flysch peuvent atteindre jusqu'à 10 mg/l, tout à fait en relation avec les eaux évaporitiques de l'Ultraschweiz (moy. 8.5 mg/l, MANDIA 1991).

Le *potassium* est l'élément mineur à plus faible concentration dans les eaux des flyschs et même dans celles à influence extra-flysch (< 3.2 mg/l).

Les écoulements lents et profonds dans les flyschs du tunnel d'Arnon peuvent atteindre des concentrations en potassium 3 à 4 fois supérieures à celles des exutoires en surface. Néanmoins, elles restent nettement inférieures à celles de la plupart des lixiviats de roches, avec un déficit de l'ordre d'un facteur 5.

L'origine du potassium dans les eaux des flyschs peut être associée à l'hydrolyse des feldspaths ou à l'altération des micas ou des zéolites (COCCO & al. 1978). Parmi les argiles du flysch du Niesen, l'illite et la glauconie peuvent aussi fournir du potassium.

Par contre, le potassium des eaux à forte incidence évaporitique trouvera son origine dans les halogènes comme la sylvite, par exemple.

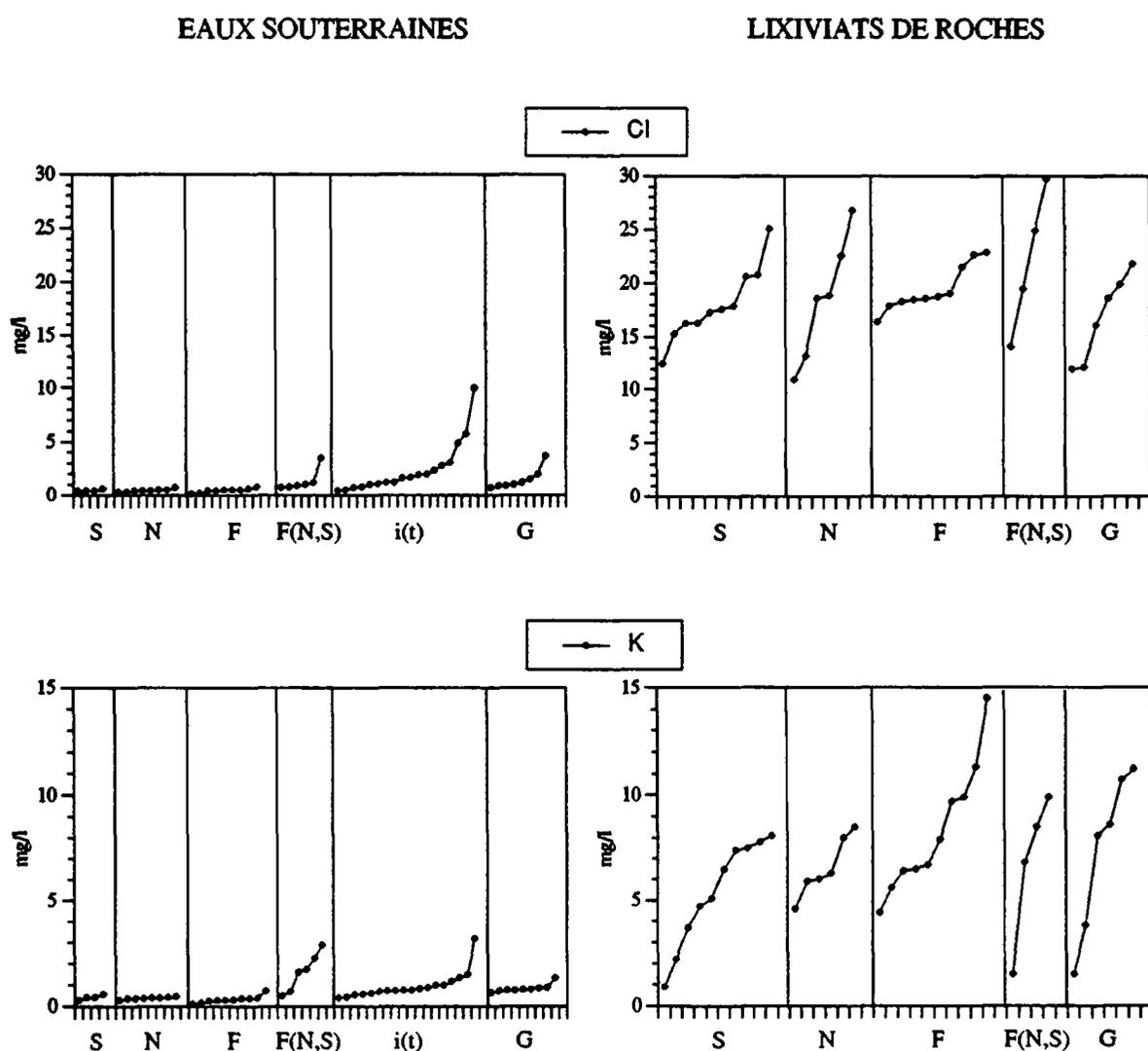


Fig. 8.6 Contenu en chlorures et en potassium des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].

8.3.4 Les éléments en trace

Rappelons que le nombre d'échantillons pour certains éléments a été réduit lorsque des anomalies extra-géologiques furent détectées (cf. tabl. 4.5). Dans un tel cas, l'élément est écrit entre parenthèses sur l'en-tête des graphiques. Les éléments en trace les plus significatifs des eaux du flysch du Niesen sont le baryum, le fer et le bore (fig. 8.7).

Le *baryum* peut atteindre des teneurs de 76 µg/l dans les exutoires situés en surface (S, N, et F, fig. 8.7) et 112 µg/l pour ceux localisés dans le tunnel d'Arnon, à écoulement plus profond et plus lent (code F(N,S)). Les lixiviats de roches du flysch du Niesen ont des teneurs entre 50 et 140 mg/l, à l'exception des échantillons des conglomérats polygéniques et d'un grès grossier (F1, F8, F9 et F10, cf. fig. 8.1c) du flysch de Frutigen qui peuvent atteindre 623 µg/l. Par conséquent, même si la présence de baryum dans les eaux est importante, des éléments détritiques grossiers pourraient fournir davantage de cet élément.

L'origine du baryum est variée. Il peut se trouver comme carbonates (p. ex. barytocalcite), sulfates (p. ex. barytine), nitrates (p. ex. nitrobarytine) ou phosphates; on le rencontre aussi comme silicates rares, à savoir le Ba-feldspath (NEUNHAM & MEGAW in FISCHER 1978) ou la barylite (ABRASHEW, ILYUKHIN & BELOV in FISCHER 1978) des roches des flyschs.

Les exutoires à influence extra-flysch ont montré des teneurs inférieures à ceux du flysch du Niesen et surtout à ceux dont l'écoulement est profond.

Quant aux eaux du flysch du Gurnigel, les concentrations en baryum de ses exutoires sont comparables à celles trouvées dans le Niesen, deux échantillons de roches arrivent même à 1 ou 2.2 mg/l dans des marnes et du grès calcaire (cf. fig. 8.1c).

Le *fer* dans les eaux souterraines des flyschs du Niesen est caractérisé par des valeurs entre 10 et 50 µg/l, y compris dans les émergences du tunnel d'Arnon à écoulements profonds et lents (fig. 8.7). Les lixiviats de roches montrent un contenu moyen entre 40 et 50 mg/l et des maxima allant jusqu'à 117 µg/l. Le fer peut provenir des minéraux ferro-magnésiens y compris la Fe-chlorite et la glauconite, des sulfures ou des oxydes des roches des flyschs.

Même si cela a déjà été signalé, notons que la présence de fer est liée au pH et au Eh du milieu. Les eaux du flysch du Niesen avec un pH moyen de 6.7 et un Eh d'environ 200 mV entrent dans le domaine des eaux stables (FREEZE et al. 1979).

Les exutoires à influence extra-flysch n'ont pas de concentrations en fer au-delà de celles des flyschs, à l'exception de la source N° 67 avec 283.9 µg/l, ce qui proviendrait de l'oxydation de la pyrite (cf. chap. 7.1.1 faciès N°6).

Quant aux exutoires du flysch du Gurnigel, seules deux sources ont été retenues, leur concentrations sont de l'ordre de 9 et 21 µg/l. Par contre les échantillons de roches indiquent des valeurs allant jusqu'à 265 µg/l. Ceci montre le déficit en fer de ces eaux.

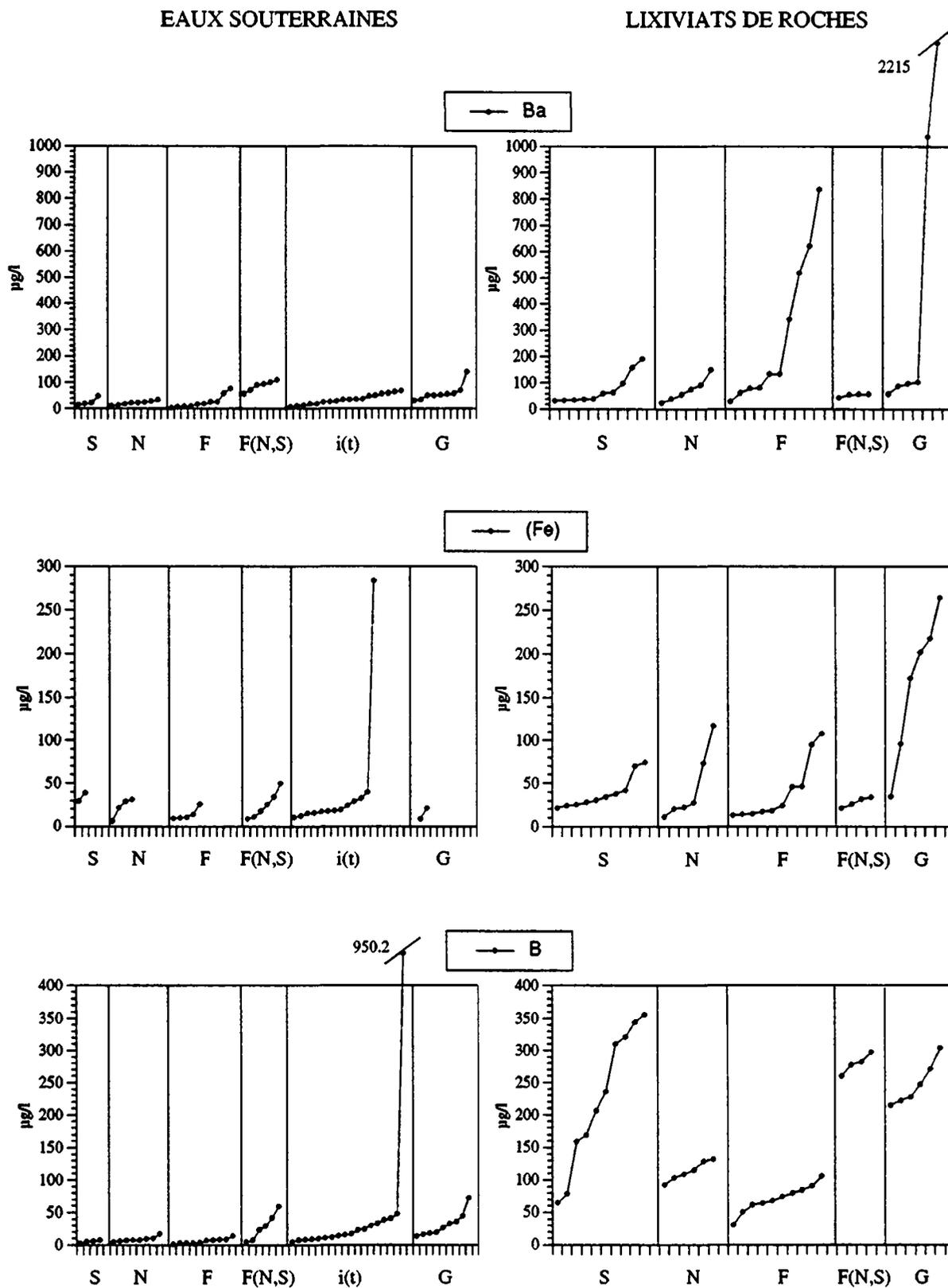


Fig. 8.7 Comparaison du contenu en (Ba, Fe et B) des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].

Le *bore* est faiblement représenté dans les eaux par rapport aux lixiviats. Un maximum de 21 µg/l dans les exutoires en surface et de 60 µg/l dans ceux du tunnel d'Arnon ont été enregistrés (fig. 8.7). Les tests de lixiviation de roches donnent des teneurs entre 31 et 356 µg/l. Le contenu plus élevé provient d'une brèche et d'un conglomérat polygénique, ainsi que d'un calcaire silteux des flyschs du Niesen (éch. S5, S6 et S8, cf. fig. 8.1c).

Le bore, combiné à l'oxygène, forme une large variété d'anions dans des cristaux (CHRIST 1978), dont les plus courants sont les borates présents plutôt dans les fragments des roches basiques et dans les sédiments marins des flyschs.

Les eaux à influence extra-flysch n'indiquent pas d'anomalie par rapport aux valeurs précitées, à part la très forte anomalie (950.2 µg/l) de la source N° 67 à influence particulière des terrains extra-flysch (cf. aussi chap. 6.2.31).

Le *lithium* des exutoires des flyschs du Niesen situés en surface (S, N et F, fig.8.8) atteint des concentrations d'environ 10 µg/l. Dans ceux du tunnel d'Arnon (code F(N,S)), elles peuvent augmenter jusqu'à 29 µg/l. Les tests de lixiviation ont fourni un maximum de 16.6 µg/l, ce qui révèle un surplus de cet élément dans les eaux à écoulement profond et lent. Ainsi, les circulations profondes traverseraient des roches plus riches en minéraux lithinifères que les roches testées en laboratoire.

Le lithium fait partie de plusieurs minéraux. Il peut être associé aux silicates fémiqes, dans lesquels le lithium a remplacé le magnésium. Tel est le cas de la série : orthopyroxène - clinopyroxène - amphibole - Li-mica (lépidolite), où l'augmentation de la concentration en lithium est régulière (RANKAMA, SAHAMA & HOWIE in HEIER 1978). Ces minéraux sont constitutifs surtout des roches cristallines, abondantes dans les fragments détritiques des flyschs du Niesen.

Les exutoires à influence extra-flysch ne présentent pas d'anomalies plus fortes que celles du flysch du Niesen, excepté la très forte valeur (277.2 µg/l) qui était une des caractéristiques de la source particulière N° 67. Dans le cas du flysch du Gurnigel, les sources ont des concentrations inférieures à celles des lixiviats correspondants.

Les concentrations en *brome* ont été prises comme ordre de grandeur à cause des problèmes d'effet mémoire (cf. tabl. 4.5). Cependant, une comparaison globale des résultats peut être réalisée. Les tests de lixiviation ont montré un contenu légèrement supérieur par rapport à celui des eaux (fig. 8.8).

Les émergences à écoulement plus profond situées dans le tunnel d'Arnon (code F(N,S) sur la fig. 8.8) présentent les concentrations les plus faibles, donc le contraire de ce qui a normalement été observé pour les autres éléments. Une explication de ce fait peut être trouvée dans le comportement du brome qui remplace partiellement le chlore dans certains minéraux comme la carnallite ($KMgCl_3 \cdot 6H_2O$) (BRAITSCHE & HERRMANN 1963 in BREHLER 1978); ainsi on le rencontrerait plus rarement à l'état soluble dans les écoulements profonds.

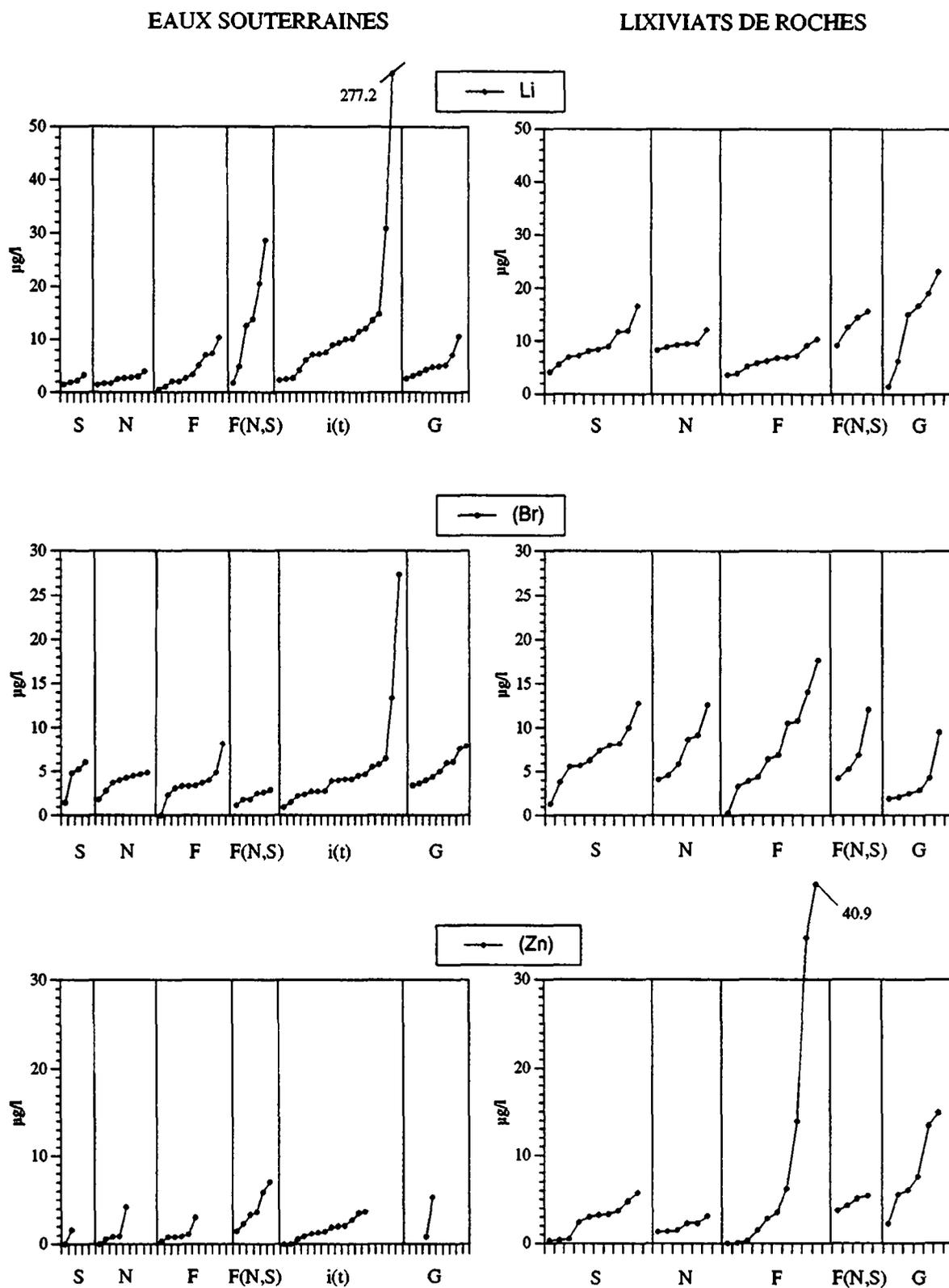


Fig. 8.8 Comparaison du contenu en (Li, Br et Zn) des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N , F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].

Par ailleurs, la présence du brome dans les eaux du flysch du Niesen peut être associée aux bromates. Quant aux eaux à influence extra-flysch, deux de leurs sources présentent des anomalies (de 13 et de 28 mg/l) qui peuvent être expliquées par la présence de bromures dans les évaporites. On peut constater un comportement similaire pour l'iode.

Les eaux et les lixiviats de roches du flysch du Gurnigel présentent des concentrations similaires, donc à l'état d'"équilibre" dans les conditions d'essais de lixiviation.

Le *zinc* est l'un des éléments dont le nombre d'exutoires a dû être réduit (de 76 à 46) à cause des contaminations dues à la tuyauterie. Les exutoires restants présentent des valeurs fiables en zinc.

Des concentrations de l'ordre de 4 µg/l ont été trouvées pour les exutoires du flysch du Niesen situés en surface (S, N et F, fig. 8.8). Les émergences du tunnel d'Arnon atteignent des concentrations de 7 µg/l (code F(N,S)). Quant aux lixiviats de roches, la plupart ont des valeurs semblables à celles des eaux du flysch du Niesen en général. On peut donc relever un "équilibre" eau-roche. Néanmoins, les lixiviats de deux échantillons du flysch de Frutigen dépassent largement ce contenu moyen en zinc. Il s'agit d'un schiste ardoisier F7 avec 35 µg/l et d'un conglomérat polygénique F9 avec 41 µg/l (cf. fig. 8.1c).

Dans la nature, le zinc est présent exclusivement en association avec d'autres éléments, formant de nombreux minéraux (BREHLER 1978). Sa présence dans les eaux des flyschs peut être liée à des sulfures (p. ex. blende ZnS), des carbonates (p. ex. smithsonite ZnCO₃) ou des silicates rares (p. ex. hémimorphite) présents dans les roches alpines. Il faut cependant noter que certains complexes organiques et inorganiques des sols peuvent à leur tour contenir du zinc. Toutefois, leur présence dans les lixiviats de roches corrobore leur origine géologique.

Quant aux sources à influence des terrains extra-flysch, elles ne montrent pas d'anomalies supérieures à celles des flyschs. Ainsi, cet élément caractérise les eaux du flysch du Niesen, en particulier s'il s'agit des écoulements plus profonds et plus lents. Par contre, les eaux du flysch du Gurnigel présentent des concentrations inférieures à celles de ses lixiviats de roches.

8.3.5 Les éléments en micro-trace

Nous considérons comme éléments en micro-trace ceux dont les concentrations moyennes sont inférieures à 2 µg/l.

Le *rubidium*, le *nickel* et le *cuivre* (fig. 8.9 et 8.11) ont un comportement eau-roche similaire. Leurs concentrations dans les eaux des flyschs ont un déficit environ 10 fois moindre par rapport aux lixiviats de roches. Les considérations générales sur l'essai de lixiviation (cf. chap. 8.3.1) donnent des explications à ce sujet.

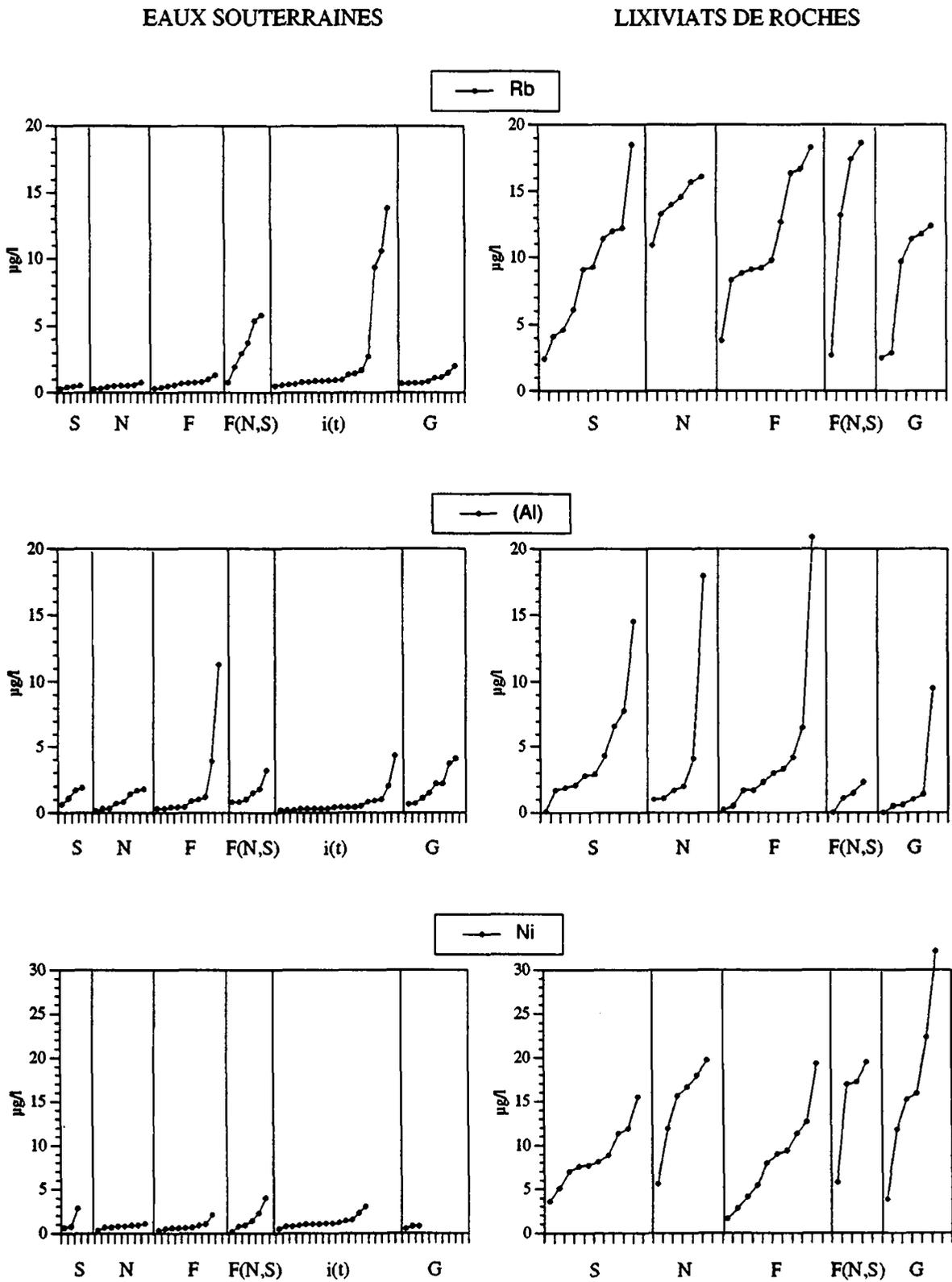


Fig. 8.9 Comparaison du contenu en (Rb, Al et Ni) des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].

Si les écoulements sont plus profonds et plus lents, les concentrations, surtout en rubidium, augmentent jusqu'à 5.8 µg/l, se différenciant ainsi nettement du reste des exutoires des flyschs.

Le rubidium peut provenir notamment des roches magmatiques qui constituent les apports des roches des flyschs du Niesen. Il est présent dans les feldspaths et les micas. Par ailleurs, la liaison Rb-Sr est indiquée dans les eaux des flyschs du Niesen (s.s.) avec un coefficient de corrélation $r = 0.78$ (cf. annexe 4A). La désintégration $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr} + \beta$ est connue en radiochronologie pour les datations géologiques à très longue période ($48.8 \cdot 10^9$ an) et souligne leur présence souvent commune.

Les exutoires à influence extra-flysch peuvent atteindre des valeurs d'environ 14 mg/l.

Quant à l'origine du nickel, il fait partie de nombreux silicates comme l'hornblende, l'orthopyroxène, le clinopyroxène, la biotite, la chlorite ou le grenat, présents notamment dans les roches magmatiques qui forment les flyschs. Par ailleurs, le nickel fait partie des minéraux oxyanions dans lesquels il peut être accompagné de cobalt ou de manganèse (BAUR 1962 in BURNS 1978).

Pour le cuivre, l'origine la plus connue est à chercher dans des sulfures comme la chalcopryrite (CuFeS_2) ou la chalcocite (Cu_2S) ou dans des carbonates comme la malachite ($\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{CO}_3$).

Les concentrations en *aluminium* avaient été traitées à titre descriptif, à cause des concentrations trouvées dans les solutions de neige (cf. chap. 5.3). Néanmoins, sa présence importante dans les lixiviats de roches (jusqu'à 21 µg/l) par rapport aux eaux (moy. entre 1 et 2 µg/l, fig. 8.9) suggère aussi une origine géologique.

L'origine de l'aluminium peut être liée à la forte présence de silicates alumineux dans les fragments lithiques des flyschs, ainsi que dans les argiles stratifiées (illite, Fe-chlorite) ou dans la glauconite d'origine marine.

Le *plomb* avait été éliminé de tout traitement à cause de la pollution atmosphérique trouvée dans les solutions de neige (cf. chap. 5.3). Nous confirmons ici ce fait, vu que cet élément, présent dans les eaux souterraines, est complètement inexistant dans les lixiviats de roches (fig. 8.10).

Les concentrations en *iode* ont été désignées comme ordre de grandeur à cause des problèmes d'effet mémoire (cf. tabl. 4.5). Cependant, une comparaison eau-roche globale peut être réalisée. La concentration de cet élément dans les lixiviats de roches des flyschs est en général plus forte que dans les eaux souterraines (fig. 8.10). Son comportement et son origine sont similaires à ceux du brome (cf. fig. 8.8).

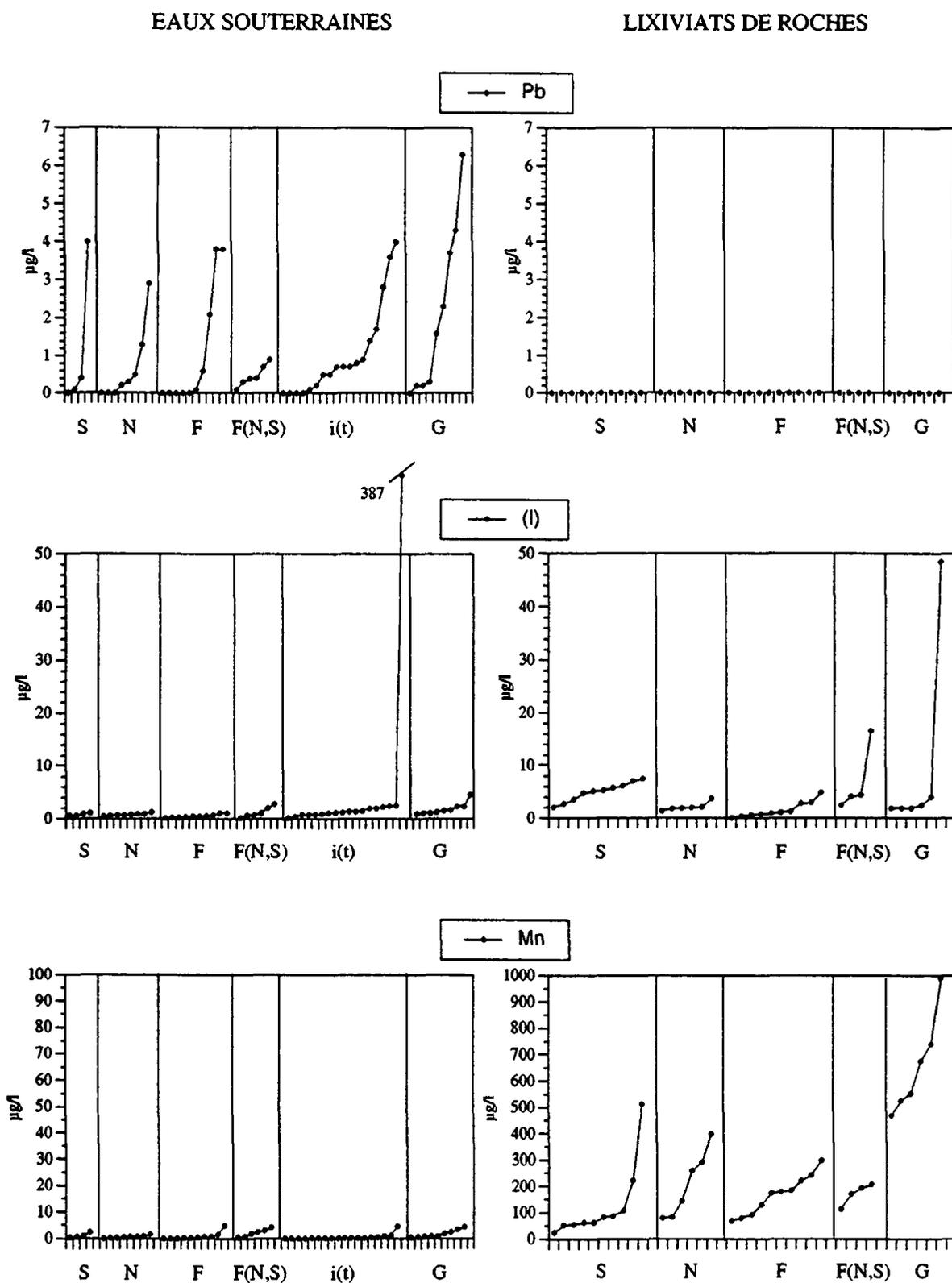


Fig. 8.10 Comparaison du contenu en Pb, I et Mn des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].

Les émergences à écoulement plus profond dans les flyschs ne présentent pas d'anomalies plus fortes que celles du reste des exutoires. Il en va de même pour les sources du flysch du Gurnigel et les sources à influence des terrains extra-flysch, à l'exception de la source particulière N° 67 qui présente une anomalie de 387 µg/l d'iode (cf. chap. 6.2.23).

Le manganèse et le *cobalt* sont faiblement présents dans les eaux souterraines (moy. < 1µg/l). Les tests de lixiviation ont fournis des teneurs environ 1000 fois supérieures (fig. 8.10 et 8.12, attention aux échelles). Ces éléments sont ceux qui présentent le plus grand déficit eau-roche. Il s'agit de métaux polyvalents, sensibles à l'Eh et au pH. Une autre explication est à chercher dans les conditions générales de l'essai de lixiviation décrites dans le chapitre 8.3.1.

L'uranium, le *chrome*, le *vanadium* et le *lanthane* sont les éléments les plus rares dans les eaux souterraines (moy. < 0.5 µg/l) (fig. 8.11 et 8.12). Les lixiviats de roches présentent des concentrations analogues, souvent à la limite du seuil de détection. Une recherche plus approfondie dans la détection de ces éléments serait nécessaire pour préciser leurs concentrations.

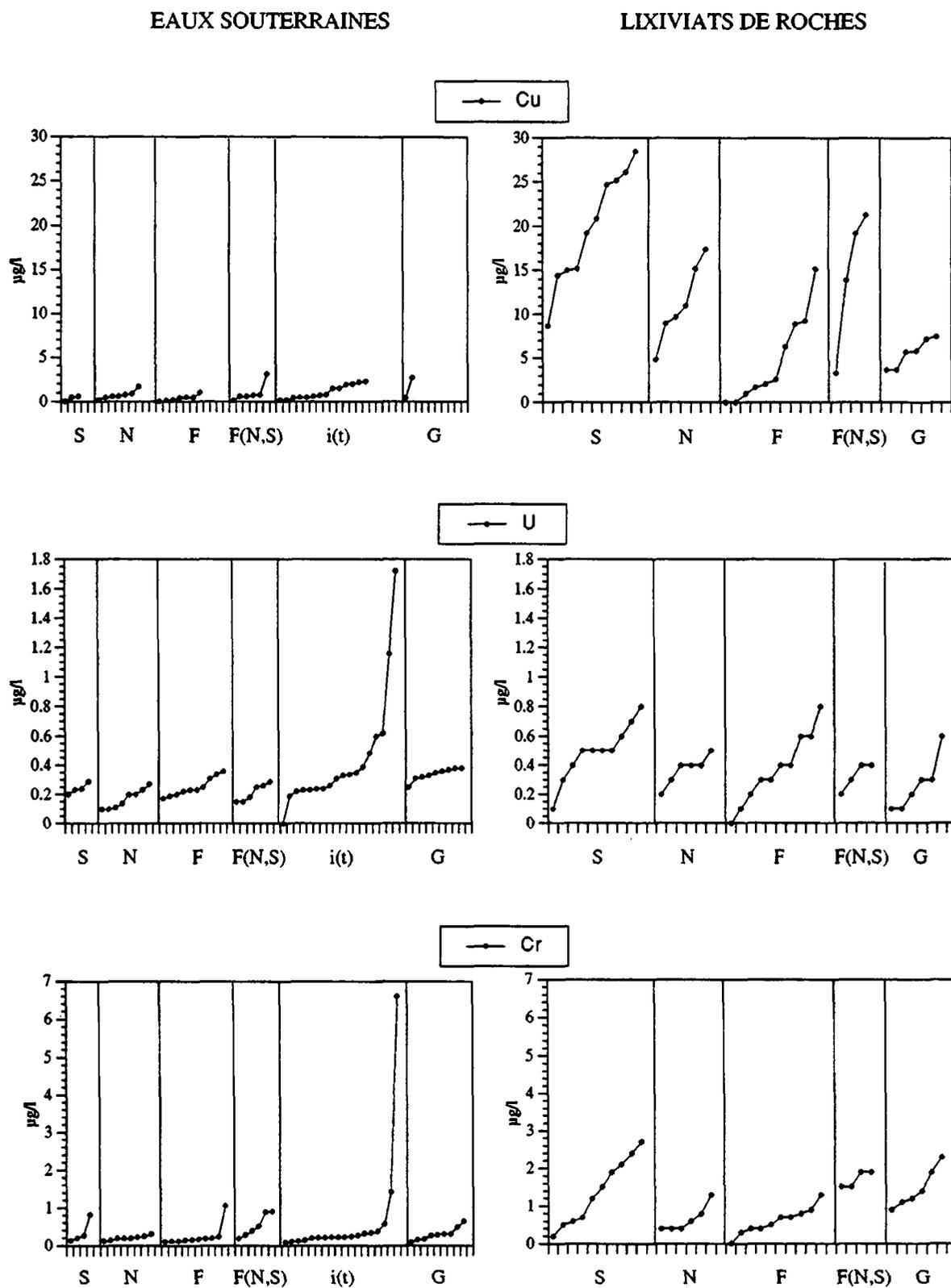


Fig. 8.11 Comparaison du contenu en Cu, U et Cr des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].

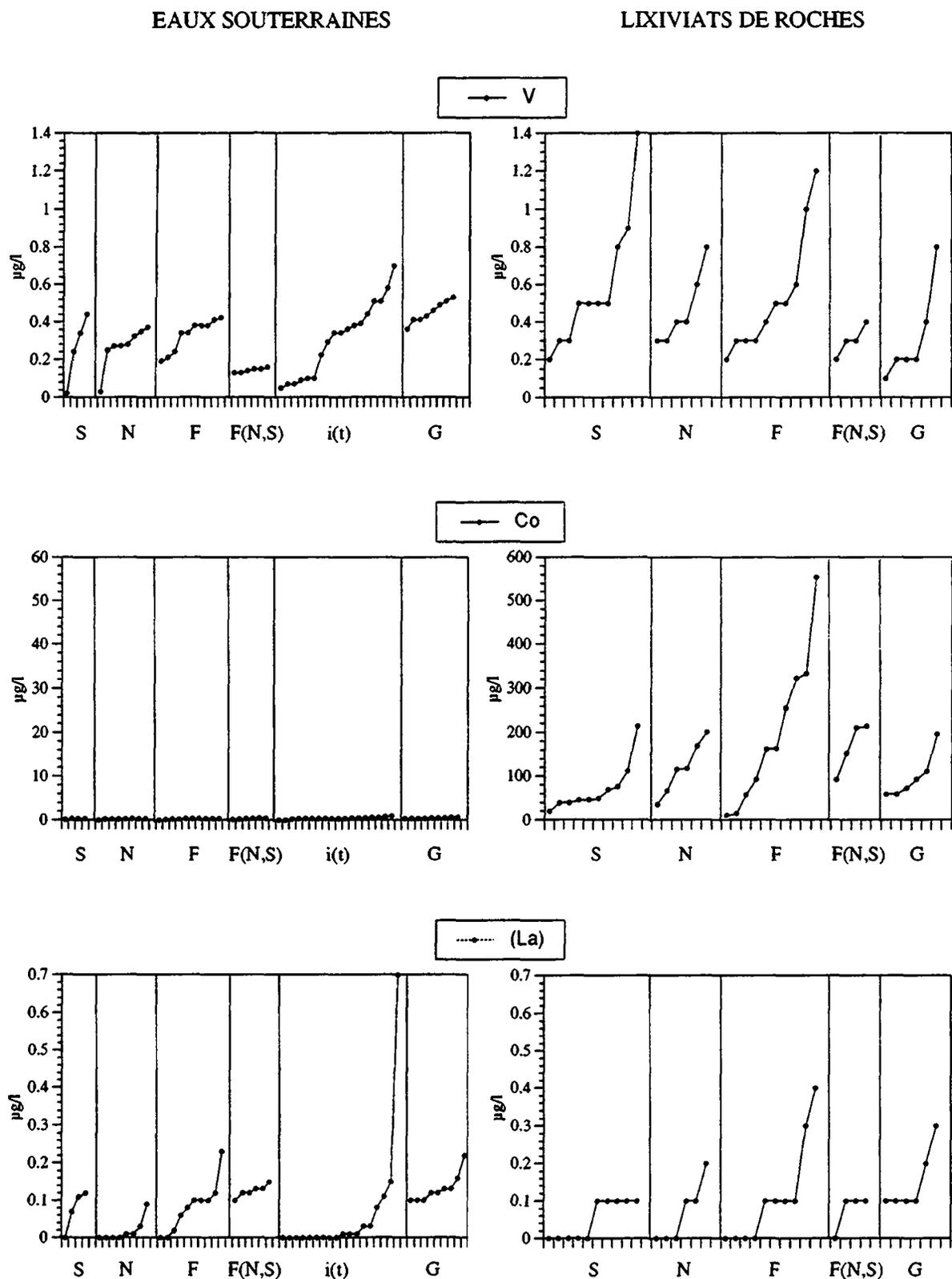


Fig. 8.12 Comparaison du contenu en (V, Co, La) des eaux souterraines et des lixiviats de roches par séquence de flysch [S, N, F et G] et à influence extra-flysch [i(t)].

8.4 SYNTHÈSE COMPARATIVE EAUX SOUTERRAINES - LIXIVIATS DE ROCHE PAR SÉQUENCES DE FLYSCHS

Afin de faire une synthèse de la discussion sur l'hydrochimie des eaux et des roches, (chap. 8.1 à 8.3), nous présentons les figures 8.13 et 8.14. Les concentrations des éléments sont indiquées en mol/l sur les graphiques (PENTCHEVA 1989).

Les eaux des différents exutoires des flyschs du Niesen (Seron, Niesenkulm et Frutigen) ont été rassemblées sous le terme "Niesen". Les émergences à écoulement plus profond et plus lent placées dans le tunnel d'Arnon sont indiquées sous "Arnon".

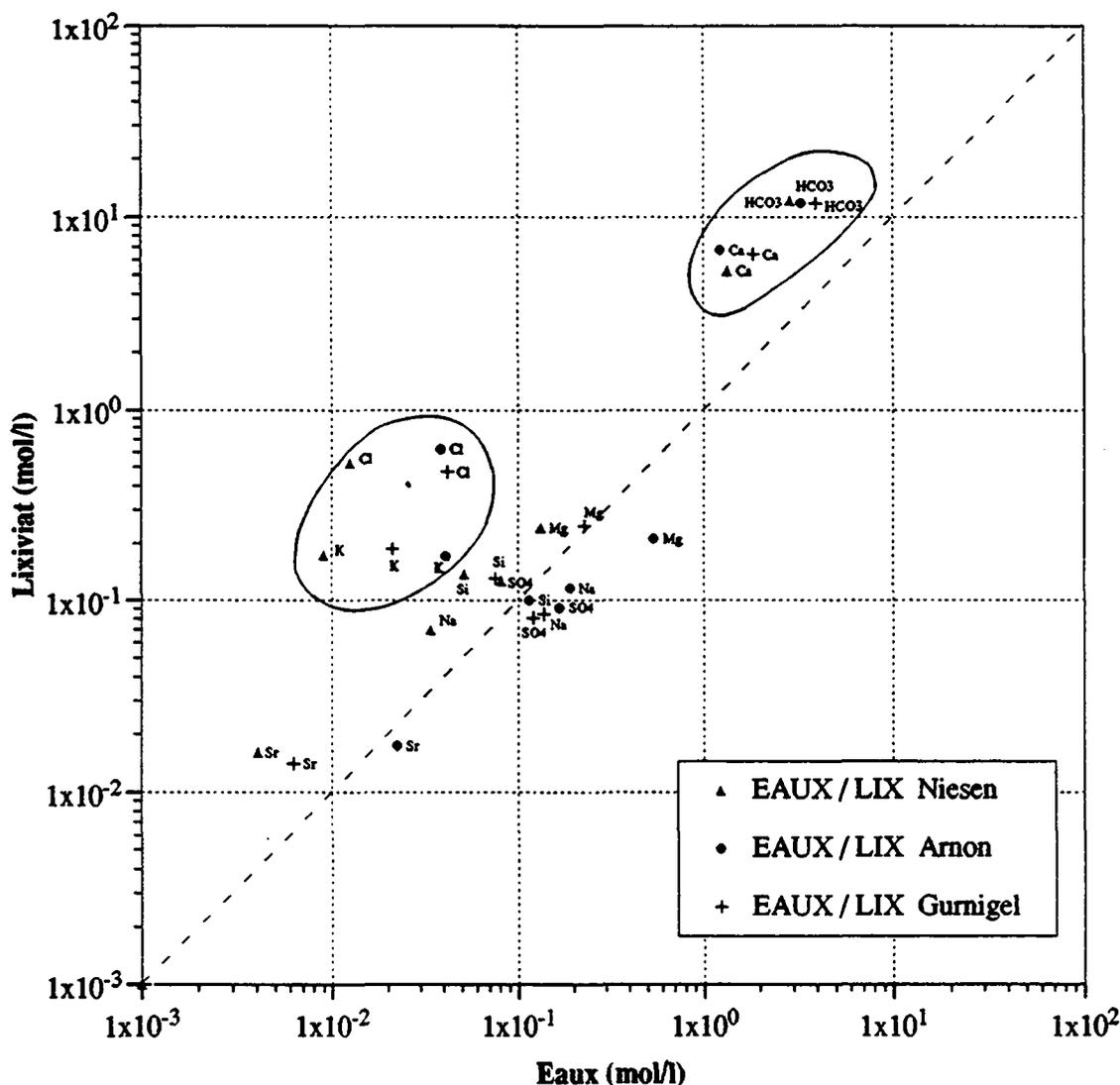


Fig. 8.13 Comparaison des concentrations en sels minéraux majeurs et mineurs des eaux souterraines et des lixiviats de roches des flyschs.

Les points d'eau localisés dans le flysch du Gurnigel sont regroupés sous "Gurnigel". Pour les lixiviats de roches, la même terminologie a été utilisée.

La figure 8.13 présente les éléments majeurs et mineurs. Cela fait bien ressortir le déficit ou le surplus de la minéralisation trouvée dans les eaux naturelles par rapport à celle des lixiviats de roches.

Le déficit trouvé dans les eaux par rapport aux lixiviats de roches pour les hydrogénocarbonates, le calcium, les chlorures et le potassium est assez marquant. Ce fait peut être expliqué par les conditions de l'essai de lixiviation en laboratoire.

Ainsi, les concentrations des composés des lixiviats de roches correspondent à la stabilité de la minéralisation totale atteinte lors de l'essai. Par contre dans les eaux naturelles en étude, ces valeurs de minéralisation ne sont souvent pas obtenues, soit par manque de matière dans la phase solide (déjà lessivée), soit parce que l'équilibre n'a pas eu le temps de se faire en raison de la vitesse des écoulements. Cette dernière peut être très élevée à cause de la porosité de fissures du flysch du Niesen (cf. chap. 5.2). Par ailleurs, lors des essais de lixiviation (à base des poudres de roches), la surface de contact eau-roche est plus élevée que dans la nature, ce qui permet la mise en solution d'une quantité plus grande de composés.

D'autres éléments comme le magnésium, le sodium, le strontium, le silicium, ainsi que les sulfates se situent vers la frontière d'"équilibre" eau-roche. On peut aussi remarquer l'excédent en magnésium, sodium, sulfates, silicium et strontium dans les eaux par rapport aux lixiviats de roches. Il s'agit des eaux profondes échantillonnées dans le tunnel d'Arnon, dont la circulation et le séjour sont plus longs et qui peuvent atteindre un éventail de roches plus vaste que celui des roches représentées dans les essais de lixiviation.

Pour les éléments en trace et en micro trace, le graphique 8.14 est aussi parlant. Il fait bien ressortir le cobalt et le manganèse, dont la présence est très forte dans les lixiviats de roches, ainsi que l'origine extra-géologique du plomb, origine déjà identifiée comme étant la pollution atmosphérique (cf. comparaison neige-eaux souterraines, chap. 5.3).

Quant aux bore, baryum, nickel, cuivre, rubidium et iode, ils sont nettement plus abondants dans les lixiviats de roches. Dans ce cas les conditions de l'essai de lixiviation peuvent être également la cause de ce "déséquilibre" eau-roche (cf. chap. 8.3.1). Les autres composés, à savoir le lithium, le fer, l'aluminium, le vanadium, le lanthane et partiellement le zinc et le brome, sont presque autant présents dans les eaux que dans les lixiviats de roches.

Comme pour les éléments majeurs et mineurs, les eaux du tunnel d'Arnon affichent des concentrations plus élevées en éléments en trace et en micro trace que le reste des exutoires du flysch du Niesen.

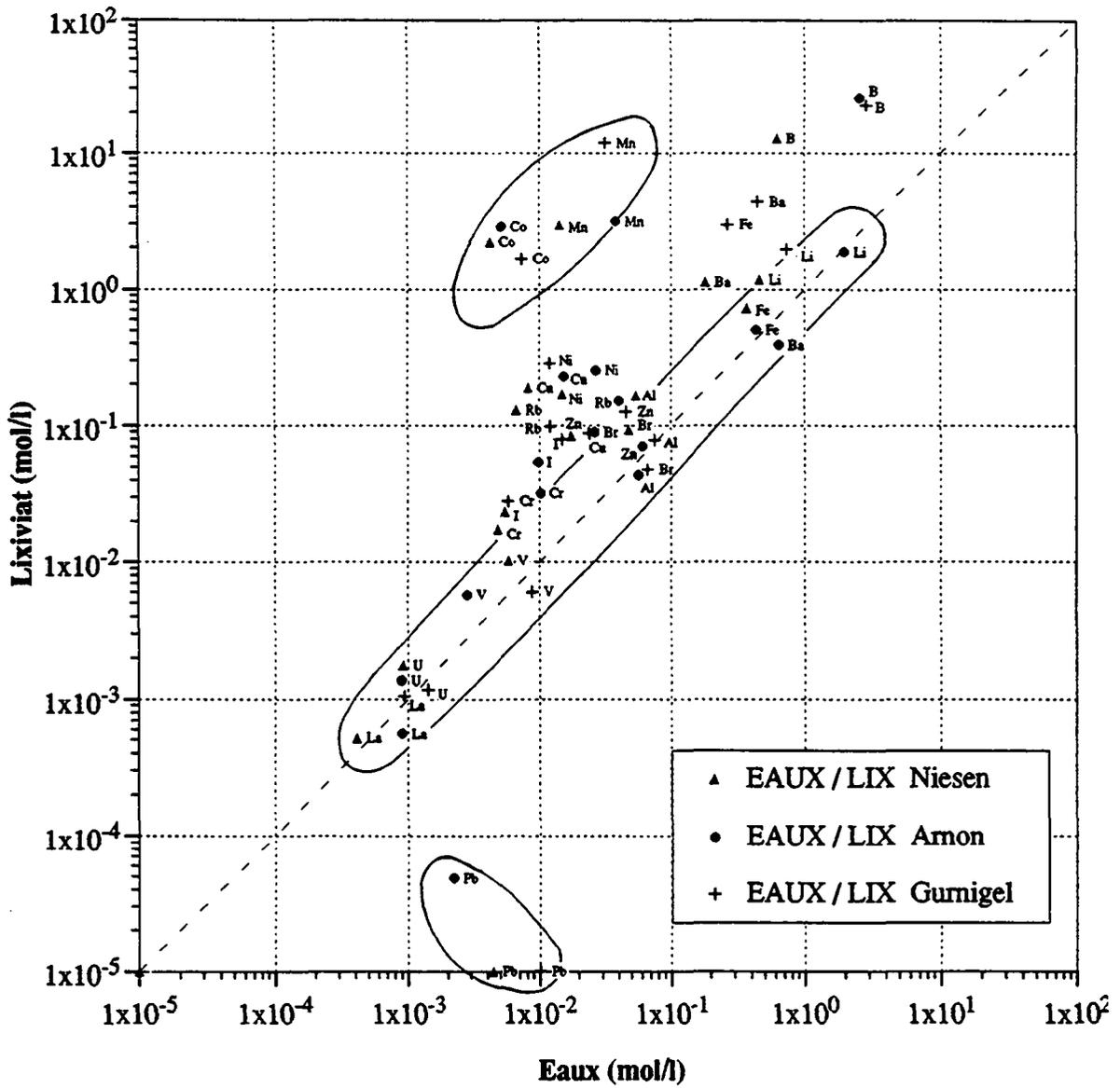


Fig. 8.14 Comparaison des concentrations en sels minéraux en trace et en micro-trace des eaux souterraines et des lixiviats de roches des flyschs.

CHAPITRE 9

COMPARAISON AVEC LE RESEAU AQUITYP



9. COMPARAISON AVEC LE RESEAU AQUITYP

Les réponses chimiques des exutoires des flyschs du Niesen sont comparées ici à celles des autres aquifères-types du réseau AQUITYP.

La traverse de base du projet AQUITYP comprend 19 points d'eau de référence groupés dans 5 différents types d'aquifères. Le tableau 9.1 et la figure 9.1 résument la dénomination de ces sources, leur localisation et l'environnement géologique des groupes d'aquifères-types, à savoir :

- Groupe 1 : terrains meubles quaternaires,
- Groupe 2 : roches sédimentaires à porosité de fissures et d'interstices (dont les flyschs),
- Groupe 3 : roches karstifiables carbonatées,
- Groupe 4 : roches karstiques évaporitiques,
- Groupe 5 : roches cristallines silicatées.

Les données chimiques acquises lors de la tournée générale du réseau AQUITYP réalisée en novembre 1989 (cf. annexe 6) ont été retenues pour cette évaluation. Cette tournée est la seule qui a été analysée complètement, y compris pour les éléments en trace et en micro-trace. Quant aux sources des flyschs du Niesen, nous utilisons les résultats de leur caractérisation chimique (cf. chap. 6.2 et son résumé dans le chap. 6.2.31). Ainsi, les fourchettes des concentrations atteintes par les eaux des flyschs (valeurs minimales et maximales) sont présentées graphiquement avec les concentrations des eaux des différents groupes d'aquifères du réseau AQUITYP (fig. 9.2 à 9.6).

Groupes d'aquifères-types	Aquifères-types	Point d'eau		Unité géographique	S / P *	Feuille au 1:25000	Coordonnées		Altitude du point d'eau	Altitude max. du bassin	Enregistr. Niveau/Q depuis	Chimie GEOLEP depuis
		Code	Nom				Commune	Y				
Terrains meubles quaternaires	Graviers de plaine alluviale	LUC	Lucens	Lucens	P	1204	555.46	174.19	484	680	4.11.74	24.11.81
		CHA	Chanivaz	Buchillon	P	1242	520.93	146.50	390	1485	1.9.78	10.10.83
	Graviers fluvio-glaciaires sur karst	MOR	Morand	Montricher	P	1222	520.38	161.87	659	1650	27.2.74	6.4.81
		DIZ	Dizy	Dizy	S	1222	527.24	164.75	576	620	1.4.84	7.4.81
		THI	Thierrens	Thierrens	S	1203	547.09	172.02	765	860	-	16.2.87
Roches sédimentaires à porosité de fissures et d'interstices	Molasse subalpine	COR	Comalle	Epesses	S	1243	547.42	149.24	597	800	3.6.83	24.11.81
	Molasse aquitanienne	CHE ¹	Cheseaux	Morrens	S	1223	537.30	160.28	675	717	8.8.84	7.2.84
		LRY	Lutry	Savigny	S	1243	544.62	157.35	878	895	3.8.83	24.11.81
	Molasse burdigalienne	POZ	Pierre-Ozaire	Savigny	S	1243	544.86	156.69	855	880	3.8.83	25.11.81
	Flysch du Niesen	LLI	Lac Lioson	Ormons-Dessous	S	1265	576.12	137.39	1845	2478	10.5.82	27.11.81
	Nappe du Gurnigel	ALL	Alliaz	Bionay	S	1224	560.05	147.05	1020	1250	-	16.10.84
	Roches karstiques carbonatées	Créacé du Jura	TIL	Tilenet	Bretonières	S	1202	526.26	173.45	650	1010	12.11.80
Malm du Jura		LIO	Lionne	L'Abbaye	S	1221	514.53	166.72	1040	1679	25.11.80	25.11.80
Malm du Jura		MAL ¹	Malagne	Montricher	S	1222	518.05	160.61	720	1650	6.1.76	8.12.80
Préalpes médianes rigides		BOR	Bornels	L'Eivaz	S	1265	576.78	142.26	1140	2458	1.1.70	27.11.81
		SAR	Sarve	Saillon	S	1305	579.72	113.16	470	3051	23.12.81	26.11.81
Roches karstiques évaporitiques	Trias évaporitique alpin	NOC	Noches	Aigle	S	1284	564.04	128.24	395	2112	23.11.82	27.11.81
		BLE	Bains de Leytron	Leytron	S	1305	580.58	114.56	560	3051	20.10.81	26.11.81
Roches cristallines silicatées	Massif du Mt-Blanc	BRO	Brocard	Martigny	S	1325	570.30	102.49	570	2838	12.2.81	8.4.81

* S = source P = puits ¹ Données non disponibles

Tableau 9.1 Désignation, localisation et environnement géologique de l'hydrotraverse du réseau AQUITYP.

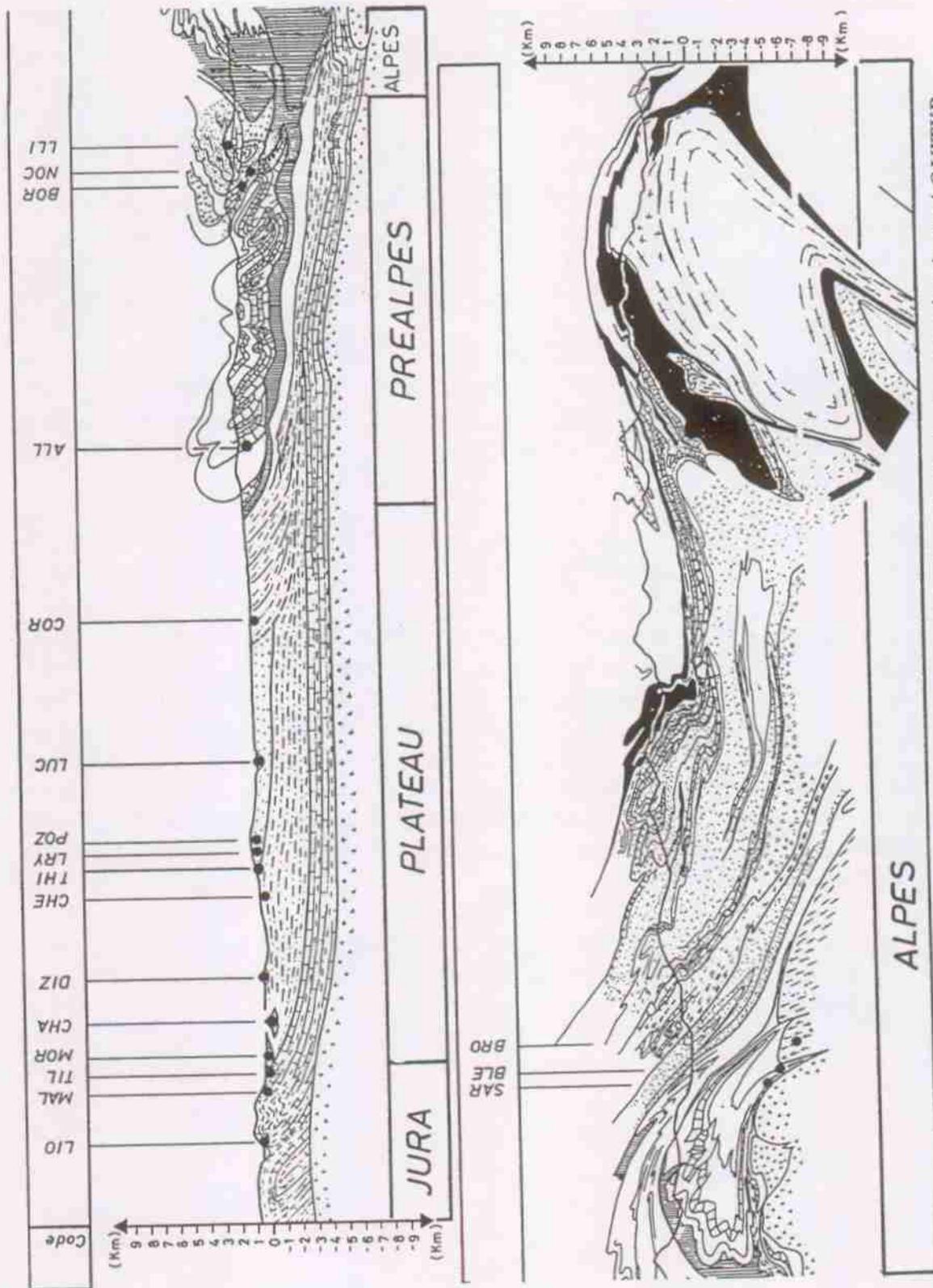


Fig. 9.1 Localisation et environnement géologique de l'hydrotraverse du réseau AQUITYP.
(Parriaux 1990b, coupe géologique d'après Escher et al. 1987).

9.1 COMPARAISON DES COMPOSÉS CHIMIQUES DES EXUTOIRES DU FLYSCH DU NIESEN AVEC LES AUTRES EXUTOIRES D'AQUIFÈRES-TYPES N°2 DU RÉSEAU AQUITYP

Le groupe N°2 du réseau AQUITYP comporte des exutoires des écoulements dans la molasse, soit subalpine soit burdigalienne. Il s'agit des aquifères à porosité de fissures et d'interstices, comme celle qui caractérise les flyschs des nappes tectoniques du Niesen et du Gurnigel. La source Lioson (LLI) du projet AQUITYP est située dans la nappe tectonique du Niesen et sert de lien entre l'étude des eaux souterraines des flyschs du Niesen et les aquifères-types du réseau AQUITYP. La source Alliaz (ALL) sise à la limite de la nappe du Gurnigel vers l'Ultraschweiz (tabl. 9.1 et fig. 9.1) fait également partie de ce groupe.

Du point de vue quantitatif, les sources d'Alliaz, avec un TSD de 621 mg/l, et de la Cornalle (COR) dans la molasse subalpine, avec 524 mg/l, sont les sources les plus chargées du groupe N°2. Elles présentent aussi des anomalies en chlorures et en sodium et des valeurs plus élevées en hydrogénocarbonates que les autres sources de ce groupe et que les émergences des flyschs du Niesen (fig. 9.2).

La source de Lioson (LLI) est la moins chargée de toutes les sources avec un TSD de 156 mg/l.

Parmi les éléments en trace, on peut remarquer à nouveau les anomalies de l'émergence d'Alliaz en baryum, bore, lithium, brome, iode, chrome et vanadium (fig. 9.2). Cette source, qui par ailleurs, a la plus faible concentration en calcium du groupe N°2, présente le même comportement chimique que la source N° 67, située à l'extrême NE de la nappe du Niesen et définie comme une eau souterraine à influence extra-flysch particulière (cf. fig. 6.61 et tabl. 6.1). A ce groupe, nous pouvons ajouter la source de la Cornalle. Elle présente une allure chimique similaire, mais avec des concentrations nettement inférieures. Son contenu en calcium de 68 mg/l la situe déjà parmi les eaux calciques, ce qui n'est pas le cas pour la source N° 67 ou celle d'Alliaz.

Pour le reste, les sources du groupe N°2 manifestent des concentrations des éléments en trace similaires à celles des sources des flyschs. Une anomalie de chrome dans la source de Lutry (LRY) devra toutefois être contrôlée par l'évolution chimique temporelle d'AQUITYP.

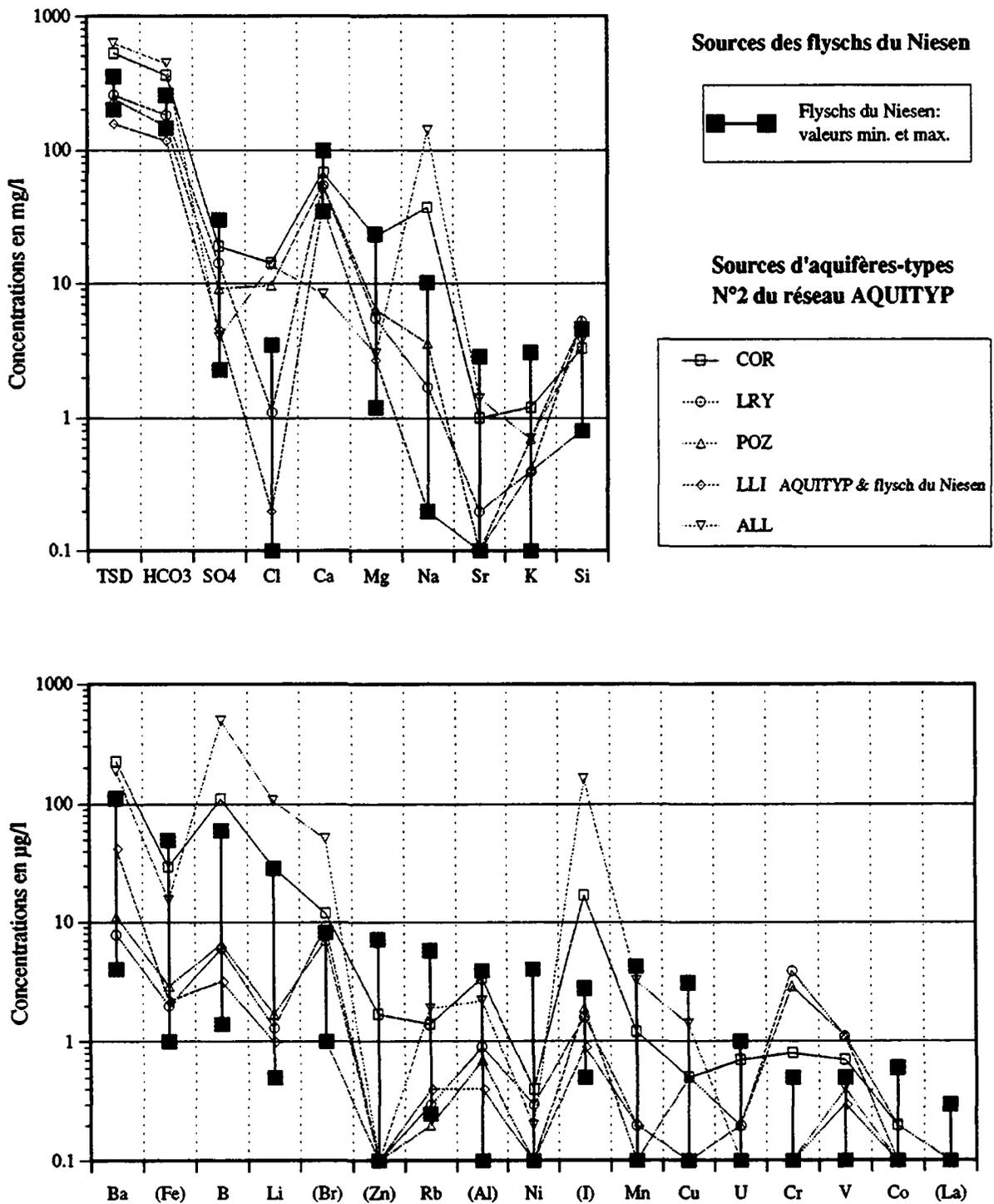


Fig. 9.2 Comparaison des concentrations chimiques des eaux souterraines des flyschs du Niesen et des autres sources d'aquifères-types N°2 du réseau AQUITYP.

9.2 COMPARAISON DES COMPOSÉS CHIMIQUES DES EXUTOIRES DU FLYSCH DU NIESEN AVEC LES AUTRES AQUIFÈRES-TYPES DU RÉSEAU AQUITYP

9.2.1 Comparaison des composés chimiques des exutoires du flysch du Niesen et des exutoires d'aquifères-types N°1 du réseau AQUITYP

Le groupe N°1 du réseau AQUITYP comporte 5 points d'eau issus d'écoulements dans des graviers alluviaux deltaïques ou fluvio-glaciaires (tabl. 9.1 et fig. 9.1). Leur contenu total en sel minéraux (TSD) est en moyenne de 470 mg/l contre des valeurs entre 200 et 350 mg/l pour les sources des flyschs (fig. 9.3). Donc, d'une manière générale, il s'agit d'eaux chimiquement plus chargées, dont le poids principal est déterminé par les hydrogénocarbonates et les nitrates qui font partie du TSD (absents du graphique). Si on regarde individuellement les autres composés chimiques, leur concentration en éléments majeurs et mineurs des eaux du groupe N°1 tombent dans les fourchettes de valeurs des eaux des flyschs du Niesen, à l'exception des chlorures qui sont bien plus présents dans les sources AQUITYP.

En ce qui concerne les éléments en trace, une grande partie des concentrations des sources du groupe N°1 correspondent aux fourchettes de valeurs trouvées dans les eaux des flyschs (fig. 9.3). Néanmoins, les concentrations en brome et en iode de la plupart des sources de ce groupe sont plus élevées que celles des eaux des flyschs et c'est ce qui les distingue. Des recherches ultérieures pourront affiner cette différence. Dans ce groupe, il existe d'autres anomalies, dont l'origine naturelle ou anthropogène devrait être précisée, à l'aide des séries temporelles d'AQUITYP, à savoir celles du zinc et du chrome pour le puits de Lucens (LUC), de l'aluminium pour Dizy (DIZ), du chrome et du vanadium pour Thierrens (THI).

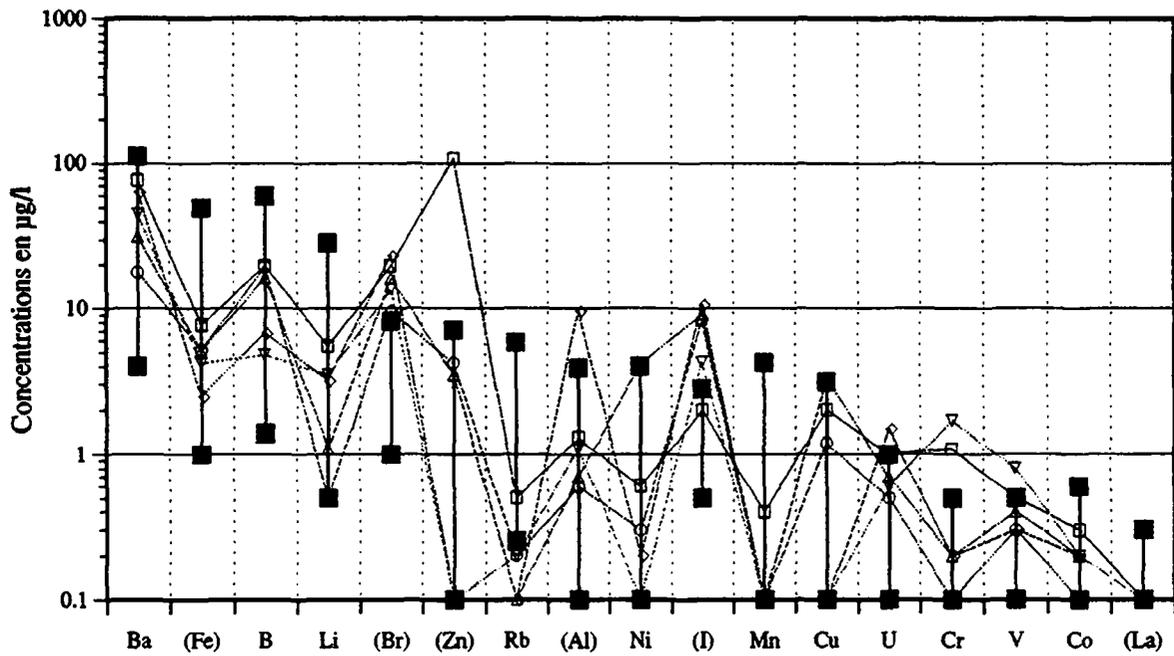
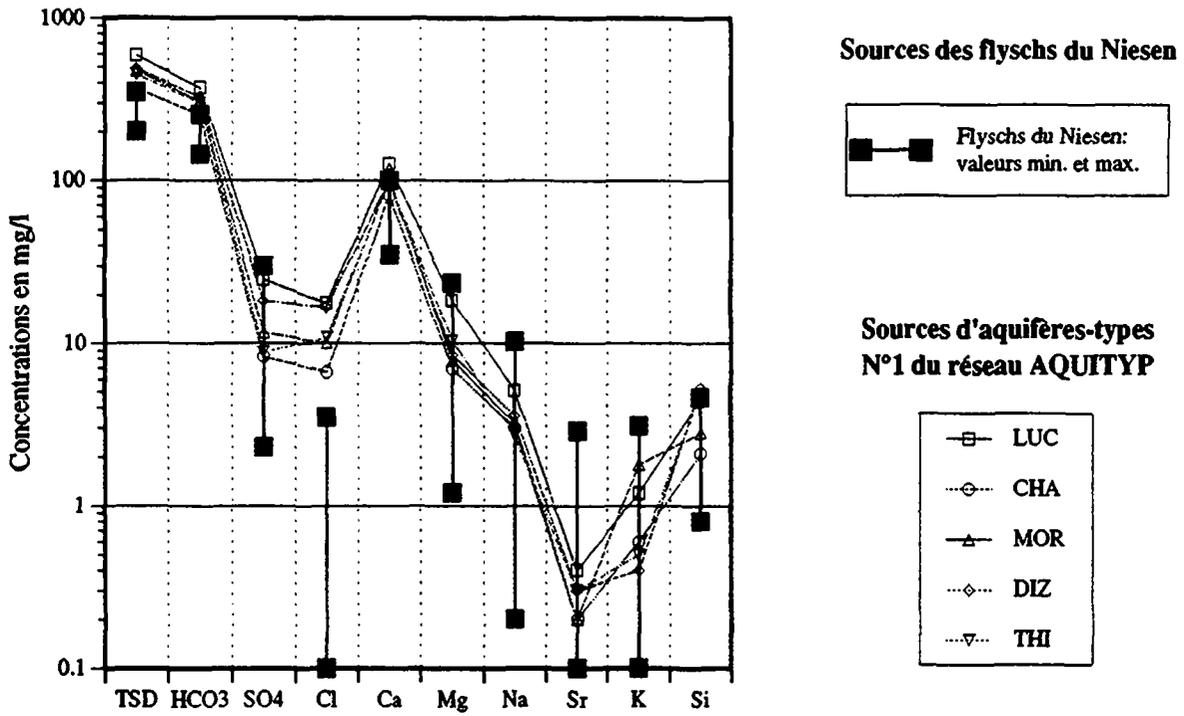


Fig. 9.3 Comparaison des concentrations chimiques des eaux souterraines des flyschs du Niesen et des sources d'aquifères-types N° 1 du réseau AQUITYP

9.2.2 Comparaison des composés chimiques des exutoires du flysch du Niesen et des exutoires d'aquifères-types N°3 du réseau AQUITYP

Le groupe N° 3 du réseau AQUITYP est composé d'exutoires de terrains karstiques carbonatés. C'est le cas des sources Tilenet (TIL) dans le Crétacé du Jura, la Lionne (LIO) dans le Malm du Jura, les Bornels (BOR) des Préalpes Médiannes Rigides et la Sarve (SAR) dans l'Helvétique (tabl. 9.1 et fig. 9.1).

Les eaux des flyschs du Niesen sont aussi issues de terrains ayant une importante composante calcaire. Il s'agit d'eaux bicarbonatées calciques, parfois magnésiennes, qui ont un comportement chimique similaire à celles du groupe N° 3 (fig. 9.4). Les teneurs en sels minéraux majeurs et mineurs de la plupart des sources de ce groupe correspondent aux fourchettes de concentrations des sources des flyschs du Niesen.

La source Tilenet a des concentrations plus élevées en hydrogénocarbonates, en calcium et surtout en chlorures. La charge anionique de la source des Bornels, par rapport aux autres sources, est inférieure en bicarbonates mais supérieure en sulfates. La source Sarve, quant à elle, a aussi des concentrations plus élevées en sulfates. Ces deux derniers points d'eau ont également une légère influence évaporitique liée au Trias.

Pour ce qui est des éléments en trace, la plupart des concentrations des sources du groupe N° 3 sont à nouveau dans les fourchettes de celles des flyschs du Niesen (fig. 9.4).

Néanmoins, la source de la Lionne présente des concentrations inférieures en baryum et en lithium. Les sources des Bornels et Sarve ont des teneurs en rubidium plus basses que le reste des émergences. Tilenet, quant à elle, a des anomalies en cuivre et en vanadium. Celles qui concernent le cuivre de Tilenet sont au moins dix fois plus élevées que celles des autres exutoires de ce groupe et devrait être précisée lors de l'étude des séries temporelles d'AQUITYP.

Une différence est toutefois marquée par les concentrations en iode. Toutes les sources du groupe N° 3 ont des valeurs plus élevées ou comparables aux concentrations maximales atteintes par les sources des flyschs du Niesen.

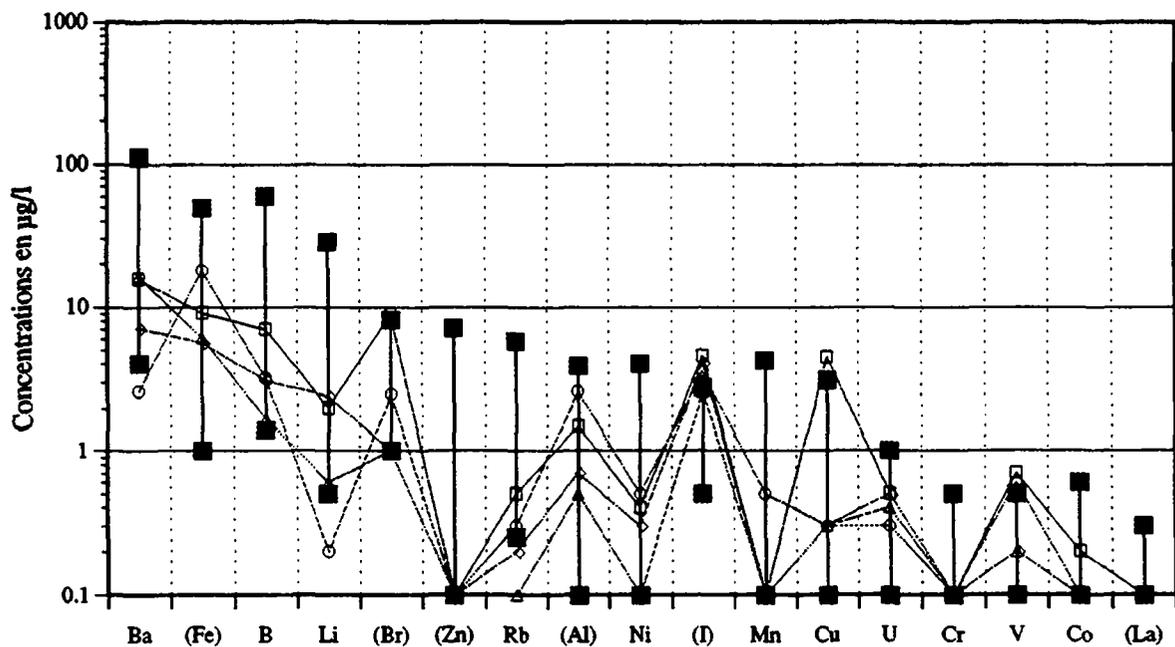
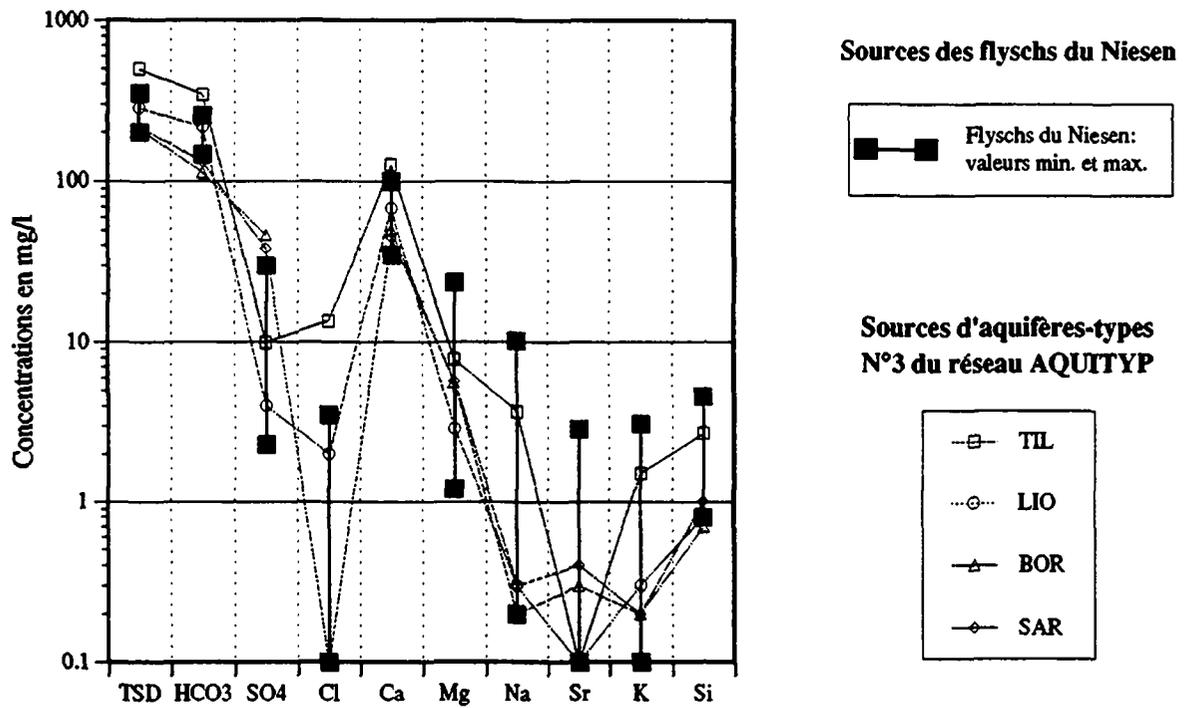


Fig. 9.4 Comparaison des concentrations chimiques des eaux souterraines des flyschs du Niesen et des sources d'aquifères-types N° 3 du réseau AQUITYP

9.2.3 Comparaison des composés chimiques des exutoires du flysch du Niesen et des exutoires d'aquifères-types N°4 du réseau AQUITYP

Le groupe N° 4 du réseau AQUITYP comporte deux exutoires des terrains karstiques évaporitiques du Trias : l'eau froide de Noches (NOC) et l'eau thermale des Bains de Leytron (BLE) (tabl. 9.1 et fig. 9.1). Elles sont aussi les points de référence des sources étudiées par MANDIA (1991).

Le comportement chimique de ce groupe est celui qui tend le plus vers les hautes concentrations. Le TSD, qui est de l'ordre de 1000 mg/l, est ainsi trois fois plus élevé qu'il ne l'est pour les sources des flyschs. Les concentrations en bicarbonates sont similaires, mais les sulfates ont des teneurs 10 à 15 fois plus élevées pour les sources du groupe N° 4 que pour celles des flyschs du Niesen (fig. 9.5).

Noches présente encore une anomalie en chlorures, ce qui n'est toutefois pas le cas des Bains de Leytron. Par ailleurs, ces deux sources ont des concentrations en calcium et en magnésium supérieures à celles des eaux des flyschs du Niesen. Finalement, la source de Noches montre encore une anomalie en strontium.

Pour ce qui est des éléments minéraux en trace, les concentrations des Bains de Leytron en fer, en lithium et en iode sont particulièrement élevées par rapport aux eaux des flyschs, et de même par rapport à celles de Noches (fig. 9.5). Des concentrations en brome, légèrement supérieures à celles des flyschs, peuvent encore être signalées pour les deux sources du groupe N° 4.

La source de Noches, quant à elle, se singularise par une concentration en iode nettement supérieure et des anomalies moins marquées, pour le cuivre et l'uranium. Ces anomalies ne sont pas constatées dans la source des Bains de Leytron.

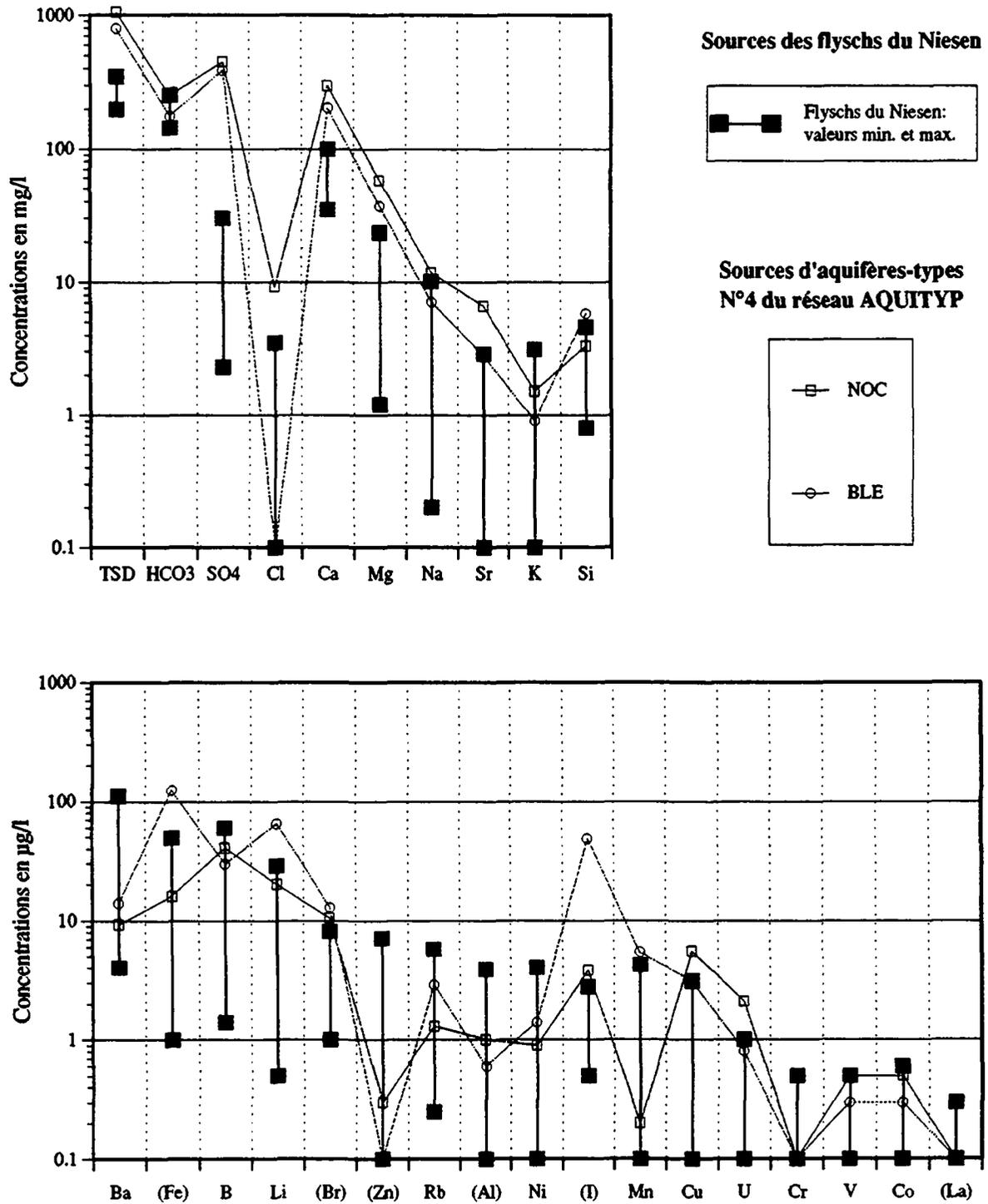


Fig. 9.5 Comparaison des concentrations chimiques des eaux souterraines des flyschs du Niesen et des sources d'aquifères-types N° 4 du réseau AQUITYP

9.2.4 Comparaison des composés chimiques des exutoires du flysch du Niesen et des exutoires d'aquifères-types N°5 du réseau AQUITYP

Le type d'aquifère N° 5 caractérise les roches cristallines silicatées. La source du Brocard, dans le massif du Mont Blanc, est le point d'accrochage des eaux de ce groupe dans "l'hydrotraverse AQUITYP" (tabl. 9.1 et fig. 9.1). Ce groupe a été étudié par DUBOIS (1992).

Les eaux du Brocard sont caractérisées par une charge minérale totale de 4 à 6 fois inférieure à celle des sources des flyschs du Niesen (fig. 9.6). On le constate tout particulièrement dans le contenu en ions majeurs - hydrogénocarbonates, calcium et magnésium - qui est *considérablement plus bas dans ce groupe.*

Quant aux éléments mineurs - chlorures, sodium, potassium et silicium - ils entrent dans la fourchette des concentrations atteintes par les sources des flyschs du Niesen (fig. 9.6). Il faut néanmoins remarquer que la concentration en silicium des eaux du cristallin correspond aux valeurs les plus élevées enregistrées dans les eaux souterraines des flyschs.

Parmi les sels minéraux en trace, la source du Brocard présente en général des valeurs correspondant aux basses concentrations atteintes par les sources des flyschs. Quant au baryum, il est même entre 6 et 100 fois moins abondant dans l'eau du Brocard.

Les concentrations du Brocard en lithium, en aluminium et en iode correspondent à peu près aux valeurs moyennes des sources des flyschs du Niesen. Le vanadium dans les eaux du Brocard atteint lui des valeurs supérieures à celles des eaux des flyschs.

Il faut remarquer que les concentrations en uranium dans les eaux du Brocard sont de 10 à 100 supérieures à celles rencontrées dans les eaux souterraines des flyschs. La présence d'uranium est d'ailleurs le caractère distinctif principal des eaux issues des roches cristallines silicatées (DUBOIS 1992). L'arsenic, le molybdène et le tungstène présents dans les eaux des aquifères du cristallin n'ont pas été détectés dans les eaux des flyschs du Niesen.

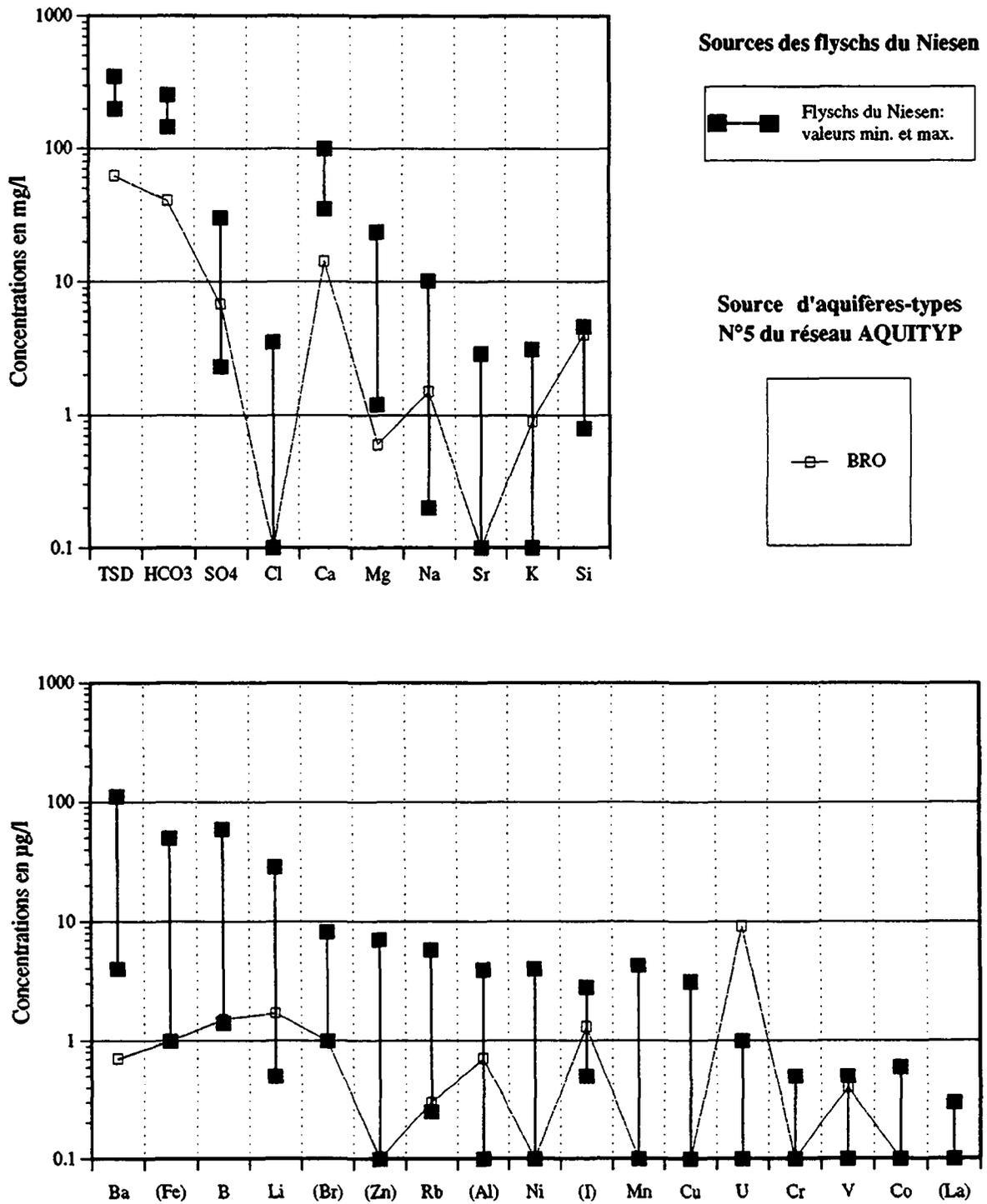


Fig. 9.6 Comparaison des concentrations chimiques des eaux souterraines des flyschs du Niesen et des sources d'aquifères-types N° 5 du réseau AQUITYP

CHAPITRE 10

CONCLUSIONS ET RAPPEL DES RESULTATS



10. CONCLUSIONS ET RAPPEL DES RESULTATS

Les aquifères des flyschs alpins, en l'occurrence ceux de la nappe tectonique du Niesen et du Gurnigel, sont complexes et ne peuvent pas être approchés par les mêmes techniques d'étude et de calcul que les aquifères de plaine. Dans cette recherche, les réponses physiques et chimiques des exutoires, ainsi que des observations hydrogéologiques ont été utilisées dans le but de caractériser les écoulements souterrains et leur milieu aquifère.

Ces unités tectoniques ne semblent pas, à priori, être propices à d'importantes circulations d'eau souterraine. Néanmoins, les lithologies très variables des flyschs alpins, notamment les importants faciès conglomératiques et calcaires de la nappe du Niesen et les flyschs grésocalcaires de la nappe du Gurnigel, présentent des conditions qui peuvent favoriser les circulations souterraines.

Géomorphologiquement et hydrogéologiquement la nappe du Niesen peut être divisée en trois secteurs. Primo, la chaîne montagneuse du NE (entre Thoun et la Simme) caractérisée par des bassins versants de montagne, de part et d'autre des crêtes. Ces écoulements souterrains subissent une influence bien définie des flyschs du Niesen. Secundo, le secteur central où la nappe, entrecoupée par des vallées hydrographiques (la Sarine, le Louibach ou la Simme), perd ses caractéristiques de contour topographique isolé, ce qui permet l'incidence des écoulements souterrains externes, souvent à empreinte des terrains extra-flysch type évaporitique. Finalement le secteur SW (entre la Sarine et la Grande Eau) retrouve la continuité du secteur NE, mais avec des bassins plus vastes du côté nord; une structure tectonique plus complexe dans ce secteur produit l'imbrication des unités de flyschs et leur influence indistincte sur les écoulements souterrains.

L'interprétation des essais de traçage et le comportement hydrogéologique des terrains ont mis en évidence le type de porosité des aquifères du flysch du Niesen. Il s'agit d'une porosité liée essentiellement aux discontinuités, y compris le micro-karst qui joue un rôle de réservoir. Les exutoires les plus importants fournissent des débits d'étiage de l'ordre de 1000 à 1500 l/mn. Cependant, l'alternance avec des pélites et turbidites fines ainsi que la structure tectonique plissée produisent des aquicludes qui limitent les écoulements régionaux. Ceci différencie les écoulements du flysch du Niesen des écoulements typiquement karstiques.

Les réponses physiques et chimiques (éléments majeurs, mineurs et en trace) ont permis la différenciation hydrochimique régionale des écoulements souterrains des flyschs. C'est l'un des buts du projet de recherche AQUITYP. Les eaux souterraines du flysch du Niesen présentent des caractéristiques hydrochimiques propres qui les distinguent de celles de terrains évaporitiques environnants. Une zone tampon de mélange des eaux s'installe vers la limite intranappe (entre le flysch du Niesen et le soubassement anté-flysch de la nappe). L'hydrochimie des écoulements profonds et lents dans le flysch a aussi été mise en évidence.

Les eaux souterraines de la nappe du Niesen ont été classées en six faciès selon la classification Jäckli : 1) bicarbonaté-calcique, 2) bicarbonaté-calcique-magnésien, 3) bicarbonaté-calcique-magnésien-sodique, 4) bicarbonaté-calcique-sulfaté, 5) bicarbonaté-calcique-magnésien-sulfaté et 6) bicarbonaté-sodique-sulfaté. A l'intérieur de ces faciès, le

contenu en magnésium et en sulfates peut être supérieur, définissant donc des sous-faciès. Une étude des bassins a mis en évidence le caractère géologique de chaque exutoire. Ainsi, les faciès hydrochimiques 1 et 2 correspondent surtout aux sources des flyschs du Niesen (Frutigen, Niesenkulm et Seron) et du Gurnigel, dont les exutoires sont situés en surface. Des écoulements plus profonds et plus lents dans les flyschs sont caractérisés par le sous-faciès 2B (Mg entre 20 et 50 %), le faciès 3, et un contenu généralement plus élevé pour les autres composés (y c. les traces). Les faciès 4 et 5 correspondent aux exutoires à incidence diverse de la zone tampon de type évaporitique. Le faciès 6 appartenant aussi à cette zone révèle de nombreuses anomalies hydrochimiques dues à l'incidence particulière des terrains extra-flysch. Par ailleurs les composés en trace les plus significatifs des eaux des flyschs sont le Ba, le Fe, le B, le Li, le Br et le Zn.

L'analyse factorielle en composantes principales sur des paramètres du réseau spatio-temporel permet de retrouver les domaines hydrochimiques principaux des eaux souterraines en fonction des cycles hydrodynamiques définis.

Les tests de mise en solution des échantillons de roche (lixiviats) ont permis la comparaison eau-roche. D'un côté l'origine géologique de la plupart des composés majeurs, mineurs et en trace des eaux souterraines a été mise en évidence et d'un autre la provenance minéralogique des composés des eaux souterraines des flyschs et à influence des terrains extra-flyschs type évaporitique a été discutée.

Au niveau régional une comparaison avec les aquifères-types du projet AQUITYP met en relief les caractéristiques distinctives de ces unités aquifères. Les eaux des flyschs appartenant au groupe des roches sédimentaires à porosité de fissures et d'interstices (groupe 2) se différencient des exutoires de la Cornalle (molasse subalpine) et d'Alliaz (avoisinant l'Ultrasuisse) qui, avec des anomalies en Cl, Na, Ba, B, Li, Br, I et Cr, sont plutôt proches des écoulements à influence extra-flysch (évaporitique).

Les eaux des exutoires des flyschs ressemblent par leur chimisme à celles issues des roches karstiques carbonatées d'aquifères-types (groupe 3). Elles sont aussi similaires à celles des terrains meubles du Quaternaire (groupe 1), mais avec des concentrations inférieures notamment en HCO_3 , NO_3 , Cl, Br et I. Par contre, les eaux des flyschs se différencient évidemment de celles des aquifères karstiques évaporitiques (groupe 4) qui ont des concentrations plus élevées notamment en SO_4 , Ca, Mg, Sr, Si, Fe, Li, I et Cu. Elles se différencient aussi des eaux des aquifères du cristallin (groupe 5) qui ont des concentrations en général plus faibles, à l'exception de l'As, du Mo, du W et de l'U, caractéristiques de ces eaux.

Les résultats ainsi acquis ont renforcé le concept du projet AQUITYP en contribuant à mieux comprendre les aquifères régionaux du type flysch de montagne. Ils fournissent des renseignements fondamentaux sur les circulations souterraines à l'état naturel. Ces données seront de première utilité pour la détermination de l'origine ainsi que du chimisme des eaux rencontrées dans les ouvrages souterrains, lors de l'exploitation et de la protection des ressources en eaux souterraines, sans oublier leur importance pour de futures recherches scientifiques.

BIBLIOGRAPHIE

The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry, no matter how small, should be recorded to ensure the integrity of the financial statements. The text also highlights the need for regular audits and reconciliations to identify any discrepancies early on.

In the second section, the author provides a detailed overview of the accounting cycle. This process involves ten distinct steps, from identifying the accounting entity to preparing financial statements. Each step is explained in detail, with examples provided to illustrate how they are applied in a real-world business context.

The third section focuses on the classification of accounts. It distinguishes between assets, liabilities, and equity, and further breaks these down into current and non-current categories. The text explains how these classifications affect the balance sheet and how they are used to calculate key financial ratios.

The final part of the document discusses the impact of accounting on business decision-making. It shows how financial data is used to evaluate performance, identify trends, and make strategic choices. The author concludes by stressing the role of accountants as trusted advisors who provide valuable insights into the financial health of the organization.

BIBLIOGRAPHIE

- ACKERMANN, A. (1986) : Le Flysch de la nappe du Niesen.- *Eclogae geol. Helv.* 79/3 : 641-684.
- ACKERMANN, A., BURRI, M., JEANBOURQUIN, P & MANCKTELOW, N. (1986) : La zone Sion-Courmayeur en Haut-Valais et comparaison avec les flyschs valaisans dans les Alpes occidentales.- *Eclogae geol. Helv.* 84/1 : 255-263.
- ARGAND, E. (1911) : Les nappes de recouvrement des Alpes occidentales. Essai de carte structurale, 1:50'000 (pl. I, carte spéciale No 64) et profils (pl. II).- *Matér. Carte géol. Suisse [n.s]* 27.
- ATLAS CLIMATOLOGIQUE DE LA SUISSE (1987), Dir. Kirchhofer, W.- Institut suisse de météorologie. Office fédéral de topographie. Wabern-Bern.
- ATTEIA, O. (1992) : Rôle du sol dans le transfert des éléments traces en solution - Application à l'étude de quelques écosystèmes d'altitude.- Thèse N° 1031, EPFL. Lausanne.
- BADOUX, H., GABUS, J.H. (1991) : 1285 Les Diablerets, Carte et Notice explicative.- Atlas géol. de la Suisse, 1:25'000.
- BASABE, P. & BIELER, G. (1988) : Hydrogéologie du bassin de la Dénériaz (Jura vaudois, Suisse).- Diplôme de troisième cycle en hydrogéologie, Université de Neuchâtel. Neuchâtel.
- BAUR, W.H. & al. (1978) : Handbook of Geochemistry.- Vol. II-1/1; II-2/19. Executive Editor : K.H. Wedepohl. Springer-Verlag. Berlin & Heidelberg.
- BENSIMON, M. & PARRIAUX, A. : Ultra traces element analysis in water using high resolution plasma source mass spectrometry (HR-ICP-MS).- Swiss group mass spectrometry (SGMS) conference, *octobre 1992* Lausanne.
- BENSIMON, M., GABUS, J.H. & PARRIAUX, A. (1991) : Characterization of natural waters using trace element analysis obtained in a plasma source mass spectrometer.- *J. Trace Microprobe Techniques*, 9 (2&3), 81-93.
- BORHAUSER, M. (1929) : Geologische Untersuchung der Niesenkette.- *Mitt. natf. Ges. Bern* 1928, 33-114.
- BOUYER, Y. & KUBLER, B. (1981) : Hétérogénéité chimique et hydrologique des eaux souterraines d'un karst du Haut-Jura neuchâtelois, Suisse.- *Journal of Hydrology*, 54, 315-339. Amsterdam.

- BREHLER, B. & al. (1978) : Handbook of Geochemistry.- Vol. II-2/17; II-3/30,35. Executive Editor : K.H. Wedepohl. Springer-Verlag. Berlin & Heidelberg.
- BURGER, A. (1983) : Prospection et captage des eaux souterraines des roches carbonatées du Jura.- Gaz - Eaux - Eaux usées, tiré-à-part N° 1037.
- BURNS, R. G., BURNS, V.M. (1978) : Handbook of Geochemistry.- Vol. II-3/27, 28. Executive Editor : K.H. Wedepohl. Springer-Verlag. Berlin & Heidelberg.
- CANTON DE FRIBOURG. Cadastre cantonal des sources (inédit) et cartes des zones de protection (en cours). Office Cantonal de la Protection de l'Environnement.
- CARON, C. (1972) : La nappe supérieure des Préalpes : subdivisions et principaux caractères du sommet de l'édifice préalpin.- *Eclogae geol. Helv.* 65/1 : 57-73.
- CARON, CH., HOMEWOOD, P. & WILDI W. (1989) : The Original Swiss Flysch : A Reappraisal of the Type Deposits in the Swiss Prealps.- *Earth Sci. Rev.*, 26, 1-45. Elsevier. Amsterdam.
- CARTOGRAPHIES GÉOLOGIQUE ET TOPOGRAPHIQUE utilisées : cf. chapitre 4.3.4.
- CASTANY, G. (1968) : Prospection et exploitation des eaux souterraines.- Dunod. Paris.
- CASTANY, G. (1982) : Principes et méthodes de l'hydrogéologie.- Bordas. Paris.
- CHRIST, C. L. & al. (1978) : Handbook of Geochemistry.- Vol. II-1/5. Executive Editor : K.H. Wedepohl. Springer-Verlag. Berlin & Heidelberg.
- COCCO, G. FANFANI, L. ZANAZZI, P.F. & al. (1978) : Handbook of Geochemistry.- Vol. II-1/3,11; II-2/19. Executive Editor : K.H. Wedepohl. Springer-Verlag. Berlin & Heidelberg.
- COLOMBI SCHMUTZ DORTHE AG (inédit): Hydrogeologischer Bericht und Dimensionierung der Schutzzonen, 1985. Wasserversorgungsgenossenschaft der Gemeinde Weissenberg. Liebefeld-Bern.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A. & ZUSSMAN, J. (1985) : An introduction to the rock-forming minerals.- Logman. Hong Kong.
- DUBOIS, J.D. (1992): Typologie des aquifères du cristallin : exemple des massifs des Aiguilles Rouges et du Mont Blanc (France, Italie et Suisse).- Thèse N° 1026, EPFL. Lausanne.
- DUCHAUFOUR, PH. (1977) : Pédogenèse et classification.- Masson. Paris.

- ESCHER, A., MASSON, H. & STECK, A (1987) : Coupes géologiques des Alpes occidentales suisses.- Rapports géologiques N°2. Service hydrologique et géologique national. Bern.
- FISCHER, K. & al. (1978) : Handbook of Geochemistry.- Vol. II-4/38,56. Executive Editor : K.H. Wedepohl. Springer-Verlag. Berlin & Heidelberg
- FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. (1979) : Groundwater.- Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. New Jersey.
- FUGE, R. & al. (1978) : Handbook of Geochemistry.- Vol. II-2/17; II-3/35. Executive Editor : K.H. Wedepohl. Springer-Verlag. Berlin & Heidelberg.
- GAUTSCHI, A. & SCHOLTIS, A. (1989) : Technique d'échantillonnage et analyses des eaux souterraines des forages profonds.- Cédra informe, N° 3+4. Baden.
- GEOTEST BÜRO (inédit) : Hydrogeologischer Bericht und Schutzzonengutachten für die Quellfassungen Augant und Zünigwald der Gemeinde Wimmis, 1982.- Zollikofen-Bern.
- GHOSE, S. (1978) : Handbook of Geochemistry.- Vol. II-3/26. Executive Editor : K.H. Wedepohl. Springer-Verlag. Berlin & Heidelberg.
- GRAND ATLAS SUISSE (1982). Kümmerly & Frey.
- HEIER, K.S. & al. (1978) : Handbook of Geochemistry.- Vol. II-1/3,11; II-2/19; II-4/37. Executive Editor : K.H. Wedepohl. Springer-Verlag. Berlin & Heidelberg.
- HOEFS, J. (1969) : Handbook of Geochemistry.- Vol. II-1/6. Executive director : K. H. Wedepohl. Springer-Verlag. Heidelberg.
- HOMEWOOD, P. & LATELTIN, O. (1988) : Classic swiss clastics (flysch and molasse) The alpine connection.- Geodinamica Acta (Paris) 2, 1, 1-11.
- JÄCKLI VON, H. (1970) : Kriterien zur Klassifikation von Grundwasservorkommen.- Eclogae Geol. Helv. 63/2, 389-434.
- KANTON BERN. Cadastre cantonal des sources (inédit) et cartes des zones de protection (1974 et 1990) - Gewässerschutzkarten des Kantons Bern. Wasser- u. Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern (WEA).
- KIRALY, L. (inédit) : Notes du cours de statistique, 1984-85. Troisième cycle en hydrogéologie.- Université de Neuchâtel.
- KUNZ, F. (inédit) : Notes de terrain sur quelques sources de la nappe tectonique du Niesen et essais de traçage, 1986.- GEOLEP-EPFL. Lausanne.

- LAMEYRE, J (1986) : Roches et minéraux, matériaux de la terre et témoins de son histoire.-
Doin éditeurs. Paris.
- LOMBARD, A. (1971) : La nappe du Niesen et son flysch. Matér.- Carte géol. Suisse [n.s] 141.
- LOMBARD, A., BAUD, A. & STEINHAUSER, N. (1975) : 1265 Les Mosses, carte et Notice
explicative.- Atlas géol. de la Suisse, 1:25'000.
- LUGEON, M. & GAGNEBIN, E. (1941) : Observation et vues nouvelles sur la géologie des
Préalpes romandes.- Soc. vaud. Sci. nat. 7/1, 1-90. Lausanne.
- LUGEON, M. (1902) : Les grandes nappes de recouvrement des Alpes du Chablais et de la
Suisse.- Bull. soc. géol. (4) 1, 723-825. France.
- MANDIA Y. (1991) : Typologie des aquifères évaporitiques du Trias dans le bassin lémanique
du Rhône (alpes occidentales).- Thèse N° 948, EPFL. Lausanne.
- MANUEL SUISSE DES DENRÉES ALIMENTAIRES (1973) : Méthodes d'analyses et d'appréciation
des denrées alimentaires et des objets usuels. Second volume - Partie spéciale, 5e édition.
Berne.
- MARSILY DE, G. (1981) : Hydrogéologie quantitative.- Masson. Paris.
- MATZAT, E. (1978) : Handbook of Geochemistry.- Vol. II-3/24. Executive Editor : K.H.
Wedepohl. Springer-Verlag. Berlin & Heidelberg.
- MAUTNER, J. & BADOUX, H. (inédit) : Cadastre cantonal des sources et cartes
hydrogéologiques, 1970-75. Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université de Lausanne.
- MAZOR, E. (1991) : Applied chemical and isotopic groundwater hydrology.- Open University
Press. Buckingham.
- MCCONNEL, R.B. (1951) : La nappe du Niesen et ses abords entre les Ormonts et la Sarine.-
Matér. Carte géol. Suisse [n.s] 95.
- MILLER, I. & FREUND, J.-E. (1978) : Probabilidad y estadística para ingenieros.- Editorial
Reverté. Mexico.
- MISEREZ, J.J. (1970) : Corrélations Na/K dans les eaux karstiques du Jura Applications aux
diagrammes d'équilibre des systèmes.- Sonderh. Hydrogeol. Hydrogeochem, 161-181.
Hannover.
- MONJALLON, A. (1980) : Introduction à la méthode statistique.- 7e édition, librairie Vuibert.
Paris.

- MUDRY, J., KIRALY, L., & MULLER, I. (1979) : Analyse multivariée du chimisme de quelques sources karstiques du Jura suisse et franc-comtois.- Bulletin du centre d'hydrogéologie, N°3, 183-221. Neuchâtel.
- NORBERT, J. (inédit) : Etude hydrogéologique. Délimitation des zones de protection. Bassin sourcier de la Torneresse (4 sources), bassin sourcier de l'eau froide (5 sources). Rapport et 12 annexes, 1988.- Service des eaux de la ville de Lausanne. Lausanne.
- PARRIAUX, A., BENSIMON, M. (1990c) : Some rules for the design and the management of observation networks for groundwater resources- Memoires of the XXIIInd Congress of IAH, part 1, 719-727. Lausanne.
- PARRIAUX, A., DUBOIS, J.D., DRAY, M. (1990a) : Chemical composition of snow cover on the West Swiss Alps.- Hydrology in Mountainous Regions I. Hydrological Measurements; the water cycle. IAHS Publ. 193, 501-509. Netherlands.
- PARRIAUX, A., DUBOIS, J.D., MANDIA, Y., BASABE, P. & BENSIMON, M. (1990b) : The AQUITYP project : towards an aquifer typology in the alpine orogen.- Memoires of the XXIIInd Congress of IAH, part 1, 254-262. Lausanne.
- PEACOR, D. R. (1978) : Handbook of Geochemistry.- Vol. II-3/25. Executive Editor : K.H. Wedepohl. Springer-Verlag. Berlin & Heidelberg.
- PENCHEVA, E.N. VELDEMAN, E., VAN'T DACK, L. & GIJBELS, R. (1989) : Water-rock interaction in the Southwest Bulgaria granitoid system: A source of trace elements in the thermal waters.- Water-rock interaction WRI-6. Douglas L. Miles. A.A.Balkema, Rotterdam.
- PETERMAN, Z.E., HEDGE, C. (1978) : Handbook of Geochemistry.- Vol. II-4/38. Executive Editor : K.H. Wedepohl. Springer-Verlag. Berlin & Heidelberg.
- PFEIFER, H. R. (1977) : A Model for Fluids in Metamorphosed Ultramafic Rocks.- Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 57, 361-396. Zürich.
- PLANCHEREL, R. (1979) : Aspects de la déformation en grand dans les Préalpes médianes plastiques entre Rhône et Aar. Implications cinématiques et dynamiques.- Eclogae geol. Helv. 72/1, 145-214.
- RAAF DE, M. (1934) : La géologie de la nappe du Niesen entre la Sarine et la Simme.- Matér. Carte géol. Suisse [n.s] 8.
- RODIER, J. (1978) : L'analyse de l'eau. Eaux naturelles, eaux résiduelles, eau de mer.- Dunod technique. Paris.

- SALOMONS, W. & FÖRSTNER, U. (1984) : *Metals in the Hydrocycle*.- Springer-Verlag. Berlin Heidelberg.
- SCHOELLER, H. (1962) : *Les Eaux Souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, Exploitation et Evaluation des Ressources*.- Masson. Paris.
- SCHOELLER, H. (1969) : *L'acide carbonique des eaux souterraines*.- Bulletin du B.R.G.M. (deuxième série). Section III, n°1, p. 1-32. Orléans.
- SPALTENSTEIN, H. (~1980) : *Altération des roches*.- Polycopié de Géologie générale. Instituts romands des sciences de la terre. Uni-Lausanne.
- STANDARD METHODS (1975) : *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 14th. ed.. American Public Health Association. Washington DC.
- STUEBER A.M. (1978) : *Handbook of Geochemistry*.- Vol. II-4/38. Executive Editor : K.H. Wedepohl. Springer-Verlag. Berlin & Heidelberg.
- THIERRIN, J. (1990) : *Contribution à l'étude des eaux souterraines de la région de Fribourg (Suisse occidentale)*.- Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel.
- TRÜMPY, R. (1980) : *Geology of Switzerland. Part A : An outline of the geology of Switzerland., a guide-book*.- Schweiz. Geol. Komm. Wepf, 194. Basel.
- TUREKIAN, K. K. (1978) : *Handbook of Geochemistry*.- Vol. II-3/27, 28. Executive Editor : K.H. Wedepohl. Springer-Verlag. Berlin & Heidelberg.
- VAN STUIJVENBERG, J. (1979) : *Geology of the Gurnigel area (Prealps, Switzerland)*.- Beitr. Geol. Karte Schweiz., N.F., 151, 111.
- VUATAZ, F.D. (1982) : *Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions limitrophes*.- Matériaux pour la géologie de la Suisse, Hydrologie, N° 29.
- WEIDMANN, M. HOMEWOOD, P., CARON, C. & BAUD, A. (1976) : *Réhabilitation de la "Zone Sudmédiane" des Préalpes*.- *Eclogae geol. Helv.* 69/2 : 265-277.
- WINKLER, W. (1984a) : *Paleocurrents and petrography of the Gurnigel-Schlierenflysch : a basin analysis*.- *Sedimentary geology*, 40 : 169-189, Elsevier. Amsterdam.
- ZEMANN, A. (1978) : *Handbook of Geochemistry*.- Vol. II-1/6; II-3/29. Executive Editor : K.H. Wedepohl. Springer-Verlag. Berlin & Heidelberg.

ANNEXE 1

**PARAMETRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES
EXUTOIRES DU RESEAU A REPARTITION
SPATIALE (N° 1)**



Paramètres physiques et chimiques des exutoires du réseau à répartition spatiale (N° 1)

File. topo. 1:25 000	N° source	Nom des sources	Code source	Date	Q [l/mn]	K20 [µS/cm]	T° [°C]	pH [-]	Diot [°F]
LES MOSSES N°1265	1	Les Evoëtes	VE	29.11.88	7	348	6.4	7.2	21.0
	2	Mimon	VN	29.11.88	120	256	-6.5	7.2	14.9
	3	Champillon	VC	06.12.88	18	198	3.8	6.4	12.2
	4	Lioson	VL	30.11.88	33	225	4.1	6.8	13.7
	5	Lioson-AQUITYP	LLI	02.11.89	-2000	165	3.7	6.5	9.9
	6	Les Becques	VB	06.12.88	300	265	4.2	6.6	16.1
	7	Planpérette	VP	06.12.88	-300	235	4.7	6.7	14.5
	8	Molaire	VM	30.11.88	1900	244	4.5	7.0	14.7
	9	Petit-Revers	VT	30.11.88	1160	291	5.6	6.8	17.6
	10	Deux Roches	VR	24.04.89	300	267	6.1	7.1	16.2
	11	Tunnel d'Arnon A	YA	20.09.89	-400	314	6.7		18.9
	12	Tunnel d'Arnon B	YB	20.09.89	3	333	6.0		20.7
	13	Tunnel d'Arnon C	YC	20.09.89	-1	354	6.6		21.5
	14	Tunnel d'Arnon D	YD	20.09.89	2	250	7.2		14.2
	15	Tunnel d'Arnon E	YE	20.09.89	3	246	7.8		13.7
	16	Tunnel d'Arnon F	YF	20.09.89	1	335	8.1		20.1
	17	Isenau	VI	14.12.88	-400	269	-4.7	7.1	16.2
	18	Gridi	TR	23.11.88		477		7.5	30.0
	19	Stuedeli	YG	20.09.89	60	293	4.5		18.5
LENK N°1266	20	Gschwändleni	TW	23.11.88		295	-5.1	6.3	18.1
	21	Mülschöpfli	TS	23.11.88	-150	242	-6.0	6.7	15.2
	22	Fangweid	TF	25.04.89	470	456	6.8	7.3	13.6
	23	Moos	TM	23.11.88	170	428		7.0	24.5
	24	Lädiwald	TL	23.11.88	-1500	495	6.6	6.7	28.3
	25	Chlösterli	TC	22.11.88	-40	337		7.0	20.0
	26	Grund	TG	22.11.88	13	324	3.2	6.8	20.8
	27	Trom2	TO	22.11.88	18	284	4.6	6.7	16.4
	28	Stalde	LS	16.11.88	4	409	7.7	7.1	25.4
	29	Wildhom	LH	16.11.88	-50	744		7.4	48.0
	30	Chillerebrünen	LC	16.11.88	100	311	6.3	6.7	19.1
ZWEISIMMEN N°1246	31	Turbach	TT	16.11.88	-80	327	5.6	7.0	20.2
	32	Weissenberg total	LW	07.12.88	-360	252	3.7	7.1	15.5
	33	Birchlouene A (gauche)	SB	08.11.88	286	316	6.4	6.5	19.4
	34	Birchlouene B (milieu)	SM	08.11.88	250	378	6.6	6.5	23.3
	35	Alpenrose	SR	08.11.88		244		6.7	15.0
	36	Albristhubel A	SL	08.11.88	-600	254	6.0	6.3	15.8
	37	Albristhubel B	SA	09.05.89	-200	238	4.2	7.1	14.2
ADELBODEN N°1247	38	Wysseberg	LT	20.06.89	40	197	2.7	7.2	11.8
	39	Mittelberg A (source r.)	DR	26.10.88	-140	181	3.1	5.9	10.8
	40	Mittelberg B (captage)	DM	26.10.88	300	180	3.3	6.4	10.8
	41	Geils	AG	09.11.88	300	1200	4.7	6.8	86.5
	42	Hindersiller	AD	09.11.88	8	290	3.8	6.1	18.6
	43	Understalde	AU	15.11.88	38	307	4.4	6.0	19.4
	44	Allebach 3	AA	15.11.88	400	246	4.5	6.5	15.0
	45	Stigelbach	AS	15.11.88	-10	440	5.8	7.0	27.7
	46	Tschenten	AC	15.11.88	2	252	1.2	6.0	15.9
	47	Suterbachli	AT	15.11.88	19	1870	7.0	6.8	150.5
	48	Ahomi	FR	02.11.88	200	232	5.7	6.4	14.1
	49	Almi	FM	02.11.88	150	265	5.4	6.3	16.5
	50	Ladholz	FL	14.11.88	3	319	8.1	6.2	18.7
	51	Linter Tunnel	FT	09.11.88	-40	537	7.1	6.5	35.4
NIESEN N°1227	52	Ottenschwand	DO	08.12.88	-100	200		6.8	12.0
	53	Zünigwald C	WC	19.10.88	38	378	7.4	6.1	23.2
	54	Zünigwald A	WA	19.10.88	150	359	6.8	6.5	21.9
	55	Zünigwald B	WB	19.10.88	63	363	6.9	6.4	22.7
	56	Zünigwald D	WD	19.10.88	638	317	6.8	6.5	18.7
	57	Zünigwald E	WE	19.10.88	100	328	6.7	6.4	19.5
	58	Zünigwald privé	WQ	19.10.88	9	514	8.1	6.5	31.1
	59	Mani	WM	08.12.88	300	373	7.9	6.8	22.5
	60	Augant	WP	26.10.88	2900	508	8.5	6.5	31.5
	61	Gungg sud+Joseli	FG	26.10.88	1200	236		6.7	14.9
	62	Gungg nord	FN	26.10.88	-500	222		6.3	13.8
	63	Lehenweide	RL	02.11.88	-500	228		6.0	13.8
	64	Stutzweid	RS	01.11.88	-400	250	6.7	6.1	14.9
65	Niesen A (Quelle)	RN	01.11.88		183	-7	6.0	10.8	
66	Niesen B (source r.)	RR	01.11.88	30	272	5.8	6.0	16.8	
67	Bad Heustrich	AH	15.11.91	1	1129	5.6	7.4	2.2	
CHATEL N°1244	68	L'Essent	GE	13.12.88	-10	372	8.2	6.8	22.4
	69	Châh	GH	21.12.88	-13	383	7.4	7.4	23.1
MOUDON N°1224	70	La Cieme	GR	20.12.88	-9	405	7.8	7.4	24.4
	71	Villette	GV	20.12.88	-280	400	8.7	7.2	24.5
	72	Moyon	GM	20.12.88	-80	429	9.8	7.4	24.1
	73	Les Côtes	GC	13.12.88	-20	340	6.6	6.6	19.9
ROSSENS N°1205	74	Joux A (gauche)	GJ	20.12.88	-55	275	-6.3	6.5	16.3
	75	Joux B (droite)	GT	20.12.88	-9	264	6.7	6.5	15.8
GUGGISBERG N°1206	76	Schwarzenbühl	GS	20.12.88		267	-4	7.1	15.7

Annexe 1

Code source	HCO3	SO4	(NO3)	Cl	Ca	Mg	Na	Sr	K	Si	TSD
	[mg/l]										
VE	235.7	8.9	2.7		71.5	6.1		0.31	0.71	2.7	329
VN	149.6	19.4	6.7	0.5	47.7	6.3	1.5	0.36	0.87	2.0	235
VC	143.5	3.0	3.5	0.5	42.3	2.8	0.6	0.16	0.30	1.2	198
VL	150.2	14.4	0.0	0.5	41.3	7.5	0.9	0.23	0.49	1.3	217
LLI	117.0	4.6	0.5	0.2	37.5	2.7	0.2	0.10	0.40	0.8	164
VB	191.7	4.7	0.9	0.4	57.7	2.9	0.9	0.33	0.42	1.0	261
VP	171.0	3.2	1.8	0.3	50.5	2.6	0.7	0.28	0.23	1.2	232
VM	174.0	6.2	0.0	0.4	53.3	2.9	1.5	0.28	0.28	1.0	240
VT	208.8	11.0	1.5	0.8	63.5	3.0	1.8	0.34	0.38	1.3	293
VR	185.0	7.5	7.0	0.6	56.3	3.5	0.8	0.13	0.49	1.6	263
YA	215.5	8.5	0.0	0.9	71.1	2.7	0.9	0.33	0.48	1.5	302
YB	232.6	12.6	0.0	0.8	75.8	4.3	1.3	0.55	0.68	1.9	330
YC	238.1	19.3	0.0	1.0	56.2	14.4	3.8	1.98	1.74	2.2	339
YD	166.7	12.4	0.0	3.5	27.0	15.9	10.2	2.95	2.88	4.5	246
YE	166.7	13.4	0.0	1.2	24.0	17.9	7.0	3.11	2.27	4.6	240
YF	196.0	30.5	0.0	0.7	41.1	23.5	3.4	2.82	1.58	4.6	304
VI	183.8	9.9	0.4	0.1	57.5	2.4	0.6	0.29	0.35	1.1	256
TR	279.0	65.9	0.5	0.4	81.2	17.2	2.6	0.66	0.40	2.7	451
YG	213.1	8.2	0.0	0.9	61.1	4.7	1.0	0.45	0.32	1.6	291
TW	202.7	16.5	0.4	0.5	60.7	4.8	1.4	0.45	0.36	1.7	290
TS	177.7	3.6	2.6	0.3	53.3	3.4	1.0	0.22	0.80	1.8	245
TF	307.1	21.1	0.0	1.1	91.2	11.0	1.8	1.14	1.06	2.2	438
TM	269.3	20.5	0.4	0.7	89.2	9.0	2.0	0.84	0.65	2.2	395
TL	210.0	93.0	1.8	2.0	91.6	8.4	3.7	1.14	0.71	1.8	414
YC	236.3	8.1	2.1	0.6	79.0	2.7	1.2	0.54	0.47	2.4	333
TG	224.1	19.0	2.0	0.7	72.5	6.4	1.0	0.26	0.42	2.5	329
TO	191.7	6.8	0.7	0.6	53.6	3.8	1.0	0.31	0.29	2.2	261
LS	294.3	14.3	2.0	1.1	81.5	4.0	1.9	0.68	0.86	2.7	403
LH	263.2	227.0	2.1	2.8	163.3	13.6	4.0	1.99	1.50	3.1	683
LC	217.4	16.2	0.6	0.4	66.1	4.6	1.2	0.73	0.30	2.0	310
TT	243.0	6.1	1.6	0.7	70.1	5.0	1.6	0.43	0.35	3.1	332
LW	181.4	6.2	0.7	0.4	58.3	2.3	0.6	0.54	0.26	1.1	252
SB	211.3	19.3	2.7	1.0	60.6	9.0	1.0	0.37	0.81	1.7	308
SM	216.2	50.5	2.1	1.1	73.5	9.7	1.1	0.57	0.57	1.8	357
SR	166.1	11.0	1.4	0.3	43.9	8.3	0.4	0.60	0.22	0.8	233
SL	183.8	6.0	1.0	0.4	54.7	4.0	1.1	0.35	0.57	2.1	254
SA	162.4	6.3	8.2	0.6	51.2	2.5	0.4	0.34	0.41	1.2	234
LT	141.1	2.3	5.7	0.6	45.3	1.2	0.4	0.36	0.15	0.3	197
DR	121.5	9.2	1.0	0.4	37.6	3.1	0.4	0.29	0.38	1.1	175
DM	122.1	8.4	0.9	0.5	36.5	3.1	0.4	0.29	0.37	1.0	174
AG	225.9	578.0	0.8	4.9	296.6	27.8	5.2	3.95	0.55	2.8	1146
AD	213.7	10.7	0.0	0.4	69.3	3.2	0.6	0.53	0.27	1.3	300
AU	225.9	4.9	1.3	0.5	64.3	3.0	0.6	0.46	0.23	1.7	303
AA	162.4	17.4	0.4	0.4	58.6	2.9	0.8	0.51	0.39	1.0	245
AS	279.7	41.7	0.0	0.5	97.2	6.1	1.0	0.63	0.33	1.7	429
AC	186.8	6.1	0.7	0.2	55.9	1.5	0.4	0.39	0.09	1.5	254
AT	238.1	1027	0.2	5.8	577.2	21.5	7.1	6.93	1.33	2.8	1888
FR	164.9	6.9	0.5	0.5	50.5	2.9	0.5	0.43	0.37	1.5	229
FM	187.5	11.7	0.0	0.4	57.2	3.0	0.5	0.60	0.27	1.7	263
FL	223.5	2.5	5.9	2.4	70.7	1.3	1.3	0.37	2.97	1.7	313
FT	294.9	98.9	0.0	3.1	84.8	28.1	7.5	0.43	3.18	4.6	526
DO	136.8	7.9	1.7	0.3	42.3	3.3	0.8	0.34	0.35	1.2	195
WC	235.7	34.7	4.7	1.6	69.7	8.8	2.6	1.08	0.73	2.2	362
WA	232.0	31.9	4.9	2.3	66.7	9.5	3.0	0.66	0.74	2.5	354
WB	239.4	30.6	3.1	1.7	68.0	10.1	3.2	0.70	0.76	2.4	360
WD	191.7	26.1	4.4	1.2	59.5	7.4	2.1	0.49	0.60	2.2	296
WE	186.8	37.2	4.4	0.8	62.3	8.3	1.4	0.50	0.69	2.3	305
WQ	293.7	63.5	2.5	1.2	85.8	17.0	3.6	1.06	1.15	3.1	473
WM	234.5	28.9	4.3	0.8	68.7	10.5	2.2	0.97	0.57	2.0	354
WP	275.4	83.1	4.1	1.9	97.8	11.8	2.9	1.12	0.98	2.3	481
FG	168.5	6.7	0.7	0.4	50.6	2.3	1.1	0.38	0.39	1.2	232
FN	155.7	5.9	0.0	0.5	49.3	2.6	0.4	0.31	0.41	1.2	216
RL	162.4	4.1	0.2	0.5	51.7	2.2	0.4	0.38	0.33	1.3	224
RS	166.1	12.8	2.0	0.7	51.1	4.7	0.7	0.37	0.50	1.5	240
RN	117.2	8.6	1.5	0.4	35.8	3.0	0.3	0.21	0.26	1.1	168
RR	186.2	10.3	1.0	0.3	56.2	4.5	0.7	0.42	0.45	1.6	262
AH	670.6	190.0	0.0	10.0	4.2	3.1	330.6	0.31	0.98	3.8	1213
GE	270.5	4.9	2.1	1.5	87.4	3.4	3.8	0.64	0.86	1.7	377
GH	263.2	14.9	1.6	0.9	84.4	5.3	2.3	0.89	0.71	2.4	377
GR	285.2	9.3	3.9	3.7	86.6	7.7	3.9	0.50	0.77	2.5	404
GV	284.5	10.1	3.3	2.0	84.5	6.8	3.0	0.47	0.74	2.2	398
GM	293.7	15.9	5.8		79.9	10.0		0.61	1.35	2.2	410
GC	225.3	13.9	6.2	1.0	69.0	7.6	5.2	0.49	0.63	1.5	331
GJ	193.6	11.3	3.7	0.9	62.9	3.1	2.9	0.32	0.76	2.1	282
GT	182.0	7.8	4.2	1.2	58.9	2.5	2.1	0.29	0.78	1.9	262
GS	173.4	15.8	3.3	0.7	56.1	3.9	1.9	0.71	0.84	2.5	259

Paramètres physiques et chimiques des exutoires du réseau à répartition spatiale (N° 1)

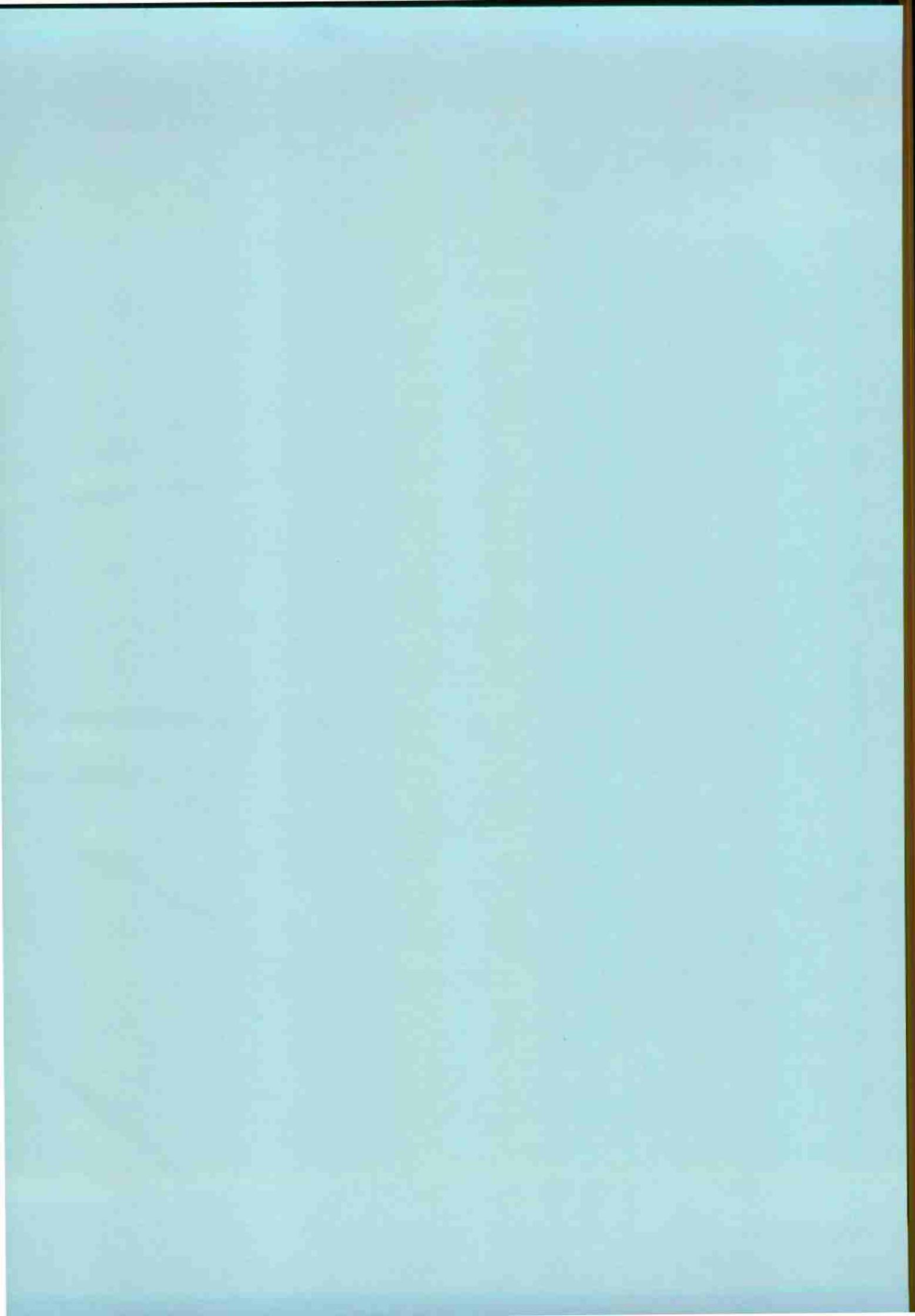
N° source	Code source	Σ cations	Σ anions	Σ c+a=TID	Balance ion.	Erreur / bal.	Ba	(Fe)	B	Li	(Br)
		[még/l]	[még/l]	[még/l]	[-]	[%]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
1	VE	4.10	4.09	8.19	1.00	0.0	76	9.0	8.4	3.4	8.2
2	VN	3.00	2.98	5.98	1.01	0.4	69		10.6	7.5	2.7
3	VC	2.38	2.48	4.87	0.96	-2.1	60		3.7	1.1	3.4
4	VL	2.73	2.78	5.51	0.98	-0.8	44	6.3	6.0	2.9	2.9
5	LLI	2.11	2.03	4.14	1.04	2.1	42	2.2	3.2	1.4	0.0
6	VB	3.17	3.27	6.44	0.97	-1.4	49		5.6	1.9	5.3
7	VP	2.78	2.91	5.68	0.96	-2.3	20		3.3	1.2	1.1
8	VM	2.97	2.99	5.97	0.99	-0.3	23	39.2	7.7	3.3	4.8
9	VT	3.52	3.70	7.22	0.95	-2.5	27	10.0	13.8	5.1	3.3
10	VR	3.15	3.32	6.47	0.95	-2.6	65	0.0	4.7	3.6	3.0
11	YA	3.83	3.74	7.56	1.02	1.2	72	49.8	4.4	1.8	2.9
12	YB	4.22	4.10	8.32	1.03	1.4	95	17.3	7.4	4.9	1.8
13	YC	4.24	4.33	8.58	0.98	-1.1	58	34.1	23.4	12.6	2.5
14	YD	3.24	3.09	6.32	1.05	2.3	112	25.2	59.5	28.6	2.6
15	YE	3.11	3.04	6.15	1.02	1.1	101	10.7	41.9	20.5	1.8
16	YF	4.23	3.87	8.10	1.09	4.5	92	8.4	29.7	13.8	1.1
17	VI	3.11	3.23	6.34	0.96	-1.8	19		2.5	2.1	3.3
18	TR	5.61	5.96	11.57	0.94	-3.1	13		13.8	4.2	3.9
19	YG	3.50	3.69	7.19	0.95	-2.6	19	8.5	10.9	15.9	3.2
20	TW	3.51	3.69	7.19	0.95	-2.5	27		7.6	7.3	4.9
21	TS	3.01	3.04	6.05	0.99	-0.4	29		4.8	1.1	2.8
22	TF	5.59	5.50	11.09	1.02	0.8	38	7.2	19.9	13.4	2.2
23	TM	5.32	4.87	10.18	1.09	4.4	33		20.9	21.7	3.4
24	TL	5.47	5.46	10.93	1.00	0.0	29	12.2	15.8	6.0	2.2
25	TC	4.24	4.09	8.33	1.04	1.8	25		7.6	5.8	2.4
26	TG	4.20	4.12	8.32	1.02	1.0	57		4.6	2.5	1.5
27	TO	3.05	3.31	6.36	0.92	-4.2	27	6.0	4.2	1.4	1.7
28	LS	4.51	5.18	9.70	0.87	-6.9	37	13.6	6.4	8.5	2.4
29	LH	9.53	9.15	18.68	1.04	2.0	20		17.0	7.1	2.8
30	LC	3.75	3.92	7.67	0.96	-2.2	31	21.0	8.1	4.0	0.0
31	TT	4.00	4.16	8.15	0.96	-1.9	29	6.0	6.8	4.0	1.8
32	LW	3.14	3.12	6.26	1.00	0.2	17	10.6	2.5	1.4	1.5
33	SB	3.84	3.94	7.78	0.98	-1.2	27	18.1	9.7	2.3	4.1
34	SM	4.54	4.66	9.20	0.98	-1.2	26	10.3	7.9	2.7	2.7
35	SR	2.91	2.98	5.89	0.97	-1.3	34		2.5	0.6	3.1
36	SL	3.13	3.16	6.29	0.99	-0.6	20		5.3	2.2	1.4
37	SA	2.79	2.94	5.73	0.95	-2.6	16	29.5	2.3	1.5	6.1
38	LT	2.39	2.47	4.86	0.97	-1.6	9	10.6	1.4	0.5	3.7
39	DR	2.17	2.21	4.38	0.98	-1.0	14	31.4	7.5	3.0	4.5
40	DM	2.11	2.20	4.31	0.96	-2.3	13	21.6	7.8	2.8	4.9
41	AG	17.41	15.89	33.30	1.10	4.6	14	29.0	8.8	7.2	2.4
42	AD	3.77	3.74	7.51	1.01	0.4	10	14.1	6.5	7.0	2.3
43	AU	3.50	3.84	7.34	0.91	-4.7	4		2.5	10.3	3.1
44	AA	3.22	3.04	6.26	1.06	2.9	8		6.0	3.8	5.9
45	AS	5.42	5.47	10.89	0.99	-0.4	18		5.7	7.1	3.3
46	AC	2.94	3.21	6.14	0.92	-4.4	9		3.0	2.7	0.0
47	AT	31.07	25.45	56.52	1.22	9.9	8	32.2	11.7	11.5	0.9
48	FR	2.80	2.87	5.67	0.98	-1.2	12		7.1	2.4	3.5
49	FM	3.15	3.33	6.47	0.95	-2.8	19	26.1	8.6	2.1	4.0
50	FL	3.77	3.88	7.65	0.97	-1.4	7	15.0	8.5	3.4	6.6
51	FT	6.96	6.98	13.94	1.00	-0.2	20	39.8	8.0	10.1	13.4
52	DO	2.43	2.44	4.88	1.00	-0.2	24		4.4	1.7	2.8
53	WC	4.36	4.71	9.06	0.93	-3.8	51	17.8	29.9	12.1	5.8
54	WA	4.28	4.61	8.89	0.93	-3.8	60	17.1	38.2	13.6	4.7
55	WB	4.40	4.66	9.06	0.94	-2.8	65	19.1	40.9	14.8	6.5
56	WD	3.69	3.79	7.48	0.97	-1.3	49	15.7	33.2	10.0	5.5
57	WE	3.88	3.93	7.81	0.99	-0.6	36	15.0	22.9	9.3	4.0
58	WQ	5.89	6.21	12.09	0.95	-2.7	37	24.2	47.7	30.8	4.5
59	WM	4.43	4.54	8.97	0.98	-1.2	42	11.8	24.3	9.8	2.8
60	WP	6.02	6.36	12.39	0.95	-2.7	38		24.5	8.9	4.1
61	FG	2.78	2.92	5.71	0.95	-2.5	26		16.8	2.5	4.7
62	FN	2.71	2.69	5.40	1.01	0.4	35		10.1	1.7	4.3
63	RL	2.80	2.76	5.56	1.01	0.6	15		8.5	1.5	3.5
64	RS	2.99	3.04	6.03	0.98	-0.9	26		8.8	2.6	4.5
65	RN	2.06	2.14	4.19	0.96	-1.9	19		6.3	1.4	3.7
66	RR	3.23	3.29	6.52	0.98	-1.0	23	29.0	9.5	2.7	4.0
67	AH	14.87	15.23	30.10	0.98	-1.2	35	283.9	950.2	277.2	27.3
68	GE	4.84	4.61	9.45	1.05	2.4	141		32.7	4.8	6.1
69	GH	4.79	4.67	9.46	1.02	1.2	72		19.3	10.5	4.0
70	GR	5.16	5.03	10.19	1.02	1.2	52		36.2	3.6	3.6
71	GV	4.93	4.98	9.92	0.99	-0.5	36		26.9	2.6	4.4
72	GM	4.86	5.24	10.10	0.93	-3.7	53		72.8	5.1	7.9
73	GC	4.32	4.11	8.43	1.05	2.5	31		44.8	4.9	5.0
74	GJ	3.55	3.49	7.04	1.02	0.8	57	8.8	16.5	4.3	3.4
75	GT	3.26	3.25	6.51	1.00	0.2	52	21.3	13.4	3.1	7.6
76	GS	3.24	3.24	6.49	1.00	0.0	58		17.5	7.0	6.0

Annexe 1

Code source	(Zn) [µg/l]	Rb [µg/l]	(Al) [µg/l]	Ni [µg/l]	(I) [µg/l]	Mn [µg/l]	Cu [µg/l]	U [µg/l]	Cr [µg/l]	V [µg/l]	Co [µg/l]	(La) [µg/l]
VE	1.1	1.0	0.4	0.5	1.1	0.20	0.5	0.34	0.11	0.41	0.31	0.10
VN		1.3	0.4		0.8	1.25		0.39	0.11	0.34	0.27	0.15
VC		0.7	3.9		0.5	1.35		0.23	0.24	0.38	0.33	0.23
VL	0.8	0.9	0.3	0.3	0.6	0.15	0.3	0.33	0.07	0.33	0.19	0.13
LLI	0.0	0.4	0.4	0.0	0.9	0.20	0	0.10	0.00	0.30	0.10	0.00
VB		0.5	1.7	0.8	0.9	2.40	0.6	0.29	0.13	0.44	0.34	0.12
VP		0.4	1.0		0.5	0.62	0.5	0.23	0.17	0.35	0.31	0.12
VM	1.6	0.4	0.6	2.8	0.6	0.77	0.5	0.24	0.20	0.34	0.31	0.11
VT	0.8	0.5	0.4	0.6	1.1	0.16	0.4	0.23	0.11	0.34	0.32	0.08
VR	0.2	0.7	0.2	0.0	0.8	0.00	0.2	0.15	0.07	0.15	0.04	0.00
YA	1.5	0.8	3.2	1.4	1.1	2.40	0.6	0.25	0.39	0.16	0.43	0.15
YB	3.3	1.9	0.8	0.8	0.7	0.67	0.6	0.29	0.51	0.13	0.42	0.12
YC	5.9	3.7	1.5	0.9	0.7	4.23	0.7	0.18	0.91	0.15	0.32	0.10
YD	7.1	5.8	1.8	4.0	2.8	3.02	0.8	0.15	0.89	0.15	0.25	0.13
YE	2.3	5.4	1.0	0.2	2.1	1.88	0.1	0.15	0.28	0.13	0.13	0.12
YF	3.6	2.9	0.8	2.3	0.2	0.34	3.1	0.26	0.18	0.14	0.27	0.13
VI		0.8	0.4	0.6	0.3	0.54		0.36	0.14	0.34	0.34	0.10
TR		1.0	0.3	1.0	1.4	0.32		0.33	0.10	0.36	0.41	0.08
YG	0.6	1.2	2.4	3.6	0.6	0.18	1.6	0.24	0.17	0.13	0.36	0.12
TW		1.3	1.2	0.6	0.7	0.70		0.31	0.16	0.42	0.32	0.12
TS		0.5	0.8		0.9	0.66		0.31	0.19	0.32	0.37	0.10
TF	0.2	2.3	0.1	0.4	0.3	0.04	0.1	0.21	0.09	0.24	0.10	0.01
TM		2.3	0.6		1.2	0.51		0.34	0.09	0.43	0.51	0.12
TL	1.4	0.9	1.0	0.8	2.3	0.22	0.7	0.48	0.14	0.44	0.35	0.11
TC		0.4	0.1	0.6	0.5	0.18		0.23	0.15	0.25	0.08	0.00
TG		0.6	0.3		0.8	0.49	0.2	0.34	0.21	0.22	0.00	0.00
TO	0.2	0.3	0.1	0.3	0.9	0.00	0.3	0.22	0.08	0.16	0.03	0.01
LS	1.2	1.4	0.2	0.7	0.9	0.16	0.1	0.45	0.16	0.27	0.08	0.03
LH		1.7	0.3		1.4	0.45		0.62	0.57	0.34	0.22	0.03
LC	2.3	0.9	0.8	0.9	0.5	0.49	0.0	0.27	0.49	0.21	0.06	0.02
TT	0.0	0.8	0.1	0.3	0.7	0.11	0.2	0.23	0.13	0.28	0.01	0.03
LW	4.4	0.9	0.6	0.5	0.5	0.24	0.6	0.29	0.11	0.39	0.30	0.09
SB	2.0	0.5	0.5	1.0	0.9	0.21	0.8	0.31	0.32	0.38	0.35	0.00
SM	0.0	0.6	0.3	0.5	1.1	0.01	0.2	0.26	0.08	0.29	0.58	0.00
SR		0.3	1.1	0.4	1.3	0.59		0.66	0.13	0.07	0.05	0.00
SL		0.5	1.9		0.6	0.57		0.20	0.82	0.24	0.26	0.07
SA	0.0	0.3	1.1	0.6	1.1	0.42	0.0	0.23	0.26	0.02	0.09	0.00
LT	3.0	0.4	0.9	1.0	0.3	0.11	1.0	0.22	0.17	0.38	0.25	0.10
DR	4.2	0.4	1.8	0.8	0.7	0.80	1.7	0.20	0.31	0.32	0.23	0.01
DM	0.9	0.5	0.8	0.7	0.6	0.31	0.6	0.20	0.20	0.27	0.24	0.01
AG	2.1	9.3	0.2	2.3	0.4	0.21	2.0	0.60	0.33	0.51	0.77	0.00
AD	0.3	0.8	0.3	0.7	0.4	0.13	0.0	0.25	0.18	0.19	0.16	0.02
AU		0.6	0.3	0.3	0.2	0.00	0.1	0.19	0.10	0.21	0.02	0.00
AA		0.4	1.1	0.9	0.4	0.39		0.33		0.34	0.11	0.18
AS		0.8	0.2		0.1	0.58	0.7	0.72	0.55	0.18	0.06	0.00
AC	0.9	0.3	11.3	2.1	0.5	4.87	0.2	0.17	1.06	0.38	0.14	0.06
AT	0.0	13.8	0.2	3.0	0.2	0.29	2.3	1.72	0.37	0.51	0.90	0.01
FR		0.5	11.4		0.5	4.03	0.9	0.18	0.42	0.48	0.36	0.04
FM	0.8	0.7	1.0	0.9	0.6	0.51	0.5	0.20	0.19	0.24	0.33	0.00
FL	0.3	0.4	0.4	0.7	1.3	0.22	0.1	0.05	0.81	0.38	0.18	0.01
FT	3.5	10.6	4.3	1.2	0.8	4.68	1.9	1.16	1.42	0.58	0.27	0.01
DO		0.5	1.7	0.7	0.5	0.66	0.8	0.27	0.14	0.37	0.24	0.09
WC	1.9	0.9	0.4	1.1	2.0	0.15	0.4	0.24	0.24	0.09	0.34	0.00
WA	2.7	0.8	0.4	1.0	2.6	0.14	1.5	0.23	0.20	0.07	0.34	0.00
WB	1.3	0.9	0.4	1.1	2.5	0.21	0.5	0.24	0.22	0.10	0.38	0.01
WD	1.2	0.7	0.2	0.8	2.0	0.14	0.6	0.19	0.23	0.07	0.30	0.00
WE	0.9	0.8	0.3	0.9	1.2	0.10	0.5	0.22	0.22	0.05	0.32	0.00
WQ	3.7	1.4	0.8	1.4	1.5	0.13	1.5	0.23	0.21	0.10	0.48	0.00
WM	0.3	1.3	0.6	0.5	0.5	0.10	0.5	0.33	0.08	0.45	0.32	0.12
WP		1.0	0.9		1.2	0.81		0.35	0.26	0.39	0.53	0.03
FG	0.5	0.3	0.7	0.8	1.3	0.35	0.6	0.10	0.19	0.25	0.32	0.00
FN		0.5	0.3	0.9	0.9	0.24	0.9	0.11	0.19	0.35	0.31	0.00
RL	0.6	0.3	0.3	0.9	0.7	0.24	0.3	0.08	0.23	0.25	0.31	0.00
RS		0.4	1.8		1.0	1.29		0.14	0.26	0.37	0.35	0.03
RN		0.3	0.3	0.9	0.9	1.58		0.10	0.23	0.03	0.23	0.00
RR	0.8	0.6	1.4	1.1	0.8	0.67	0.5	0.14	0.25	0.27	0.36	0.00
AH	0.5	2.7	2.0	1.5	386.9	0.00	2.2	0.00	6.60	0.70	0.00	0.70
GE		1.2	4.1		1.6	4.49		0.37	0.49	0.51	0.67	0.12
GH		1.5	0.7		1.1	0.82		0.31	0.17	0.41	0.43	0.10
GR		0.9	3.7		1.7	3.36		0.38	0.31	0.53	0.47	0.13
GV		0.7	1.5		1.1	0.78		0.35	0.26	0.49	0.43	0.12
GM		1.1	1.1		2.4	1.91		0.38	0.28	0.43	0.60	0.10
GC		0.7	2.2	0.8	1.3	0.54		0.36	0.15	0.46	0.35	0.10
GJ	0.8	0.7	0.6	0.5	4.6	0.42	0.4	0.33	0.09	0.36	0.27	0.13
GT	5.3	0.7	2.2	0.8	2.4	0.90	2.7	0.32	0.31	0.41	0.29	0.16
GS		2.0			1.0	2.46		0.25	0.65		0.37	0.22

ANNEXE 2

**PARAMETRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES
EXUTOIRES DES RESEAUX
SPATIO-TEMPOREL (N° 2) ET TEMPOREL (N° 3)**



Paramètres physiques et chimiques des exutoires des réseaux spatio-temporel (N° 2) et temporel (N° 3)

N° source		2	2	2	4	4	4	5
Code source		VN1	VN2	VN5	VL1	VL2	VL5	LLI
Date		29.nov.88	25.mai.89	6.sep.89	30.nov.88	17.mai.89	6.sep.89	16.jul.81
Q	[l/mn]	120	150	97	33	130	60	
K20	[μ S/cm]	256	253	278	225	194	225	150
T	[°C]	-6.5	4.6	4.8	4.1	3.2	5.1	3.1
pH	[-]	7.2	7.1	7.0	6.8	6.8	7.0	7.7
O2	[%]							86
Eh	[mV]							
Dtot	[°F]	14.9	15.0	16.6	13.7	12.1	13.9	8.9
HCO3	[mg/l]	149.6	149.0	160.0	150.2	141.7	156.9	104.0
SO4	[mg/l]	19.4	23.5	32.8	14.4	4.8	0.9	4.9
(NO3)	[mg/l]	6.7	13.6	5.6	0.0	6.9	0.0	1.4
Cl	[mg/l]	0.5	0.7	0.5	0.5	0.6	0.8	0.0
Ca	[mg/l]	47.7	46.9	52.5	41.3	41.9	45.3	31.0
Mg	[mg/l]	6.3	6.0	6.6	7.5	3.3	2.5	2.2
Na	[mg/l]	1.5	1.2	1.6	0.9	0.3	0.8	0.2
Sr	[mg/l]	0.36	0.33	0.46	0.23	0.12	0.24	
K	[mg/l]	0.87	0.67	0.67	0.49	0.21	0.19	0.50
Si	[mg/l]	2.0	1.0	1.6	1.3	0.0	0.7	0.9
TSD	[mg/l]	235	243	262	217	200	208	145
Σ cations	[méq/l]	3.00	2.91	3.26	2.73	2.38	2.51	1.75
Σ anions	[méq/l]	2.98	3.17	3.41	2.78	2.55	2.61	1.83
Σ c+a = TID	[méq/l]	5.98	6.08	6.67	5.51	4.93	5.12	3.58
Balance ionique	[-]	1.01	0.92	0.96	0.98	0.93	0.96	0.96
Erreur / balance	[%]	0.4	-4.3	-2.2	-0.8	-3.4	-2.0	-2.2
Ba	[μ g/l]	69	57	59	44	33	21	
(Fe)	[μ g/l]		3.1	0.4	6.3	0.6	2.2	
B	[μ g/l]	10.6	8.2	11.9	6.0	2.5	5.1	
Li	[μ g/l]	7.5	5.4	6.3	2.9	1.2	2.3	
(Br)	[μ g/l]	2.7	1.3	5.7	2.9	4.0	1.1	
(Zn)	[μ g/l]		2.3	0.5	0.8	0.0	0.6	
Rb	[μ g/l]	1.3	0.8	1.1	0.9	0.3	0.2	
(Al)	[μ g/l]	0.4	0.6	0.4	0.3	0.1	0.4	
Ni	[μ g/l]		0.5	0.3	0.3	0.0	0.3	
(I)	[μ g/l]	0.8	2.0	1.4	0.6	1.0	0.9	
Mn	[μ g/l]	1.25	0.47	0.40	0.15	0.00	0.13	
Cu	[μ g/l]		0.6	0.7	0.3	0.1	0.4	
U	[μ g/l]	0.39	0.25	0.26	0.33	0.14	0.11	
Cr	[μ g/l]	0.11	0.29	0.25	0.07	0.07	0.31	
V	[μ g/l]	0.34	0.02	0.16	0.33	0.07	0.38	
Co	[μ g/l]	0.27	0.05	0.11	0.19	0.04	0.07	
(La)	[μ g/l]	0.15	0.04	0.00	0.13	0.04	0.04	

N° source		5	5	5	5	5	5	5
Code source		LLI						
Date		27.nov.81	26.fév.82	22.avr.82	19.jul.82	27.oct.82	16.fév.83	29.avr.83
Q	[l/mn]				3750	3250	1750	2700
K20	[μS/cm]	161	171	166	151	159	157	168
T	[°C]	3.0	3.2	3.2	3.1	3.3	3.1	3.1
pH	[-]	7.6	7.9	7.8	7.8	8.2	8.0	8.0
O2	[%]	91	86	97	101	102	95	99
Eh	[mV]							
Dtot	[°F]	9.6	9.5	10.1	8.8	9.5	9.5	10.0
HCO3	[mg/l]	109.0	111.0	116.0	101.0	110.0	107.0	113.0
SO4	[mg/l]	3.0	4.3	4.6	4.0	4.4	4.0	5.0
(NO3)	[mg/l]	1.3	1.3	1.6	1.3	1.3	1.2	1.2
Cl	[mg/l]	0.3	0.6	0.0	0.3	0.4	0.2	0.2
Ca	[mg/l]	32.5	33.6	35.5	30.5	33.4	33.1	34.6
Mg	[mg/l]	3.5	2.9	2.9	2.7	2.9	2.9	2.9
Na	[mg/l]	0.7	0.3	0.7	0.3	0.3	0.3	0.3
Sr	[mg/l]		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
K	[mg/l]	0.40	0.40	0.40	0.30	0.40	0.40	0.40
Si	[mg/l]	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.4	1.0
TSD	[mg/l]	152	155	163	141	154	150	159
Σ cations	[méq/l]	1.88	1.94	2.05	1.77	1.93	1.91	1.99
Σ anions	[méq/l]	1.88	1.95	2.02	1.77	1.93	1.86	1.98
Σ c+a = TID	[méq/l]	3.75	3.88	4.08	3.53	3.85	3.77	3.97
Balance ionique	[-]	1.00	1.00	1.02	1.00	1.00	1.03	1.01
Erreur / balance	[%]	-0.1	-0.2	0.8	0.0	0.0	1.3	0.3
Ba	[μg/l]							
(Fe)	[μg/l]							
B	[μg/l]							
Li	[μg/l]		2.8	2.9	2.7	2.9	2.8	2.9
(Br)	[μg/l]							
(Zn)	[μg/l]							
Rb	[μg/l]							
(Al)	[μg/l]							
Ni	[μg/l]							
(I)	[μg/l]							
Mn	[μg/l]							
Cu	[μg/l]							
U	[μg/l]							
Cr	[μg/l]							
V	[μg/l]							
Co	[μg/l]							
(La)	[μg/l]							

Paramètres physiques et chimiques des exutoires des réseaux spatio-temporel (N° 2) et temporel (N° 3)

N° source		5	5	5	5	5	5	5
Code source		LLI						
Date		14.jul.83	11.oct.83	13.fév.84	11.avr.84	25.jul.84	16.oct.84	12.fév.85
Q	[l/mn]	3760	2820	2070	1170	3820	3700	1216
K20	[μ S/cm]	139	148	158	157	144		155
T	[°C]	3.1	3.4	3.4	3.3	3.3	3.4	3.5
pH	[-]	7.9	7.8	7.9	8.3	7.7	8.0	8.1
O2	[%]	98	87	91	95	96		97
Eh	[mV]							
Dtot	[°F]	9.0	9.3	9.4	9.7	8.8	9.7	9.6
HCO3	[mg/l]	104.0	109.0	110.0	110.0	106.0	109.0	110.0
SO4	[mg/l]	3.9	4.3	4.4	4.4	4.2	4.4	4.4
(NO3)	[mg/l]	1.4	1.7	1.0	1.4	1.9	0.9	1.1
Cl	[mg/l]	0.4	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.0
Ca	[mg/l]	31.7	33.4	36.4	37.0	33.9	36.7	32.8
Mg	[mg/l]	2.8	2.8	4.2	4.4	4.2	4.5	3.2
Na	[mg/l]	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4
Sr	[mg/l]	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
K	[mg/l]	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Si	[mg/l]	1.0	0.9	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0
TSD	[mg/l]	146	153	158	159	152	158	153
Σ cations	[m \acute{e} q/l]	1.84	1.92	2.19	2.23	2.06	2.23	1.92
Σ anions	[m \acute{e} q/l]	1.82	1.91	1.92	1.92	1.86	1.90	1.91
Σ c+a = TID	[m \acute{e} q/l]	3.66	3.83	4.10	4.15	3.92	4.13	3.84
Balance ionique	[-]	1.01	1.01	1.14	1.16	1.11	1.18	1.01
Erreur / balance	[%]	0.5	0.4	6.6	7.5	5.0	8.1	0.3
Ba	[μ g/l]							
(Fe)	[μ g/l]							
B	[μ g/l]							
Li	[μ g/l]	2.8	2.8	2.8	2.9	2.8	2.9	2.4
(Br)	[μ g/l]							
(Zn)	[μ g/l]							
Rb	[μ g/l]							
(Al)	[μ g/l]							
Ni	[μ g/l]							
(I)	[μ g/l]							
Mn	[μ g/l]							
Cu	[μ g/l]							
U	[μ g/l]							
Cr	[μ g/l]							
V	[μ g/l]							
Co	[μ g/l]							
(La)	[μ g/l]							

N° source		5	5	5	5	5	5	5
Code source		LLI	LLI	LLI	LLI	LLI	LLI	LLI
Date		16.avr.85	16.jul.85	11.oct.85	10.fév.86	1.mai.86	22.jul.86	29.oct.86
Q	[l/mn]	1141	3611	1584	816	1070	2870	
K20	[µS/cm]	162	149	152	151		147	151
T	[°C]	3.5	3.5	3.7	3.5		3.5	3.8
pH	[-]	8.1	8.0	8.2	8.2		8.0	8.0
O2	[%]		93	100	85	100	99	42
Eh	[mV]							
Dtot	[°F]	9.8		9.3	9.6	10.2	9.2	9.4
HCO3	[mg/l]	108.0	104.0	107.0	108.0	115.0	108.0	113.0
SO4	[mg/l]	4.5	4.0	4.2	8.5	4.7	4.0	4.5
(NO3)	[mg/l]	1.4	1.2	1.1	0.9	1.2	1.1	1.0
Cl	[mg/l]	0.3	0.1	0.3	0.2	0.4	0.2	0.2
Ca	[mg/l]	35.0	30.0	33.1	33.3	36.0	29.8	32.2
Mg	[mg/l]	4.3	2.7	2.6	2.7	2.6	2.6	2.7
Na	[mg/l]	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Sr	[mg/l]	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
K	[mg/l]	0.40	0.40	0.30	0.40	0.40	0.30	0.40
Si	[mg/l]	1.0	1.0	1.0	0.9	0.5	1.0	1.1
TSD	[mg/l]	155	144	150	155	161	147	155
Σ cations	[méq/l]	2.12	1.74	1.89	1.91	2.03	1.72	1.85
Σ anions	[méq/l]	1.89	1.81	1.87	1.97	2.01	1.88	1.97
Σ c+a = TID	[méq/l]	4.02	3.55	3.76	3.88	4.05	3.60	3.82
Balance ionique	[-]	1.12	0.96	1.01	0.97	1.01	0.92	0.94
Erreur / balance	[%]	5.7	-1.9	0.7	-1.4	0.5	-4.3	-3.0
Ba	[µg/l]							
(Fe)	[µg/l]							
B	[µg/l]							
Li	[µg/l]	2.0	3.0	1.7	1.8	1.8	1.3	1.2
(Br)	[µg/l]							
(Zn)	[µg/l]							
Rb	[µg/l]							
(Al)	[µg/l]							
Ni	[µg/l]							
(I)	[µg/l]							
Mn	[µg/l]							
Cu	[µg/l]							
U	[µg/l]							
Cr	[µg/l]							
V	[µg/l]							
Co	[µg/l]							
(La)	[µg/l]							

Paramètres physiques et chimiques des exutoires des réseaux spatio-temporel (N° 2) et temporel (N° 3)

N° source		5	5	5	5	5	5	5
Code source		LLI	LLI	LLI	LLI	LLI	LLI	LLI
Date		11.fév.87	15.avr.87	24.jul.87	19.oct.87	3.fév.88	17.mai.88	16.août.88
Q	[l/mn]				181			
K20	[μ S/cm]	164	160	147	152	152		152
T	[°C]	3.5	3.1	3.4	3.2	3.2	3.1	3.2
pH	[-]	7.8	7.8	8.0	7.6	7.0	6.9	7.0
O2	[%]	95		99	92	93	109	97
Eh	[mV]	293	280	180	256	277	250	197
Dtot	[°F]	9.4	9.7	8.9	9.4	9.5	9.6	9.2
HCO3	[mg/l]	116.0	113.0	108.0	112.0	114.0	114.0	112.0
SO4	[mg/l]	4.8	4.9	4.0	5.7	5.6	6.8	
(NO3)	[mg/l]	0.9	1.2	1.8	1.6	1.4	1.6	
Cl	[mg/l]	0.3	0.1	1.0	0.3	0.5	0.4	
Ca	[mg/l]	33.2	34.1	29.1	31.9	29.9	33.5	32.1
Mg	[mg/l]	2.7	2.5	2.5	2.5	2.7	2.1	3.0
Na	[mg/l]	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Sr	[mg/l]	0.10	0.20	0.10	0.10	0.00	0.10	0.20
K	[mg/l]	0.40	0.40	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40
Si	[mg/l]	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	
TSD	[mg/l]	160	158	148	156	156	160	148
Σ cations	[méq/l]	1.91	1.93	1.68	1.82	1.74	1.87	1.87
Σ anions	[méq/l]	2.02	1.98	1.91	1.99	2.02	2.05	1.84
Σ c-a = TID	[méq/l]	3.93	3.91	3.59	3.81	3.76	3.91	3.71
Balance ionique	[-]	0.94	0.98	0.88	0.92	0.86	0.91	1.02
Erreur / balance	[%]	-3.0	-1.1	-6.4	-4.3	-7.5	-4.6	1.0
Ba	[μ g/l]							
(Fe)	[μ g/l]							
B	[μ g/l]							
Li	[μ g/l]	1.4	1.2	1.4	1.3	1.4	1.3	1.4
(Br)	[μ g/l]							
(Zn)	[μ g/l]							
Rb	[μ g/l]							
(Al)	[μ g/l]							
Ni	[μ g/l]							
(I)	[μ g/l]							
Mn	[μ g/l]							
Cu	[μ g/l]							
U	[μ g/l]							
Cr	[μ g/l]							
V	[μ g/l]							
Co	[μ g/l]							
(La)	[μ g/l]							

N° source		5	5	5	6	6	6	6
Code source		LLI	LLI	LLI	VB1	VB2	VB3	VB4
Date		1.nov.88	17.mai.89	2.nov.89	6.déc.88	19.mai.89	27.jui.89	19.jul.89
Q	[l/mn]		~4000	~2000	300	>930	300	~600
K20	[μ S/cm]		163	165	265	214	239	262
T	[°C]		3.2	3.7	4.2	4.4	4.4	4.5
pH	[-]		7.0	6.5	6.6	7.3	7.7	7.3
O2	[%]	100	100					
Eh	[mV]	268	233					
Dtot	[°F]	9.8	10.0	9.9	16.1	13.1	14.3	15.8
HCO3	[mg/l]	116.0	117.0	117.0	191.7	155.7	171.0	186.8
SO4	[mg/l]	2.4	8.0	4.6	4.7	3.6	5.3	4.0
(NO3)	[mg/l]	1.0	1.2	0.5	0.9	6.7	0.0	0.0
Cl	[mg/l]	0.2	0.0	0.2	0.4	0.2	2.9	0.3
Ca	[mg/l]	34.8	35.3	37.5	57.7	46.0	52.7	54.7
Mg	[mg/l]	2.6	2.8	2.7	2.9	2.1	2.7	2.8
Na	[mg/l]	0.3	0.3	0.2	0.9	0.5	1.1	1.0
Sr	[mg/l]	0.10	0.10	0.10	0.33	0.22	0.26	0.29
K	[mg/l]	0.30	0.40	0.40	0.42	0.35	0.36	0.46
Si	[mg/l]	1.0		0.8	1.0	0.9	0.9	0.9
TSD	[mg/l]	159	165	164	261	216	237	251
Σ cations	[méq/l]	1.98	2.02	2.11	3.17	2.50	2.91	3.02
Σ anions	[méq/l]	1.97	2.10	2.03	3.27	2.74	2.99	3.15
Σ c+a = TID	[méq/l]	3.95	4.12	4.14	6.44	5.24	5.91	6.18
Balance ionique	[-]	1.00	0.96	1.04	0.97	0.91	0.97	0.96
Erreur / balance	[%]	0.0	-2.0	2.1	-1.4	-4.5	-1.3	-2.2
Ba	[μ g/l]			42	49	36	44	46
(Fe)	[μ g/l]			2.2		18.2	11.0	18.1
B	[μ g/l]			3.2	5.6	4.1	8.8	7.7
Li	[μ g/l]	1.2	1.5	1.4	1.9	1.7	3.6	3.1
(Br)	[μ g/l]			0.0	5.3	3.0	2.1	1.7
(Zn)	[μ g/l]			0.0		1.3	0.8	5.3
Rb	[μ g/l]			0.4	0.5	0.3	0.4	0.5
(Al)	[μ g/l]			0.4	1.7	0.9	1.1	1.4
Ni	[μ g/l]			0.0	0.8	0.5	0.5	0.6
(I)	[μ g/l]			0.9	0.9	2.0	1.5	2.1
Mn	[μ g/l]			0.20	2.40	1.32	0.99	0.98
Cu	[μ g/l]			0.0	0.6	0.5	0.5	2.4
U	[μ g/l]			0.10	0.29	0.14	0.16	0.15
Cr	[μ g/l]			0.00	0.13	1.20	0.20	0.30
V	[μ g/l]			0.30	0.44	0.20	0.20	0.13
Co	[μ g/l]			0.10	0.34	0.14	0.16	0.13
(La)	[μ g/l]			0.00	0.12	0.02	0.02	0.02

Paramètres physiques et chimiques des exutoires des réseaux spatio-temporel (N° 2) et temporel (N° 3)

N° source		6	6	6	6	6	6	6
Code source		VB5	VB6	VB7	VB8	VB9	VB10	VB11
Date		9.aou.89	5.sep.89	13.oct.89	7.nov.89	5.déc.89	9.jan.90	8.mar.90
Q	[l/mn]	430	480	650	~500	300	~470	
K20	[µS/cm]	288	302	323	313	313	268	260
T	[°C]	4.4	4.3	4.4	4.2	4.2	4.2	4.2
pH	[-]	7.5	7.2	7.3	7.4	7.5	7.5	
O2	[%]			176		120		
Eh	[mV]			234		246		
Dtot	[°F]	17.7	18.6	20.2	19.6	19.0	21.0	17.3
HCO3	[mg/l]	207.6	221.7	240.0	230.2	225.9	211.7	202.1
SO4	[mg/l]	3.7	4.8	5.4	5.2	5.7	5.7	4.8
(NO3)	[mg/l]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cl	[mg/l]	3.2	3.0	3.0	2.3	2.8	2.7	0.6
Ca	[mg/l]	63.7	62.7	68.7	68.1	66.7	64.9	59.5
Mg	[mg/l]	2.7	3.0	3.4	3.2	3.9	3.4	3.6
Na	[mg/l]	0.6	0.7	0.9	0.9	1.6	1.3	1.6
Sr	[mg/l]	0.31	0.30	0.36	0.33	0.36	0.31	0.32
K	[mg/l]	0.54	0.53	0.44	0.54	0.60	0.56	0.50
Si	[mg/l]	1.2	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2
TSD	[mg/l]	283	298	323	312	309	292	274
Σ cations	[méq/l]	3.45	3.43	3.76	3.72	3.74	3.60	3.35
Σ anions	[méq/l]	3.57	3.82	4.13	3.95	3.90	3.66	3.43
Σ c+a = TID	[méq/l]	7.01	7.24	7.89	7.67	7.64	7.26	6.78
Balance ionique	[-]	0.97	0.90	0.91	0.94	0.96	0.98	0.98
Erreur / balance	[%]	-1.7	-5.4	-4.6	-2.9	-2.1	-0.9	-1.1
Ba	[µg/l]	52	54	60	55	69	55	53
(Fe)	[µg/l]	25.0	9.2	7.6	6.4	5.2	4.4	5.2
B	[µg/l]	5.5	6.5	7.6	6.2	12.4	10.1	12.4
Li	[µg/l]	1.8	2.4	2.8	2.7	5.2	4.2	4.8
(Br)	[µg/l]	3.2	2.1	6.2	2.4	4.9	2.7	7.8
(Zn)	[µg/l]	1.5	1.9	1.3	1.4	1.2	2.2	2.0
Rb	[µg/l]	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5	1.0	0.5
(Al)	[µg/l]	1.0	0.4	0.3	0.4	0.1	0.5	0.2
Ni	[µg/l]	0.8	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
(I)	[µg/l]	1.4	1.3	1.4	1.0	1.7	0.8	1.0
Mn	[µg/l]	1.33	0.52	0.35	0.68	0.32	0.81	0.31
Cu	[µg/l]	0.5	0.7	0.3	0.4	0.3	0.7	0.4
U	[µg/l]	0.15	0.17	0.19	0.20	0.22	0.23	0.23
Cr	[µg/l]	0.39	1.11	0.24	0.23	0.17	0.14	0.06
V	[µg/l]	0.27	0.25	0.25	0.00	0.01	0.00	0.01
Co	[µg/l]	0.15	0.15	0.12	0.15	0.15	0.09	0.09
(La)	[µg/l]	0.07	0.01	0.04	0.02	0.02	0.00	0.00

N° source		6	6	6	6	6	6	6
Code source		VB12	VB13	VB14	VB15	VB16	VB17	VB18
Date		21.mar.90	25.avr.90	29.mai.90	29.jui.90	23.jul.90	16.aou.90	12.sep.90
Q	[l/mn]	~450	410	>930	>930	>930	880	470
K20	[µS/cm]	260	281	222	255	270	283	286
T	[°C]	4.2	4.3	4.2	4.6	4.6	4.5	4.3
pH	[-]	7.0	7.4	6.8	7.0	7.0	7.2	6.8
O2	[%]			200	90	126	110	68
Eh	[mV]			243	224	214	241	250
Dtot	[°F]	15.5	11.0	13.5	15.5	16.4	18.1	17.7
HCO3	[mg/l]	181.4	120.3	161.2	191.1	197.2	213.7	212.5
SO4	[mg/l]	6.4	9.4	3.2	5.1	6.8	3.5	5.1
(NO3)	[mg/l]	2.3	2.3	0.6	2.5	1.9	0.5	0.8
Cl	[mg/l]	0.7	0.8	0.3	0.6	0.5	0.7	0.5
Ca	[mg/l]	58.9	38.9	47.6	57.3	58.5	56.5	67.1
Mg	[mg/l]	2.7	3.6	2.2	2.3	2.8	2.3	3.1
Na	[mg/l]	0.9	1.4	0.6	0.7	1.3	0.6	1.1
Sr	[mg/l]	0.29	0.37	0.26	0.29	0.29	0.30	0.32
K	[mg/l]	0.61	0.58	0.27	0.47	0.74	0.54	0.40
Si	[mg/l]	0.9	1.1	0.9	1.0	1.1	1.0	1.0
TSD	[mg/l]	255	179	217	261	271	280	292
Σ cations	[méq/l]	3.22	2.32	2.59	3.10	3.24	3.06	3.67
Σ anions	[méq/l]	3.16	2.23	2.73	3.30	3.42	3.60	3.62
Σ c+a = TID	[méq/l]	6.38	4.55	5.32	6.40	6.66	6.66	7.28
Balance ionique	[-]	1.02	1.04	0.95	0.94	0.95	0.85	1.01
Erreur / balance	[%]	0.9	2.1	-2.5	-3.0	-2.7	-8.2	0.7
Ba	[µg/l]	45	61	39	42	49	51	53
(Fe)	[µg/l]	13.6	5.4	11.4	11.3	5.0	10.8	5.3
B	[µg/l]	7.2	12.0	4.1	4.2	10.0	5.1	13.0
Li	[µg/l]	2.6	4.5	1.8	1.8	3.7	1.9	3.3
(Br)	[µg/l]	7.2	6.5	4.7	5.1	3.9	9.1	7.0
(Zn)	[µg/l]	1.8	2.0	1.0	5.2	5.3	2.3	1.9
Rb	[µg/l]	0.5	0.5	0.3	0.4	0.9	0.5	0.5
(Al)	[µg/l]	0.6	0.2	0.6	0.6	13.9	2.6	2.0
Ni	[µg/l]	0.6	0.5	0.4	0.8	0.6	0.5	0.4
(I)	[µg/l]	1.1	1.6	0.9	1.2	1.3	1.2	10.7
Mn	[µg/l]	0.80	0.38	1.11	0.86	6.09	1.18	0.45
Cu	[µg/l]	0.4	1.4	0.3	1.0	1.4	0.2	0.4
U	[µg/l]	0.15	0.24	0.16	0.17	0.16	0.16	0.19
Cr	[µg/l]	0.16	0.24	0.29	0.26	0.43	0.18	0.22
V	[µg/l]	0.06	0.00	0.00	0.02	0.20	0.14	0.00
Co	[µg/l]	0.08	0.14	0.10	0.14	0.08	0.15	0.12
(La)	[µg/l]	0.04	0.05	0.02	0.05	0.07	0.04	0.06

Paramètres physiques et chimiques des exutoires des réseaux spatio-temporel (N° 2) et temporel (N° 3)

N° source		6	6	7	7	7	8	8
Code source		VB19	VB20	VP1	VP2	VP5	VM1	VM2
Date		25.oct.90	21.nov.90	6.déc.88	25.mai.89	5.sep.89	30.nov.88	1.mai.89
Q	[l/mn]	370	>930	~300	~500	300	1900	2800
K20	[μ S/cm]	289	267	235	230	268	244	246
T	[°C]	4.3	4.2	4.7	5.0	5.1	4.5	3.7
pH	[-]	7.2	7.3	6.7	7.3	7.2	7.0	7.3
O2	[%]		103					
Eh	[mV]		289					
Dtot	[°F]	17.9	16.7	14.5	14.4	16.4	14.7	15.3
HCO3	[mg/l]	213.1	218.0	171.0	166.7	196.0	174.0	180.1
SO4	[mg/l]	4.3	3.9	3.2	2.2	3.8	6.2	5.7
(NO3)	[mg/l]	0.6	0.9	1.8	4.9	0.0	0.0	6.8
Cl	[mg/l]	0.4	0.4	0.3	0.2	2.8	0.4	0.6
Ca	[mg/l]	66.9	75.8	50.5	47.9	53.3	53.3	56.3
Mg	[mg/l]	3.1	2.5	2.6	2.1	2.7	2.9	2.5
Na	[mg/l]	1.2	0.6	0.7	0.5	0.6	1.5	1.0
Sr	[mg/l]	0.33	0.30	0.28	0.20	0.28	0.28	0.23
K	[mg/l]	0.41	0.41	0.23	0.15	0.30	0.28	0.18
Si	[mg/l]	1.1	1.0	1.2	0.5	0.8	1.0	0.6
TSD	[mg/l]	291	304	232	225	261	240	254
Σ cations	[méq/l]	3.67	4.03	2.78	2.59	2.93	2.97	3.07
Σ anions	[méq/l]	3.60	3.68	2.91	2.86	3.37	2.99	3.20
Σ c+a = TID	[méq/l]	7.27	7.71	5.68	5.45	6.30	5.97	6.27
Balance ionique	[-]	1.02	1.09	0.96	0.90	0.87	0.99	0.96
Erreur / balance	[%]	0.9	4.5	-2.3	-5.0	-7.0	-0.3	-2.0
Ba	[μ g/l]	62	48	20	15	18	23	18
(Fe)	[μ g/l]	2.3	19.2		5.0	3.5	39.2	0.0
B	[μ g/l]	16.4	6.1	3.3	3.4	4.2	7.7	5.9
Li	[μ g/l]	3.9	1.7	1.2	1.2	1.6	3.3	2.8
(Br)	[μ g/l]	4.5	3.2	1.1	0.6	2.9	4.8	3.2
(Zn)	[μ g/l]	0.9	6.2		0.8	1.6	1.6	0.1
Rb	[μ g/l]	0.5	0.6	0.4	0.2	0.4	0.4	0.3
(Al)	[μ g/l]	0.5	0.8	1.0	0.5	0.5	0.6	0.1
Ni	[μ g/l]	0.3	0.5		0.3	0.2	2.8	0.2
(I)	[μ g/l]	7.5	5.9	0.5	0.6	0.6	0.6	0.8
Mn	[μ g/l]	0.23	1.39	0.62	0.32	0.20	0.77	0.11
Cu	[μ g/l]	0.3	3.0	0.5	0.3	0.3	0.5	0.4
U	[μ g/l]	0.18	0.17	0.23	0.11	0.12	0.24	0.10
Cr	[μ g/l]	0.25	0.20	0.17	0.23	0.25	0.20	0.15
V	[μ g/l]	0.00	0.02	0.35	0.01	0.36	0.34	0.00
Co	[μ g/l]	0.08	0.13	0.31	0.10	0.09	0.31	0.03
(La)	[μ g/l]	0.00	0.00	0.12	0.05	0.00	0.11	0.04

N° source		8	9	9	9	10	10	17
Code source		VM5	VT1	VT2	VT5	VR2	VR5	VI1
Date		6.sep.89	30.nov.88	25.mai.89	5.sep.89	24.avr.89	6.sep.89	14.déc.88
Q	[l/mn]	4200	1160	~2000	~1000	300	300	~400
K20	[μ S/cm]	248	291	246	294	267	255	269
T	[°C]	5.2	5.6	4.8	6.0	6.1	6.4	~4.7
pH	[-]	7.5	6.8	7.2	7.0	7.1	7.0	7.1
O2	[%]							
Eh	[mV]							
Dtot	[°F]	15.7	17.6	15.8	18.2	16.2	16.3	16.2
HCO3	[mg/l]	187.5	208.8	175.2	220.4	185.0	175.9	183.8
SO4	[mg/l]	4.5	11.0	3.9	5.1	7.5	9.4	9.9
(NO3)	[mg/l]	9.5	1.5	5.9	9.7	7.0	9.1	0.4
Cl	[mg/l]	0.4	0.8	0.8	1.2	0.6	0.5	0.1
Ca	[mg/l]	56.5	63.5	53.7	65.1	56.3	53.3	57.5
Mg	[mg/l]	5.9	3.0	2.4	2.7	3.5	3.7	2.4
Na	[mg/l]	0.6	1.8	0.9	1.3	0.8	0.9	0.6
Sr	[mg/l]	0.16	0.34	0.24	0.28	0.13	0.13	0.29
K	[mg/l]	0.29	0.38	0.27	0.31	0.49	0.61	0.35
Si	[mg/l]	1.0	1.3	0.6	1.1	1.6	1.5	1.1
TSD	[mg/l]	266	293	244	307	263	255	256
Σ cations	[méq/l]	3.34	3.52	2.93	3.55	3.15	3.02	3.11
Σ anions	[méq/l]	3.33	3.70	3.07	3.91	3.32	3.24	3.23
Σ c+a = TID	[méq/l]	6.67	7.22	6.00	7.46	6.47	6.26	6.34
Balance ionique	[-]	1.00	0.95	0.95	0.91	0.95	0.93	0.96
Erreur / balance	[%]	0.2	-2.5	-2.4	-4.9	-2.6	-3.5	-1.8
Ba	[μ g/l]	40	27	19	23	65	67	19
(Fe)	[μ g/l]	4.6	10.0	1.3	0.0	0.0	0.0	
B	[μ g/l]	4.2	13.8	8.0	10.9	4.7	6.0	2.5
Li	[μ g/l]	2.6	5.1	3.0	4.2	3.6	3.9	2.1
(Br)	[μ g/l]	2.3	3.3	1.1	3.3	3.0	1.5	3.3
(Zn)	[μ g/l]	0.6	0.8	0.2	0.5	0.2	0.4	
Rb	[μ g/l]	0.5	0.5	0.2	0.2	0.7	0.8	0.8
(Al)	[μ g/l]	1.0	0.4	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4
Ni	[μ g/l]	0.3	0.6	0.1	0.2	0.0	0.0	0.6
(I)	[μ g/l]	0.6	1.1	1.1	1.7	0.8	0.7	0.3
Mn	[μ g/l]	0.37	0.16	0.05	0.15	0.00	0.08	0.54
Cu	[μ g/l]	1.0	0.4	0.2	0.3	0.2	0.3	
U	[μ g/l]	0.23	0.23	0.10	0.10	0.15	0.15	0.36
Cr	[μ g/l]	0.32	0.11	0.25	0.30	0.07	0.09	0.14
V	[μ g/l]	0.26	0.34	0.00	0.15	0.15	0.19	0.34
Co	[μ g/l]	0.00	0.32	0.08	0.11	0.04	0.04	0.34
(La)	[μ g/l]	0.04	0.08	0.00	0.02	0.00	0.01	0.10

Paramètres physiques et chimiques des exutoires des réseaux spatio-temporel (N° 2) et temporel (N° 3)

N° source		17	17	20	20	20	21	21
Code source		VI2	VI5	TW1	TW2	TW5	TS1	TS2
Date		4.avr.89	6.sep.89	23.nov.88	25.avr.89	17.aou.89	23.nov.88	25.avr.89
Q	[l/mn]	300	470				~150	145
K20	[μ S/cm]	277	265	295	307	312	242	227
T	[°C]	3.4	4.2	~5.1	6.3		~6.0	6.0
pH	[-]	7.0	7.0	6.3	7.0	7.7	6.7	6.9
O2	[%]							
Eh	[mV]							
Dtot	[°F]	16.5	16.1	18.1	18.6	18.9	15.2	13.6
HCO3	[mg/l]	188.1	183.2	202.7	208.8	204.6	177.7	160.0
SO4	[mg/l]	11.9	11.8	16.5	9.2	18.6	3.6	3.1
(NO3)	[mg/l]	8.2	11.2	0.4	5.5	0.0	2.6	8.5
Cl	[mg/l]	0.5	0.4	0.5	0.7	1.3	0.3	0.7
Ca	[mg/l]	63.3	58.9	60.7	70.3	70.6	53.3	48.7
Mg	[mg/l]	1.8	2.0	4.8	5.2	5.7	3.4	3.0
Na	[mg/l]	0.3	0.3	1.4	1.2	1.2	1.0	0.6
Sr	[mg/l]	0.19	0.22	0.45	0.43	0.48	0.22	0.18
K	[mg/l]	0.21	0.26	0.36	0.34	0.37	0.80	0.60
Si	[mg/l]	0.8	0.5	1.7	1.4	1.4	1.8	1.3
TSD	[mg/l]	275	269	290	303	304	245	227
Σ cations	[méq/l]	3.33	3.13	3.51	4.01	4.07	3.01	2.72
Σ anions	[méq/l]	3.48	3.44	3.69	3.72	3.78	3.04	2.84
Σ c+a = TID	[méq/l]	6.81	6.57	7.19	7.73	7.84	6.05	5.56
Balance ionique	[-]	0.96	0.91	0.95	1.08	1.08	0.99	0.96
Erreur / balance	[%]	-2.1	-4.7	-2.5	3.7	3.8	-0.4	-2.2
Ba	[μ g/l]	16	18	27	23	26	29	21
(Fe)	[μ g/l]	1.0	14.4		6.9	6.2		6.2
B	[μ g/l]	1.5	2.1	7.6	11.2	10.9	4.8	6.1
Li	[μ g/l]	1.5	1.8	7.3	8.2	8.9	1.1	0.9
(Br)	[μ g/l]	1.5	4.0	4.9	2.7	2.8	2.8	0.4
(Zn)	[μ g/l]		0.8		3.1	2.4		0.2
Rb	[μ g/l]	0.4	0.4	1.3	1.1	0.9	0.5	0.3
(Al)	[μ g/l]	0.1	0.3	1.2	0.2	0.3	0.8	0.4
Ni	[μ g/l]	0.8	0.6	0.6	0.4	0.2		0.3
(I)	[μ g/l]	0.6	0.8	0.7	0.4	0.4	0.9	0.5
Mn	[μ g/l]	0.24	0.28	0.70	0.10	0.07	0.66	0.19
Cu	[μ g/l]	5.2	0.8		3.6	3.8		0.2
U	[μ g/l]	0.25	0.28	0.31	0.17	0.20	0.31	0.12
Cr	[μ g/l]	0.11	0.26	0.16	0.28	0.17	0.19	0.11
V	[μ g/l]	0.18	0.23	0.42	0.06	0.06	0.32	0.08
Co	[μ g/l]	0.12	0.09	0.32	0.11	0.08	0.37	0.09
(La)	[μ g/l]	0.00	0.00	0.12	0.04	0.00	0.10	0.04

N° source		22	22	23	23	23	24	24
Code source		TF2	TF5	TM1	TM2	TM5	TL1	TL2
Date		25.avr.89	17.aoû.89	23.nov.88	25.avr.89	17.aoû.89	23.nov.88	25.avr.89
Q	[l/mn]	470	300	170			~1500	2000
K20	[µS/cm]	456	491	428	411	412	495	445
T	[°C]	6.8	6.9				6.6	5.8
pH	[-]	7.3	~7.8	7.0	6.9	~7.8	6.7	7.3
O2	[%]							
Eh	[mV]							
Dtot	[°F]	28.4	31.0	24.5	25.1	26.5	28.3	25.3
HCO3	[mg/l]	307.1	321.2	269.3	282.1	282.7	210.0	202.1
SO4	[mg/l]	21.1	32.0	20.5	21.7	26.0	93.0	64.2
(NO3)	[mg/l]	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	1.8	1.4
Cl	[mg/l]	1.1	0.7	0.7	1.2	0.8	2.0	1.9
Ca	[mg/l]	91.2	103.4	89.2	87.2	89.7	91.6	82.2
Mg	[mg/l]	11.0	11.3	9.0	7.8	9.1	8.4	6.5
Na	[mg/l]	1.8	2.0	2.0	1.5	1.7	3.7	2.5
Sr	[mg/l]	1.14	1.23	0.84	0.76	0.76	1.14	0.90
K	[mg/l]	1.06	0.93	0.65	0.61	0.90	0.71	0.96
Si	[mg/l]	2.2	2.0	2.2	1.6	0.7	1.8	2.0
TSD	[mg/l]	438	475	395	404	412	414	365
Σ cations	[méq/l]	5.59	6.23	5.32	5.09	5.33	5.47	4.79
Σ anions	[méq/l]	5.50	5.95	4.87	5.11	5.20	5.46	4.72
Σ c+a = TID	[méq/l]	11.09	12.18	10.18	10.20	10.53	10.93	9.51
Balance ionique	[-]	1.02	1.05	1.09	1.00	1.03	1.00	1.01
Erreur / balance	[%]	0.8	2.3	4.4	-0.2	1.3	0.0	0.7
Ba	[µg/l]	38	45	33	24	25	29	24
(Fe)	[µg/l]	7.2	14.3				12.2	8.7
B	[µg/l]	19.9	22.6	20.9	16.3	21.3	15.8	12.9
Li	[µg/l]	13.4	14.2	21.7	16.8	19.4	6.0	3.5
(Br)	[µg/l]	2.2	1.3	3.4	-0.9	3.1	2.2	10.8
(Zn)	[µg/l]	0.2	1.9				1.4	0.0
Rb	[µg/l]	2.3	2.3	2.3	1.9	2.2	0.9	0.3
(Al)	[µg/l]	0.1	0.3	0.6	0.0	1.7	1.0	0.0
Ni	[µg/l]	0.4	0.5		0.3	0.5	0.8	0.5
(I)	[µg/l]	0.3	0.8	1.2	0.7	0.9	2.3	2.0
Mn	[µg/l]	0.04	0.32	0.51	0.21	0.78	0.22	0.00
Cu	[µg/l]	0.1	1.4		1.2	1.1	0.7	0.0
U	[µg/l]	0.21	0.24	0.34	0.16	0.18	0.48	0.30
Cr	[µg/l]	0.09	0.12	0.09	0.09	0.09	0.14	0.22
V	[µg/l]	0.24	0.11	0.43	0.06	0.10	0.44	0.39
Co	[µg/l]	0.10	0.10	0.51	0.06	0.09	0.35	0.12
(La)	[µg/l]	0.01	0.05	0.12	0.00	0.01	0.11	0.00

Paramètres physiques et chimiques des exutoires des réseaux spatio-temporel (N° 2) et temporel (N° 3)

N° source		24	24	24	24	24	24	24
Code source		TL3	TL4	TL5	TL6	TL7	TL8	TL9
Date		20.jui.89	19.jul.89	17.aoû.89	14.sep.89	12.oct.89	9.nov.89	5.déc.89
Q	[l/mn]	~1500	~1100			1740		1696
K20	[µS/cm]	490	507	508	516	522	522	538
T	[°C]	6.2	6.3	6.6	6.7	6.7	6.6	6.3
pH	[-]	7.4	7.6	7.5	7.5	7.3	7.4	7.4
O2	[%]					202		160
Eh	[mV]					188		220
Dtot	[°F]	29.4	29.9	30.8	31.4	31.4	31.0	31.5
HCO3	[mg/l]	204.6	207.0	211.3	216.2	216.2	219.8	216.8
SO4	[mg/l]	99.0	100.0	91.0	96.6	91.0	90.6	107.0
(NO3)	[mg/l]	0.0	0.5	1.3	0.8	0.9	1.0	0.7
Cl	[mg/l]	2.0	1.6	1.7	1.4	1.4	1.6	1.3
Ca	[mg/l]	99.8	104.2	108.8	112.2	102.6	112.0	114.2
Mg	[mg/l]	8.0	8.9	9.5	10.1	9.5	10.1	10.6
Na	[mg/l]	3.4	3.8	4.3	4.4	4.1	4.4	4.6
Sr	[mg/l]	1.23	1.26	1.34	1.38	1.27	1.33	1.38
K	[mg/l]	0.96	0.82	1.11	1.14	0.83	0.96	1.16
Si	[mg/l]	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9
TSD	[mg/l]	421	430	432	446	430	444	460
Σ cations	[méq/l]	5.84	6.15	6.45	6.68	6.13	6.67	6.83
Σ anions	[méq/l]	5.47	5.53	5.43	5.61	5.49	5.55	5.83
Σ c+a = TID	[méq/l]	11.31	11.68	11.88	12.29	11.62	12.22	12.66
Balance ionique	[-]	1.07	1.11	1.19	1.19	1.12	1.20	1.17
Erreur / balance	[%]	3.3	5.3	8.6	8.7	5.5	9.1	7.9
Ba	[µg/l]	26	25	25	27	24	26	26
(Fe)	[µg/l]	8.8	10.7	10.7	11.4	9.6	10.8	12.4
B	[µg/l]	16.2	17.3	19.3	20.0	18.7	19.8	19.3
Li	[µg/l]	4.7	5.4	5.9	5.9	5.6	5.8	5.8
(Br)	[µg/l]	5.4	9.0	7.8	13.4	3.8	8.7	9.4
(Zn)	[µg/l]	0.0	6.2	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Rb	[µg/l]	0.5	0.5	0.8	0.8	0.3	0.6	0.8
(Al)	[µg/l]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ni	[µg/l]	0.4	0.6	0.4	0.7	0.6	0.6	1.5
(I)	[µg/l]	2.0	1.8	3.3	2.4	2.0	2.5	3.1
Mn	[µg/l]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
Cu	[µg/l]	0.0	0.0	0.4	0.3	0.0	0.0	0.5
U	[µg/l]	0.36	0.35	0.33	0.32	0.34	0.31	0.36
Cr	[µg/l]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
V	[µg/l]	0.20	0.30	0.16	0.43	0.10	0.10	0.14
Co	[µg/l]	0.14	0.15	0.18	0.18	0.20	0.14	0.19
(La)	[µg/l]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

N° source		24	24	24	24	24	24	24
Code source		TL10	TL11	TL12	TL13	TL14	TL15	TL16
Date		9.jan.90	21.fév.90	29.mar.90	25.avr.90	31.mai.90	29.jui.90	23.jul.90
Q	[l/mn]		~2500		3327	2787	3327	3047
K20	[µS/cm]	515	410	380	472	480	440	455
T	[°C]	6.2	5.9	6.1	5.8	6.0	6.7	6.3
pH	[-]	7.0		7.5	7.7	7.3	7.6	7.2
O2	[%]					136	73	112
Eh	[mV]					243	197	196
Dtot	[°F]	32.4	27.1	26.1	25.7	28.3	26.8	27.4
HCO3	[mg/l]	274.8	238.1	195.4	201.4	202.7	204.6	204.6
SO4	[mg/l]	71.0	39.4	61.0	92.3	81.9	95.7	91.4
(NO3)	[mg/l]	0.5	0.8	1.1	1.8	1.4	0.0	0.0
Cl	[mg/l]	1.3	1.4	1.0	1.9	1.7	1.7	1.6
Ca	[mg/l]	111.8	83.2	75.2	97.8	93.4	85.4	89.6
Mg	[mg/l]	11.0	7.0	7.5	9.1	8.6	7.7	8.0
Na	[mg/l]	4.8	3.0	2.5	3.6	3.5	3.0	3.1
Sr	[mg/l]	1.47	0.92	0.76	1.10	1.07	1.01	1.03
K	[mg/l]	0.92	1.25	1.01	1.20	1.07	0.78	0.81
Si	[mg/l]	2.0	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0
TSD	[mg/l]	480	377	347	412	397	402	402
Σ cations	[méq/l]	6.75	4.91	4.52	5.84	5.57	5.06	5.31
Σ anions	[méq/l]	6.02	4.78	4.52	5.30	5.10	5.39	5.30
Σ c+a = TID	[méq/l]	12.78	9.68	9.04	11.14	10.67	10.46	10.61
Balance ionique	[-]	1.12	1.03	1.00	1.10	1.09	0.94	1.00
Erreur / balance	[%]	5.7	1.4	0.0	4.8	4.4	-3.2	0.1
Ba	[µg/l]	24	22	28	26	26	26	30
(Fe)	[µg/l]	17.3	8.5	8.4	11.7	23.4	6.8	6.6
B	[µg/l]	18.3	13.2	11.4	16.6	15.4	13.7	14.5
Li	[µg/l]	5.8	4.4	3.8	4.9	5.1	4.6	4.7
(Br)	[µg/l]	11.5	7.8	4.9	5.4	9.6	2.5	5.9
(Zn)	[µg/l]	4.7	0.0	0.0	0.1	1.8	0.0	0.0
Rb	[µg/l]	0.7	0.7	0.7	0.5	0.8	0.6	0.4
(Al)	[µg/l]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ni	[µg/l]	0.8	0.7	0.5	0.5	0.7	0.4	0.3
(I)	[µg/l]	2.6	2.1	2.0	1.9	1.8	1.8	2.4
Mn	[µg/l]	0.14	0.00	0.00	0.03	0.43	0.00	0.06
Cu	[µg/l]	2.9	0.0	0.0	0.2	1.3	0.0	0.0
U	[µg/l]	0.35	0.28	0.31	0.35	0.35	0.36	0.35
Cr	[µg/l]	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
V	[µg/l]	0.13	0.16	0.09	0.09	0.14	0.13	0.20
Co	[µg/l]	0.17	0.11	0.13	0.17	0.17	0.12	0.08
(La)	[µg/l]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.01

Paramètres physiques et chimiques des exutoires des réseaux spatio-temporel (N° 2) et temporel (N° 3)

N° source		24	24	24	24	30	30	30
Code source		TL17	TL18	TL19	TL20	LC1	LC2	LC5
Date		16.aoû.90	19.sep.90	25.oct.90	21.nov.90	16.nov.88	20.jui.89	28.sep.89
Q	[l/mn]	2032		2658		100	150	110
K20	[µS/cm]	505	520	504	450	311	309	313
T	[°C]	6.5	6.5	6.6	6.5	6.3	5.9	6.0
pH	[-]	7.1	7.1	7.3	7.1	6.7	7.3	7.0
O2	[%]	90	72		79			
Eh	[mV]	223	225		270			
Dtot	[°F]	30.2	32.7	30.4	27.2	19.1	19.0	19.6
HCO3	[mg/l]	208.8	211.9	215.5	214.3	217.4	210.7	222.3
SO4	[mg/l]	84.2	101.1	98.0	58.6	16.2	8.2	11.3
(NO3)	[mg/l]	1.6	1.4	0.8	1.3	0.6	5.7	0.0
Cl	[mg/l]	1.9	2.1	1.2	1.1	0.4	0.6	0.4
Ca	[mg/l]	104.6	108.0	104.4	89.2	66.1	65.5	68.7
Mg	[mg/l]	9.4	10.1	9.8	8.4	4.6	4.9	5.6
Na	[mg/l]	4.0	4.4	4.1	3.3	1.2	1.0	1.2
Sr	[mg/l]	1.28	1.37	1.27	0.99	0.73	0.76	0.87
K	[mg/l]	1.05	1.14	1.10	1.10	0.30	0.28	0.50
Si	[mg/l]	1.9	1.9	1.8	1.9	2.0	1.5	1.4
TSD	[mg/l]	419	443	438	380	310	299	312
Σ cations	[még/l]	6.23	6.47	6.25	5.34	3.75	3.74	3.97
Σ anions	[még/l]	5.25	5.66	5.62	4.78	3.92	3.73	3.89
Σ c+a = TID	[még/l]	11.48	12.13	11.87	10.12	7.67	7.47	7.86
Balance ionique	[-]	1.19	1.14	1.11	1.12	0.96	1.00	1.02
Erreur / balance	[%]	8.5	6.7	5.3	5.5	-2.2	0.1	1.1
Ba	[µg/l]	26	24	26	28	31	35	40
(Fe)	[µg/l]	10.7	9.7	9.3	10.0	21.0	5.6	6.1
B	[µg/l]	18.4	25.6	27.1	22.8	8.1	7.0	8.3
Li	[µg/l]	5.7	5.7	5.5	4.6	4.0	3.8	4.3
(Br)	[µg/l]	5.7	10.5	3.5	6.7	0.0	0.0	1.1
(Zn)	[µg/l]	2.5	0.0	0.5	0.1	2.3	0.0	1.0
Rb	[µg/l]	1.0	0.6	2.3	0.4	0.9	1.0	0.9
(Al)	[µg/l]	0.1	0.0	0.0	0.0	0.8	2.5	0.0
Ni	[µg/l]	0.5	0.3	0.5	0.5	0.9	0.1	0.1
(I)	[µg/l]	2.4	9.3	7.8	6.1	0.5	0.4	0.8
Mn	[µg/l]	0.57	0.00	0.00	0.00	0.49	0.06	0.08
Cu	[µg/l]	0.3	0.2	0.1	0.7	0.0	0.1	1.6
U	[µg/l]	0.36	0.34	0.32	0.26	0.27	0.27	0.35
Cr	[µg/l]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	0.09	0.03
V	[µg/l]	0.22	0.07	0.11	0.11	0.21	0.31	0.02
Co	[µg/l]	0.15	0.16	0.14	0.13	0.06	0.06	0.07
(La)	[µg/l]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.04

N° source		31	31	31	32	32	36	36
Code source		TT1	TT2	TT5	LW1	LW2	SL1	SL2
Date		16.nov.88	20.jui.89	28.sep.89	7.déc.88	20.jui.89	8.nov.88	25.avr.89
Q	[l/mn]	~80	~100	~60	~360		~600	~250
K20	[μ S/cm]	327	333	332	252	231	254	299
T	[°C]	5.6	7.3	7.2	3.7	5.4	6.0	5.2
pH	[-]	7.0	7.9	7.0	7.1	7.4	6.3	7.1
O2	[%]							
Eh	[mV]							
Dtot	[°F]	20.2	20.0	20.5	15.5	14.8	15.8	18.2
HCO3	[mg/l]	243.0	237.5	246.1	181.4	163.0	183.8	211.9
SO4	[mg/l]	6.1	4.1	5.7	6.2	3.8	6.0	2.5
(NO3)	[mg/l]	1.6	7.4	0.0	0.7	5.4	1.0	8.3
Cl	[mg/l]	0.7	0.8	0.9	0.4	0.7	0.4	0.7
Ca	[mg/l]	70.1	70.1	73.3	58.3	52.0	54.7	66.1
Mg	[mg/l]	5.0	6.4	6.1	2.3	1.6	4.0	2.7
Na	[mg/l]	1.6	1.7	1.6	0.6	0.3	1.1	0.6
Sr	[mg/l]	0.43	0.54	0.51	0.54	0.42	0.35	0.39
K	[mg/l]	0.35	0.64	0.42	0.26	0.16	0.57	0.63
Si	[mg/l]	3.1	2.4	2.1	1.1	0.7	2.1	1.4
TSD	[mg/l]	332	332	337	252	228	254	295
Σ cations	[méq/l]	4.00	4.13	4.26	3.14	2.75	3.13	3.57
Σ anions	[méq/l]	4.16	4.12	4.18	3.12	2.86	3.16	3.68
Σ c+a = TID	[méq/l]	8.15	8.25	8.43	6.26	5.61	6.29	7.25
Balance ionique	[-]	0.96	1.00	1.02	1.00	0.96	0.99	0.97
Erreur / balance	[%]	-1.9	0.1	1.0	0.2	-1.8	-0.6	-1.5
Ba	[μ g/l]	29	36	34	17	10	20	18
(Fe)	[μ g/l]	6.0	8.7	4.6	10.6	32.1		20.7
B	[μ g/l]	6.8	8.7	8.9	2.5	2.5	5.3	4.1
Li	[μ g/l]	4.0	5.1	4.3	1.4	1.1	2.2	1.3
(Br)	[μ g/l]	1.8	0.9	0.0	1.5	1.0	1.4	1.4
(Zn)	[μ g/l]	0.0	0.4	0.0	4.4	4.1		4.4
Rb	[μ g/l]	0.8	0.9	0.8	0.9	0.3	0.5	0.6
(Al)	[μ g/l]	0.1	0.2	0.0	0.6	1.7	1.9	1.0
Ni	[μ g/l]	0.3	0.2	0.2	0.5	0.5		0.7
(I)	[μ g/l]	0.7	0.7	2.0	0.5	0.7	0.6	1.0
Mn	[μ g/l]	0.11	0.16	0.14	0.24	0.84	0.57	0.57
Cu	[μ g/l]	0.2	0.6	0.1	0.6	0.1		0.0
U	[μ g/l]	0.23	0.30	0.33	0.29	0.12	0.20	0.20
Cr	[μ g/l]	0.13	0.11	0.07	0.11	0.04	0.82	0.48
V	[μ g/l]	0.28	0.23	0.08	0.39	0.16	0.24	0.22
Co	[μ g/l]	0.01	0.05	0.05	0.30	0.06	0.26	0.10
(La)	[μ g/l]	0.03	0.03	0.01	0.09	0.02	0.07	0.00

Paramètres physiques et chimiques des exutoires des réseaux spatio-temporel (N° 2) et temporel (N° 3)

N° source		36	36	36	36	36	36	36
Code source		SL9	SL10	SL11	SL12	SL13	SL14	SL15
Date		5.déc.89	9.jan.90	21.fév.90	29.mar.90	25.avr.90	31.mai.90	29.jui.90
Q	[l/mn]	~400	~300	~800	~700	~600	>1000	~1000
K20	[μ S/cm]	266	256	254	258	288	267	257
T	[°C]	5.8	5.7	5.2	4.8	4.8	4.9	5.9
pH	[-]	7.1	~6.3		~6.8	7.2	7.1	7.5
O2	[%]						155	~69
Eh	[mV]	246					239	208
Dtot	[°F]	16.1	17.2	18.3	16.1	16.5	16.1	14.5
HCO3	[mg/l]	193.0	208.8	201.4	190.5	196.6	193.0	193.0
SO4	[mg/l]	6.3	2.9	3.0	3.0	3.6	5.6	6.2
(NO3)	[mg/l]	0.9	5.6	8.8	7.5	2.3	1.6	2.6
Cl	[mg/l]	0.7	0.3	1.3	0.8	0.4	0.3	0.3
Ca	[mg/l]	55.3	57.1	55.1	56.5	61.4	56.1	60.9
Mg	[mg/l]	3.8	3.9	2.5	2.7	2.8	2.3	2.5
Na	[mg/l]	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5
Sr	[mg/l]	0.33	0.36	0.36	0.33	0.38	0.34	0.35
K	[mg/l]	0.53	0.43	0.79	0.71	0.73	0.61	0.48
Si	[mg/l]	2.2	2.2	1.7	1.6	1.6	1.5	1.6
TSD	[mg/l]	264	282	275	264	270	262	268
Σ cations	[méq/l]	3.13	3.22	3.01	3.10	3.35	3.04	3.29
Σ anions	[méq/l]	3.33	3.58	3.54	3.33	3.34	3.31	3.34
Σ c+a = TID	[méq/l]	6.46	6.81	6.55	6.42	6.69	6.35	6.63
Balance ionique	[-]	0.94	0.90	0.85	0.93	1.00	0.92	0.98
Erreur / balance	[%]	-3.1	-5.3	-8.2	-3.6	0.0	-4.4	-0.8
Ba	[μ g/l]	19	19	18	16	20	12	14
(Fe)	[μ g/l]	21.7	13.4	17.1	9.0	11.5	13.0	16.6
B	[μ g/l]	4.5	4.5	3.5	3.5	3.8	3.5	3.9
Li	[μ g/l]	2.0	1.9	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4
(Br)	[μ g/l]	2.5	5.3	7.8	8.3	3.6	5.3	4.7
(Zn)	[μ g/l]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	3.0
Rb	[μ g/l]	0.3	0.1	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2
(Al)	[μ g/l]	0.7	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.4
Ni	[μ g/l]	0.5	0.5	0.5	0.3	0.4	0.5	0.7
(I)	[μ g/l]	0.9	1.0	0.7	0.8	0.4	0.7	0.7
Mn	[μ g/l]	0.34	0.19	0.42	0.03	0.08	0.12	0.43
Cu	[μ g/l]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U	[μ g/l]	0.22	0.23	0.18	0.20	0.17	0.21	0.19
Cr	[μ g/l]	0.44	0.67	0.43	0.30	0.36	0.49	0.49
V	[μ g/l]	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Co	[μ g/l]	0.14	0.10	0.09	0.08	0.14	0.10	0.10
(La)	[μ g/l]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

N° source		36	36	36	36	36	37	37
Code source		SL16	SL17	SL18	SL19	SL20	SA2	SA3
Date		23.jul.90	16.août.90	19.sep.90	25.oct.90	21.nov.90	9.mai.89	27.jui.89
Q	[l/mn]	~1000	~800	~500		~700	~200	~2500
K20	[µS/cm]	256	254	256	263	286	238	199
T	[°C]	5.6	6.4	5.9	6.0	6.0	4.2	4.3
pH	[-]	7.0	7.0	7.1	7.3	7.2	7.1	7.3
O2	[%]	112	77	105		93		
Eh	[mV]	227	236	254		325		
Dtot	[°F]	14.4	15.6	17.3	16.0	18.7	14.2	11.7
HCO3	[mg/l]	184.4	182.6	206.4	188.1	213.1	162.4	128.8
SO4	[mg/l]	6.8	6.6	5.2	6.3	4.2	6.3	7.0
(NO3)	[mg/l]	1.7	1.4	1.1	1.4	1.7	8.2	5.3
Cl	[mg/l]	0.6	0.7	0.2	0.3	0.3	0.6	0.6
Ca	[mg/l]	54.9	53.1	60.1	56.9	67.7	51.2	42.3
Mg	[mg/l]	3.2	3.6	3.7	4.2	3.1	2.5	2.6
Na	[mg/l]	0.7	1.1	0.7	0.8	0.7	0.4	0.3
Sr	[mg/l]	0.34	0.35	0.33	0.35	0.39	0.34	0.28
K	[mg/l]	0.49	0.74	0.42	0.57	0.51	0.41	0.30
Si	[mg/l]	1.8	1.9	2.0	1.9	1.9	1.2	1.1
TSD	[mg/l]	255	252	280	261	294	234	189
Σ cations	[méq/l]	3.06	3.02	3.36	3.24	3.69	2.79	2.36
Σ anions	[méq/l]	3.21	3.17	3.51	3.24	3.62	2.94	2.36
Σ c+a = TID	[méq/l]	6.26	6.20	6.87	6.48	7.30	5.73	4.72
Balance ionique	[-]	0.95	0.95	0.95	1.00	1.02	0.95	1.00
Erreur / balance	[%]	-2.4	-2.4	-2.3	0.0	1.0	-2.6	-0.1
Ba	[µg/l]	16	21	19	21	19	16	11
(Fe)	[µg/l]	12.2		19.4	17.0	10.4	29.5	50.0
B	[µg/l]	3.8	5.1	4.4	15.3	17.9	2.3	2.2
Li	[µg/l]	1.6	2.1	1.9	1.9	1.5	1.5	1.6
(Br)	[µg/l]	4.7		2.2	2.5	0.8	6.1	4.2
(Zn)	[µg/l]	0.0		1.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Rb	[µg/l]	0.3	0.4	0.1	0.3	0.2	0.3	0.3
(Al)	[µg/l]	0.1		0.6	0.2	0.0	1.1	2.8
Ni	[µg/l]	0.5	1.4	0.4	0.4	0.3	0.6	0.7
(I)	[µg/l]	0.8	0.8	8.7	5.3	4.4	1.1	0.8
Mn	[µg/l]	0.28	2.16	0.83	0.70	0.29	0.42	0.62
Cu	[µg/l]	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U	[µg/l]	0.19	0.22	0.24	0.25	0.22	0.23	0.23
Cr	[µg/l]	0.54	0.73	0.41	0.42	0.47	0.26	0.17
V	[µg/l]	0.10	0.18	0.00	0.00	0.02	0.02	0.21
Co	[µg/l]	0.06	0.16	0.10	0.11	0.08	0.09	0.07
(La)	[µg/l]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Paramètres physiques et chimiques des exutoires des réseaux spatio-temporel (N° 2) et temporel (N° 3)

N° source		37	37	37	37	37	37	38
Code source		SA4	SA5	SA6	SA7	SA8	SA9	LT2
Date		19.jul.89	16.aoû.89	14.sep.89	12.oct.89	9.nov.89	5.déc.89	20.jui.89
Q	[l/mn]	-1700	-800	-200	-180	-200	-50	40
K20	[μ S/cm]	228	241	245	255	249	260	197
T	[°C]	4.3	4.4	4.4	4.4	4.3	4.4	2.7
pH	[-]	7.4	7.5	7.3	7.0	7.0	6.7	7.2
O2	[%]				280		122	
Eh	[mV]				224		242	
Dtot	[°F]	13.5	14.6	15.1	15.8	14.9	15.5	11.8
HCO3	[mg/l]	145.3	156.3	156.9	167.3	160.0	163.6	141.1
SO4	[mg/l]	11.7	15.9	16.4	17.0	12.2	13.4	2.3
(NO3)	[mg/l]	7.1	10.1	8.3	9.4	7.3	7.0	5.7
Cl	[mg/l]	0.6	0.5	0.5	0.8	0.5	0.6	0.6
Ca	[mg/l]	48.9	52.1	51.1	47.7	53.9	50.9	45.3
Mg	[mg/l]	3.4	3.8	4.2	4.6	3.9	5.5	1.2
Na	[mg/l]	0.5	0.5	0.6	0.7	0.6	0.8	0.4
Sr	[mg/l]	0.32	0.34	0.35	0.38	0.34	0.41	0.36
K	[mg/l]	0.36	0.37	0.24	0.26	0.25	0.28	0.15
Si	[mg/l]	1.4	1.5	1.5	1.6	1.7	1.7	0.3
TSD	[mg/l]	220	241	240	250	241	244	197
Σ cations	[méq/l]	2.75	2.95	2.94	2.80	3.05	3.04	2.39
Σ anions	[méq/l]	2.76	3.07	3.06	3.27	3.01	3.09	2.47
Σ c+a = TID	[méq/l]	5.51	6.02	6.00	6.07	6.06	6.13	4.86
Balance ionique	[-]	1.00	0.96	0.96	0.86	1.01	0.98	0.97
Erreur / balance	[%]	0.0	-2.0	-2.1	-7.7	0.7	-0.8	-1.6
Ba	[μ g/l]	15	15	16	17	15	17	9
(Fe)	[μ g/l]		82.1	63.9	50.3		64.0	10.6
B	[μ g/l]	3.5	3.6	3.3	4.2	3.3	4.4	1.4
Li	[μ g/l]	2.5	2.7	2.8	2.8	3.2	3.4	0.5
(Br)	[μ g/l]	4.4	3.6	4.7	3.6	1.7	1.9	3.7
(Zn)	[μ g/l]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0
Rb	[μ g/l]	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4
(Al)	[μ g/l]	10.1	4.5	3.2	2.2	7.1	3.4	0.9
Ni	[μ g/l]	1.9	1.0	0.7	0.6	1.4	0.9	1.0
(I)	[μ g/l]	0.7	1.0	0.9	0.5	0.8	0.5	0.3
Mn	[μ g/l]	1.81	1.15	0.78	0.77	1.80	0.75	0.11
Cu	[μ g/l]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
U	[μ g/l]	0.32	0.34	0.36	0.35	0.34	0.37	0.22
Cr	[μ g/l]	0.44	0.31	0.29	0.50	0.31	0.20	0.17
V	[μ g/l]	0.29	0.07	0.24	0.03	0.05	0.05	0.38
Co	[μ g/l]	0.17	0.10	0.07	0.10	0.21	0.08	0.25
(La)	[μ g/l]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10

N° source		38	40	40	40	43	43	43
Code source		LT5	DM1	DM2	DM5	AU1	AU2	AU5
Date		16.aoû.89	26.oct.88	27.jui.89	27.sep.89	15.nov.88	18.mai.89	15.aoû.89
Q	[l/mn]	35	300	300	300	38	-200	
K20	[µS/cm]	265	180	155	185	307	277	305
T	[°C]	4.4	3.3	2.8	3.3	4.4	4.8	7.0
pH	[-]	7.5	6.4	7.3	7.0	6.0	7.5	7.5
O2	[%]							
Eh	[mV]							
Dtot	[°F]	16.7	10.8	9.1	11.3	19.4	16.9	18.8
HCO3	[mg/l]	193.0	122.1	103.8	125.2	225.9	200.9	218.0
SO4	[mg/l]	4.6	8.4	5.1	8.7	4.9	2.5	5.2
(NO3)	[mg/l]	0.0	0.9	4.0	7.2	1.3	6.0	10.7
Cl	[mg/l]	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.8	0.6
Ca	[mg/l]	59.9	36.5	33.1	39.5	64.3	62.7	69.5
Mg	[mg/l]	1.8	3.1	2.2	3.1	3.0	2.6	3.3
Na	[mg/l]	0.3	0.4	0.3	0.4	0.6	0.4	0.5
Sr	[mg/l]	0.46	0.29	0.25	0.29	0.46	0.42	0.48
K	[mg/l]	0.09	0.37	0.30	0.35	0.23	0.20	0.25
Si	[mg/l]	0.4	1.0	0.7	0.8	1.7	1.0	1.1
TSD	[mg/l]	261	174	150	186	303	277	310
Σ cations	[méq/l]	3.17	2.11	1.85	2.26	3.50	3.38	3.78
Σ anions	[méq/l]	3.27	2.20	1.89	2.36	3.84	3.46	3.87
Σ c+a = TID	[méq/l]	6.44	4.31	3.74	4.62	7.34	6.84	7.65
Balance ionique	[-]	0.97	0.96	0.98	0.95	0.91	0.98	0.98
Erreur / balance	[%]	-1.6	-2.3	-1.0	-2.3	-4.7	-1.2	-1.1
Ba	[µg/l]	12	13	10	14	4	5	6
(Fe)	[µg/l]	8.7	21.6	32.6	11.5		7.8	15.0
B	[µg/l]	2.0	7.8	2.2	3.6	2.5	3.2	3.9
Li	[µg/l]	0.8	2.8	1.7	2.5	10.3	9.0	11.3
(Br)	[µg/l]	0.6	4.9	0.0	1.1	3.1	0.1	0.7
(Zn)	[µg/l]	0.1	0.9	7.0	1.5		67.0	31.6
Rb	[µg/l]	0.3	0.5	0.4	0.3	0.6	0.7	0.5
(Al)	[µg/l]	0.0	0.8	1.0	0.6	0.3	0.2	0.4
Ni	[µg/l]	0.2	0.7	0.4	0.1	0.3	0.3	0.4
(I)	[µg/l]	0.3	0.6	0.9	0.8	0.2	0.5	0.9
Mn	[µg/l]	0.04	0.31	0.45	0.22	0.00	0.17	0.28
Cu	[µg/l]	0.4	0.6	0.0	0.1	0.1	0.7	0.5
U	[µg/l]	0.11	0.20	0.20	0.22	0.19	0.16	0.22
Cr	[µg/l]	0.14	0.20	0.33	0.18	0.10	0.37	0.42
V	[µg/l]	0.03	0.27	0.43	0.25	0.21	0.06	0.37
Co	[µg/l]	0.10	0.24	0.07	0.01	0.02	0.09	0.12
(La)	[µg/l]	0.09	0.01	0.07	0.05	0.00	0.02	0.12

Paramètres physiques et chimiques des exutoires des réseaux spatio-temporel (N° 2) et temporel (N° 3)

N° source		45	45	45	45	45	45	45
Code source		AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6	AS7
Date		15.nov.88	18.mai.89	21.jui.89	19.jul.89	15.aou.89	13.sep.89	11.oct.89
Q	[l/mn]	~10	15	9	10	11	7	8
K20	[µS/cm]	440	451	452	448	441	444	442
T	[°C]	5.8	5.7	5.7	5.8	6.3	6.5	6.6
pH	[-]	7.0	7.5	7.8	8.0	7.7	7.5	7.9
O2	[%]							240
Eh	[mV]							217
Dtot	[°F]	27.7	27.8	28.1	27.9	28.3	28.0	28.2
HCO3	[mg/l]	279.7	275.4	276.0	277.8	276.6	283.9	285.8
SO4	[mg/l]	41.7	42.3	37.4	17.2	41.5	30.3	36.0
(NO3)	[mg/l]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cl	[mg/l]	0.5	0.5	1.0	1.3	0.6	0.8	0.8
Ca	[mg/l]	97.2	96.0	99.2	96.4	97.2	94.2	96.6
Mg	[mg/l]	6.1	8.7	8.1	7.7	8.2	8.0	7.5
Na	[mg/l]	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6
Sr	[mg/l]	0.63	0.89	0.85	0.82	0.88	0.90	0.84
K	[mg/l]	0.33	1.26	0.63	0.42	0.50	0.46	0.44
Si	[mg/l]	1.7	1.8	1.8	1.7	1.7	1.6	1.8
TSD	[mg/l]	429	428	426	404	428	421	430
Σ cations	[méq/l]	5.42	5.60	5.68	5.50	5.59	5.42	5.49
Σ anions	[méq/l]	5.47	5.41	5.33	4.95	5.41	5.31	5.46
Σ c+a = TID	[méq/l]	10.89	11.01	11.01	10.45	11.00	10.73	10.95
Balance ionique	[-]	0.99	1.04	1.07	1.11	1.03	1.02	1.01
Erreur / balance	[%]	-0.4	1.8	3.2	5.3	1.6	1.1	0.3
Ba	[µg/l]	18	29	24	25	23	22	24
(Fe)	[µg/l]		22.0	11.2	14.2	9.8	11.5	8.9
B	[µg/l]	5.7	11.1	8.3	9.2	8.7	8.4	7.8
Li	[µg/l]	7.1	10.0	9.4	9.7	9.7	10.1	10.0
(Br)	[µg/l]	3.3	4.0	2.8	4.3	1.5	2.2	6.0
(Zn)	[µg/l]		6.8	0.3	0.5	0.4	0.6	0.2
Rb	[µg/l]	0.8	1.8	1.0	1.5	1.1	1.2	1.4
(Al)	[µg/l]	0.2	11.0	0.2	1.2	0.4	0.1	0.0
Ni	[µg/l]		1.2	0.5	0.6	0.6	0.7	0.6
(I)	[µg/l]	0.1	0.4	0.3	0.2	0.5	1.0	0.5
Mn	[µg/l]	0.58	19.99	0.23	0.20	0.49	0.08	0.12
Cu	[µg/l]	0.7	4.1	0.2	0.5	0.7	0.7	0.7
U	[µg/l]	0.72	0.86	0.98	0.89	0.91	0.90	0.84
Cr	[µg/l]	0.55	0.83	0.31	0.37	0.38	0.15	0.25
V	[µg/l]	0.18	0.22	0.19	0.23	0.40	0.30	0.00
Co	[µg/l]	0.06	0.11	0.10	0.11	0.10	0.11	0.14
(La)	[µg/l]	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

N° source		45	45	45	45	45	45	45
Code source		AS8	AS9	AS10	AS11	AS12	AS13	AS14
Date		8.nov.89	4.déc.89	10.jan.90	21.fév.90	29.mar.90	26.avr.90	31.mai.90
Q	[l/mn]	6	6	6	11	21	12	13
K20	[µS/cm]	440	443	425	410	420	458	463
T	[°C]	6.5	6.3	6.1	5.7	5.4	5.0	5.4
pH	[-]	7.4	7.0	7.0	~6.8	~7	7.7	7.3
O2	[%]		110					145
Eh	[mV]		270					248
Dtot	[°F]	27.3	27.3	27.3	26.8	27.1	26.1	28.9
HCO3	[mg/l]	281.5	279.0	291.9	299.6	274.8	244.2	287.6
SO4	[mg/l]	36.5	32.0	26.1	15.8	29.7	43.4	41.1
(NO3)	[mg/l]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5
Cl	[mg/l]	0.8	0.8	0.8	1.1	0.8	0.3	0.2
Ca	[mg/l]	101.8	96.2	95.8	90.2	87.2	85.2	88.6
Mg	[mg/l]	7.3	7.5	7.4	7.1	7.3	7.7	7.8
Na	[mg/l]	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Sr	[mg/l]	0.83	0.85	0.86	0.84	0.85	0.88	0.92
K	[mg/l]	0.43	0.43	0.44	0.41	0.41	0.42	0.42
Si	[mg/l]	1.8	1.8	1.7	1.6	1.6	1.7	1.7
TSD	[mg/l]	432	419	426	417	403	385	430
Σ cations	[méq/l]	5.74	5.47	5.45	5.14	5.01	4.94	5.12
Σ anions	[méq/l]	5.39	5.26	5.35	5.27	5.14	4.92	5.58
Σ c+a = TID	[méq/l]	11.13	10.74	10.80	10.41	10.15	9.86	10.71
Balance ionique	[-]	1.06	1.04	1.02	0.98	0.97	1.00	0.92
Erreur / balance	[%]	3.1	2.0	0.9	-1.3	-1.3	0.2	-4.3
Ba	[µg/l]	26	26	23	18	23	23	25
(Fe)	[µg/l]	6.6	8.6	15.1	9.8	12.7	8.4	13.6
B	[µg/l]	7.1	7.6	7.0	6.5	7.6	7.6	6.8
Li	[µg/l]	9.0	9.3	8.7	8.2	8.2	9.0	9.1
(Br)	[µg/l]	5.1	5.6	3.7	3.9	3.6	4.0	3.6
(Zn)	[µg/l]	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
Rb	[µg/l]	1.5	1.0	1.3	0.8	1.4	1.3	1.4
(Al)	[µg/l]	0.0	0.0	0.3	0.1	0.3	0.0	0.3
Ni	[µg/l]	0.4	0.5	0.3	0.6	0.6	0.2	0.6
(I)	[µg/l]	0.3	0.2	0.2	0.0	0.8	0.2	0.0
Mn	[µg/l]	0.13	0.18	0.21	0.07	0.14	0.07	0.43
Cu	[µg/l]	0.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
U	[µg/l]	0.85	0.91	0.94	0.90	0.91	0.98	1.03
Cr	[µg/l]	0.20	0.37	0.18	0.33	0.33	0.11	0.17
V	[µg/l]	0.02	0.03	0.00	0.02	0.04	0.03	0.04
Co	[µg/l]	0.09	0.13	0.10	0.15	0.08	0.05	0.11
(La)	[µg/l]	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01

Paramètres physiques et chimiques des exutoires des réseaux spatio-temporel (N° 2) et temporel (N° 3)

N° source		45	45	45	45	45	45	48
Code source		AS15	AS16	AS17	AS18	AS19	AS20	FR1
Date		29.jui.90	23.jul.90	17.aou.90	20.sep.90	26.oct.90	21.nov.90	2.nov.88
Q	[l/mn]	13	12	7	4	5	9	200
K20	[μ S/cm]	434	454	453	453	446	448	232
T	[°C]	6.2	6.3	6.3	6.7	6.7	6.4	5.7
pH	[-]	7.6	7.4	7.0	7.4	7.3	7.3	6.4
O2	[%]	73	111	78	118		75	
Eh	[mV]	252	258	261	304		353	
Dtot	[°F]	28.1	27.2	28.9	29.7	28.4	28.7	14.1
HCO3	[mg/l]	285.2	285.2	289.4	284.5	287.0	317.5	164.9
SO4	[mg/l]	50.0	48.0	40.5	38.4	29.4	28.0	6.9
(NO3)	[mg/l]	0.0	0.0	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5
Cl	[mg/l]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.5
Ca	[mg/l]	99.0	98.2	98.2	100.2	100.6	104.6	50.5
Mg	[mg/l]	7.2	7.5	7.4	6.7	7.4	7.5	2.9
Na	[mg/l]	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.5
Sr	[mg/l]	0.86	0.86	0.87	0.82	0.85	0.84	0.43
K	[mg/l]	0.41	0.43	0.44	0.39	0.43	0.43	0.37
Si	[mg/l]	1.7	1.7	1.7	1.6	1.7	1.7	1.5
TSD	[mg/l]	445	442	440	434	429	462	229
Σ cations	[m \acute{e} q/l]	5.59	5.57	5.56	5.60	5.69	5.89	2.80
Σ anions	[m \acute{e} q/l]	5.71	5.67	5.60	5.47	5.33	5.80	2.87
Σ c+a = TID	[m \acute{e} q/l]	11.30	11.25	11.16	11.07	11.02	11.69	5.67
Balance ionique	[-]	0.98	0.98	0.99	1.02	1.07	1.02	0.98
Erreur / balance	[%]	-1.1	-0.9	-0.3	1.2	3.3	0.8	-1.2
Ba	[μ g/l]	24	25	23	23	22	24	12
(Fe)	[μ g/l]	11.6	9.1	8.6	6.6	9.3	8.0	
B	[μ g/l]	7.7	7.3	7.1	8.1	8.2	8.3	7.1
Li	[μ g/l]	8.7	9.5	8.9	8.7	9.5	8.7	2.4
(Br)	[μ g/l]	2.3	0.7	3.2	5.8	3.4	2.3	3.5
(Zn)	[μ g/l]	0.2	0.1	0.2	0.0	0.6	0.0	
Rb	[μ g/l]	1.8	1.3	1.3	0.9	1.5	1.2	0.5
(Al)	[μ g/l]	2.3	0.5	3.1	0.3	1.7	0.0	11.4
Ni	[μ g/l]	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.4	
(I)	[μ g/l]	0.0	0.0	0.2	2.1	1.0	1.0	0.5
Mn	[μ g/l]	0.11	0.27	0.24	0.00	0.20	0.00	4.03
Cu	[μ g/l]	0.4	0.4	0.4	0.1	0.4	0.0	0.9
U	[μ g/l]	0.97	0.86	1.00	0.91	0.89	0.86	0.18
Cr	[μ g/l]	0.32	0.39	0.25	0.15	0.35	0.22	0.42
V	[μ g/l]	0.03	0.18	0.11	0.00	0.00	0.01	0.48
Co	[μ g/l]	0.10	0.14	0.10	0.14	0.14	0.10	0.36
(La)	[μ g/l]	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.01	0.04

N° source		48	49	49	49	52	52	52
Code source		FR2	FM1	FM2	FM5	DO1	DO2	DO5
Date		18.mai.89	2.nov.88	18.mai.89	22.aoû.89	8.déc.88	18.mai.89	27.sep.89
Q	[l/mn]	~300	150	~800	~800	~100	~120	~90
K20	[µS/cm]	153	265	251	268	200	170	211
T	[°C]	4.6	5.4	5.3	5.6		6.2	8.7
pH	[-]	7.0	6.3	7.2	7.1	6.8	7.0	7.0
O2	[%]							
Eh	[mV]							
Dtot	[°F]	9.6	16.5	15.2	16.2	12.0	10.1	12.5
HCO3	[mg/l]	114.2	187.5	175.9	187.5	136.8	117.2	143.5
SO4	[mg/l]	2.2	11.7	7.1	8.5	7.9	3.9	6.1
(NO3)	[mg/l]	3.9	0.0	6.6	8.4	1.7	7.6	8.2
Cl	[mg/l]	0.5	0.4	0.6	1.0	0.3	0.7	0.6
Ca	[mg/l]	33.6	57.2	57.4	61.9	42.3	38.0	47.6
Mg	[mg/l]	1.2	3.0	2.7	3.1	3.3	1.7	4.0
Na	[mg/l]	0.3	0.5	0.5	0.5	0.8	0.4	0.7
Sr	[mg/l]	0.28	0.60	0.58	0.65	0.34	0.23	0.35
K	[mg/l]	0.14	0.27	0.15	0.17	0.35	0.34	0.60
Si	[mg/l]	0.5	1.7	1.0	1.1	1.2	0.9	1.1
TSD	[mg/l]	157	263	253	273	195	171	213
Σ cations	[méq/l]	1.80	3.15	3.13	3.38	2.43	2.06	2.75
Σ anions	[méq/l]	1.99	3.33	3.15	3.41	2.44	2.14	2.63
Σ c+a = TID	[méq/l]	3.79	6.47	6.28	6.80	4.88	4.21	5.38
Balance ionique	[-]	0.90	0.95	0.99	0.99	1.00	0.96	1.05
Erreur / balance	[%]	-5.1	-2.8	-0.4	-0.4	-0.2	-1.9	2.3
Ba	[µg/l]	10	19	16	17	24	14	21
(Fe)	[µg/l]	64.8	26.1	18.6	43.3		15.6	11.3
B	[µg/l]	3.2	8.6	4.8	4.6	4.4	3.4	5.6
Li	[µg/l]	1.1	2.1	1.6	1.7	1.7	0.7	2.0
(Br)	[µg/l]	0.0	4.0	0.3	0.0	2.8	1.9	0.8
(Zn)	[µg/l]	0.4	0.8	0.6	0.0		5.8	1.0
Rb	[µg/l]	0.2	0.7	0.3	0.4	0.5	0.2	0.3
(Al)	[µg/l]	4.8	1.0	0.8	2.3	1.7	0.7	0.5
Ni	[µg/l]	0.8	0.9	0.3	0.6	0.7	0.4	0.2
(I)	[µg/l]	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.3	1.4
Mn	[µg/l]	2.16	0.51	0.32	1.06	0.66	0.19	0.14
Cu	[µg/l]	0.5	0.5	0.5	0.1	0.8	0.9	0.6
U	[µg/l]	0.09	0.20	0.17	0.18	0.27	0.11	0.16
Cr	[µg/l]	0.21	0.19	0.12	0.12	0.14	0.37	0.12
V	[µg/l]	0.34	0.24	0.24	0.09	0.37	0.28	0.08
Co	[µg/l]	0.09	0.33	0.09	0.06	0.24	0.06	0.06
(La)	[µg/l]	0.13	0.00	0.02	0.04	0.09	0.06	0.06

Paramètres physiques et chimiques des exutoires des réseaux spatio-temporel (N° 2) et temporel (N° 3)

N° source		59	59	59	59	59	59	59
Code source		WM1	WM2	WM3	WM4	WM5	WM6	WM7
Date		8.déc.88	2.mai.89	21.jui.89	19.jul.89	15.aou.89	13.sep.89	11.oct.89
Q	[l/mn]	300	550	300	350	460	400	500
K20	[μ S/cm]	373	371	387	383	370	382	375
T	[°C]	7.9	8.0	8.1	8.0	8.1	8.0	8.0
pH	[-]	6.8	7.1	7.5	7.8	7.7	7.8	7.5
O2	[%]							258
Eh	[mV]							216
Dtot	[°F]	22.5	22.2	23.2	22.9	22.5	22.9	23.0
HCO3	[mg/l]	234.5	228.4	229.0	227.8	228.4	232.6	232.0
SO4	[mg/l]	28.9	30.7	35.0	35.9	24.8	31.8	26.0
(NO3)	[mg/l]	4.3	3.9	2.9	3.3	4.1	3.0	3.5
Cl	[mg/l]	0.8	2.7	1.8	1.6	1.4	1.0	1.4
Ca	[mg/l]	68.7	65.3	64.5	70.1	68.3	65.8	66.7
Mg	[mg/l]	10.5	10.5	11.9	11.5	9.7	10.7	10.0
Na	[mg/l]	2.2	2.0	2.2	2.1	1.7	1.9	1.8
Sr	[mg/l]	0.97	0.92	1.02	1.01	0.88	0.96	0.93
K	[mg/l]	0.57	0.75	0.76	1.03	0.71	0.70	0.70
Si	[mg/l]	2.0	1.9	2.4	2.3	2.1	2.1	2.1
TSD	[mg/l]	354	347	351	357	342	351	345
Σ cations	[méq/l]	4.43	4.25	4.34	4.59	4.32	4.29	4.27
Σ anions	[méq/l]	4.54	4.52	4.58	4.58	4.36	4.55	4.44
Σ c+a = TID	[méq/l]	8.97	8.77	8.91	9.17	8.68	8.84	8.71
Balance ionique	[-]	0.98	0.94	0.95	1.00	0.99	0.94	0.96
Erreur / balance	[%]	-1.2	-3.1	-2.7	0.1	-0.5	-3.0	-1.9
Ba	[μ g/l]	42	43	40	40	37	41	38
(Fe)	[μ g/l]	11.8	33.4	25.9	19.1	31.4	14.8	21.5
B	[μ g/l]	24.3	22.7	25.5	25.5	20.3	22.6	21.8
Li	[μ g/l]	9.8	9.3	9.6	9.6	7.4	8.7	7.5
(Br)	[μ g/l]	2.8	3.0	2.8	0.6	2.3	2.2	0.9
(Zn)	[μ g/l]	0.3	5.9	5.3	0.0	2.9	0.2	1.7
Rb	[μ g/l]	1.3	0.8	0.9	1.3	0.7	0.9	0.8
(Al)	[μ g/l]	0.6	1.4	0.8	4.0	0.9	0.1	0.3
Ni	[μ g/l]	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.3	0.4
(I)	[μ g/l]	0.5	2.0	1.1	1.0	1.1	1.0	0.8
Mn	[μ g/l]	0.10	0.74	0.59	1.56	0.70	0.13	0.20
Cu	[μ g/l]	0.5	1.5	4.0	0.6	3.2	0.2	0.6
U	[μ g/l]	0.33	0.25	0.19	0.23	0.18	0.25	0.18
Cr	[μ g/l]	0.08	0.34	0.28	0.51	0.22	0.23	0.29
V	[μ g/l]	0.45	0.17	0.24	0.32	0.10	0.31	0.33
Co	[μ g/l]	0.32	0.40	0.32	0.29	0.36	0.26	0.24
(La)	[μ g/l]	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00

N° source		59	59	59	59	59	59	59
Code source		WM8	WM9	WM10	WM11	WM12	WM13	WM14
Date		9.nov.89	4.déc.89	10.jan.90	21.fév.90	29.mar.90	26.avr.90	31.mai.90
Q	[l/mn]	600	300		480	~300	600	550
K20	[µS/cm]	373	394	384	355	368	365	375
T	[°C]	8.0	7.8	7.8	8.2	8.1	7.9	7.9
pH	[-]	7.7	7.8	7.5	~6.8	~7	7.8	7.4
O2	[%]		120					178
Eh	[mV]		280					236
Dtot	[°F]	22.3	23.7	24.0	23.4	22.7	17.6	22.6
HCO3	[mg/l]	232.6	238.1	292.9	254.6	263.2	167.3	232.0
SO4	[mg/l]	29.5	36.7	21.5	18.6	23.6	31.1	25.2
(NO3)	[mg/l]	3.7	2.8	1.2	2.8	2.1	3.7	3.1
Cl	[mg/l]	1.2	1.1	1.3	1.1	1.2	0.7	0.7
Ca	[mg/l]	67.1	70.1	74.1	73.6	66.1	50.9	71.5
Mg	[mg/l]	9.6	10.6	12.5	10.2	14.3	10.6	11.1
Na	[mg/l]	1.7	2.0	2.4	1.8	2.6	1.8	1.9
Sr	[mg/l]	0.90	1.05	1.09	0.87	1.17	0.89	0.87
K	[mg/l]	0.67	0.70	0.79	0.93	1.15	0.83	0.75
Si	[mg/l]	2.0	2.2	2.2	2.1	2.0	2.0	2.2
TSD	[mg/l]	349	365	410	367	377	270	349
Σ cations	[méq/l]	4.25	4.50	4.87	4.63	4.64	3.53	4.61
Σ anions	[méq/l]	4.52	4.74	5.30	4.64	4.87	3.47	4.40
Σ c+a = TID	[méq/l]	8.77	9.24	10.17	9.27	9.52	7.00	9.00
Balance ionique	[-]	0.94	0.95	0.92	1.00	0.95	1.02	1.05
Erreur / balance	[%]	-3.1	-2.6	-4.2	0.0	-2.4	0.9	2.3
Ba	[µg/l]	41	43	43	38	45	35	35
(Fe)	[µg/l]	18.7	16.1	18.7	20.9	23.7	16.8	20.9
B	[µg/l]	19.3	22.4	26.8	21.3	31.3	23.6	24.9
Li	[µg/l]	7.0	8.3	9.9	7.5	11.2	8.8	9.1
(Br)	[µg/l]	2.5	3.2	1.5	4.5	2.4	3.0	0.8
(Zn)	[µg/l]	0.0	0.3	0.0	0.5	0.9	0.1	2.7
Rb	[µg/l]	1.0	1.0	0.9	0.7	1.0	0.6	0.8
(Al)	[µg/l]	0.3	0.0	0.1	0.2	0.2	0.1	0.6
Ni	[µg/l]	0.3	0.2	0.4	0.6	0.7	0.4	0.5
(I)	[µg/l]	1.0	1.2	1.0	1.3	1.1	0.7	0.8
Mn	[µg/l]	0.16	0.09	0.29	0.24	0.20	0.25	0.51
Cu	[µg/l]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	2.2
U	[µg/l]	0.23	0.22	0.20	0.22	0.24	0.19	0.22
Cr	[µg/l]	0.36	0.27	0.20	0.27	0.25	0.20	0.28
V	[µg/l]	0.00	0.04	0.06	0.12	0.11	0.04	0.11
Co	[µg/l]	0.28	0.21	0.33	0.33	0.42	0.28	0.29
(La)	[µg/l]	0.02	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00

Paramètres physiques et chimiques des exutoires des réseaux spatio-temporel (N° 2) et temporel (N° 3)

N° source		59	59	59	59	59	59	61
Code source		WM15	WM16	WM17	WM18	WM19	WM20	FG1
Date		29.jui.90	23.jul.90	17.aoû.90	19.sep.90	26.oct.90	21.nov.90	26.oct.88
Q	[l/mn]	1123	1123	562	330	260	600	1200
K20	[μ S/cm]	359	380	372	384	383	375	236
T	[°C]	8.4	7.9	8.0	7.9	7.9	7.8	
pH	[-]	7.4	7.5	7.0	7.3	7.4	7.2	6.7
O2	[%]	100	114	78	86		95	
Eh	[mV]	243	195	250	290		355	
Dtot	[°F]	22.0	23.2	23.1	24.3	23.4	22.8	14.9
HCO3	[mg/l]	231.4	231.4	229.0	277.2	232.0	235.1	168.5
SO4	[mg/l]	36.8	39.1	25.2	25.1	36.7	28.3	6.7
(NO3)	[mg/l]	5.0	4.8	2.1	2.2	2.7	3.4	0.7
Cl	[mg/l]	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.4
Ca	[mg/l]	70.5	70.1	69.3	77.3	73.3	75.8	50.6
Mg	[mg/l]	11.1	11.6	11.5	12.7	11.7	9.1	2.3
Na	[mg/l]	1.9	2.0	2.0	2.2	2.1	1.5	1.1
Sr	[mg/l]	0.87	0.88	0.88	0.98	0.91	0.79	0.38
K	[mg/l]	0.76	0.89	0.92	0.98	0.84	0.79	0.39
Si	[mg/l]	2.1	2.2	2.0	2.2	2.1	1.9	1.2
TSD	[mg/l]	361	364	343	401	363	357	232
Σ cations	[méq/l]	4.56	4.58	4.53	5.05	4.75	4.63	2.78
Σ anions	[méq/l]	4.66	4.70	4.33	5.12	4.62	4.51	2.92
Σ c+a = TID	[méq/l]	9.22	9.28	8.86	10.16	9.38	9.14	5.71
Balance ionique	[-]	0.98	0.97	1.05	0.99	1.03	1.03	0.95
Erreur / balance	[%]	-1.1	-1.3	2.3	-0.7	1.4	1.3	-2.5
Ba	[μ g/l]	33	32	32	36	34	28	26
(Fe)	[μ g/l]	19.6	20.7	15.9	43.8	26.7	13.7	
B	[μ g/l]	25.7	27.2	25.9	31.2	48.1	17.8	16.8
Li	[μ g/l]	9.2	9.5	9.9	9.8	9.2	5.9	2.5
(Br)	[μ g/l]	3.6	2.6	3.2	2.1	2.3	2.7	4.7
(Zn)	[μ g/l]	1.0	1.1	0.4	8.9	2.5	0.5	0.5
Rb	[μ g/l]	0.7	0.8	1.0	0.8	0.6	0.7	0.3
(Al)	[μ g/l]	18.9	1.1	2.9	0.6	0.4	0.0	0.7
Ni	[μ g/l]	0.8	0.4	0.4	1.5	0.4	0.0	0.8
(I)	[μ g/l]	0.6	0.6	0.7	6.1	4.2	2.7	1.3
Mn	[μ g/l]	0.33	0.62	1.09	0.86	0.44	0.12	0.35
Cu	[μ g/l]	0.7	0.6	0.2	4.7	0.6	0.0	0.6
U	[μ g/l]	0.21	0.24	0.22	0.29	0.21	0.17	0.10
Cr	[μ g/l]	0.80	0.29	0.25	1.03	0.50	0.47	0.19
V	[μ g/l]	0.10	0.28	0.22	0.12	0.10	0.02	0.25
Co	[μ g/l]	0.21	0.42	0.15	0.25	0.16	0.19	0.32
(La)	[μ g/l]	0.03	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00

N° source		61	62	62	63	63	64	64
Code source		FG2	FN1	FN2	RL1	RL2	RS1	RS2
Date		18.mai.89	26.oct.88	18.mai.89	2.nov.88	18.mai.89	1.nov.88	2.mai.89
Q	[l/mn]	~3000	~500	~800	~500	~1000	~400	720
K20	[μ S/cm]	194	222	195	228	195	250	237
T	[°C]	6.3		9.2		7.0	6.7	5.5
pH	[-]	7.1	6.3	7.1	6.0	7.2	6.1	7.0
O2	[%]							
Eh	[mV]							
Dtot	[°F]	11.8	13.8	11.5	13.8	11.7	14.9	14.1
HCO3	[mg/l]	136.2	155.7	133.1	162.4	134.3	166.1	158.8
SO4	[mg/l]	3.4	5.9	3.7	4.1	3.1	12.8	5.2
(NO3)	[mg/l]	5.7	0.0	4.8	0.2	4.5	2.0	4.8
Cl	[mg/l]	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.7	0.8
Ca	[mg/l]	43.0	49.3	42.5	51.7	43.8	51.1	50.4
Mg	[mg/l]	1.6	2.6	1.7	2.2	1.5	4.7	3.7
Na	[mg/l]	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.7	0.6
Sr	[mg/l]	0.30	0.31	0.24	0.38	0.28	0.37	0.32
K	[mg/l]	0.24	0.41	0.30	0.33	0.17	0.50	0.46
Si	[mg/l]	0.7	1.2	0.8	1.3	0.7	1.5	1.2
TSD	[mg/l]	192	216	188	224	189	240	226
Σ cations	[méq/l]	2.31	2.71	2.29	2.80	2.34	2.99	2.86
Σ anions	[méq/l]	2.41	2.69	2.35	2.76	2.35	3.04	2.81
Σ c-a = TID	[méq/l]	4.72	5.40	4.64	5.56	4.69	6.03	5.67
Balance ionique	[-]	0.96	1.01	0.97	1.01	1.00	0.98	1.02
Erreur / balance	[%]	-2.2	0.4	-1.3	0.6	-0.2	-0.9	0.9
Ba	[μ g/l]	21	35	27	15	12	26	20
(Fe)	[μ g/l]	14.6		43.5		16.8		13.8
B	[μ g/l]	4.4	10.1	3.3	8.5	3.3	8.8	5.0
Li	[μ g/l]	1.2	1.7	1.0	1.5	0.9	2.6	2.0
(Br)	[μ g/l]	0.0	4.3	1.2	3.5	1.8	4.5	1.8
(Zn)	[μ g/l]	0.0		14.1	0.6	0.4		0.1
Rb	[μ g/l]	0.3	0.5	0.3	0.3	0.2	0.4	0.3
(Al)	[μ g/l]	0.8	0.3	2.2	0.3	0.5	1.8	0.7
Ni	[μ g/l]	0.3	0.9	0.6	0.9	0.2		0.2
(I)	[μ g/l]	0.3	0.9	0.4	0.7	0.1	1.0	1.0
Mn	[μ g/l]	0.28	0.24	1.52	0.24	0.28	1.29	0.25
Cu	[μ g/l]	0.0	0.9	1.2	0.3	0.2		0.0
U	[μ g/l]	0.08	0.11	0.09	0.08	0.06	0.14	0.13
Cr	[μ g/l]	0.87	0.19	0.12	0.23	1.32	0.26	0.05
V	[μ g/l]	0.07	0.35	0.26	0.25	0.15	0.37	0.25
Co	[μ g/l]	0.09	0.31	0.07	0.31	0.05	0.35	0.08
(La)	[μ g/l]	0.02	0.00	0.08	0.00	0.03	0.03	0.09

Paramètres physiques et chimiques des exutoires des réseaux spatio-temporel (N° 2) et temporel (N° 3)

N° source		64	66	66	68	68	69	69
Code source		RS5	RR1	RR2	GE1	GE5	GH1	GH5
Date		23.aoû.89	1.nov.88	2.mai.89	13.déc.88	4.oct.89	21.déc.88	4.oct.89
Q	[l/mn]	450	30	~50	~10	2	~13	4
K20	[µS/cm]	254	272	192	372	366	383	403
T	[°C]	5.6	5.8	4.0	8.2		7.4	
pH	[-]	6.9	6.0	6.5	6.8	7.3	7.4	7.4
O2	[%]							
Eh	[mV]							
Dtot	[°F]	15.2	16.8	11.7	22.4	22.6	23.1	24.9
HCO3	[mg/l]	167.9	186.2	136.8	270.5	270.5	263.2	276.6
SO4	[mg/l]	10.7	10.3	1.7	4.9	4.5	14.9	21.8
(NO3)	[mg/l]	8.2	1.0	0.0	2.1	0.0	1.6	0.0
Cl	[mg/l]	0.6	0.3	0.5	1.5	0.6	0.9	1.4
Ca	[mg/l]	55.4	56.2	44.1	87.4	78.2	84.4	81.8
Mg	[mg/l]	4.5	4.5	1.5	3.4	2.4	5.3	5.4
Na	[mg/l]	0.7	0.7	0.3	3.8	3.0	2.3	2.5
Sr	[mg/l]	0.40	0.42	0.22	0.64	0.49	0.89	0.85
K	[mg/l]	0.53	0.45	0.15	0.86	0.39	0.71	0.76
Si	[mg/l]	1.2	1.6	0.7	1.7	2.2	2.4	2.0
TSD	[mg/l]	250	262		377	362	377	393
Σ cations	[méq/l]	3.19	3.23	2.35	4.84	4.25	4.79	4.67
Σ anions	[méq/l]	3.12	3.29	2.29	4.61	4.54	4.67	5.03
Σ c+a = TID	[méq/l]	6.32	6.52	4.64	9.45	8.80	9.46	9.70
Balance ionique	[-]	1.02	0.98	1.02	1.05	0.94	1.02	0.93
Erreur / balance	[%]	1.1	-1.0	1.2	2.4	-3.3	1.2	-3.7
Ba	[µg/l]	27	23	13	141	115	72	66
(Fe)	[µg/l]	9.5	29.0	23.2		0.0		2.8
B	[µg/l]	5.4	9.5	3.3	32.7	24.3	19.3	21.7
Li	[µg/l]	2.4	2.7	0.4	4.8	3.8	10.5	12.2
(Br)	[µg/l]	0.0	4.0	2.2	6.1	7.1	4.0	5.5
(Zn)	[µg/l]	0.7	0.8	0.2		1.2		0.5
Rb	[µg/l]	0.3	0.6	0.2	1.2	0.5	1.5	1.1
(Al)	[µg/l]	0.4	1.4	1.0	4.1	0.5	0.7	0.3
Ni	[µg/l]	0.3	1.1	0.3		0.4		0.7
(I)	[µg/l]	0.9	0.8	0.6	1.6	2.3	1.1	1.3
Mn	[µg/l]	0.20	0.67	0.59	4.49	0.10	0.82	0.44
Cu	[µg/l]	0.3	0.5	0.2		0.4		0.5
U	[µg/l]	0.10	0.14	0.05	0.37	0.31	0.31	0.23
Cr	[µg/l]	0.08	0.25	0.58	0.49	0.14	0.17	0.12
V	[µg/l]	0.08	0.27	0.10	0.51	0.37	0.41	0.26
Co	[µg/l]	0.09	0.36	0.06	0.67	0.14	0.43	0.19
(La)	[µg/l]	0.04	0.00	0.05	0.12	0.05	0.10	0.00

N° source		70	70	73	73	74	74	74
Code source		GR1	GR5	GC1	GC5	GJ1	GJ5	GJ8
Date		20.déc.88	4.oct.89	13.déc.88	4.oct.89	20.déc.88	4.oct.89	3.nov.89
Q	[l/mn]	-9	9	~20	21	~55	37	43
K20	[μ S/cm]	405	425	340	348	275	274	271
T	[°C]	7.8		6.6		~6.3	6.3	6.1
pH	[-]	7.4	7.4	6.6	7.1	6.5	7.0	7.5
O2	[%]							
Eh	[mV]							
Dtot	[°F]	24.4	25.5	19.9	20.4	16.3	16.7	16.5
HCO3	[mg/l]	285.2	300.4	225.3	231.4	193.6	192.3	193.6
SO4	[mg/l]	9.3	10.2	13.9	18.1	11.3	8.0	8.2
(NO3)	[mg/l]	3.9	2.2	6.2	5.3	3.7	3.1	2.5
Cl	[mg/l]	3.7	3.5	1.0	0.8	0.9	0.6	0.8
Ca	[mg/l]	86.6	77.3	69.0	70.1	62.9	63.1	58.9
Mg	[mg/l]	7.7	7.6	7.6	6.9	3.1	2.5	2.5
Na	[mg/l]	3.9	5.6	5.2	6.9	2.9	2.2	2.1
Sr	[mg/l]	0.50	0.46	0.49	0.39	0.32	0.27	0.26
K	[mg/l]	0.77	0.68	0.63	0.48	0.76	0.79	0.76
Si	[mg/l]	2.5	2.0	1.5	1.6	2.1	2.0	1.8
TSD	[mg/l]	404	410	331	342	282	275	271
Σ cations	[méq/l]	5.16	4.75	4.32	4.39	3.55	3.48	3.26
Σ anions	[méq/l]	5.03	5.27	4.11	4.28	3.49	3.39	3.40
Σ c+a = TID	[méq/l]	10.19	10.02	8.43	8.66	7.04	6.86	6.67
Balance ionique	[-]	1.02	0.90	1.05	1.03	1.02	1.03	0.96
Erreur / balance	[%]	1.2	-5.2	2.5	1.3	0.8	1.3	-2.2
Ba	[μ g/l]	52	53	31	32	57	49	47
(Fe)	[μ g/l]		5.5		3.2	8.8	5.0	5.4
B	[μ g/l]	36.2	46.3	44.8	51.2	16.5	13.0	13.9
Li	[μ g/l]	3.6	3.6	4.9	6.3	4.3	3.3	3.5
(Br)	[μ g/l]	3.6	8.6	5.0	4.8	3.4	2.8	2.6
(Zn)	[μ g/l]		0.4		1.2	0.8	1.4	0.3
Rb	[μ g/l]	0.9	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	0.5
(Al)	[μ g/l]	3.7	0.8	2.2	0.7	0.6	0.8	0.6
Ni	[μ g/l]		0.5	0.8	0.3	0.5	0.0	0.0
(I)	[μ g/l]	1.7	3.9	1.3	2.0	4.6	4.2	4.1
Mn	[μ g/l]	3.36	1.43	0.54	0.20	0.42	0.23	0.11
Cu	[μ g/l]		0.4		0.6	0.4	0.5	0.4
U	[μ g/l]	0.38	0.26	0.36	0.25	0.33	0.16	0.14
Cr	[μ g/l]	0.31	0.12	0.15	0.17	0.09	0.14	0.14
V	[μ g/l]	0.53	0.31	0.46	0.27	0.36	0.17	0.17
Co	[μ g/l]	0.47	0.15	0.35	0.09	0.27	0.06	0.08
(La)	[μ g/l]	0.13	0.02	0.10	0.02	0.13	0.04	0.00

Paramètres physiques et chimiques des exutoires des réseaux spatio-temporel (N° 2) et temporel (N° 3)

N° source		74	74	74	74	74	74	74
Code source		GJ9	GJ10	GJ11	GJ12	GJ13	GJ14	GJ15
Date		19.déc.89	17.jan.90	15.fév.90	13.mar.90	11.avr.90	10.mai.90	27.jui.90
Q	[l/mn]	40	36	53	49	53	60	69
K20	[μ S/cm]	277	277	259	278	275	280	278
T	[°C]	5.9	5.8	5.6	5.7	5.7	5.8	5.9
pH	[-]		6.4				7.5	
O2	[%]							
Eh	[mV]							
Dtot	[°F]	16.7	17.3	16.8	16.6	16.5	16.6	16.7
HCO3	[mg/l]	189.9	210.5	195.4	197.2	191.7	192.3	194.2
SO4	[mg/l]	9.8	9.3	8.5	7.5	8.2	9.5	9.9
(NO3)	[mg/l]	3.5	3.2	3.6	2.6	3.6	3.5	8.7
Cl	[mg/l]	1.7	1.9	0.7	2.2	1.2	1.3	0.8
Ca	[mg/l]	61.7	57.5	58.7	61.1	60.7	64.3	60.1
Mg	[mg/l]	2.3	2.4	2.2	2.4	2.3	2.2	2.3
Na	[mg/l]	2.2	2.2	1.8	2.1	2.0	2.1	2.1
Sr	[mg/l]	0.25	0.25	0.24	0.25	0.26	0.25	0.24
K	[mg/l]	0.89	0.85	0.81	0.72	0.71	0.67	0.67
Si	[mg/l]	2.0	2.0	1.8	1.6	2.4	2.0	2.0
TSD	[mg/l]	274	290	274	278	273	278	281
Σ cations	[méq/l]	3.40	3.19	3.21	3.36	3.33	3.51	3.30
Σ anions	[méq/l]	3.42	3.75	3.46	3.49	3.40	3.44	3.55
Σ c+a = TID	[méq/l]	6.82	6.94	6.67	6.85	6.74	6.95	6.85
Balance ionique	[-]	0.99	0.85	0.93	0.96	0.98	1.02	0.93
Erreur / balance	[%]	-0.4	-8.1	-3.7	-1.9	-1.1	0.9	-3.6
Ba	[μ g/l]	49	49	44	46	47	45	48
(Fe)	[μ g/l]	7.7	2.1	24.7	3.5	3.0	2.0	0.3
B	[μ g/l]	13.1	13.9	12.6	13.3	12.8	12.6	12.8
Li	[μ g/l]	3.4	3.3	3.3	3.3	3.3	3.2	3.3
(Br)	[μ g/l]	2.9	2.8	2.3	3.2	1.8	2.0	1.6
(Zn)	[μ g/l]	4.2	0.3	1.1	0.4	2.2	0.3	0.1
Rb	[μ g/l]	0.7	0.5	0.8	0.4	0.6	0.7	0.5
(Al)	[μ g/l]	1.1	0.4	3.4	0.4	0.4	0.3	0.6
Ni	[μ g/l]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
(I)	[μ g/l]	4.0	4.7	4.0	5.1	4.9	4.5	5.0
Mn	[μ g/l]	0.57	0.06	0.65	0.06	0.11	0.05	0.05
Cu	[μ g/l]	1.3	0.1	0.4	0.3	0.4	0.1	0.4
U	[μ g/l]	0.18	0.18	0.17	0.16	0.15	0.13	0.18
Cr	[μ g/l]	0.27	0.13	0.23	0.11	0.01	0.13	0.14
V	[μ g/l]	0.06	0.04	0.12	0.04	0.03	0.06	0.04
Co	[μ g/l]	0.08	0.09	0.15	0.08	0.05	0.09	0.06
(La)	[μ g/l]	0.06	0.00	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00

N° source		74	74	74	74	74	75	75
Code source		GJ16	GJ17	GJ18	GJ19	GJ20	GT1	GT5
Date		19.jul.90	15.août.90	13.sep.90	11.oct.90	29.nov.90	20.déc.88	4.oct.89
Q	[l/mn]	71	55	46	58	65	-9	3
K20	[µS/cm]	272	280	277	278	285	264	271
T	[°C]	6.1	6.1	6.2	6.1	5.7	5.7	6.7
pH	[-]		6.5		6.8		6.5	7.0
O2	[%]							
Eh	[mV]							
Dtot	[°F]	16.4	19.4		16.8	17.4	15.8	16.6
HCO3	[mg/l]	193.6	220.9	193.0	194.8	197.2	182.0	188.7
SO4	[mg/l]	10.7	5.9	5.1	4.8	8.1	7.8	8.3
(NO3)	[mg/l]	6.6	2.5	3.1	1.8	2.9	4.2	3.2
Cl	[mg/l]	1.0	0.7	0.8	0.7	0.9	1.2	2.2
Ca	[mg/l]	60.5	64.5	54.7	62.1	60.5	58.9	55.7
Mg	[mg/l]	2.4	1.0	2.2	2.3	2.3	2.5	1.9
Na	[mg/l]	2.3	0.9	2.0	2.2	2.1	2.1	1.6
Sr	[mg/l]	0.25	0.11	0.23	0.25	0.25	0.29	0.21
K	[mg/l]	0.70	0.29	0.63	1.25	0.77	0.78	0.59
Si	[mg/l]	2.0	1.0	1.8	1.7	1.1	1.9	1.7
TSD	[mg/l]	280	298	264	272	276	262	264
Σ cations	[méq/l]	3.34	3.35	3.02	3.43	3.32	3.26	3.03
Σ anions	[méq/l]	3.53	3.80	3.34	3.34	3.47	3.25	3.38
Σ c+a = TID	[méq/l]	6.87	7.15	6.36	6.77	6.80	6.51	6.40
Balance ionique	[-]	0.95	0.88	0.91	1.03	0.96	1.00	0.90
Erreur / balance	[%]	-2.8	-6.3	-5.0	1.2	-2.2	0.2	-5.5
Ba	[µg/l]	47	22	40	47	47	52	41
(Fe)	[µg/l]	3.6	0.0	8.2	3.3	2.8	21.3	4.7
B	[µg/l]	13.1	6.2	13.8	17.8	19.4	13.4	10.4
Li	[µg/l]	3.2	1.3	2.2	3.4	3.3	3.1	2.4
(Br)	[µg/l]	2.1	1.8	0.5	3.2	1.5	7.6	0.9
(Zn)	[µg/l]	1.4	0.2	0.5	2.6	8.5	5.3	0.2
Rb	[µg/l]	0.4	0.3	0.4	1.4	0.5	0.7	0.4
(Al)	[µg/l]	0.5	0.5	1.0	18.5	1.2	2.2	0.7
Ni	[µg/l]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0
(I)	[µg/l]	4.6	3.2	10.4	10.4	6.3	2.4	3.9
Mn	[µg/l]	0.21	0.07	0.32	2.81	0.33	0.90	0.12
Cu	[µg/l]	1.1	0.0	0.9	1.6	1.6	2.7	0.3
U	[µg/l]	0.17	0.08	0.15	0.16	0.14	0.32	0.15
Cr	[µg/l]	0.06	0.00	0.11	0.49	0.28	0.31	0.11
V	[µg/l]	0.02	0.00	0.04	0.05	0.04	0.41	0.23
Co	[µg/l]	0.07	0.02	0.06	0.08	0.07	0.29	0.07
(La)	[µg/l]	0.00	0.03	0.02	0.01	0.02	0.16	0.02

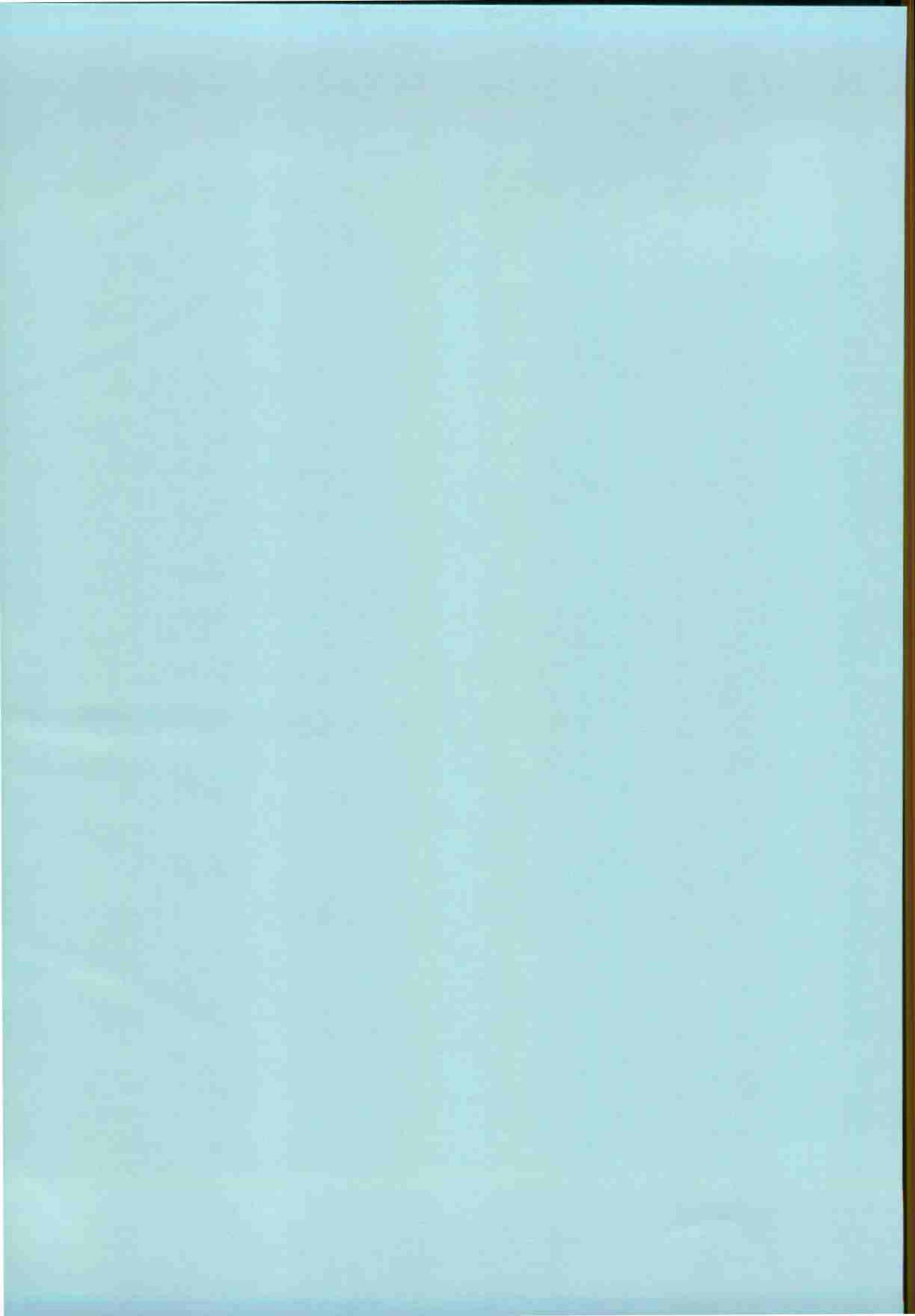
Paramètres physiques et chimiques des exutoires des réseaux spatio-temporel (N° 2) et temporel (N° 3)

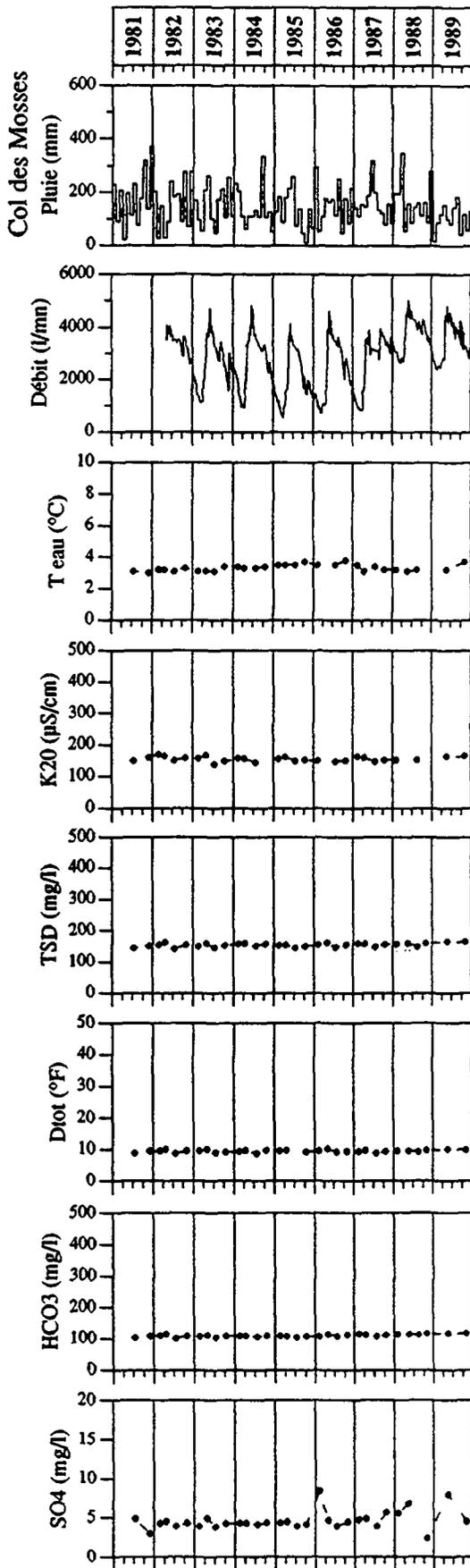
N° source		75	75	75	75	75	75	75
Code source		GT8	GT9	GT11	GT12	GT13	GT14	GT15
Date		3.nov.89	19.déc.89	15.fév.90	13.mar.90	11.avr.90	10.mai.90	27.jui.90
Q	[l/mn]	6	6	12	6	8	10	16
K20	[μ S/cm]	374	264	247	275	267	269	267
T	[°C]	6.5	5.7	4.8	5.3	5.2	5.5	6.1
pH	[-]	7.5					7.6	
O2	[%]							
Eh	[mV]							
Dtot	[°F]	16.3	16.1	14.8	16.2	15.9	16.0	16.1
HCO3	[mg/l]	189.3	195.4	207.6	191.7	183.8	184.4	185.6
SO4	[mg/l]	8.1	7.3	4.3	7.7	8.8	6.3	9.8
(NO3)	[mg/l]	3.5	4.3	2.7	3.5	5.2	3.5	5.6
Cl	[mg/l]	1.5	1.7	0.3	1.9	1.3	0.9	1.0
Ca	[mg/l]	56.1	57.9	57.9	63.1	63.1	54.5	58.9
Mg	[mg/l]	1.7	1.7	1.3	1.7	1.7	1.6	1.9
Na	[mg/l]	1.3	1.1	0.9	1.4	1.3	1.3	1.6
Sr	[mg/l]	0.21	0.21	0.17	0.22	0.21	0.20	0.21
K	[mg/l]	0.58	0.82	0.74	0.58	0.68	0.61	0.70
Si	[mg/l]	1.7	1.8	0.9	1.7	1.8	1.6	0.9
TSD	[mg/l]	264	272	277	274	268	255	266
Σ cations	[még/l]	3.02	3.10	3.06	3.37	3.37	2.92	3.18
Σ anions	[még/l]	3.37	3.47	3.54	3.41	3.32	3.23	3.36
Σ c+a = TID	[még/l]	6.39	6.57	6.60	6.79	6.69	6.16	6.55
Balance ionique	[-]	0.89	0.89	0.86	0.99	1.02	0.90	0.95
Erreur / balance	[%]	-5.6	-5.6	-7.4	-0.6	0.8	-5.0	-2.8
Ba	[μ g/l]	41	40	35	42	39	37	37
(Fe)	[μ g/l]	4.2	50.5	62.9	3.3	5.0	0.5	11.6
B	[μ g/l]	9.8	9.0	7.2	9.2	8.4	8.4	10.8
Li	[μ g/l]	2.2	2.2	1.7	2.4	2.0	1.9	2.5
(Br)	[μ g/l]	1.8	1.7	1.4	3.2	3.7	2.0	2.5
(Zn)	[μ g/l]	0.2	1.3	0.7	0.4	0.6	0.6	3.3
Rb	[μ g/l]	0.5	1.0	0.8	0.6	0.3	0.3	0.5
(Al)	[μ g/l]	1.0	6.7	8.4	0.6	0.6	0.6	2.2
Ni	[μ g/l]	0.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
(I)	[μ g/l]	3.8	2.2	2.6	3.0	2.5	3.2	3.0
Mn	[μ g/l]	0.23	1.50	2.96	0.16	0.15	0.24	0.50
Cu	[μ g/l]	0.2	0.9	0.6	0.1	0.2	0.2	2.3
U	[μ g/l]	0.15	0.15	0.11	0.14	0.16	0.15	0.16
Cr	[μ g/l]	0.00	0.43	0.29	0.11	0.12	0.11	0.25
V	[μ g/l]	0.21	0.19	0.25	0.05	0.05	0.01	0.05
Co	[μ g/l]	0.08	0.07	0.10	0.07	0.06	0.05	0.05
(La)	[μ g/l]	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00

N° source		75	75	75	75	76	76
Code source		GT16	GT17	GT18	GT19	GS1	GS5
Date		19.jul.90	15.août.90	13.sep.90	25.oct.90	20.déc.88	4.oct.89
Q	[l/mn]	14	8	6	10		
K20	[µS/cm]	269	278	270	266	267	273
T	[°C]	6.2	6.5	7.1	6.5	-4	
pH	[-]		6.5		6.8	7.1	7.0
O2	[%]						
Eh	[mV]						
Dtot	[°F]	15.9	16.2		16.1	15.7	16.3
HCO3	[mg/l]	185.6	220.9	186.8	186.2	173.4	178.9
SO4	[mg/l]	10.1	5.7	7.1	5.8	15.8	12.0
(NO3)	[mg/l]	9.4	3.3	3.0	3.6	3.3	2.6
Cl	[mg/l]	1.1	0.7	0.9	0.8	0.7	0.8
Ca	[mg/l]	59.3	64.5	50.5	58.9	56.1	55.9
Mg	[mg/l]	1.8	1.7	1.8	1.8	3.9	3.9
Na	[mg/l]	1.6	1.4	1.4	1.4	1.9	1.9
Sr	[mg/l]	0.21	0.19	0.20	0.21	0.71	0.64
K	[mg/l]	0.64	0.68	0.59	0.66	0.84	0.78
Si	[mg/l]	1.9	1.7	1.6	1.3	2.5	1.4
TSD	[mg/l]	272	301	254	261	259	259
Σ cations	[méq/l]	3.20	3.44	2.75	3.17	3.24	3.23
Σ anions	[méq/l]	3.43	3.81	3.28	3.25	3.24	3.25
Σ c+a = TID	[méq/l]	6.64	7.26	6.03	6.42	6.49	6.48
Balance ionique	[-]	0.93	0.90	0.84	0.97	1.00	0.99
Erreur / balance	[%]	-3.5	-5.1	-8.9	-1.3	0.0	-0.3
Ba	[µg/l]	41	37	40	37	58	54
(Fe)	[µg/l]	0.0	1.6	0.0	0.7		7.8
B	[µg/l]	10.7	10.2	13.5	10.7	17.5	15.9
Li	[µg/l]	2.5	2.2	3.1	2.5	7.0	7.0
(Br)	[µg/l]	1.3	1.8	1.6	3.2	6.0	7.2
(Zn)	[µg/l]	0.9	0.6	0.4	0.6		75.0
Rb	[µg/l]	0.4	0.5	0.4	0.4	2.0	1.0
(Al)	[µg/l]	0.3	1.1	1.1	1.0		0.9
Ni	[µg/l]	0.0	0.0	0.0	0.0		0.1
(I)	[µg/l]	2.8	2.8	9.9	10.8	1.0	1.0
Mn	[µg/l]	0.03	0.16	0.05	0.32	2.46	0.35
Cu	[µg/l]	0.1	0.0	0.1	0.2		3.5
U	[µg/l]	0.14	0.14	0.15	0.16	0.25	0.13
Cr	[µg/l]	0.03	0.07	0.05	0.00	0.65	0.24
V	[µg/l]	0.00	0.02	0.02	0.04		0.42
Co	[µg/l]	0.04	0.06	0.06	0.07	0.37	0.05
(La)	[µg/l]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.02

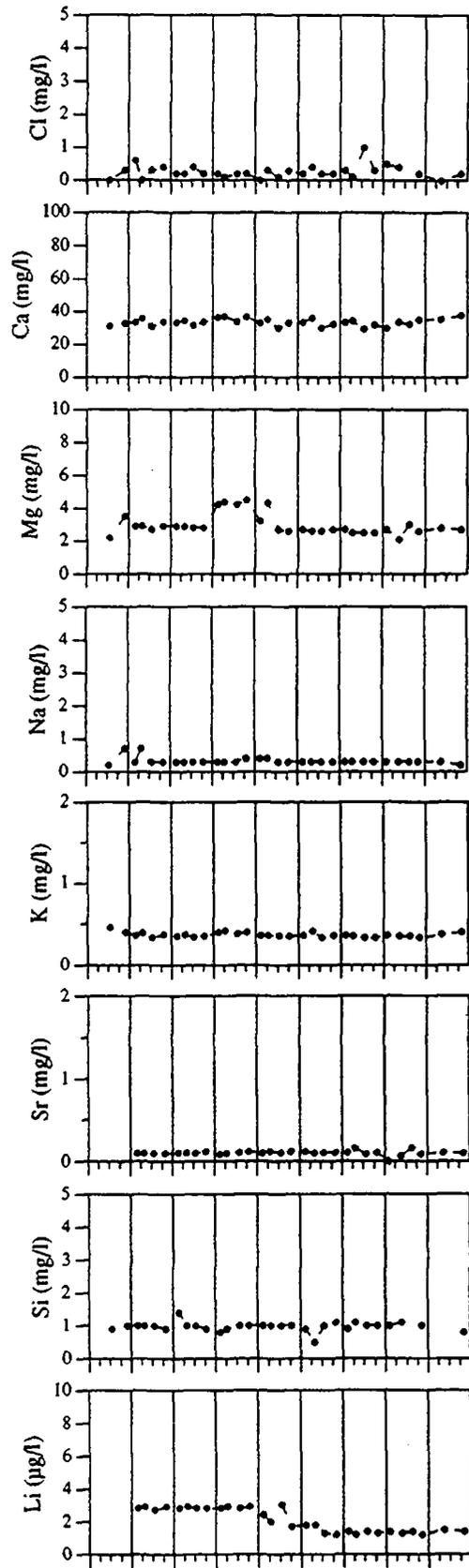
ANNEXE 3

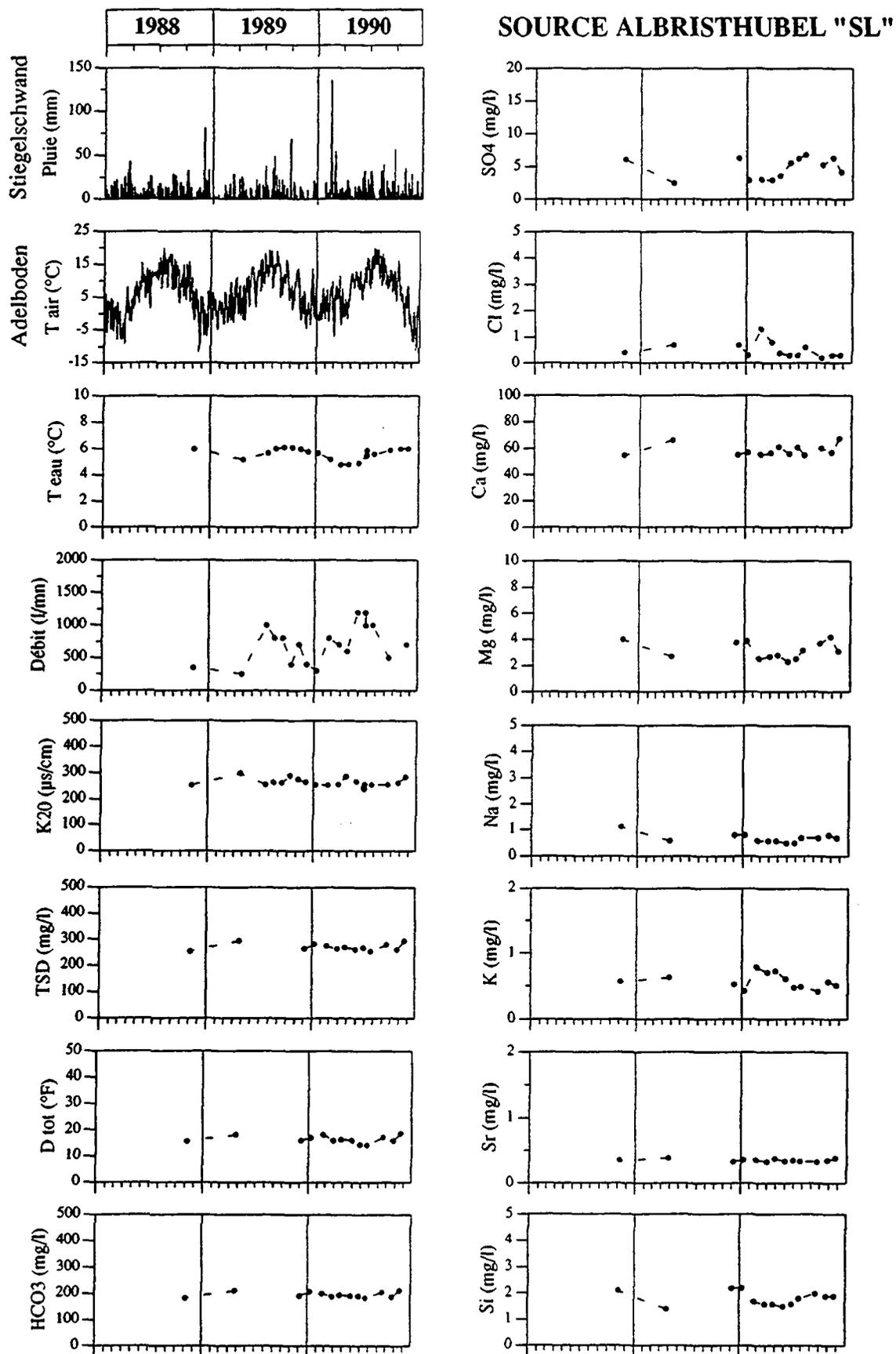
**EVOLUTION TEMPORELLE DES PARAMETRES
PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES EXUTOIRES DU
RESEAU N° 3**

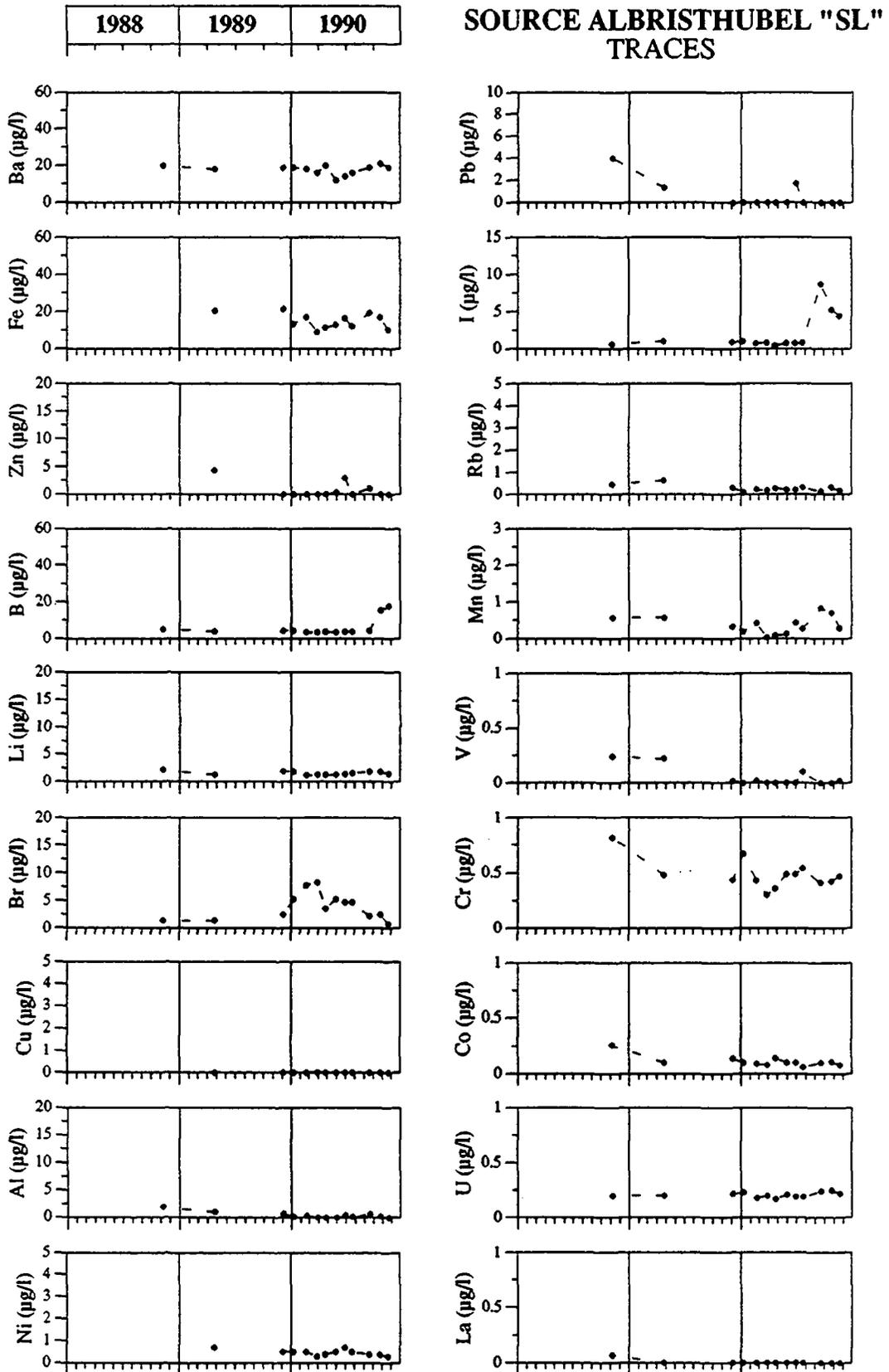


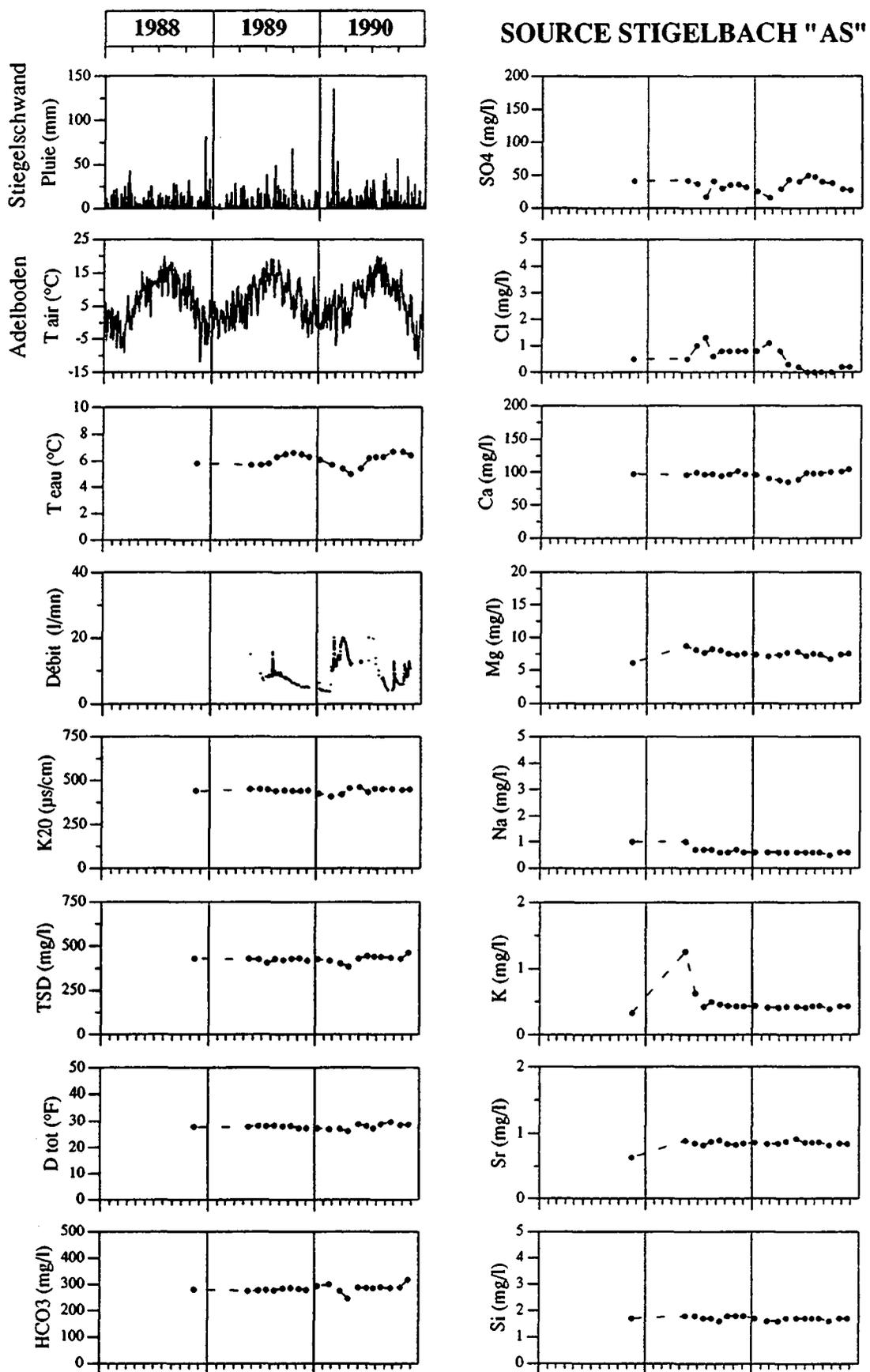


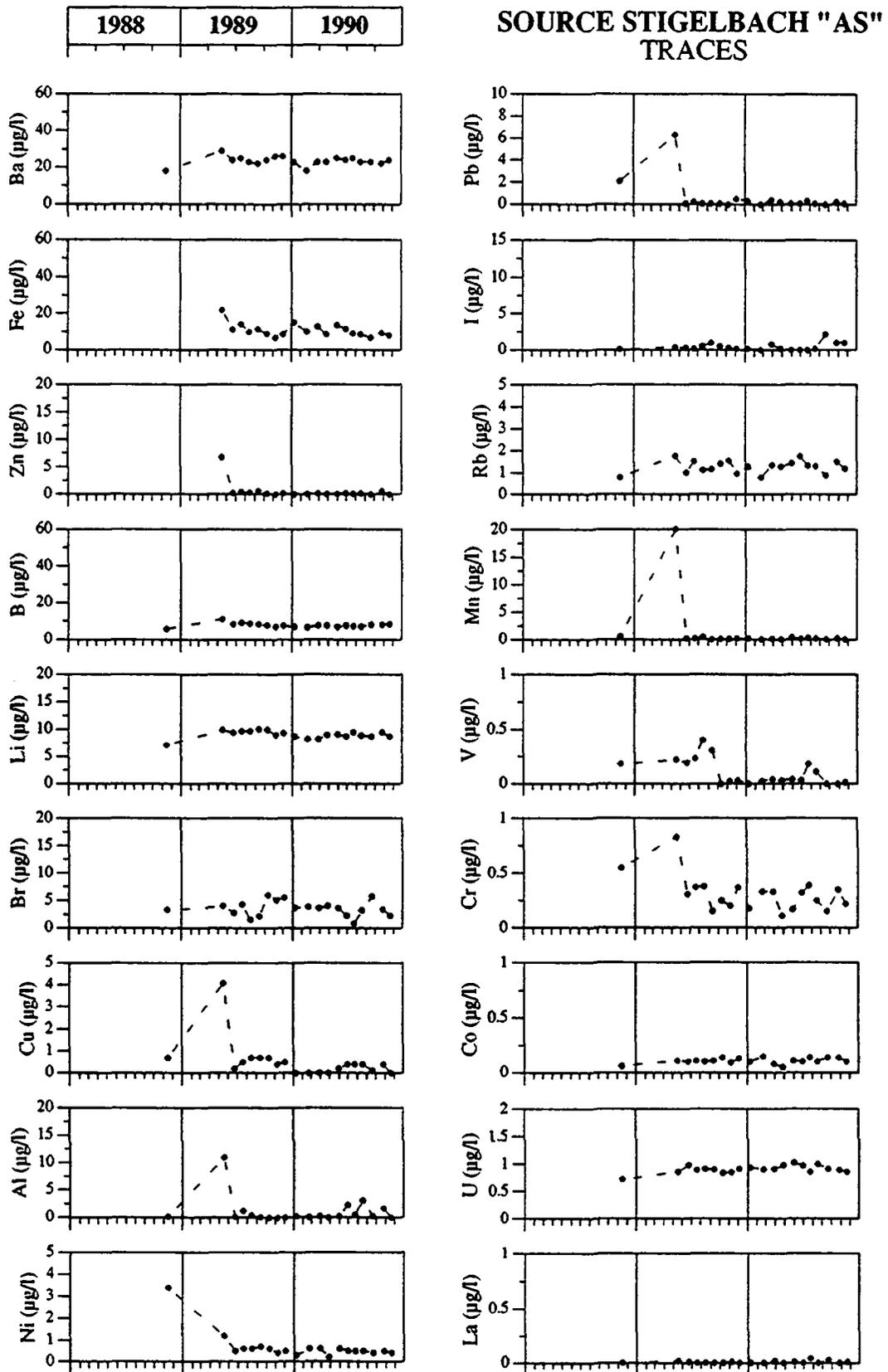
SOURCE LIOSON-AQUITYP "LLI"

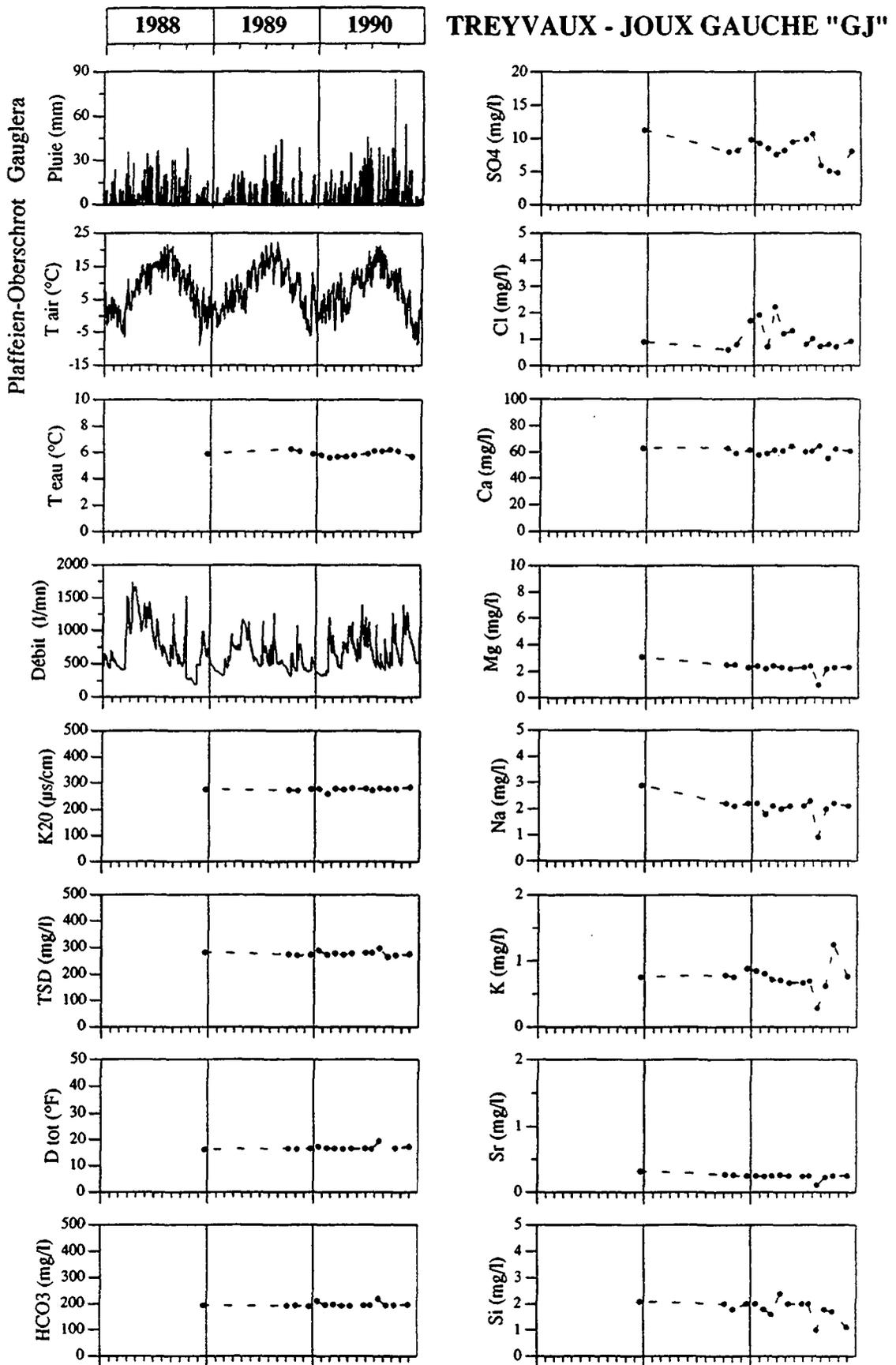


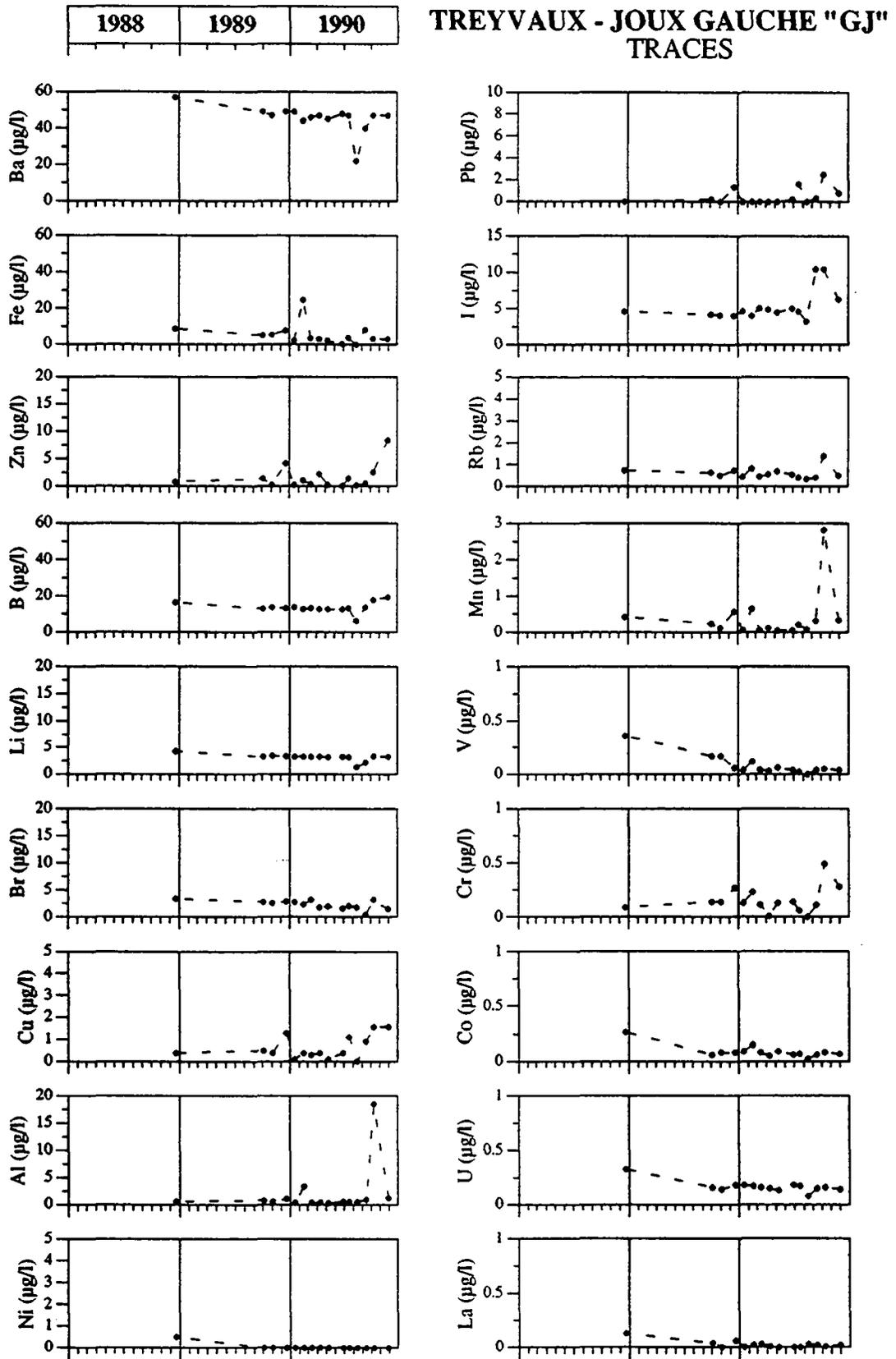


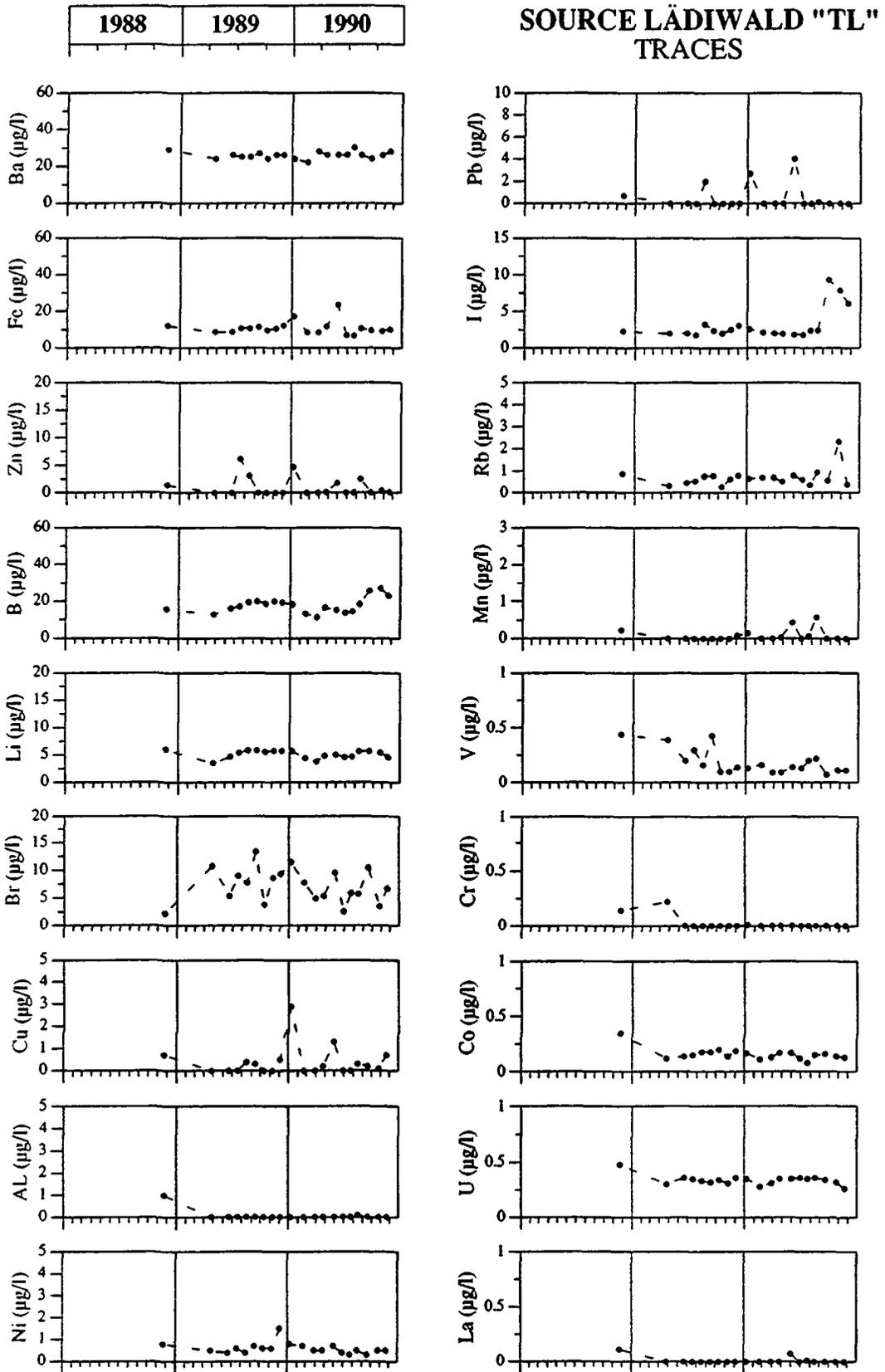


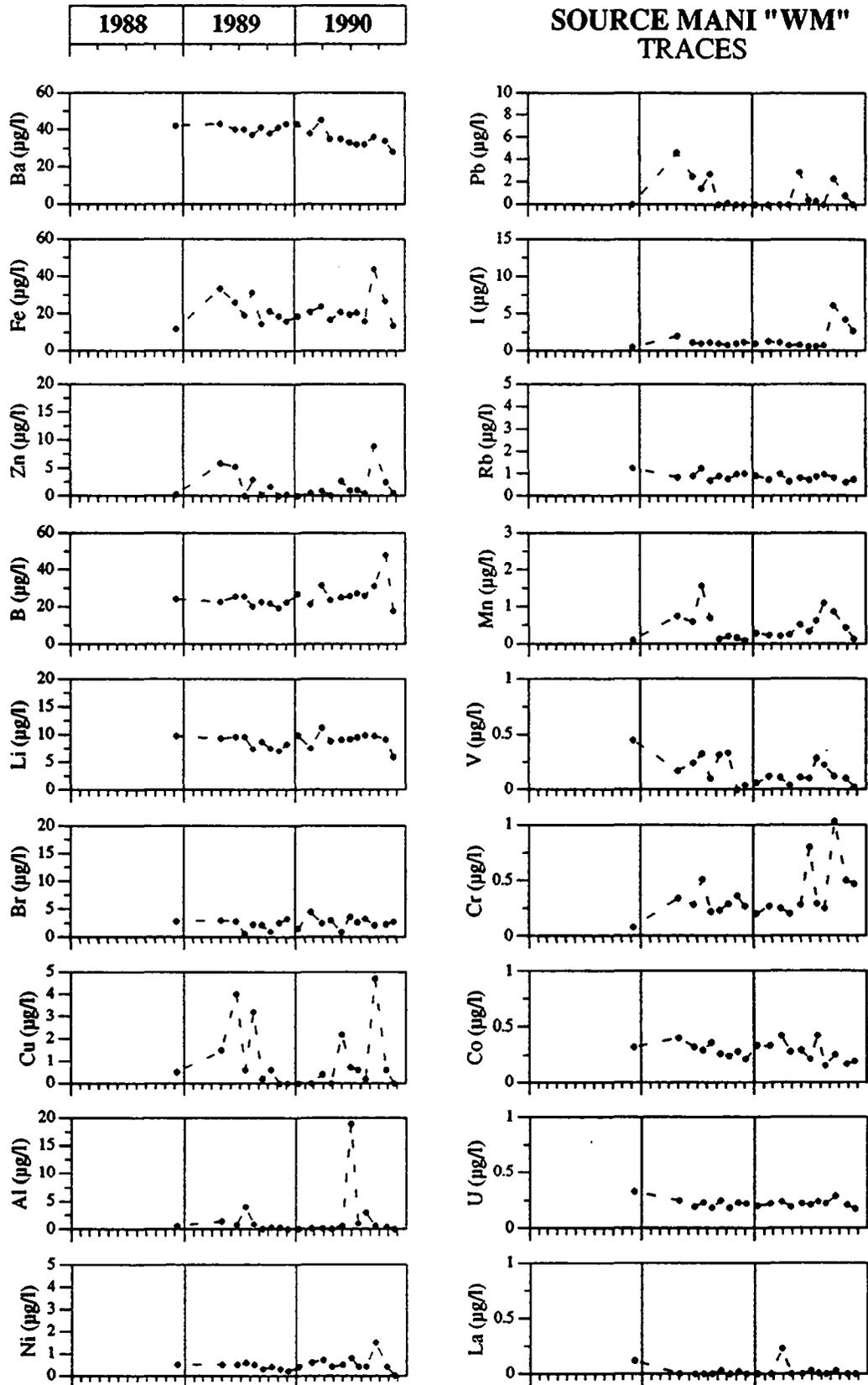


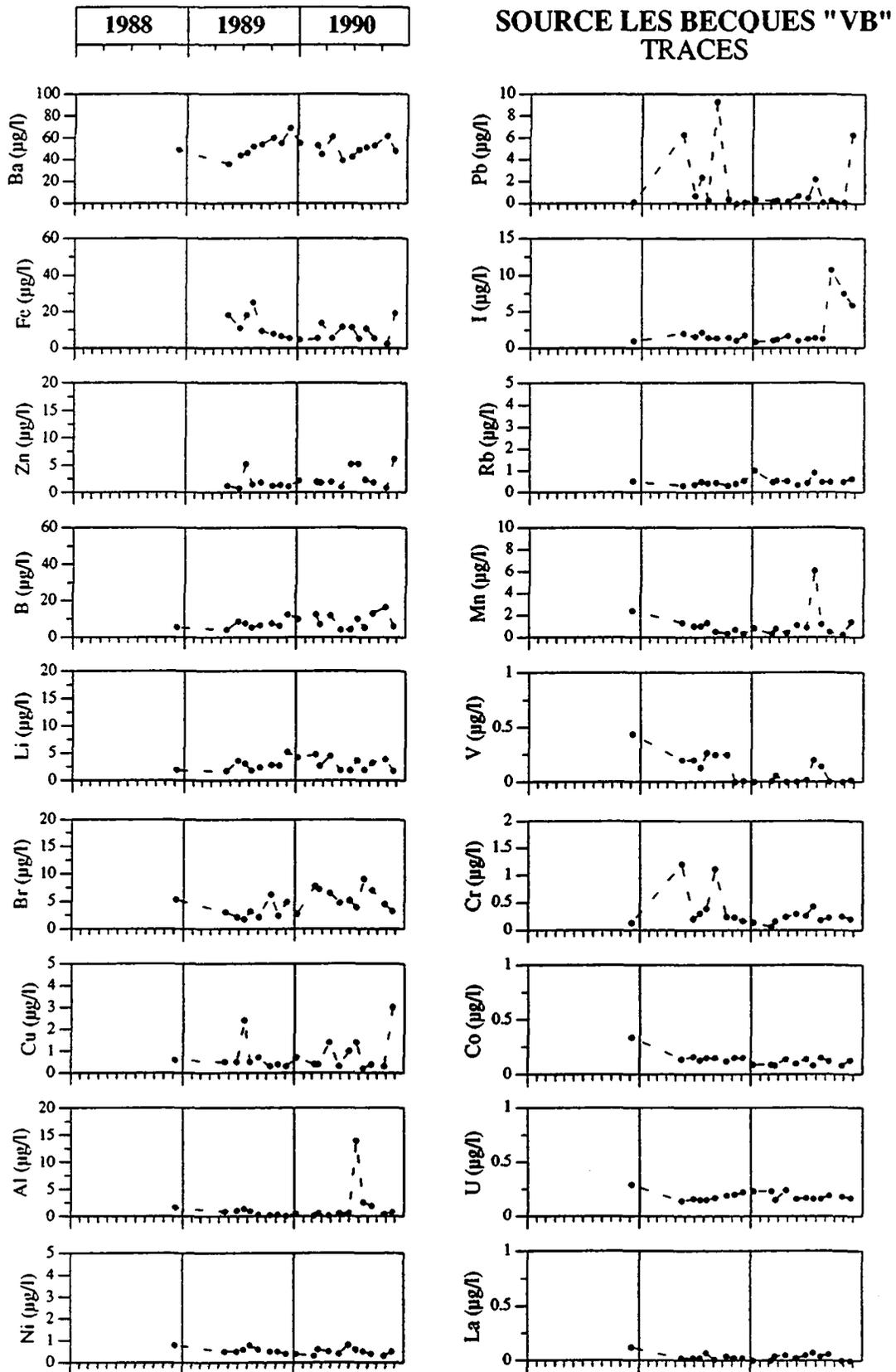












ANNEXE 4

**MATRICES DE CORRELATION DES COMPOSES
CHIMIQUES DES EAUX**



Matrices de corrélation des composés chimiques des eaux

	pH	HCO3	SO4	Cl	Ca	Mg	Na	Sr	K	SI	TSD	Ba	(Fe)	B	Li	(Br)	(Zn)	Rb	(Al)	Ni	(I)	Mn	Cu	U	Cr	V	Co	(La)	
pH		0.14	-0.75	0.68	0.12	-0.36	0.39	-0.30	-0.35	-0.04	0.12	0.20	-0.27	-0.41	-0.34	0.09	-0.19	-0.39	-0.47	0.15	0.12	-0.41	-0.31	0.54	-0.48	0.00	-0.34	0.62	
HCO3			0.26	0.30	0.98	0.58	0.66	0.56	0.05	0.74	1.00	0.64	-0.47	0.33	0.59	-0.72	-0.67	0.70	-0.70	-0.17	0.17	-0.41	-0.68	0.27	-0.63	-0.10	-0.28	0.04	
SO4				-0.30	0.27	0.41	0.04	0.45	0.45	0.24	0.29	0.20	0.13	0.76	0.55	-0.14	-0.26	0.51	0.09	-0.20	0.29	0.21	-0.13	-0.29	0.05	-0.14	0.38	-0.51	
Cl					0.26	-0.11	0.51	-0.23	-0.02	0.19	0.29	0.33	-0.68	0.04	0.05	-0.23	-0.22	-0.14	-0.53	-0.44	0.40	-0.68	-0.23	0.48	-0.65	0.06	-0.41	0.36	
Ca						0.48	0.59	0.60	-0.02	0.63	0.99	0.52	-0.46	0.28	0.63	-0.71	-0.66	0.68	-0.70	-0.16	0.12	-0.44	-0.71	0.33	-0.61	-0.15	-0.26	0.06	
Mg							0.40	0.23	0.62	0.86	0.57	0.66	-0.07	0.48	0.42	-0.43	-0.45	0.62	-0.18	-0.20	0.26	0.11	-0.27	-0.33	-0.06	-0.07	-0.22	-0.44	
Na								-0.14	0.12	0.46	0.64	0.84	-0.27	0.56	0.45	-0.44	-0.30	0.22	-0.64	0.21	0.34	-0.17	-0.30	0.34	-0.65	0.36	-0.03	0.53	
Sr									-0.25	0.41	0.57	-0.01	-0.27	0.06	0.25	-0.50	-0.42	0.78	-0.23	-0.30	-0.27	-0.26	-0.40	-0.04	-0.25	-0.24	-0.01	-0.39	
K										0.37	0.08	0.45	0.27	0.44	0.14	0.27	-0.29	-0.07	0.30	-0.26	0.78	0.35	-0.12	-0.46	0.37	-0.38	-0.05	-0.57	
SI											0.73	0.69	-0.30	0.28	0.32	-0.54	-0.54	0.68	-0.38	-0.36	0.25	-0.15	-0.39	-0.04	-0.29	-0.16	-0.48	-0.37	
TSD												0.62	-0.46	0.34	0.60	-0.70	-0.69	0.69	-0.69	-0.20	0.20	-0.41	-0.69	0.27	-0.61	-0.14	-0.28	0.00	
Ba													0.62	-0.06	0.20	-0.26	-0.40	0.27	-0.33	0.09	0.56	0.09	-0.29	-0.09	-0.39	0.16	0.02	0.12	
(Fe)														-0.01	-0.30	0.75	0.24	-0.41	0.62	0.65	0.14	0.93	0.24	-0.30	0.75	-0.19	0.39	-0.15	
B															0.53	-0.25	-0.16	0.37	-0.13	0.03	0.39	0.15	-0.01	-0.23	-0.28	0.34	0.50	-0.01	
Li																-0.61	0.19	-0.79	0.62	0.32	0.34	0.57	0.19	-0.21	0.64	-0.36	0.24	-0.13	
(Br)																		-0.44	0.61	0.24	-0.34	0.40	0.96	-0.15	0.44	0.58	0.31	0.28	
(Zn)																				-0.48	-0.27	-0.30	-0.36	0.00	-0.44	0.06	-0.12	-0.30	
Rb																				0.06	0.11	0.71	0.67	-0.66	0.88	-0.06	0.37	-0.39	
(Al)																					-0.23	0.58	0.11	0.07	0.14	0.32	0.48	0.56	
Ni																						0.15	-0.25	-0.10	0.09	-0.40	-0.05	-0.22	
(I)																							0.45	-0.46	0.76	0.03	0.45	-0.17	
Mn																								-0.33	0.47	0.59	0.34	0.11	
Cu																										-0.45	-0.12	-0.50	0.46
U																											-0.32	0.09	-0.49
Cr																											-0.48	0.63	
V																											-0.48	0.63	
Co																											-0.48	0.63	
(La)																											-0.48	0.63	

ANNEXE 4A: Matrice de corrélation des exutoires du flysch du Nésen (s.s.)

ANNEXE 5

**ECHANTILLONS DE ROCHES ET ANALYSES
CHIMIQUES DES LIXIVIATS**



N° échantillon / par.	Description roche	K20 (final) [μS/cm]	pH (final) [-]
Flysch de Frutigen			
F1	Conglomérat polygénique à ciment calcaire	800.0	5.9
F2	Schiste mameux	960.0	6.0
F3	Grès schisteux & veine de calcite	1060.0	6.0
F4	Schiste ardoisier peu calcaire	644.0	5.9
F5	Grès calcaire schisteux	1000.0	6.0
F6	Microconglomérat polygénique à ciment calcaire	1036.0	6.0
F7	Schiste ardoisier peu calcaire	470.0	5.8
F8	Conglomérat polygénique (séd., r. vertes) à ciment calcaire	1010.0	6.0
F9	Conglomérat polygénique à ciment calcaire	800.0	6.0
F10	Grès grossier calcaire	890.0	6.0
Flysch du Niesenkulm			
N1	Microconglomérat polygénique à ciment calcaire	910.0	6.0
N2	Grès calcaire schisteux	930.0	5.9
N3	Calcaire plaqueté	980.0	6.0
N4	Microbrèche à ciment calcaire	960.0	6.0
N5	Calcaire plaqueté	970.0	6.0
N6	Schiste mameux	980.0	6.0
Flysch de Seron			
S1	Mame	950.0	6.0
S2	Dépôt de fissure (argile & calcaire)	1150.0	6.0
S3	Schiste mameux	950.0	6.0
S4	Calcaire compact	950.0	6.0
S5	Brèche polygénique à ciment calcaire	920.0	6.0
S6	Conglomérat polygénique à ciment calcaire	940.0	6.0
S7	Schiste mameux	890.0	5.9
S8	Calcaire silteux plaqueté	1040.0	6.0
S9	Calcarénite	1010.0	6.0
S10	Schiste mameux	840.0	5.9
Tunnel d'Arnon			
F(N,S)1	Schiste calcaire	990.0	5.9
F(N,S)2	Tuf calcaire de fissures	850.0	5.9
F(N,S)3	Calcaire massif & plaqueté	890.0	6.0
F(N,S)4	Calcaire plaqueté & schiste mameux	775.0	5.9
Flysch du Gurnigel			
G1	Grès fin calcaire	1055.0	6.0
G2	Grès fin, peu calcaire	685.0	5.8
G3	Grès fin calcaire et schiste mameux	845.0	6.0
G4	Schiste gréseux calcaire	930.0	6.0
G5	Mame et grès calcaire	995.0	6.0
G6	Grès fin, peu calcaire	745.0	5.9

N° échantillon / par.	Eh (final)	HCO3	SO4	NO3	Cl	F	Ca
	[mV]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Flysch de Frutigen							
F1	250	656.4	12.0	1.0	22.9	0.1	168.2
F2	264	780.1	8.0	1.1	18.3	0.1	199.5
F3	224	839.9	20.4	1.2	18.5	0.1	204.3
F4	267	506.3	9.5	1.7	22.7	0.1	124.6
F5	198	705.4	68.9	0.0	16.4	0.1	195.3
F6	210	838.6	7.6	0.5	18.8	0.0	222.7
F7	232	351.3	10.5	0.0	19.1	0.1	57.4
F8	234	824.5	9.9	0.6	17.9	0.1	211.5
F9	215	654.5	9.5	0.7	21.5	0.0	177.6
F10	212	725.4	9.6	0.0	18.6	0.0	194.0
Flysch du Niesenkulm							
N1	220	752.5	7.7	0.5	18.6	0.1	185.3
N2	220	754.3	5.2	0.5	10.9	0.1	193.7
N3	200	820.5	5.0	0.6	13.2	0.1	209.1
N4	213	767.7	7.6	0.9	18.9	0.1	203.9
N5	220	786.6	27.7	0.0	26.8	0.1	205.6
N6	200	790.8	8.5	1.2	22.6	0.1	229.8
Flysch de Seron							
S1	200	760.7	8.4	1.0	17.9	0.1	135.8
S2	220	952.7	8.1	26.0	12.5	0.1	264.5
S3	224	750.2	10.7	1.1	15.3	0.1	199.5
S4	186	757.6	5.4	0.0	20.8	0.1	230.7
S5	270	755.3	6.0	0.5	20.6	0.1	283.3
S6	198	760.6	8.0	0.0	16.3	0.1	271.7
S7	215	715.0	17.0	0.0	17.3	0.1	259.6
S8	205	837.5	11.5	0.0	16.3	0.1	309.7
S9	190	833.1	6.6	0.0	17.6	0.1	308.5
S10	235	712.6	8.9	0.0	25.1	0.1	252.3
Tunnel d'Arnon							
F(N,S)1	185	804.9	7.2	0.0	29.7	0.1	303.9
F(N,S)2	215	703.3	9.4	0.0	19.5	0.1	269.9
F(N,S)3	197	739.1	7.9	0.0	14.1	0.1	272.4
F(N,S)4	204	644.2	10.6	0.0	24.9	0.1	235.5
Flysch du Gurnigel							
G1	230	845.5	5.2	0.0	12.0	0.1	323.7
G2	280	560.0	5.2	0.0	12.2	0.1	182.1
G3	225	688.0	11.0	0.0	21.8	0.1	236.3
G4	210	768.8	7.2	0.0	19.9	0.1	280.2
G5	205	829.8	7.0	0.0	16.1	0.1	315.1
G6	210	600.5	11.1	0.0	18.6	0.1	204.8

N° échantillon / par.	Mg	Na	Sr	K	Si	TSD	Ba
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[µg/l]
Flysch de Frutigen							
F1	4.0	1.9	0.8	9.9	4.5	881.9	622.5
F2	3.4	0.6	1.0	9.7	6.3	1028.0	79.0
F3	3.8	0.9	1.1	4.4	3.5	1098.1	81.8
F4	4.3	1.1	0.3	7.9	6.2	684.6	133.4
F5	3.9	2.1	0.6	11.3	3.7	1007.7	29.8
F6	4.2	1.8	1.0	5.6	3.4	1104.2	132.5
F7	13.8	1.1	0.3	14.5	5.3	473.4	61.8
F8	8.8	2.1	0.7	6.7	4.3	1086.8	341.1
F9	5.3	1.6	0.5	6.4	2.7	880.4	517.7
F10	6.0	2.0	0.8	6.5	3.6	966.5	836.9
Flysch du Niesenkuhm							
N1	6.0	2.4	1.3	5.9	4.2	984.5	76.7
N2	5.2	1.5	1.5	8.5	4.5	985.9	146.6
N3	8.6	2.5	1.4	8.0	4.8	1073.7	39.3
N4	4.0	1.2	1.6	6.0	4.1	1016.0	91.5
N5	4.0	1.0	1.9	4.6	3.4	1061.6	23.9
N6	4.6	0.7	1.9	6.3	3.8	1070.1	55.3
Flysch de Seron							
S1	7.7	1.2	1.4	5.1	4.2	943.5	33.1
S2	6.1	1.0	1.2	4.7	4.4	1281.2	60.1
S3	7.3	1.9	1.9	7.5	5.0	1000.3	190.4
S4	3.2	1.8	3.5	0.9	1.1	1025.0	39.7
S5	5.7	2.1	1.0	8.1	3.2	1085.9	65.0
S6	7.6	2.9	1.2	7.4	3.2	1078.9	157.8
S7	7.3	1.4	2.2	6.5	2.7	1029.1	39.0
S8	6.3	1.3	3.1	3.7	2.3	1191.7	35.1
S9	4.6	2.0	2.7	2.2	1.6	1178.9	97.8
S10	6.5	1.7	2.1	7.8	3.8	1021.0	35.7
Tunnel d'Arnon							
F(N,S)1	4.0	4.1	2.4	1.5	1.1	1158.9	57.2
F(N,S)2	6.5	2.9	1.2	9.9	3.3	1026.0	45.0
F(N,S)3	5.9	1.0	1.4	8.5	3.6	1054.0	57.6
F(N,S)4	4.2	2.7	1.1	6.8	3.2	933.3	56.0
Flysch du Gurnigel							
G1	4.2	2.3	1.5	3.8	3.8	1202.1	87.3
G2	10.2	2.4	0.7	10.7	3.7	787.2	58.3
G3	7.4	1.7	1.0	8.1	3.6	978.9	104.2
G4	6.9	1.9	1.3	11.2	5.7	1103.0	96.8
G5	2.4	0.5	1.4	1.5	1.2	1175.1	2215.7
G6	4.8	2.8	1.5	8.6	4.1	857.0	1038.2

N° échantillon / par.	Fe	B	Li	Br	Zn	Rb	Al
	[µg/l]						
Flysch de Frutigen							
F1	46.2	105.7	6.9	3.3	6.2	16.7	6.5
F2	17.0	84.5	6.8	0.3	3.5	12.7	0.2
F3	45.7	64.0	5.2	6.4	0.0	8.3	3.3
F4	18.3	67.6	9.2	3.9	0.3	3.8	3.0
F5	108.1	50.2	6.2	6.9	2.8	18.3	20.9
F6	14.6	90.5	5.8	10.8	0.1	9.1	0.5
F7	13.1	30.9	10.4	4.4	34.8	16.4	4.2
F8	95.1	61.1	7.2	17.7	1.5	9.2	1.7
F9	24.4	79.9	3.9	10.5	40.9	9.8	2.3
F10	13.7	74.0	3.6	14.1	13.9	8.8	1.7
Flysch du Niesenkuhl							
N1	27.4	108.9	9.3	8.7	1.4	13.3	4.1
N2	73.6	131.9	12.1	12.6	1.5	15.7	17.9
N3	117.3	92.8	9.5	9.2	3.1	16.1	1.7
N4	20.7	103.8	8.9	5.9	2.3	14.0	2.0
N5	10.9	129.0	8.3	4.1	1.3	10.9	1.0
N6	22.1	115.8	9.6	4.6	2.3	14.6	1.1
Flysch de Seron							
S1	24.4	64.3	8.1	1.3	0.3	11.4	7.8
S2	21.4	169.6	8.4	12.8	0.4	4.6	2.8
S3	69.8	78.6	16.6	8.2	4.8	18.5	14.5
S4	25.3	159.1	5.5	10.0	0.5	2.4	0.1
S5	75.0	344.3	11.7	6.3	3.3	12.2	6.6
S6	42.0	321.3	11.9	7.4	5.7	12.0	2.9
S7	30.6	236.4	7.2	8.0	3.2	9.1	4.3
S8	34.5	356.3	6.9	5.6	2.4	6.1	1.7
S9	38.1	207.0	4.1	3.8	3.7	4.1	1.9
S10	28.1	310.3	9.0	5.7	3.0	9.3	2.1
Tunnel d'Arnon							
F(N,S)1	34.4	297.4	12.6	12.1	4.3	2.7	1.5
F(N,S)2	20.9	277.4	14.4	6.9	5.4	18.6	2.3
F(N,S)3	31.7	259.6	9.2	5.3	5.1	17.4	1.1
F(N,S)4	25.7	282.2	15.6	4.2	3.7	13.2	-0.2
Flysch du Gurnigel							
G1	172.2	222.0	6.2	9.5	2.2	2.9	0.6
G2	96.4	247.2	19.1	2.1	5.5	11.8	9.5
G3	202.3	303.3	15.0	1.9	6.0	9.7	0.5
G4	217.3	227.6	16.7	2.9	7.6	12.4	1.4
G5	34.9	271.3	1.4	4.3	14.9	2.5	-0.2
G6	264.6	214.7	23.2	2.5	13.4	11.4	1.0

N° échantillon / par.	Ni	Pb	I	Mn	Cu	U	Cr
	[µg/l]						
Flysch de Frutigen							
F1	5.4	0.0	1.1	240.3	0.0	0.1	1.3
F2	4.1	0.0	0.9	130.0	0.0	0.3	0.9
F3	7.9	0.0	2.8	91.3	2.6	0.6	0.7
F4	1.6	0.0	0.1	68.5	1.0	0.2	0.5
F5	9.0	0.0	0.6	183.3	2.1	0.8	0.7
F6	2.8	0.0	2.9	79.1	8.9	0.6	0.8
F7	19.3	0.0	0.4	178.4	1.7	0.0	0.0
F8	12.7	0.0	4.8	299.1	9.3	0.4	0.3
F9	9.4	0.0	1.3	173.4	6.3	0.3	0.4
F10	11.3	0.0	0.8	220.7	15.2	0.4	0.4
Flysch du Niesenkulm							
N1	16.6	0.0	2.1	293.3	15.2	0.4	0.8
N2	15.6	0.0	1.8	258.5	9.0	0.3	1.3
N3	19.7	0.0	1.4	397.8	11.0	0.5	0.4
N4	17.9	0.0	1.9	143.8	4.9	0.4	0.4
N5	11.9	0.0	3.7	78.7	9.7	0.4	0.6
N6	5.6	0.0	2.0	82.8	17.4	0.2	0.4
Flysch de Seron							
S1	7.7	0.0	2.7	24.5	8.7	0.3	0.2
S2	5.1	0.0	6.1	86.9	20.9	0.8	0.7
S3	11.9	0.0	2.1	61.9	25.2	0.5	0.5
S4	3.6	0.0	5.7	55.0	24.7	0.1	0.6
S5	8.9	0.0	5.1	513.4	14.4	0.4	2.7
S6	15.5	0.0	5.2	221.7	15.2	0.5	2.1
S7	7.6	0.0	4.7	62.9	15.0	0.5	1.5
S8	7.0	0.0	7.5	52.3	26.1	0.6	2.4
S9	8.1	0.0	7.0	107.0	19.2	0.5	1.2
S10	11.3	0.0	3.5	81.9	28.5	0.7	1.9
Tunnel d'Arnon							
F(N,S)1	5.8	0.0	16.6	114.0	13.9	0.2	1.9
F(N,S)2	19.5	0.0	4.4	207.1	19.2	0.4	1.9
F(N,S)3	17.2	0.0	4.1	192.4	21.3	0.4	1.5
F(N,S)4	16.9	0.0	2.5	168.5	3.3	0.3	1.5
Flysch du Gurnigel							
G1	15.9	0.0	48.5	467.3	7.2	0.6	1.2
G2	22.3	0.0	2.5	523.7	3.7	0.1	2.3
G3	32.1	0.0	1.9	674.6	7.5	0.2	1.9
G4	15.2	0.0	1.9	739.0	5.8	0.3	0.9
G5	3.8	0.0	4.0	552.6	3.7	0.1	1.4
G6	11.8	0.0	1.9	988.7	5.7	0.3	1.1

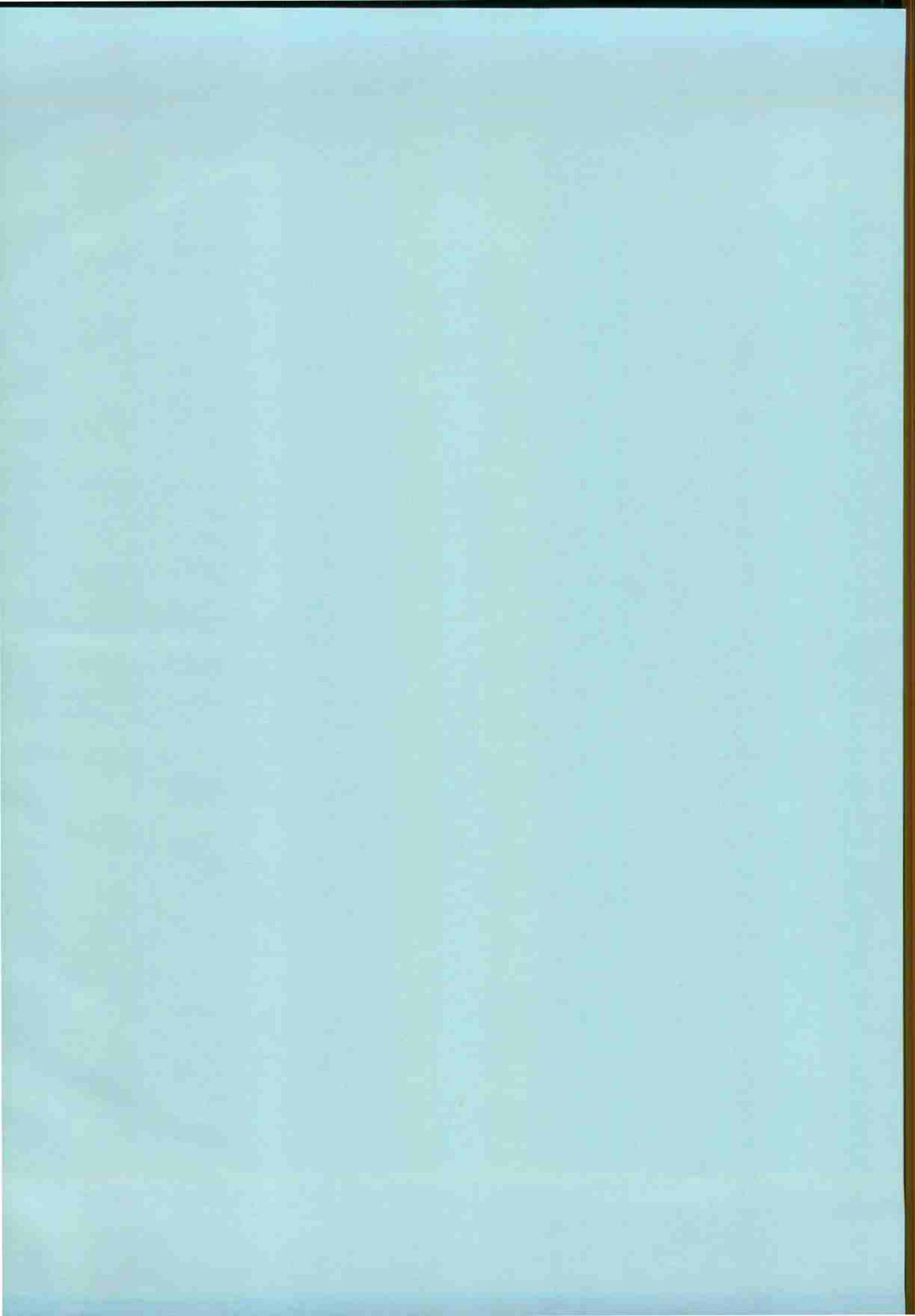
N° échantillon / par.	V	Co	La
	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
Flysch de Frutigen			
F1	1.0	161.9	0.3
F2	1.2	14.9	0.1
F3	0.4	93.0	0.0
F4	0.5	10.2	0.0
F5	0.6	332.8	0.4
F6	0.5	255.3	0.0
F7	0.3	56.5	0.0
F8	0.3	162.4	0.1
F9	0.3	322.1	0.1
F10	0.2	553.0	0.1
Flysch du Niesenkulm			
N1	0.4	200.9	0.1
N2	0.8	115.1	0.1
N3	0.3	168.7	0.2
N4	0.4	117.5	0.0
N5	0.3	66.1	0.0
N6	0.6	35.8	0.0
Flysch de Seron			
S1	0.8	39.3	0.0
S2	0.3	20.1	0.0
S3	1.4	46.3	0.1
S4	0.2	39.1	0.0
S5	0.5	68.3	0.1
S6	0.5	214.0	0.1
S7	0.5	48.2	0.1
S8	0.9	44.3	0.0
S9	0.5	75.8	0.0
S10	0.3	111.7	0.1
Tunnel d'Arnon			
F(N,S)1	0.3	210.1	0.0
F(N,S)2	0.4	152.0	0.1
F(N,S)3	0.3	91.1	0.1
F(N,S)4	0.2	213.7	0.1
Flysch du Gurnigel			
G1	0.2	195.6	0.1
G2	0.8	58.4	0.3
G3	0.4	92.0	0.1
G4	0.2	110.9	0.1
G5	0.1	58.5	0.1
G6	0.2	72.2	0.2

ANNEXE 6

**PARAMETRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DU
RESEAU AQUITYP
(TOURNNEE DE NOVEMBRE 1989)**



CURRICULUM VITAE



CURRICULUM VITAE

Nom, prénom : BASABE-RODRIGUEZ Pedro Pablo
Date de naissance : 29 juin 1954
Origine : Quito - Equateur

FORMATION

	<i>Ecoles suivies</i>	<i>Titre obtenu</i>
1960 - 72	Ecole primaire, Collège et Gymnase "La Salle". Quito - Equateur.	Baccalauréat.
1972 - 78	"Escuela Politécnica Nacional" (EPN). Quito - Equateur.	<i>Ingénieur géologue dipl.</i>
1980 - 82	"Escuela Politécnica Nacional" (EPN). Quito - Equateur.	Attestation de fin d'études en génie industriel.
1984 - 86	Université de Neuchâtel - Suisse.	<i>Hydrogéologue dipl.</i>

LANGUES

- Espagnol: langue maternelle
- Français: couramment parlé et écrit
- Anglais: très bonnes connaissances
- Allemand: niveau moyen

EXPERIENCE

- Oct. 78 - juin 79 *Technicien de sismologie et volcanologie.* Projet du Conseil de Sécurité Equatorien et de l'Escuela Politécnica Nacional. Quito - Equateur.
- Juin 79 - Oct. 79 *Inspecteur des forages profonds.* Projet hydroélectrique Guayllabamba. Etudes de faisabilité. Electrowatt. Quito - Equateur.
- Oct. 79 - Juin 83 *Géologue de projet.* Projet hydroélectrique Paute-Mazar. Etudes de faisabilité et dessins définitifs. Institut Equatorien d'Electricité (INECEL), Quito - Equateur avec Electrowatt, Motor Columbus et Saltzgitler.
- Oct. 83 - Juill. 87 *Assistant-étudiant.* Institut de sols, roches et fondations - EPFL, Lausanne. Formation en génie civil et cours de troisième cycle en hydrogéologie, Université de Neuchâtel.
- Juill. 87 - *Assistant-doctorant.* Laboratoire de Géologie - EPFL, Lausanne.

PUBLICATIONS

- BASABE, P. & DAVILA, O. (1977). "Un estudio sobre réplicas de terremotos en el Ecuador". Bulletin of Panamerican Institute of Geography and History.
- HALL, M., BASABE, P. & YEPEZ, H. (1980). "Estudio de las fallas tectónicas y la actividad microsísmica del valle interandino, entre Pastocalle y Ambato". "EPN"-Journal, vol. 2, p. 57-78. (Prix "Escuela Politécnica Nacional 1982"). Quito - Equateur.
- BASABE, P. (1980). "Estudio geológico estructural entre Perucho y Guayllabamba, provincia de Pichincha". Travail de diplôme comme ingénieur. Escuela Politécnica Nacional. Quito - Equateur.
- PARRIAUX, A., DUBOIS, J.D., MANDIA, Y., BASABE, P & BENSIMON, M. (1990). "The Aquityp project: towards an aquifer typology in the alpine orogen". 22e congrès de l'AIH, vol. XXII, p. 254-262. Lausanne - Suisse.
- BASABE, P. & BIELER, G. (1990). "Différenciation des écoulements du Malm inférieur et du Dogger supérieur dans le Jura vaudois". 22e congrès de l'AIH, vol. XXII, p. 383-391. Lausanne - Suisse.
- BASABE, P. (1990). "Hydrochemical characterization of the Flysch groundwater of the Niesen tectonic nappe (Swiss prealps)". 22e congrès de l'AIH, vol. XXII, p. 514-524. Lausanne - Suisse.
- BASABE, P. (en présentation). "Typologie des eaux souterraines du flysch de la nappe tectonique du Niesen, Préalpes suisses". Thèse de doctorat, EPFL-GEOLEP.

Lausanne, le 26 août 1992