

**TYPOLOGIE DES AQUIFERES DU CRISTALLIN:
EXEMPLE DES MASSIFS DES AIGUILLES ROUGES ET DU
MONT-BLANC
(FRANCE, ITALIE ET SUISSE)**

THESE No 950 (1991)

PRESENTEE AU DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES

PAR

JEAN-DANIEL DUBOIS

Géologue et hydrogéologue diplômé des Universités de Genève et Neuchâtel
originaire de Genève (GE)

acceptée sur proposition du jury :

Prof. J. H. Gabus, rapporteur
Prof. B. Blavoux, corapporteur
Prof. A. Parriaux, corapporteur
Prof. J. M. Zuppi, corapporteur
Prof. F. Zwahlen, corapporteur

Lausanne, EPFL
1992

TABLE DES MATIERES

RESUME.....	i
ABSTRACT.....	v
REMERCIEMENTS.....	ix
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xvii
LISTE DES ANNEXES.....	xxi
1. INTRODUCTION.....	1
2. OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	3
3. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE.....	5
3.1 Géographie physique, conditions météorologiques et activités humaines.....	5
3.2 Géologie et hydrogéologie générale.....	5
4. METHODOLOGIE ET ACQUISITION DES DONNEES.....	9
4.1 Historique, études antérieures.....	9
4.2 Travaux de terrain.....	10
4.2.1 Réseaux d'observation des eaux souterraines.....	10
4.2.1.1 Réseau I.....	10
4.2.1.2 Réseau II.....	10
4.2.1.3 Réseau III.....	11
4.2.2 Réseaux d'observations des eaux de surface.....	12
4.2.2.1 Les torrents.....	12
4.2.2.2 La couverture neigeuse.....	12
4.2.2.3 Les pluies.....	12
4.2.2.4 Les eaux des sols.....	12
4.2.3 Equipement limnigraphique des sources principales.....	12
4.2.4 Mesures de terrain et matériel utilisé.....	13
4.3 Analyses en laboratoire.....	13
4.3.1 Choix des paramètres chimiques.....	14
4.3.2 Précision des mesures et analyses.....	14
4.3.3 Contrôle des mesures physico-chimiques.....	16
4.3.4 Fluorescence X.....	16
4.3.5 Test de mise en solution de roche (lixiviation).....	16
4.3.6 Analyse des traceurs artificiels.....	17
4.4 Représentation des données.....	17

4.4.1	Représentation cartographique.....	17
4.4.2	Diagrammes géochimiques.....	17
4.4.3	Graphes de corrélations physico-chimiques	17
4.5	Statistiques	18
4.6	Equilibre chimique des eaux souterraines.....	18
5.	GEOLOGIE.....	19
5.1	Introduction.....	19
5.2	Evolution géologique.....	19
5.3	Description géologique et pétrographique des formations	19
5.3.1	Massif des Aiguilles Rouges	20
5.3.2	Massif du Mont-Blanc	21
5.3.3	Minéralisations.....	22
5.4	Unités hydrogéologiques principales.....	23
5.5	Composition géochimique des roches.....	24
5.5.1	Test de mise en solution de roche (lixiviats)	26
5.6	Tectonique	29
5.6.1	Introduction.....	29
5.6.2	Tectonique anté-secondaire.....	29
5.6.3	Tectonique alpine	30
5.6.4	Conclusion	30
6.	HYDROLOGIE DE SURFACE.....	31
6.1	Pluies et neiges.....	32
6.2	Les torrents.....	35
6.3	Les écoulements dans les sols.....	38
7.	LES EAUX SOUTERRAINES.....	41
7.1	Classification des eaux souterraines.....	41
7.1.1	Classification thermique	41
7.1.2	Classification chimique	41
7.2	Variations temporelles des principales sources.....	43
7.2.1	Introduction.....	43
7.2.2	Séries temporelles, interprétations graphiques	44
7.2.3	Séries temporelles, analyse statistique simple de la variabilité des principaux paramètres.....	48
7.2.4	Conclusions.....	49
7.3	Variations spatiales des paramètres hydrogéologiques à l'échelle des massifs et origine de la minéralisation des eaux	50

7.3.1	Amplitude de la variabilité spatiale	50
7.3.2	Etude systématique de la variabilité spatiale des paramètres hydrogéologiques	50
7.3.2.1	Le débit	52
7.3.2.2	La température	56
7.3.2.3	Le pH.....	59
7.3.2.4	La minéralisation totale (TSD).....	60
7.3.2.5	Les hydrogénocarbonates (HCO_3^-).....	61
7.3.2.6	Le calcium (Ca^{++})	65
7.3.2.7	Les sulfates (SO_4^-)	67
7.3.2.8	La silice (SiO_2).....	70
7.3.2.9	Le sodium (Na^+).....	73
7.3.2.10	Les chlorures (Cl^-).....	75
7.3.2.11	Le fluor	78
7.3.2.12	Le lithium.....	81
7.3.2.13	Le potassium.....	83
7.3.2.14	Le magnésium	86
7.3.2.15	Le strontium.....	88
7.3.2.16	L'arsenic	90
7.3.2.17	Le rubidium.....	92
7.3.2.18	Le molybdène	94
7.3.2.19	Le baryum.....	97
7.3.2.20	Le tungstène.....	99
7.3.2.21	L'uranium	101
8.	TRAÇAGES ARTIFICIELS DES EAUX SOUTERRAINES	107
8.1	Finhaut	108
8.2	Massif de Bovine.....	110
8.3	Aiguille du Midi et Helbronner	111
8.4	Bilan des essais de traçage	112
9.	SYNTHESE TYPOLOGIQUE DES AQUIFERES	113
9.1	Typologie hydraulique des écoulements souterrains.....	113
9.2	Typologie géochimique	114
9.2.1	Analyses en composantes principales des paramètres chimiques des eaux souterraines.....	119
9.2.1.1	Analyse des éléments majeurs	119
9.2.1.2	Analyse des éléments en traces	119
9.3	Test de la représentabilité de la station Brocard du réseau AQUITYP.....	122
9.3.1	Représentabilité par rapport au régime hydraulique.....	122
9.3.2	Représentabilité par rapport à la classification géochimique	122
9.3.3	Représentabilité par rapport à l'étendue des paramètres géochimiques	122

10.	COMPARAISON AVEC LES AQUIFERES D'AUTRES MASSIFS CRISTALLINS.....	125
10.1	Introduction.....	125
10.2	Comparaison de la typologie géochimique.....	125
10.3	Comparaison des différents aquifères cristallins au niveau des divers composés en solution.....	126
11.	COMPARAISON AVEC LES AUTRES AQUIFERES DU RESEAU AQUITYP	131
11.1	Introduction.....	131
11.2	Comparaison de la typologie géochimique selon les classes de majeurs.....	132
11.3	Comparaison de l'étendue des paramétries des différents aquifères cristallins.....	133
12.	CONCLUSION.....	137
	BIBLIOGRAPHIE.....	139
	ANNEXES.....	145
	CURRICULUM VITAE	321
	LISTE DES PUBLICATIONS	323

RESUME

Cette étude hydrogéologique des aquifères du cristallin des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges s'inscrit dans le cadre du projet AQUITYP mené depuis plusieurs années au Laboratoire de géologie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (GEOLEP).

Elle a impliqué l'observation, l'échantillonnage et l'analyse systématique de plus de 160 points d'eau souterraine et de surface. Une grande partie des émergences d'eau souterraine sont en relation avec de très nombreuses galeries et tunnel qui traversent les massifs de la région.

Les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, situés aux frontières française, italienne et suisse, font partie des massifs "cristallins externes" de l'arc alpin occidental. Ils sont formés d'un cortège de roches métamorphiques et éruptives complexes, essentiellement de type gneissique et granitique d'âge hercynien.

L'étude des eaux souterraines de la région a nécessité la mise en place d'un important réseau d'observation, à différents niveaux d'investigations, dans le but d'acquérir des informations sur les variations temporelles et spatiales des paramètres hydrogéologiques. Les eaux souterraines et de surface (torrents, neiges, pluies et eaux de percolation des sols) ainsi que des roches caractéristiques ont été l'objet d'analyses chimiques complètes (éléments majeurs et en traces). Enfin, des tests de mise en solution de poudre de roche (lixiviation) ont été effectués dans le but de simuler en laboratoire la minéralisation des eaux souterraines et de préciser l'origine des ions en solution.

L'analyse chimique des éléments majeurs et en traces des eaux de surface (neiges, pluies et sols) a montré qu'à l'exception des chlorures, des nitrates et du baryum, les composés chimiques possédaient des concentrations nettement inférieures aux eaux souterraines les moins minéralisées observées sur l'ensemble des massifs. Par contre, les eaux des torrents ont présenté des caractéristiques relativement semblables aux eaux souterraines.

Plus de 85 % des eaux souterraines observées possèdent des températures inférieures à 12 °C, alors que les eaux subthermales (entre 12 et 20 °C) et thermales (> 20 °C) représentent respectivement 5 et 10 % des émergences.

Les débits des sources observés en surface comme en galeries peuvent atteindre plus de 4000 l/mn. La minéralisation totale des eaux souterraines étudiées est en moyenne de 90 mg/l et varie de 20 à 650 mg/l.

La classification chimique des eaux souterraines fait apparaître que plus de 90 % des sources sont de type bicarbonaté calcique, 8.5 % de type sulfaté calcique et 1.5 % de type chloruré sodique.

L'étude des variations temporelles indique, dans tous les cas observés, d'importantes fluctuations des débits, dont les crues sont essentiellement en relation avec les périodes de fortes fontes des neiges en altitude (mai à juillet), alors que les basses eaux se manifestent parallèlement aux très faibles températures de l'air (l'ensemble des précipitations étant stockées sous forme de neige). Contrairement aux variations importantes des débits, les températures ont montré d'une manière générale une forte stabilité de leur comportement, alors que la minéralisation des eaux des aquifères granitiques a été l'objet de faibles, mais significatives variations.

Des essais de traçage en haute montagne ont notamment mis en évidence des circulations à partir de la pointe Helbronner (massif du Mont-Blanc italien, altitude 3470 m) jusque dans le tunnel sous le Mont-Blanc. Ce traçage a démontré le caractère discontinu du pergélisol et des vitesses très élevées de transit des eaux souterraines.

L'observation de la variation spatiale de l'ensemble des paramètres physico-chimiques disponibles a permis de déboucher sur une synthèse typologique des principaux sous-types d'aquifères du cristallin des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

Typologie hydraulique:

- Les aquifères granitiques ont montré des perméabilités beaucoup plus élevées, dues à l'influence à la fois de micro et de macrodiscontinuités tectoniques.
- Les aquifères gneissiques sont caractérisés essentiellement par des écoulements homogènes à faible perméabilité, liée à des systèmes de microdiscontinuités tectoniques.

Typologie hydrochimique:

L'analyse des éléments majeurs et en traces a mis en évidence un certain nombre de marqueurs naturels spécifiques aux trois principaux sous-types d'aquifères:

- Les eaux issues des aquifères granitiques du Mont-Blanc sont très fortement marquées par la présence de molybdène, de tungstène, de fluor, d'uranium et de sodium. L'uranium est d'autant mieux représenté s'il est en relation avec des aquifères profonds à renouvellements rapides (eaux "jeunes").
- Les eaux des aquifères gneissiques du massif du Mont-Blanc présentent dans l'ensemble une légère anomalie en arsenic, alors que les aquifères gneissiques des Aiguilles Rouges sont marqués par des concentrations sensiblement plus élevées en baryum et magnésium que dans les autres types d'aquifères.

Les marqueurs de ces principaux sous-types ont été vérifiés et confirmés par une analyse en composantes principales.

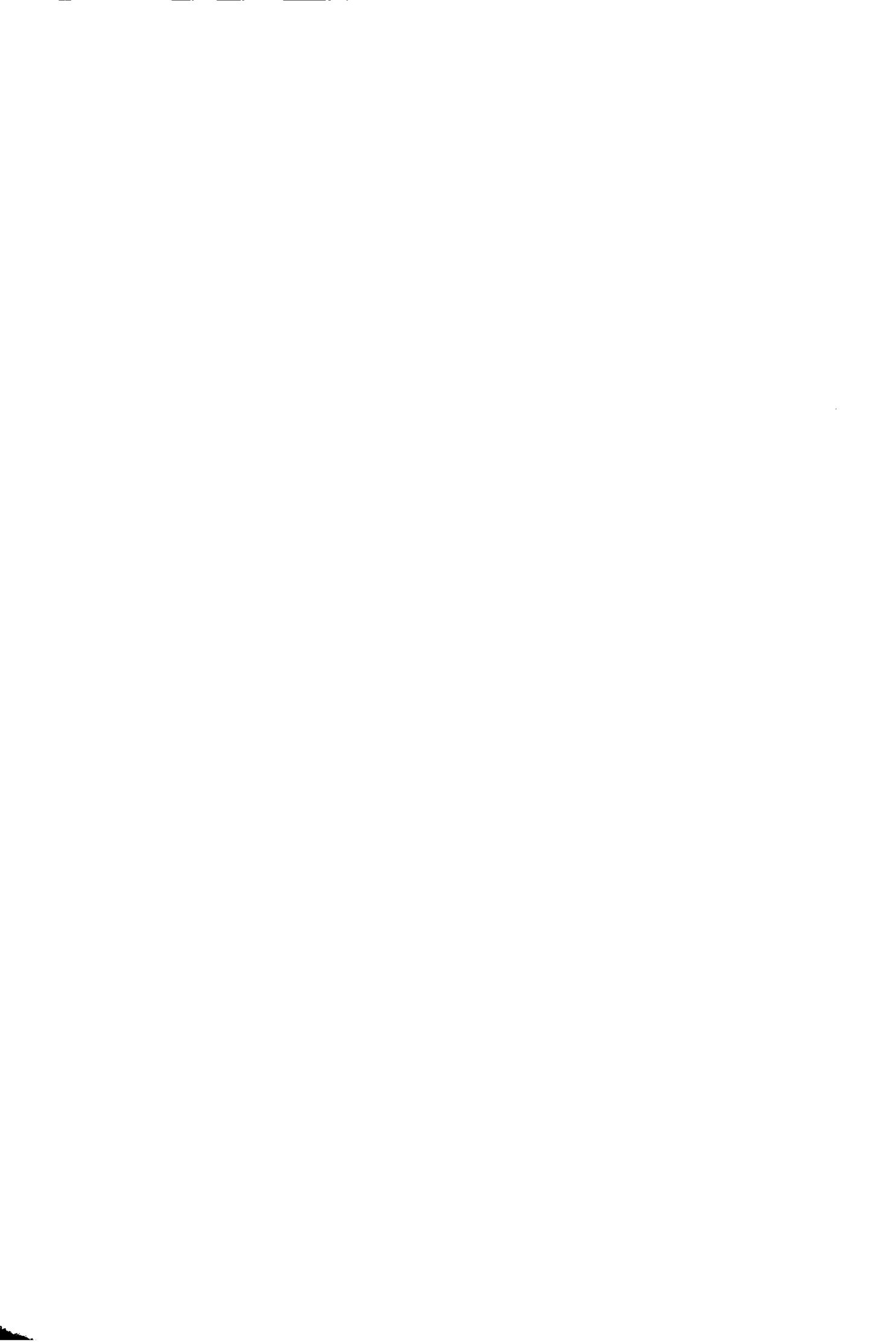
La source du Brocard (Martigny, VS), qui avait été installée, au début du projet AQUITYP, pour caractériser a priori les aquifères du cristallin, s'est révélée, au terme de cette recherche, représentative des caractéristiques des aquifères gneissiques des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, mais non représentative des aquifères granitiques profonds du Mont-Blanc.

La comparaison avec d'autres aquifères cristallins de l'arc alpin occidental a montré que les principaux marqueurs des aquifères granitiques du Mont-Blanc (fluor, uranium et sodium) ont été également retrouvés dans les massifs de l'Aar et de Belledonne. Il n'existe cependant que très peu de parenté avec les aquifères profonds du socle cristallin du nord de la Suisse, qui sont le siège de circulations lentes d'eau thermominérale profonde, par opposition aux aquifères des massifs du Mont-Blanc, de l'Aar et de Belledonne caractérisés par des écoulements à fort taux de renouvellement.

La comparaison avec les autres groupes d'aquifères du réseau AQUITYP n'a montré aucun lien de parenté hydrochimique significatif. Les eaux très faiblement minéralisées du cristallin, face à des eaux de la géotransverse

d'AQUITYP, globalement beaucoup plus chargées en sels minéraux, ont fait apparaître très nettement que l'arsenic, le rubidium, le tungstène et l'uranium présentent des étendues de concentration supérieures à celles du réseau de référence. Ces derniers éléments peuvent être considérés, en première approche, comme des marqueurs privilégiés du cristallin face à des eaux souterraines plus minéralisées. Ils devront être vérifiés par l'étude d'autres points d'eau qui compléteront l'actuel réseau AQUITYP.

Les connaissances acquises des structures aquifères simples étudiées dans le cristallin des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges permettent d'aborder et de mieux comprendre des conditions hydrogéologiques complexes, qui font intervenir très souvent des phénomènes de mélange entre plusieurs types d'aquifères à caractères lithologiques différents. Elles constituent des outils qui peuvent permettre de déterminer l'origine des venues d'eau, en particulier dans le cadre de travaux souterrains.



ABSTRACT

This hydrogeological study of the crystalline aquifers of the Mont-Blanc and the Aiguilles Rouges massifs is part of the AQUITYP project, which has been carried out at the Geology Laboratory of the Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne (GEOLEP).

This study has encompassed the observation, sampling and systematic chemical analysis of more than 160 surface and groundwaters. Many of the springs are located within the numerous galleries and tunnels which cut the crystalline massifs of this region.

The Mont-Blanc and the Aiguilles Rouges massifs, situated at the borders of France, Switzerland and Italy, are part of the "external crystalline" massifs of the western alpine arc. They are formed by a succession of metamorphic and complex eruptive rocks, mostly of the gneissic and granitic types of the Hercynien Age.

The study of the regional groundwater systems necessitated the setting of an extensive observation network, with different investigative levels, with the aim of acquiring information on the time and space variations of the hydrogeological parameters. The groundwaters and surface waters (streams, snow, rain and soil water), as well as the characteristics of the rocks, were the object of complete chemical analyses (both major and trace elements). Finally, laboratory tests of rock powder dissolution (lixivation) were carried out in order to simulate the mineralization of the groundwater and to decipher the origin of the dissolved ions.

The chemical analyses of the major and trace elements of the surface waters (snow, rain and soil) showed that, with the exception of chloride, nitrate and barium, the dissolved solids revealed much lower concentrations than the least mineralized groundwater observed in all of the massifs. However, stream waters showed relatively similar characteristics to those of the groundwaters.

More than 85% of the observed groundwaters were at a temperature less than 12°C, while the subthermal (between 12 and 20°C) and thermal water (>20°C) represented 5 and 10% of the springs, respectively.

The springs observed at the surface as well as in the galleries could reach more than 4000 l/min. The total mineralization of the groundwaters studied varied from 20 to 650 mg/l, with an average of 90 mg/l.

The chemical classification of the groundwaters showed that more than 90% of the springs were of the calcium bicarbonate type, 8.5% of the calcium sulfate type and 1.5% of the sodium chloride type.

Time variations studies showed large fluctuations of flow rate in all of the observed cases, with peak values generally corresponding to periods of important snow thaw at high altitude (May to July), while the lower values corresponded roughly to low air temperatures (as all of the precipitations were stored as snow). In comparison to the large variations in flow rate, the temperatures showed a generally stable behavior pattern, while the mineralization of the water in the granitic aquifers showed small, but significant, variations.

Tracer tests at high altitude showed water circulations from the Helbronner peak (Mont-Blanc Massif, altitude of 3470 m) to the Mont-Blanc Tunnel. These tests revealed the discontinuous character of the permafrost and high velocities of groundwater infiltration.

The observation of the spatial variation of all of the available physical and chemical parameters permitted a typological synthesis of the principal aquifer sub-types of the Mont-Blanc and the Aiguilles Rouges massifs.

Hydraulic typology:

- The granitic aquifers showed high permeabilities, due to the influence of both micro and macro tectonic discontinuities.
- The gneissic aquifers are characterized essentially by homogeneous flow with low permeability, which is linked to systems of micro tectonic discontinuities.

Hydrochemical typology:

The analysis of major and trace elements showed a certain number of natural tracers for the three principal aquifer sub-types:

- The waters originating from the granitic aquifers of the Mont-Blanc Massif are very strongly marked by the presence of molybden, tungsten, fluoride, uranium and sodium. Uranium is clearly represented if related to the deep aquifers with rapid flow (recent water).
- The waters of the gneissic aquifers of the Mont-Blanc Massif show, overall, a small anomaly of arsenic while the gneissic aquifers of the Aiguilles Rouges Massif are marked by slightly higher concentrations of barium and magnesium.

The markers of the principal sub-types were verified and confirmed by an analysis of principal components.

The spring of Brocard (Martigny, VS, Switzerland), which was installed at the initial phase of the AQUITYP project for the characterization of the crystalline aquifers, showed itself to be representative of the characteristics of the the gneissic aquifers of the Mont-Blanc and the Aiguilles Rouges massifs and non representative of the deep granitic aquifers of the Mont-Blanc.

The comparison with other crystalline aquifers of the west alpine arc showed that the principal markers of the granitic aquifers of the Mont-Blanc (fluoride, uranium and sodium) were also found in the Aar and the Belledonne massifs. However, relatively small similarities were found with the deep aquifers of the crystalline basement in the north of Switzerland, which is the seat of deep and slow flow of thermomineral water. In contrary, the aquifers of the Mont-Blanc, Aar and Belledonne massifs are mostly characterized by rapidly renewed flows.

The comparison with other aquifer groups of the AQUITYP network showed no significant hydrochemical similarities. The slightly mineralized water of the crystalline rocks, compared to the waters of the AQUITYP crosssection which contain globally much more dissolved minerals, revealed that lithium, fluoride, boron, arsenic, rubidium, tungsten and uranium are found in higher concentrations than in the reference network. These last elements may be considered as special markers for the crystalline, compared to the more mineralized groundwaters. This should be verified by the study of other springs which will be added in the AQUITYP network.

The knowledge of the simple aquifer structures obtained in this study of the crystalline of the Mont-Blanc and the Aiguilles Rouges massifs allows a better comprehension of the complex hydrogeological conditions which often include mixture phenomena among several types of aquifers with different lithological characteristics. Such knowledge is one of the tools which permit the determination of the origin of water sources, particularly in underground construction projects.



REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de thèse, le Professeur Jacques Henri Gabus, pour m' avoir reçu au laboratoire de géologie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne et pour la lecture attentive de mon manuscrit.

Toute ma reconnaissance va au docteur Aurèle Parriaux, adjoint scientifique du même laboratoire, qui m'a proposé ce sujet de thèse. Il a dirigé cette recherche avec intérêt et enthousiasme. Durant les années que j'ai passées à l'EPFL, j'ai particulièrement apprécié sa disponibilité, ses qualités scientifiques et son professionnalisme. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude.

Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur Théophile Lutz, chimiste, qui au cours des années passées au laboratoire de géologie, puis plus tard dans sa propre société (Trace Analytic SA), a analysé avec compétence la plupart de mes échantillons d'eau souterraine et notamment leur concentration en éléments en traces. Je tiens à lui témoigner ma reconnaissance pour les nombreuses conversations stimulantes qui ont accompagné les différentes phases de l'acquisition des données géochimiques.

Je tiens à remercier le Professeur Hans Rudolf Pfeifer de l'Institut de minéralogie de l'Université de Lausanne pour les très précieux conseils qu'il m'a donnés lors de l'interprétation de l'origine de la minéralisation des eaux ainsi que pour l'intérêt qu'il a témoigné à cette recherche.

A l'issue de ce travail, j'aimerais exprimer toute ma reconnaissance au Professeur Emanuel Mazon de l'Institut Weizman, Rehovot, Israël, qui lors de mes séjours dans son laboratoire, m'a éveillé à la recherche scientifique et qui par ses idées, son enthousiasme et son dynamisme m'a aidé à la réalisation de cette étude.

Ce travail n'aurait pas pu aboutir sans l'appui, la collaboration et l'amitié des personnes suivantes, que je tiens à remercier ici très chaleureusement.

Le Professeur Jean-Charles Fontes et le docteur Jean-Luc Michelot, de l'Université de Paris sud, centre d'Orsay, pour les conseils qu'ils m'ont donnés dans la phase initiale des recherches.

Monsieur Jean-Marie Rouiller, chef d'exploitation de la centrale hydroélectrique de la Bâtiaz à Martigny (Emosson SA), pour m'avoir donné accès à de précieuses archives techniques et géologiques et de l'appui considérable qu'il m'a accordé lors de mes reconnaissances en galerie. Monsieur Paul Vallotton ainsi que Monsieur Jean Hugon et leurs collègues de la société d'Emosson et d'Electricité de France à Chamonix.

Messieurs Gérard Roncoli et Eduardo Fiorani, chefs d'exploitation du tunnel routier du Mont-Blanc en France et en Italie pour les possibilités d'accès qui m'ont été accordées lors de mes campagnes de prélèvements.

Monsieur Christian Ducroz, directeur de la Lyonnaise des Eaux de Chamonix pour m'avoir permis d'effectuer des échantillonnages et des mesures sur leurs différentes sources.

Monsieur Lambert Lugon, directeur des travaux publics de la commune de Finhaut, qui m'a toujours aidé à réaliser les mesures sur les captages de la commune.

Monsieur Michel Blanc du centre de la Flatière aux Houches pour son hospitalité et pour avoir effectué des pompages en forages pour la prise de mes échantillons.

Monsieur Olivier Atteia du laboratoire de pédologie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne pour ses nombreuses explications liées aux conditions géochimiques de l'infiltration des eaux souterraines en présence de sols.

Mes collègues géologues, Yvan Mandia, Gabriel De Los Cobos, Pedro Basabe et Claude Hilfiker, qui m'ont encouragé et aidé lors de mes campagnes de mesures en montagne. Raphaël Mayoraz, pour l'aide considérable qu'il m'a apportée dans la recherche et l'utilisation des différents logiciels qui ont été utilisés pour cette étude. Pierre Wexsteen qui par son expérience m'a initié au calcul des équilibres chimiques des eaux.

Madame Erika Zoller, qui a beaucoup amélioré le traitement de ma rédaction. Monsieur Robert Guelpa, malheureusement disparu, qui malgré son âge, m'a aidé à réaliser sur le terrain des travaux pénibles d'équipement de sources.

Le Fonds National pour la Recherche Scientifique pour l'appui financier qui a contribué dans une large mesure à la réalisation de ce travail (projet n° 20-27860-89).

L'armée suisse et ses pilotes pour les nombreux vols effectués en haute montagne dans le cadre des prélèvements de neige et d'eaux souterraines.

Je tiens également à exprimer mes remerciements à mes amis, ma famille et à mon épouse Feliciano pour leur patience et leurs encouragements.

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Situation des stations d'observation du réseau AQUITYP.....	4
Figure 3.1	Carte tectonique schématique de l'arc alpin occidental, dans laquelle les massifs cristallins sont représentés par des croix (d'après Von Raumer, 1984).	6
Figure 3.2	Carte géologique simplifiée des massifs du Mont Blanc et des Aiguilles Rouges (d'après Von Raumer, 1987).....	7
Figure 4.1	Carte de situation des sources et des points d'échantillonnage des eaux de surface (torrents, neiges et eaux de sol).....	11
Figure 5.1	Carte de situation des 4 unités hydrogéologiques principales.....	24
Figure 5.2	Représentation graphique des analyses chimiques (Si, Li, Na, K, Mg, Ca) de quelques roches caractéristiques	25
Figure 5.3	Représentation graphique des analyses chimiques (Rb, Sr, Ba, U) de quelques roches caractéristiques.....	26
Figure 5.4	Composition chimique des lixiviats de roches en comparaison avec celle des eaux souterraines de la source du Brocard.....	27
Figure 5.5	Représentation graphique du rapport des concentrations moyennes des lixiviats avec les concentrations moyennes des eaux souterraines des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	28
Figure 6.1	Représentation schématique des conditions générales de circulation des eaux souterraines dans le massif du Mont-Blanc.	31
Figure 6.2	Représentation comparative des paramètres chimiques des pluies et des neiges avec les eaux souterraines de la source du Brocard.....	34
Figure 6.3	Situation des torrents étudiés et contexte géologique des bassins versants (Mont-Blanc français et italien).....	35
Figure 6.4	Situation des torrents étudiés et contexte géologique des bassins versants (Mont-Blanc suisse).....	36
Figure 6.5	Comparaison des données physico-chimiques de torrents situés sur les versants nord et sud du massif du Mont-Blanc et de la source du Brocard.....	37
Figure 6.6	Comparaison des concentrations des ions majeurs et des éléments en traces dans les eaux d'infiltration de sol avec les eaux souterraines du Brocard.....	39

Figure 7.1	Représentation graphique des caractéristiques géochimiques du groupe 2, exemple de la source du Brocard (n° 1), Martigny, Suisse. (Pour les autres types géochimiques, voir annexe 7.3).....	43
Figure 7.2	Source de Bonnette, Martigny, Suisse: Représentation graphique de la variation des paramètres physico-chimiques en relation avec les conditions météorologiques (station météorologique du Grand St-Bernard; pour les graphiques des autres sources voir annexe 7.4).....	44
Figure 7.3	Relation entre la température, la minéralisation et les variations de débit des sources du groupe I (aquifère de type gneissique)	46
Figure 7.4	Relation entre la température, la minéralisation et les variations de débit des sources du groupe II (aquifère de type granitique).....	47
Figure 7.5	Galerie est d'Emosson, (Trient), répartition spatiale des paramètres en fonction de la topographie et des formations géologiques (l'ensemble des galeries et tunnel sont rassemblés dans l'annexe 7.5).	51
Figure 7.6	Histogramme des fréquences des débits	53
Figure 7.7	Carte de répartition spatiale des débits à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.	54
Figure 7.8	Comportement de la minéralisation totale en fonction du débit.....	55
Figure 7.9	Comportement de la température en fonction du débit.....	55
Figure 7.10	Histogramme des fréquences des températures	56
Figure 7.11	Comportement de la minéralisation en fonction de la température.....	57
Figure 7.12	Carte de répartition spatiale des températures à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	58
Figure 7.13	Histogramme des fréquences des mesures de pH.....	59
Figure 7.14	Représentation des valeurs de pH en relation avec les différents aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	59
Figure 7.15	Histogramme des fréquences de la minéralisation totale des eaux souterraines.....	60
Figure 7.16	Carte de répartition spatiale de la minéralisation totale à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	61
Figure 7.17	Histogramme des fréquences des concentrations des hydrogénocarbonates.....	62

Figure 7.18	Carte de répartition spatiale des hydrogénocarbonates à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	63
Figure 7.19	Relation entre la minéralisation totale et les hydrogénocarbonates.....	63
Figure 7.20	Histogramme des fréquences des concentrations en calcium.....	65
Figure 7.21	Carte de répartition spatiale du calcium à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	66
Figure 7.22	Relation entre le calcium et la minéralisation totale.....	66
Figure 7.23	Représentation graphique des indices de saturation des eaux souterraines par rapport à la calcite.....	67
Figure 7.24	Histogramme des fréquences des concentrations en sulfates.....	68
Figure 7.25	Carte de répartition spatiale des sulfates à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	69
Figure 7.26	Relation entre les concentrations en sulfates et la température.....	69
Figure 7.27	Relation entre les concentrations en sulfates et la minéralisation totale.....	70
Figure 7.28	Histogramme des fréquences concentration de la silice.	70
Figure 7.29	Carte de répartition spatiale de la silice à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	71
Figure 7.30	Relation entre les concentrations de silice et la température.	72
Figure 7.31	Relation entre la minéralisation totale et les concentrations de silice.	72
Figure 7.32	Représentation graphique des indices de saturation des eaux souterraines par rapport aux différentes formes de la silice	73
Figure 7.33	Histogramme des fréquences des concentrations en sodium	73
Figure 7.34	Carte de répartition spatiale du sodium à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	74
Figure 7.35	Relation entre les concentrations en sodium et les températures.....	74
Figure 7.36	Histogramme des fréquence des concentrations des chlorures.	76
Figure 7.37	Carte de répartition spatiale des chlorures à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	77
Figure 7.38	Relation entre la concentration en chlorures et la température.....	77

Figure 7.39	Relation entre les chlorures et la minéralisation totale.....	78
Figure 7.40	Histogramme des fréquences des concentrations en fluor.....	78
Figure 7.41	Carte de répartition spatiale du fluor à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	79
Figure 7.42	Relation entre les concentrations en fluor et la minéralisation totale.....	80
Figure 7.43	Relation entre les concentrations en fluor et la température.....	80
Figure 7.44	Représentation graphique des indices de saturation des eaux souterraines par rapport à la fluorite	81
Figure 7.45	Histogramme des fréquences des concentrations en lithium	81
Figure 7.46	Carte de répartition spatiale du lithium à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.	82
Figure 7.47	Relation entre la température et le lithium.	83
Figure 7.48	Histogramme des fréquences des concentration en potassium.....	84
Figure 7.49	Carte de répartition spatiale du potassium à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	85
Figure 7.50	Relation entre les concentrations en potassium et la minéralisation totale	85
Figure 7.51	Histogramme des fréquences des concentrations en magnésium.....	86
Figure 7.52	Carte de répartition spatiale du magnésium à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	87
Figure 7.53	Relation entre la minéralisation totale et le magnésium.....	87
Figure 7.54	Relation entre les concentrations en calcium et en magnésium.....	88
Figure 7.55	Histogramme des fréquences des concentrations en strontium.....	88
Figure 7.56	Carte de répartition spatiale du strontium à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	89
Figure 7.57	Relation entre la minéralisation totale et les concentrations en strontium.....	90
Figure 7.58	Histogramme des concentration de l'arsenic	90
Figure 7.59	Carte de répartition spatiale de l'arsenic à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	91

Figure 7.60	Relation entre la minéralisation totale et l'arsenic.....	92
Figure 7.61	Histogramme des fréquences des concentrations en rubidium.....	92
Figure 7.62	Carte de répartition spatiale du rubidium à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	93
Figure 7.63	Relation entre la minéralisation totale et le rubidium.....	94
Figure 7.64	Histogramme des fréquences des concentrations en molybdène.....	95
Figure 7.65	Carte de répartition spatiale du molybdène à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	96
Figure 7.66	Relation entre la minéralisation totale et les concentrations en molybdène.....	96
Figure 7.67	Relation entre la température et les concentrations en molybdène.....	97
Figure 7.68	Histogramme des fréquences des concentrations en baryum.....	97
Figure 7.69	Carte de répartition spatiale du baryum à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	98
Figure 7.70	Relation entre la minéralisation totale et les concentrations en baryum.....	98
Figure 7.71	Histogramme des fréquences des concentrations du tungstène.....	100
Figure 7.72	Carte de répartition spatiale du tungstène à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	100
Figure 7.73	Relation entre la minéralisation totale et le tungstène.....	101
Figure 7.74	Histogramme des fréquences des concentrations en uranium.....	102
Figure 7.75	Carte de répartition spatiale de l'uranium dans les eaux souterraines à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	103
Figure 7.76	Relation entre les concentrations en uranium et la minéralisation totale.....	103
Figure 7.77	Relation entre la température et les concentrations en uranium.....	104
Figure 7.78	Relation entre les concentrations d'uranium dans les eaux souterraines des aquifères granitiques et le pH.....	104
Figure 8.1	Carte de situation des points d'injection et de prélèvements des essais de traçage de Finhaut.....	108

Figure 8.2	Les Fontaines, Finhaut. Concentration de l'uranine en fonction du temps en regard du débit de la Drance de Bagnes prise comme référence des conditions météorologiques.....	109
Figure 8.3	Carte de situation des points d'injection et de prélèvements des essais de traçage de Bovine.....	110
Figure 8.4	Carte de situation des points d'injection et de prélèvements des essais de traçage de la pointe Helbronner	112
Figure 9.1	Représentation en série ordonnée des débits, de la température et des domaines de concentration des composés chimiques majeurs des eaux souterraines associées aux différents aquifères cristallins dont elles sont issues.....	115
Figure 9.2	Représentation en série ordonnée des domaines de concentration des éléments en traces des eaux souterraines associées aux différents aquifères cristallins dont elles sont issues.....	116
Figure 9.3	Exemple de définition des différentes limites de discrimination d'un élément marqueur. Cas du molybdène.....	116
Figure 9.4	Représentation graphique de l'analyse en composantes principales des éléments majeurs.....	120
Figure 9.5	Représentation graphique de l'analyse en composantes principales des éléments en traces.....	121
Figure 10.1	Représentation comparative des variabilités des paramètres de quelques aquifères cristallins alpins. Les graphiques situés sur la droite sont des agrandissements partiels des valeurs faiblement exprimées dans les graphiques de représentation d'ensemble (1).	128
Figure 10.2	Représentation comparative des variabilités des paramètres de quelques aquifères cristallins alpins. Les graphiques situés sur la droite sont des agrandissements partiels des valeurs faiblement exprimées dans les graphiques de représentation d'ensemble (2).	129
Figure 11.1	Coupe géologique du Jura aux Alpes avec situation des sources et des aquifères du réseau d'observation AQUITYP.....	131
Figure 11.2	Représentation graphique comparative des concentrations en silice des eaux des sous-types aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges et de celles des sources des 5 groupes aquifères du réseau AQUITYP	133

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1	Méthodes de mesures et analyses.....	13
Tableau 4.2	Paramètres chimiques analysés.....	14
Tableau 4.3	Exactitude et précision des mesures et analyses des éléments majeurs.	15
Tableau 4.4	Reproductibilité des analyses des éléments en traces.....	16
Tableau 5.1	Résumé des principales formations géologiques cristallines des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges	22
Tableau 5.2	Classement par ordre d'affinité de la composition chimique des différents lixiviats par rapport aux eaux souterraines de la source du Brocard.....	29
Tableau 6.1	Situation des sites d'échantillonnage de neige, de pluie et de la source du Brocard.....	33
Tableau 6.2	Concentrations des éléments majeurs des neiges, des pluies et des eaux souterraines de la source du Brocard	33
Tableau 6.3	Concentrations des éléments en traces des neiges, des pluies et des eaux souterraines de la source du Brocard	33
Tableau 6.4	Caractéristiques physico-chimiques des torrents et de la source du Brocard.....	36
Tableau 6.5	Concentrations en éléments majeurs dans les eaux de percolation des sols de la station lysimétrique de Lognan et les eaux souterraines de la source du Brocard.....	38
Tableau 6.6	Concentrations en éléments en traces dans les eaux de percolation des sols de la station lysimétrique de Lognan et celles des eaux souterraines de la source du Brocard.....	38
Tableau 7.1	Classification chimique basée sur les éléments majeurs des sources observées dans les massifs du Mont Blanc et des Aiguilles Rouges	42
Tableau 7.2	Situation des sources et environnement géologique.....	43
Tableau 7.3	Classification des sources en fonction du comportement relatif des principaux paramètres hydrogéologiques des sources étudiées.	47
Tableau 7.4	Variabilité des mesures de débit.....	48
Tableau 7.5	Variabilité des mesures de température.....	48
Tableau 7.6	Variabilité de la minéralisation totale.....	48

Tableau 7.7	Classement par ordre croissant des coefficients de variabilité des principaux paramètres hydrogéologiques des sources étudiées	49
Tableau 7.8	Domaines de variabilité des principaux paramètres des deux groupes de sources étudiées.....	49
Tableau 7.9	Variabilité spatiale de l'ensemble des paramètres des sources échantillonnées en galeries et en surface.....	52
Tableau 7.10	Classement croissant par tranches de variabilité des différents paramètres.....	52
Tableau 7.11	Variabilité spatiale du débit des sources échantillonnées en galeries.....	54
Tableau 7.12	Comparaison des débits spécifiques approximatifs par kilomètre mesurés dans les ouvrages souterrains pour les deux types principaux d'aquifères (granite et gneiss).....	55
Tableau 7.13	Gradient géothermique de quelques massifs alpins.....	57
Tableau 9.1	Typologie hydraulique des écoulements souterrains.....	114
Tableau 9.2	Répartition des éléments majeurs des eaux souterraines en relation avec les différents aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	117
Tableau 9.3	Répartition des éléments majeurs des eaux souterraines en relation avec les différents aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	117
Tableau 9.4	Répartition des éléments en traces des eaux souterraines en relation avec les différents aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	118
Tableau 9.5	Classification hiérarchique des éléments marqueurs des aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	119
Tableau 9.6	Comparaison des concentrations des composés chimiques de la source du Brocard avec les moyennes paramétriques de l'ensemble des sources observées dans le massif.....	123
Tableau 10.1	Choix des aquifères et des massifs cristallins utilisés pour effectuer l'étude de la représentabilité de la typologie des aquifères du Mont Blanc et des Aiguilles Rouges.	125
Tableau 10.2	Classification chimique comparative des différents aquifères cristallins.....	126
Tableau 11.1	Comparaison des types géochimiques entre les eaux souterraines du réseau AQUITYP et celles des aquifères cristallins des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.....	132
Tableau 11.2	Paramètres marqueurs des eaux des aquifères granitiques du Mont-Blanc par rapport aux eaux souterraines du réseau AQUITYP.....	134

Tableau 11.3	Paramètres marqueurs des eaux des aquifères gneissiques du Mont-Blanc par rapport aux eaux souterraines du réseau AQUITYP.....	134
Tableau 11.4	Paramètres marqueurs des eaux des aquifères gneissiques des Aiguilles Rouges par rapport aux eaux souterraines du réseau AQUITYP	134
Tableau 11.5	Paramètres marqueurs, à la fois des eaux des aquifères granitiques et gneissiques du massif du Mont-Blanc et gneissiques des Aiguilles Rouges, par rapport aux eaux souterraines du réseau AQUITYP (ayant des concentrations supérieures ou égales aux groupe d'aquifères 1, 2, 3 et 4)	135

LISTE DES ANNEXES

Annexe 4.1	Liste générale des sites de mesures et de prélèvements (eaux souterraines, torrents, pluies, neiges et eaux de percolation des sols)	147
Annexe 5.1	Composition modale de quelques roches représentatives des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges	153
Annexe 5.2	Composition chimique de quelques échantillons de roches représentatives des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, exprimées en pour cent du poids et en ppm	155
Annexe 5.3	Données analytiques des lixiviats de poudre de roche.....	157
Annexe 7.1	Tables des données physico-chimiques des eaux souterraines et des torrents.....	159
Annexe 7.2	Classification chimique des eaux souterraines.....	187
Annexe 7.3	Représentation graphique de la composition chimique des groupes d'eaux souterraines	191
Annexe 7.4	Représentation graphique des variations temporelles des sources du réseau I	197
Annexe 7.5	Représentation graphique de la variabilité spatiale des paramètres hydrogéologiques des venues d'eau interceptées en galeries.....	207
Annexe 7.6	Représentation cartographique de la variation spatiale des paramètres hydrogéologiques des eaux souterraines des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges. La couverture cartographique a été réalisée à l'aide de 4 cartes de détail (I, II, III et IV)	213
Annexe 8.1	Essais de traçage massif de Bel-Oiseau, Finhaut (massif des Aiguilles Rouges).....	299
Annexe 8.2	Essai de traçage, massif de Bovine (massif du Mont-Blanc).....	301
Annexe 8.3	Essai de traçage au dessus du tunnel du Mont-Blanc (massif du Mont-Blanc)	303
Annexe 10.1	Données comparatives d'autres massifs cristallins	305
Annexe 10.2	Classification hiérarchique de la répartition des domaines paramétriques des différents aquifères	307
Annexe 11.1	Sources du réseau AQUITYP	309
Annexe 11.2	Représentation graphique comparative des données physico-chimiques des aquifères du cristallin du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges avec celles du réseau AQUITYP	311
Annexe 11.3	Données analytiques des sources du réseau AQUITYP.....	317
Annexe 11.4	Comparaison des domaines de répartition de paramètres.....	319

1. INTRODUCTION

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet AQUITYP du Laboratoire de géologie de L'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Ce projet a pour but de déterminer les caractéristiques hydrogéologiques spécifiques des différents types d'aquifères situés sur une traverse qui s'étend du Jura aux Alpes (Parriaux et al, 1990).

Les 17 sources qui constituent le réseau de base de ce projet sont en principe les exutoires de circulations simples au sein de structures hydrogéologiques très différentes: terrains meubles quaternaires, roches sédimentaires à porosité de fissures et d'interstices, roches karstiques carbonatées ou évaporitiques et enfin roches cristallines silicatées fracturées. Les sources choisies sont toutes pérennes et chaque émergence est équipée d'une station limnigraphique accessible toute l'année. Des mesures hydrogéologiques sont réalisées systématiquement depuis 1981 pour les stations les plus anciennes et depuis 1985 pour les plus récentes. Ces stations ont déjà fourni un nombre important d'informations concernant essentiellement le comportement des paramètres physico-chimiques au cours de plusieurs cycles hydrogéologiques complets.

La présente étude a été entreprise dans les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges à partir de la station AQUITYP du Brocard (Martigny, Suisse) qui a été installée pour étudier les écoulements souterrains en milieu cristallin fissuré.

Le choix de cette recherche a été motivé par l'intérêt croissant de l'hydrogéologie en milieu cristallin. En effet ces formations sont convoitées en tant que sites potentiels pour le stockage de déchets radioactifs ou encore comme réservoirs profonds dans le cadre de projets d'exploitation de ressources géothermiques. Actuellement plusieurs recherches sont menées en Suisse avec la CEDRA (Coopérative d'entreposage de déchets radioactifs), en Suède avec le projet STRIPA (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Nordstrom, 1985), ou encore aux Etats-Unis (projet Hot Dry Rock, Vuataz & Goff, 1987).

2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Les grands projets cités plus haut possèdent des moyens d'investigation considérables. Nous avons toutefois abordé l'étude des massifs cristallins avec des moyens modestes en choisissant les principaux objectifs suivants:

- 1) Définir les caractéristiques physico-chimiques (y.c. les éléments en traces) des eaux souterraines des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, en étudiant des structures aquifères simples (monoaquifère).
- 2) Déterminer les variabilités temporelles et spatiales des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.
- 3) Définir les caractéristiques géochimiques des eaux d'infiltration du milieu cristallin fracturé (torrents, neiges, pluies et eaux de percolation de sol).
- 4) Déterminer les vitesses de transit d'un certain nombre de sites localisés dans des unités et des conditions hydrogéologiques différentes. Par exemple: test d'infiltration en haute montagne (mise en évidence des discontinuités du pergélisol), pertes de lac de barrage liées à la fracturation du cristallin.
- 5) Proposer une typologie des différents sous-types d'aquifères cristallins des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, en mettant notamment en évidence les principaux traceurs naturels (marqueurs).
- 6) Tester la représentativité a priori de la station AQUITYP du Brocard à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, aussi bien concernant le comportement des paramètres hydrauliques et géochimiques dans le temps que dans l'espace.
- 5) Dégager les extrapolations possibles des données acquises dans le Mont-Blanc à d'autres massifs cristallins des Alpes.
- 6) Comparer les résultats acquis dans le massif du Mont-Blanc avec les données hydrogéologiques du réseau AQUITYP.
- 7) Vérifier, et si possible renforcer le concept du projet AQUITYP.

La figure 2.1 présente les stations d'observation du réseau AQUITYP en relation avec les structures géologiques régionales. Cette carte situe également les massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges dans le cadre de ce projet. L'annexe 11.1 donne une description résumée des conditions hydrogéologiques des sources du réseau AQUITYP.

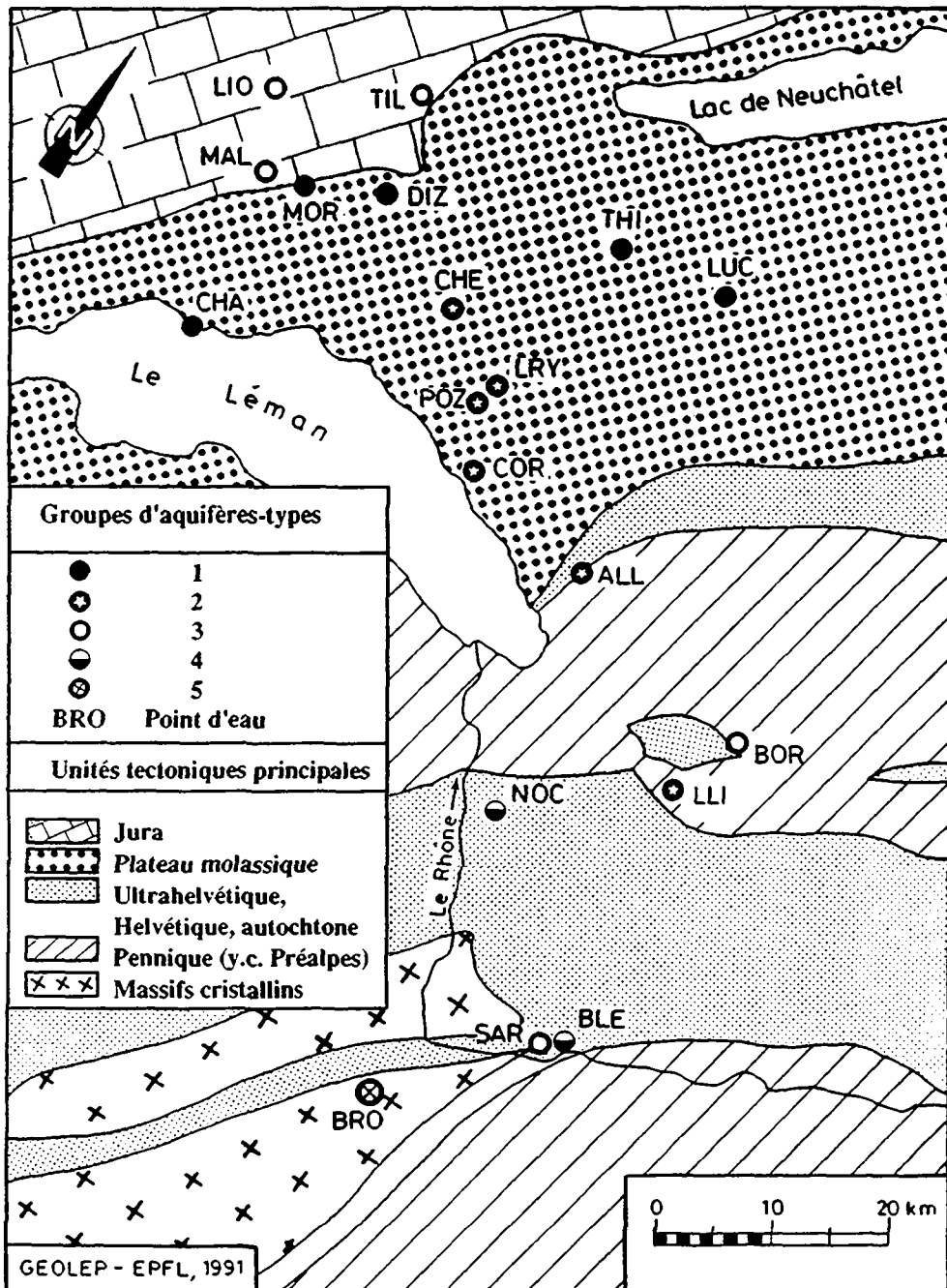


Figure 2.1 Situation des stations d'observation du réseau AQUITYP.

3. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

3.1 Géographie physique, conditions météorologiques et activités humaines

Les massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges se développent à partir de l'ouest de la Suisse en direction du sud-ouest sur les territoires français et italien (figure 3.1). Ces massifs possèdent un relief extrêmement accidenté où culminent certains des plus hauts sommets des Alpes, et notamment le Mont-Blanc (4807 m) qui est le plus élevé d'Europe. La couverture végétale est typiquement alpine, la limite des forêts se situe à environ 2000 m. Au-delà la végétation est rare, de type toundra, avant d'atteindre les espaces rocheux abrupts ou les zones enneigées. En effet, une très grande surface du massif du Mont-Blanc est recouverte de neige pérenne et de glaciers. Entre les années 1986 et 1988, durant lesquelles la plus grande partie des observations hydrogéologiques ont été effectuées, la somme des précipitations annuelles, enregistrées à la station météorologique du Grand Saint-Bernard (altitude 2458 m), a été comprise entre 2.49 m et 2.75 m. Les températures moyennes annuelles ont été proches de 0° C. Ces valeurs sont représentatives des conditions météorologiques d'une très grande partie des bassins versants des sources étudiées.

Les torrents et les rivières qui drainent ces massifs alimentent pour la partie française et suisse le bassin du Rhône, alors que pour le versant italien les eaux rejoignent le bassin du Pô. Les conditions climatiques rudes ont de tout temps fortement influencé les activités économiques de cette région. Au-delà de l'agriculture traditionnelle de montagne et de la petite industrie de transformation, les activités touristiques se sont très largement développées depuis les années soixante. La région du Mont-Blanc a également contribué à l'alimentation en énergie hydroélectrique, essentiellement à destination de la Suisse et de la France.

3.2 Géologie et hydrogéologie générale

Les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges font partie des massifs dits "cristallins externes" de l'arc alpin occidental, qui ponctuent ce dernier du sud de la France (Belledonne et Argentera) au nord de la Suisse (Aar-Gothard, figure 3.1). Tous ces massifs sont d'âge hercynien.

Les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges (massifs cristallins delphino-helvétiques des Alpes occidentales) sont une relique d'une croûte continentale polymétamorphique varisque (Von Raumer, 1987). Sur la figure 3.2, qui montre une carte géologique simplifiée, les Aiguilles Rouges se situent au nord-ouest de la carte, elles sont séparées du massif du Mont-Blanc, qui se développe au sud-est, par une bande de terrains mésozoïques (nommée Zone de Chamonix). Ces formations témoignent de déformations alpines intenses (Ayrton, 1980). L'orogénèse alpine a rapproché le massif du Mont-Blanc des Aiguilles Rouges et en les déformant, elle en a également dégagé leur couverture mésozoïque et tertiaire en la déplaçant vers l'extérieur de la chaîne sous forme de nappe (Bussy, 1990). Les unités lithologiques principales des massifs des Aiguilles Rouges sont constituées de schistes cristallins complexes, principalement de paragneiss de compositions variées, d'amphibolites, de gneiss œillés, d'anatexites et de granodiorites, ainsi que d'intrusions granitiques à enclaves microgrenues (granite de Vallorcine). Les Aiguilles Rouges sont encore recoupées par des formations permo-carbonifères et notamment le synclinal de Salvan-Dorénaz.

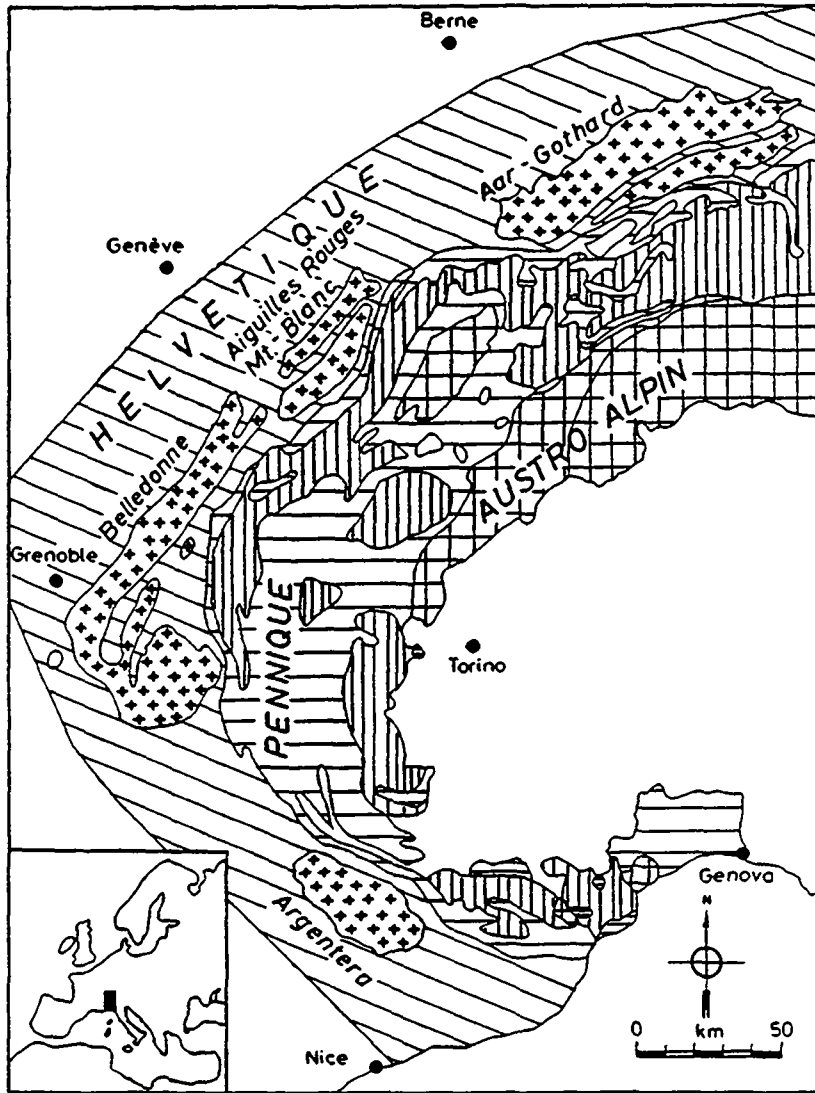


Figure 3.1 Carte tectonique schématique de l'arc alpin occidental, dans laquelle les massifs cristallins sont représentés par des croix (d'après Von Raumer, 1984).

Le massif du Mont-Blanc est également constitué de gneiss et de schistes cristallins qui constituent l'encaissant du granite du Mont-Blanc. Ils sont représentés essentiellement par des gneiss et des micaschistes stratifiés avec intercalations minces d'amphibolites, des gneiss œillés, des granites à enclaves microgrenues (granite du Montenvers). Enfin le granite du Mont-Blanc, qui constitue un corps intrusif de forme amigdalair d'environ 40 km de longueur, forme l'ossature de la chaîne. Il est encore bordé sur son flanc est par des porphyres quartzifères (rhyolites) qui constituent une large bande de quelque 30 km de longueur (cartes géologiques n° 1325 Sembrancher, 1:25'000, n° 1324 Barberine, 1:25'000, n° 704 Mont-Blanc, 1: 50'000, n° 680 Chamonix, 1:50'000, n° 703 St-Gervais, 1:50'000 et Les Houches (en préparation), 1: 50'000).

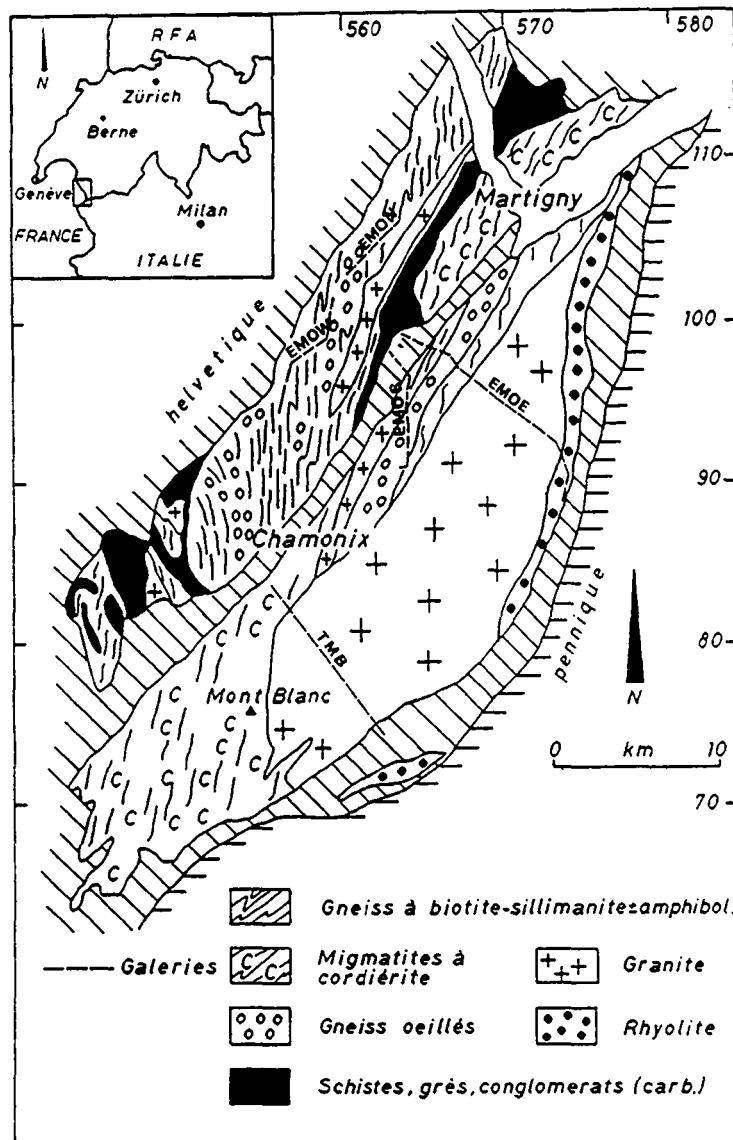


Figure 3.2 Carte géologique simplifiée des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges (d'après Von Raumer, 1987).



4. METHODOLOGIE ET ACQUISITION DES DONNEES

4.1 Historique, études antérieures

Les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges ont depuis plus de deux siècles passionné de nombreux chercheurs. Actuellement, plus d'une centaine de références ont été rassemblées, attestant ainsi l'intérêt et la complexité de cette région des Alpes (Gubler, 1982). Nous présentons ici uniquement les principales étapes des recherches.

Géologie

Les premiers travaux de recherche géologique du massif du Mont-Blanc ont été réalisés essentiellement par des auteurs suisses, de 1779 à la fin du 19^{ème} siècle: de Saussure (1779), Favre (1861), Mrazec (1892). C'est l'époque de la découverte. Puis a suivi celle de la grande tectonique avec les nouvelles théories sur la formation des nappes, avec les travaux de deux grands géologues suisses, Argand (1916) et Lugeon (1912). Les recherches se poursuivent sur plusieurs dizaines d'années avec les travaux de stratigraphie, Parejase (1922) et surtout de remarquables travaux de cartographie qui servent encore actuellement de référence, Corbin et Oulianoff (1959). La troisième période est marquée par l'application des nouvelles méthodes d'analyses aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire. La sédimentologie a contribué largement aux reconstitutions paléogéographiques. Les observations et mesures physico-chimiques de laboratoire ont également fait progresser la connaissance sur les relations entre la cristallinité des minéraux et les événements géologiques qui en sont responsables. Deux thèses de doctorat ont été récemment rédigées, en se basant notamment sur un très grand nombre de données géochimiques nouvelles (Marro, 1986 et Bussy, 1990).

Hydrogéologie

Depuis les années soixante, les travaux de percement du tunnel routier sous le Mont-Blanc, reliant Chamonix (France) à Courmayeur (Italie), ainsi que la réalisation du complexe hydroélectrique d'Emosson (France, Suisse) ont apporté d'importantes informations nouvelles sur la géologie profonde de la région. Ces travaux souterrains ont été à l'origine de plusieurs recherches hydrogéologiques :

- *Tunnel routier du Mont-Blanc*: Les premières observations géologiques et hydrogéologiques ont été réalisées au cours du percement de la galerie (Baggio et Malaroda, 1961; Gudéfin 1967). Puis plusieurs campagnes d'observation et d'échantillonnage d'eau souterraine: campagnes 1974, 1976 (Fontes et al, 1978), campagne 1978 (Lale Demoz, 1979), campagnes 1974, 1976, 1978 (Michelot, 1982), campagne 1983 (Lebdioui, 1985).
- *Galeries du complexe hydroélectrique d'Emosson*: Les premières études sur les venues d'eaux souterraines interceptées par les différentes galeries du vaste réseau d'Emosson ont été effectuées par Blanc (1976) dans le cadre du percement de la galerie de Ravoire (Martigny, Suisse) et par Jamier (1975) dans cette même galerie et dans une partie du collecteur est reliant la Fouly (Val Ferret, Suisse) au Châtelard (Vallée du Trient).

Parallèlement, Jamier a également effectué un très important travail sur la fracturation des roches cristallines de la région.

De nombreux rapports techniques ont également pu être consultés dans les archives des différentes sociétés d'exploitation. Enfin les données du projet AQUITYP (source du Brocard) acquises depuis 1981 ont été intégrées à cette recherche.

4.2 Travaux de terrain

Les travaux de terrain ont débuté par un contact systématique avec les différentes municipalités ou avec les sociétés d'exploitation d'eau potable en Suisse, en France et en Italie. Ces visites ont eu pour but de rassembler les informations disponibles et d'effectuer l'inventaire des différentes sources ou captages existant. Dans le même temps les reconnaissances hydrogéologiques générales de terrain ont été entreprises afin de mettre en place les réseaux d'observation indispensables à cette étude.

4.2.1 Réseaux d'observation des eaux souterraines

A partir de la station de référence du Brocard (Martigny, Suisse), trois réseaux d'observation des eaux souterraines ont été mis en place sur l'ensemble des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges. Le choix des points d'observation s'est porté sur des sources pérennes jaillissant directement des discontinuités rocheuses ou en relation directe avec ces dernières. La description des sources et leur appartenance aux différents réseaux est présentée dans l'annexe 4.1. Leur situation est indiquée sur la carte générale des sources (figure 4.1).

4.2.1.1 Réseau I

Il comprend quatre sources situées dans des structures géologiques différentes (granite et gneiss du massif du Mont-Blanc, granite de Vallorcine du massif des Aiguilles Rouges). Chacune des sources a été équipée d'une station limnigraphique (enregistrement des niveaux en continu) et a fait l'objet de mesures et d'échantillonnages systématiques durant au moins deux à trois cycles hydrogéologiques complets. Ce réseau a été mis en place essentiellement pour acquérir des informations sur le comportement physico-chimique des eaux souterraines dans le temps en relation avec les conditions hydrauliques et météorologiques locales. Ces informations ont notamment permis de proposer une typologie des écoulements en milieu fissuré. Les sources choisies possèdent toutes des débits d'étiage élevés et sont accessibles toute l'année (figure 4.1 et annexe 4.1).

4.2.1.2 Réseau II

Considéré comme réseau intermédiaire, il est composé de 7 sources qui ont pu être mesurées et échantillonnées à plusieurs reprises (4 à 5 fois par année) durant au moins deux cycles hydrogéologiques complets. Il apporte des informations sur les comportements des paramètres hydrogéologiques dans le temps et complète le réseau I (figure 4.1 et annexe 4.1).

4.2.1.3 Réseau III

Il est composé d'un très grand nombre de sources, échantillonnées aussi bien en surface qu'en galeries. Ces points d'eau, compte tenu de leur difficulté d'accès, n'ont pu être l'objet que de rares échantillonnages (2 à 3 fois) entre 1986 et 1989. Une partie importante de ce réseau est constituée par les sources interceptées dans les galeries souterraines (tunnel du Mont-Blanc et galeries d'Emosson). Ce réseau se développe sur l'ensemble des massifs cristallins en territoire suisse, français et italien. Plus de 160 sources ont été mesurées, échantillonnées et permettent essentiellement l'observation de la variabilité spatiale des caractéristiques hydrogéologiques à l'échelle régionale (figure 4.1 et annexe 4.1).

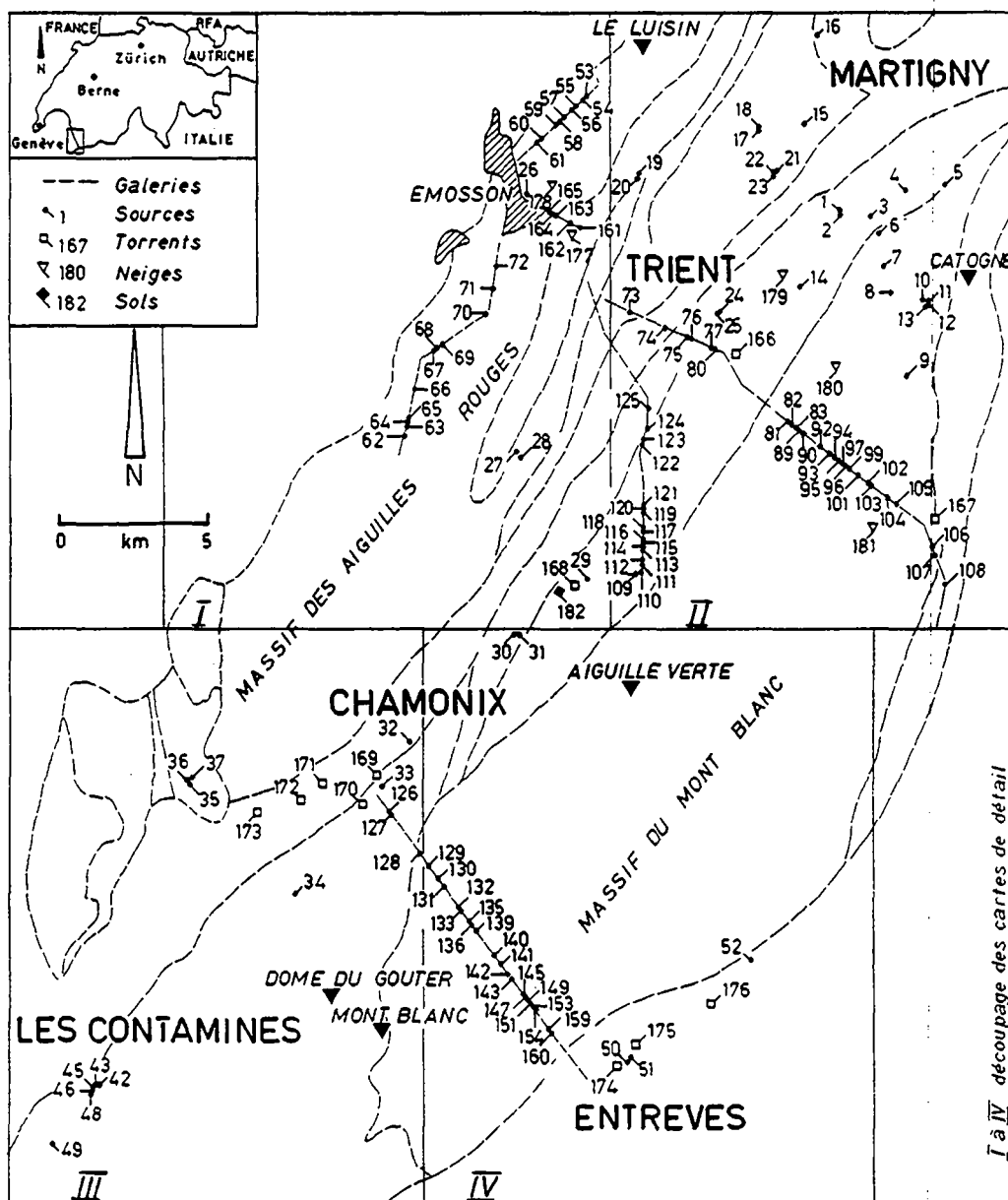


Figure 4.1 Carte de situation des sources et des points d'échantillonnage des eaux de surface (torrents, neiges et eaux de sol).

4.2.2 Réseaux d'observation des eaux de surface

Ces derniers ont été mis en œuvre dans le but de connaître les caractéristiques physico-chimiques des eaux de recharge avant leur infiltration dans l'aquifère. La figure 4.1 et l'annexe 4.1 situent les points d'échantillonnage des torrents, des neiges et d'une station lysimétrique (eaux des sols).

4.2.2.1 Les torrents

Dix torrents, essentiellement liés à des écoulements sous-glaciaires, ont été échantillonnés à deux reprises en 1987 et 1988.

4.2.2.2 La couverture neigeuse

Cinq sites d'accumulation neigeux ont été prélevés en mars 1988 dans le massif du Mont-Blanc. Grâce aux moyens hélicoptés, ils ont pu être échantillonnés le même jour et ont donné une image synchrone de la composition chimique et isotopique. Les échantillonnages ont eu lieu en fin d'hiver afin d'acquérir des informations sur les caractéristiques physico-chimiques et isotopiques du stock neigeux accumulé durant l'hiver. La couverture neigeuse ainsi échantillonnée donne une image assez représentative des eaux qui vont contribuer, dès la fonte, à recharger les aquifères (Parriaux et al, 1990; Dray et al, 1990).

4.2.2.3 Les pluies

Dans le cadre du projet AQUISOL, un pluviomètre, conçu pour des prélèvements destinés aux analyses chimiques, a été installé et échantillonné systématiquement (Atteia et al, 1990). Le pluviomètre a été implanté sur le site de Lognan, choisi pour l'étude des eaux de percolation dans les sols (voir 4.2.4).

4.2.2.4 Les eaux des sols

Une station lysimétrique a été installée en 1989 dans le massif du Mont-Blanc, plateau de Lognan, France. Elle a déjà été l'objet de plusieurs campagnes d'échantillonnage entre 1989 et 1990. Ces mesures, actuellement en cours, sont effectuées dans le cadre du projet AQUISOL (Atteia et al, 1990).

4.2.3 Equipement limnigraphique des sources principales

Les quatre sources du réseau I ont été équipées de stations limnigraphiques dans le but d'acquérir les enregistrements en continu des variations des régimes hydrologiques. La conversion des niveaux mesurés en débits réels a été réalisée à l'aide de courbes de tarage, établies après de nombreux jaugeages. Seuls les enregistreurs mécaniques conventionnels (Biland) ont résisté aux conditions de haute et moyenne montagne. En effet, deux sources qui n'étaient pas accessibles régulièrement en hiver ont été équipées d'enregistreurs électroniques (MADD). Dans les deux cas les appareils n'ont pas supporté les conditions extrêmes de froid et surtout d'humidité et les informations ont été perdues.

4.2.4 Mesures de terrain et matériel utilisé

Les méthodes de mesure et le matériel utilisé sur le terrain et en laboratoire sont présentés dans le tableau 4.1. Les échantillons d'eau ont été stockés dans des flacons en polyéthylène et à l'abri de la lumière. Les eaux destinées à l'analyse des cations et des éléments en traces ont été filtrées (0.45 μm) sur le terrain lors du prélèvement. Les échantillons de neige ont été transportés dans des sacs en polyéthylène jusqu'au laboratoire où ils ont été stockés sous forme d'eau, également dans des flacons en polyéthylène. Avant d'être analysées selon la même procédure que les eaux souterraines, les eaux issues des neiges, caractérisées par de très faibles charges ioniques, ont été concentrées sur des colonnes de résine (8-hydroxyquinoline; Parriaux et al, 1990).

Les échantillons n'ont pas été acidifiés. Toutefois, des analyses chimiques comparatives réalisées sur des échantillons prélevés en 1985 (source du Brocard), acidifiés et non acidifiés, ont donné des résultats similaires, dans les limites de précision admises pour les différentes méthodes.

4.3 Analyses en laboratoire

- *Les éléments majeurs:* Les analyses chimiques présentées dans cette recherche ont été réalisées au Laboratoire de géologie de l'EPFL (GEOLEP), Lausanne, Suisse (tableau 4.2).
- *Les éléments en traces:* Les analyses de traces ont été effectuées par Trace Analytic SA, Morges, Suisse et au GEOLEP (tableau 4.3).
- *Les isotopes:* Dans le cadre des travaux entrepris sur les caractéristiques de la couverture neigeuse, des mesures isotopiques (tritium, oxygène-18 et deutérium) ont été réalisées au Centre de Recherches Géodynamiques de l'Université Pierre et Marie Curie de Thonon, France (Dray et al, 1990).

Tableau 4.1 Méthodes de mesures et analyses

Paramètres	Unités	Appareillage	
Terrain	Débit	l/mn	Bidon, réservoir et chronomètre
	Niveau d'eau	m	Enregistreur limnographique
	Température	°C	Thermomètre digital WTW LF 91
	Conductivité électrique	$\mu\text{S/cm}$	Conductivimètre digital WTW LF 91
	pH	unité pH	pH mètre digital WTW
	Potentiel Redox	mv	Rh mètre digital WTW
Laboratoire	HCO ₃	mg/l	Titration de l'alcalinité totale (pH 4.6), burette Metrohm
	Dureté totale	°F	Titration avec solution complexométrique avec indicateur, burette Metrohm
	Li, Na, K, Mg, Ca	mg/l	Spectroscopie d'émission de flamme, Pye Unicam
	SiO ₂ , B	"	Colorimétrie
	F	"	Electrode sélective
	NO ₃ , SO ₄ , Cl	"	Chromatographie liquide, Perkin Elmer
	Ni, Cu, Zn, Cd	$\mu\text{g/l}$	Four à graphite
	As, Rb, Sr, Ba, Mo, W, U	"	Spectrométrie de masse VG (ICP-MS)*
	Tritium	UT	Scintillation liquide, Packard
	Oxygène-18 & Deutérium	$\delta \text{‰}$	Spectrométrie de masse

*Inductively coupled plasma mass spectrometry (Date and Gray, 1989).

Des mesures de tritium ont également été effectuées au GEOLEP, mais elles n'ont pas encore donné de résultats fiables. Les recherches à ce sujet sont actuellement en cours dans notre laboratoire.

4.3.1 Choix des paramètres chimiques

Le tableau 4.2 présente les éléments sur lesquels ont porté les analyses chimiques.

Tableau 4.2 Paramètres chimiques analysés.

Cations		Anions	
Lithium	(Li ⁺⁺⁺)	Hydrogénocarbonates	(HCO ₃ ⁻)
Sodium	(Na ⁺)	Sulfates	(SO ₄ ⁻)
Potassium	(K ⁺)	Fluorures	(F ⁻)
Magnésium	(Mg ⁺⁺)	Chlorures	(Cl ⁻)
Calcium	(Ca ⁺⁺)	Nitrates	(NO ₃ ⁻)
Strontium	(Sr ⁺⁺)		
Eléments en traces		Autres	
Arsenic	(As)	Silice	(SiO ₂)
Rubidium	(Rb)	Bore	(B)
Molybdène	(Mo)	Dureté totale	
Baryum	(Ba)		
Tungstène	(W)		
Uranium	(U)		

4.3.2 Précision des mesures et analyses

Trois méthodes différentes ont été utilisées pour contrôler les analyses chimiques.

a) Contrôle de la balance ionique

La somme des cations exprimée en milliéquivalents par litre (meq/l) doit être théoriquement égale à celle des anions. En pratique cette égalité n'est qu'approximée, car certains ions mineurs ne sont pas analysés et parfois à cause d'erreurs analytiques. Les analyses chimiques ont été acceptées seulement si la différence entre la somme des cations et la somme des anions était inférieure ou égale à 10 % de la valeur moyenne des sommes des cations et des anions.

$$|\sum \text{cations} - \sum \text{anions}| \geq 0.1 \frac{|\sum \text{cations} + \sum \text{anions}|}{2}$$

En cas de balance imprécise, des analyses de contrôle ont été effectuées pour les paramètres douteux.

b) *Contrôle de la méthode*

La grande majorité des méthodes analytiques utilisées sont celles recommandées dans les Standard Methods (1975). La précision de l'analyse ou la reproductibilité de la méthode analytique est déterminée par le rapport de l'écart-type sur la moyenne, rapport de la concentration réelle de l'échantillon à analyser. Cet écart-type relatif est aussi appelé coefficient de variation (Cv):

$$Cv = \frac{\sigma x}{\bar{x}} 100$$

c) *Contrôle de la reproductibilité des analyses des éléments majeurs*

Pour tester la reproductibilité de nos analyses, nous avons choisi un point d'eau typique du massif du Mont-Blanc, la source du Nant Provent à Chamonix (voir situation sur figure 4.1), où nous avons prélevé 14 échantillons identiques, pour les analyses en laboratoire. Les paramètres chimiques majeurs de cette eau ont été analysés 14 fois, dans des conditions d'analyse nouvelles et non pas en série lors d'un même chargement. En raison du petit nombre d'échantillons, l'écart-type ($2\sigma x$) a été calculé avec n-1 (tableau 4.3).

$$Cv = \frac{2\sigma x}{\bar{x}} 100$$

d) *Contrôle de la reproductibilité des éléments en traces*

Dans ce cas également, 10 échantillons identiques (source du Brocard) ont été analysés avec le même concept de vérification que celui mis en œuvre pour les éléments majeurs. Le tableau 4.4 donne les coefficients de variation de chaque élément.

Tableau 4.3 *Exactitude et précision des mesures et analyses des éléments majeurs.*

Paramètre	Unité	Reproductibilité Coefficient de variation (%)
Li	(mg/l)	6.8
Na	"	2.3
K	"	0.9
Mg	"	11.0
Ca	"	1.5
Sr	"	2.8
Dureté totale	°F	2.9
F	(mg/l)	12
Cl	"	22
HCO ₃	"	5.0
NO ₃	"	4.0
SO ₄	"	5.5
SiO ₂	"	6.5
B	(µg/l)	12
Conductivité	(µS/cm)	0.6
pH	(unité pH)	0.2 pH
Rh	(mv)	20 mv
Température	(°C)	0.1 °C
Débit	(l/mn)	10-100*

* Erreur dans le cas de mesures de débit estimées (sans mesures possibles)

Tableau 4.4 *Reproductibilité des analyses des éléments en traces.*

Elément	Unité	Reproductibilité Coefficient de variation (%)
As	($\mu\text{g/l}$)	15
Rb	"	8
Mo	"	10
Ba	"	7
W	"	8
U	"	9

4.3.3 Contrôle des mesures physico-chimiques

La conductivité et le pH ont subi les mêmes tests que les analyses chimiques, alors que la précision des mesures de température et de débit a été estimée en fonction du matériel et des conditions de mesure (tableau 4.3).

La grande majorité des analyses chimiques des roches disponibles sont tirées des travaux récents effectués dans les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges (Marro, 1986, Bussy, 1990 et Favre, 1990). Une dizaine d'échantillons ont également été prélevés par le GEOLEP. Deux types d'analyses ont été pratiquées:

4.3.4 Fluorescence X

L'ensemble des analyses chimiques des éléments majeurs et des traces des roches totales ont été effectuées au Centre d'Analyse de l'Université de Lausanne par fluorescence X (FX) sur l'appareil Philips PW 1400 (Bussy, 1990).

4.3.5 Test de mise en solution de roche (lixiviation)

Afin de simuler l'interaction entre les eaux souterraines et les roches, nous avons fait barboter avec du CO_2 (afin de reconstituer les conditions d'attaque des roches par les eaux météoriques) 10 grammes de poudre de roches, finement broyée (broyeur à anneau) dans 300 ml d'eau déionisée. Des mesures de conductivité, de pH et Rh ont été systématiquement réalisées durant l'essai. Après environ 3 jours, les mesures de conductivité ont cessé de croître, indiquant de ce fait que nous avons atteint approximativement la mise en solution maximum possible des roches. Durant le test le pH a été de l'ordre de 5 (proche de l'acidité des eaux météoriques) alors que les mesures de Rh ont varié entre +190 et +380 d'un échantillon à l'autre. Cette manipulation, réalisée en laboratoire dans des conditions de pression atmosphérique normale, a relativement bien simulé les conditions de mise en solution des roches par des eaux souterraines à écoulement rapide et peu profond.

L'eau, après avoir été filtrée, a été analysée comme les échantillons d'eaux souterraines.

4.3.6 Analyse des traceurs artificiels

Dans le cadre de cette étude, quatre types de traceurs ont été utilisés: l'uranine, l'éosine, la duasyne et le naphthionate. Les procédures analytiques ainsi que les difficultés liées à leur utilisation ont été largement décrites dans différents ouvrages (Parriaux et al, 1988; Lutz et al, 1987).

4.4 Représentation des données

Dans le cadre de cette recherche, à côté des différentes tables de mesures et d'analyses, un poids important a été donné à la représentation graphique, afin de faciliter au maximum la lecture et la compréhension des résultats.

4.4.1 Représentation cartographique

La représentation des données s'est faite essentiellement par l'élaboration de cartes de répartition spatiale des paramètres hydrogéologiques. Les données physico-chimiques de chaque point d'eau en période d'étiage (plus représentative des caractéristiques des aquifères) en relation avec les formations géologiques, sont présentées à l'échelle des massifs à l'aide de quatre cartes pour chacun des paramètres. Ces mêmes données ont également été représentées en rassemblant la variabilité pour chaque paramètre sur une seule carte, permettant ainsi une vision globale des données hydrogéologiques des deux massifs cristallins.

4.4.2 Diagrammes géochimiques

Pour représenter les caractéristiques chimiques des eaux, nous avons choisi les diagrammes à secteurs. Ils permettent de visualiser en pour cent la concentration en milliéquivalents par litre des éléments majeurs d'une eau souterraine et de la comparer dans son ensemble avec d'autres types d'eau.

4.4.3 Graphes de corrélations physico-chimiques

Les variations saisonnières des paramètres hydrogéologiques majeurs des principales sources ont été représentées en fonction du temps ainsi qu'en fonction du Total des Ions Dissous (TID). Ce dernier type de représentation peut donner des informations intéressantes sur le comportement d'une source dans le temps ou sur d'éventuels phénomènes de mélange des différents types d'eau en présence.

Dans le cadre des observations sur la répartition spatiale des paramètres hydrogéologiques mesurés en galeries, ils ont été représentés en fonction des distances et en relation avec les coupes géologiques simplifiées correspondantes.

4.5 Statistiques

Parallèlement aux méthodes classiques de statistique descriptive, qui ont naturellement été appliquées aux différentes mesures et analyses, des histogrammes de fréquence de chaque paramètre ont été systématiquement réalisés.

Dans un dernier temps, afin d'appréhender les diverses relations possibles existant entre les paramètres de l'ensemble des sources réparties dans l'espace, une analyse factorielle en composantes principales a été entreprise à l'aide du programme STATGRAPHICS.

4.6 Equilibre chimique des eaux souterraines

L'équilibre des eaux des aquifères du massif du Mont-Blanc a été étudié par Jamier, 1975 (galerie est d'Emosson) et par Lebdioui, 1985 (tunnel du Mont-Blanc).

Dans le cas de la présente étude, les calculs d'équilibre des eaux souterraines en relation avec les différentes formations aquifères ont été effectués pour un échantillon d'eau souterraine appartenant à chacun des principaux groupes géochimiques (voir chapitre 7.1, paragraphe 7.1.2) répartis dans le massif du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

Les calculs des constantes d'équilibre et des indices de saturation des eaux souterraines, par rapport aux différents minéraux constituant les aquifères, ont été effectués à l'aide du programme de calcul PHREEQE (Parkhurst et al, 1980). Les résultats sont représentés graphiquement pour un certain nombre de minéraux caractéristiques des aquifères du cristallin (voir chapitre 7.3, Variations spatiales des paramètres hydrogéologiques à l'échelle des massifs et origine de la minéralisation des eaux).

5. GEOLOGIE

5.1 Introduction

Dans le cadre de cette recherche nous proposons de présenter les principales phases de l'évolution des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, la description générale des formations géologiques ainsi que leur contenu pétrographique et géochimique. Cette approche géologique n'a pas la prétention d'être exhaustive, mais elle a été conçue essentiellement dans le but de dégager les principales caractéristiques pétrographiques et géochimiques des aquifères du cristallin.

5.2 Evolution géologique

Les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges (massifs cristallins delphino-helvétiques des Alpes occidentales) correspondent à une croûte continentale polymétamorphique varisque. Une partie cristalline plus ancienne, mal définie, ainsi que sa couverture sédimentaire (paléozoïque inférieur) et des magmas acido-basiques, ont subi une évolution métamorphique et structurale de l'Ordovicien au Carbonifère inférieur (Von Raumer, 1987). Elle comprend les stades suivants:

- 1) Sédimentation de type plate-forme continentale précoce avec les premiers signes de mouvements de rift (Carbonifère-Ordovicien) et probablement la formation d'une croûte océanique.
- 2) Tectonique compressive avec subduction, obduction, collision et formation de nappes varisques précoces; écaillages de lentilles d'ultrabasite et d'éclogite et transport dans la croûte supérieure (Ordovicien-Silurien).
- 3) Elévation régionale du gradient géothermique (Dévonien), due soit à l'épaississement de la croûte (formation d'un dôme et érosion), soit à un amincissement initial de la croûte (maximum thermique) avec formation d'anatexites et fusion incongruente de magmas granitoidiques.
- 4) Refroidissement tardi-varisque, intrusion de granites calco-alkalins et formation de dépressions intramontagneuses à sédimentation détritique grossière du Permo-Carbonifère.
- 5) Tectonique cisailante du Permien supérieur, sédimentation mézosoïque et surimpression alpine.

Dans leur évolution, les massifs externes sont comparés aux dômes de gneiss des Apalaches. Ils sont les représentants d'une zone d'évolution de type acadien qui se suit depuis le sud de la Bretagne, à travers le Massif Central français jusqu'au Moldanubien (Von Raumer, 1987).

La situation géologique et tectonique générale des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges a été décrite au chapitre 3, qui comprend également une carte géologique simplifiée (figure 3.2).

5.3 Description géologique et pétrographique des formations

Certaines formations géologiques se développent exclusivement dans le massif du Mont-Blanc ou dans le massif des Aiguilles Rouges, alors qu'un certain nombre de faciès s'observent sur l'ensemble des deux unités. Afin de

faciliter la présentation des différentes roches, elles ont été traitées séparément, pour chacune des deux grandes unités tectoniques, lorsque cela a été possible. Dans le cas contraire elles sont présentées dans le cadre général des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

Les nombreux travaux entrepris dans le massif du Mont-Blanc (Niggli et al, 1930; Rybach et al, 1966; Laurent, 1968; Marro, 1986; Von Raumer et al; 1990, Bussy, 1990) ont permis de rassembler suffisamment d'informations pour donner une composition pétrographique modale moyenne des principales roches qui constituent les formations aquifères qui nous intéressent ici (annexe 5.1).

5.3.1 Massif des Aiguilles Rouges

Ce massif est constitué principalement de schistes cristallins, dont les différents types sont détaillés ci-dessous. Il s'agit de gneiss et de micaschistes de composition pélitique, grauwackoïde ou granitique, accompagnés accessoirement de roches basiques et calcaires (Bellière, 1958; Ayrton et al, 1987).

Les principales unités lithologiques sont les suivantes:

1. *Michaschistes et paragneiss non migmatitiques.* Ce sont des schistes cristallins stratifiés, de composition alumineuse à grauwackoïde, constitués essentiellement de quartz, d'oligoclase, de muscovite, de biotite, auxquels peuvent s'ajouter le feldspath potassique ou le grenat. Ces roches, sauf exception, sont grenues et leurs minéraux se distinguent à l'œil nu. La stratification, décimétrique à métrique, est généralement bien visible et correspond à la succession de lits de compositions différentes, depuis des mica-schistes très riches en micas, jusqu'à des roches exclusivement quartzo-feldspathiques, éventuellement grenatifères. Les quartzites sont exceptionnelles (Von Raumer, 1983).
2. *Gneiss, généralement migmatitiques.* Ces gneiss sont toujours grenus, de composition granitique à granodioritique (quartz, oligoclase, feldspath potassique, biotite, muscovite, grenat) et montrent une structure migmatitique concordante: les mobilisats quartzo-feldspathiques sont des lentilles plus ou moins allongées, parallèles à la schistosité. Ces roches migmatitiques se rencontrent également dans le massif du Mont-Blanc (Ayrton et al, 1987).
3. *Gneiss granitoïdes, souvent œillés.* Ces gneiss de composition granitique sont toujours très grenus, avec une structure migmatitique rubano-lenticulaire bien exprimée. Contrairement aux gneiss précédents, ils ne montrent pas de linéation mais forment des masses homogènes d'importance diverse. Ils sont souvent caractérisés par des yeux pluricentimétriques de feldspath potassique (Favre, 1990). Il s'agit probablement dans la plupart des cas d'orthogneiss (anciens granites gneissifiés, Ayrton et al, 1987).
4. *Blastomylonites.* Dans certaines parties du massif des Aiguilles Rouges, les gneiss décrits plus haut, migmatitiques ou non, ont été transformés en roches blastomylonitiques, caractérisées par la granulation régulière (polygonisation) des feldspaths et la recristallisation du quartz en grands individus allongés. Cette déformation particulière s'est effectuée, elle aussi, dans des conditions du faciès amphibolitique à almandin et n'a donc pas modifié la composition minéralogique des gneiss.
5. *Amphiboloschistes.* Ces roches sont composées essentiellement de hornblende et de plagioclases auxquels peuvent s'adjoindre, en proportion diverses, du quartz, du grenat ou du diopside, ainsi que divers minéraux

accessoires. Elles constituent toujours au sein des schistes cristallins, des niveaux peu épais, tronçonnés par le phénomène de boudinage en chapelets de lentilles plus ou moins espacées les uns des autres.

6. *Le granite de Vallorcine.* Il s'agit d'un granite clair, de type assez constant, constitué d'un mélange à grains fins de quartz, oligoclase, feldspath potassique, biotite (souvent chloritisée), dans lesquels sont fréquemment dispersés des feldspaths potassiques rectangulaires (Ayrton et al, 1987).
7. *Les marbres, calcaires métamorphiques.* Ils sont de composition variable, formant souvent de grandes traînées ou enclaves lenticulaires. Certaines sont constituées de calcite ou sont partiellement minéralisées (cornéennes à amphibole et pyroxène), d'autres sont accompagnées de diopside et d'humites plus ou moins serpentinisées (Burri et Jemelin, 1983).

5.3.2 Massif du Mont-Blanc

Traditionnellement associé au massif des Aiguilles Rouges, il en diffère toutefois pour deux raisons principales:

- a) Sa plus grande partie est occupée par des granites (granite du Mont-Blanc).
- b) Les schistes cristallins, s'ils ont la même composition que ceux des Aiguilles Rouges, possèdent pratiquement partout des structures de mylonito-schistes.

D'une manière générale le massif du Mont-Blanc est constitué des lithofaciès suivants:

1. *Gneiss, généralement migmatitiques.* Ces formations se rencontrent également dans le massif des Aiguilles Rouges, leurs caractéristiques ont été présentées plus haut.
2. *Mylonitoschistes de gneiss divers, souvent migmatitiques.* Ces roches forment la majeure partie des schistes cristallins du massif du Mont-Blanc. Elles résultent d'une déformation pénétrative régionale, développée dans les conditions du faciès schiste vert à biotite. Cette déformation mylonitique s'est traduite par une fracturation irrégulière des autres minéraux et par la production d'une schistosité et d'une linéation bien exprimées. La schistosité est partout à forte pente et la linéation est dirigée selon cette dernière. Macroscopiquement, ces schistes montrent donc un grain hétérogène; la présence de porphyroclastes œillés est souvent caractéristique (Ayrton et al, 1987).
3. *Mylonitoschistes de granite, granite du Montenvers.* Ils sont du même type pétrographique que les précédents, mais ils ont été engendrés non plus aux dépens de gneiss, mais aux dépens d'un granite, ou plutôt d'un cortège de petites masses granitiques, rassemblées sous le nom de "granite du Montenvers". Ce granite devait être équi-granulaire et à grains moyens à fins.
4. *Le granite du Mont-Blanc.* Il s'agit d'une roche grenue (5 mm ou plus), formée de quartz, oligoclase, feldspath potassique, biotite, auxquels s'ajoutent des minéraux accessoires, en particulier l'épidote, parfois assez abondante pour colorer le granite en vert pistache. Sa composition habituelle correspond à des "granites" sensu stricto de la classification de Streickeisen; en fait, le massif comporte diverses variétés: granite à grain homogène, granite à grands feldspaths potassiques rectangulaires (jusqu'à 7 cm), granite plus clair, ou plus foncé, à amphiboles, etc. Il n'est pas possible dans l'état actuel des relevés, de cartographier ces divers types, dont les contacts mutuels témoignent d'intrusions successives les unes dans les autres lors

de la formation du pluton. Le granite du Mont-Blanc est riche en enclaves, dont la plupart représentent des gouttes de magma basique qui ne sont pas mélangées au magma granitique (Jacquemin et Bellière, 1984).

5. *Les rhyolites.* Nommées "microgranulites" par Duparc et Pearce (1896), nous préférons le terme de rhyolite pour décrire les formations qui constituent la bordure est des granites du Mont-Blanc (Marro, 1986). Cette roche possède une structure extrêmement fine, à grain invisible à la loupe, de couleur grise tirant sur le vert ou le bleu et à texture porphyrique. Les cristaux peuvent être très nombreux ou manquer presque totalement. Leur taille dépasse rarement 3 millimètres. Il s'agit de quartz, plagioclase courant, feldspath potassique, plus rare. La biotite est souvent présente (Marro, 1986). Le tableau 5.1 résume la description des principales unités lithologiques décrites plus haut.
6. *Les marbres, calcaire métamorphique.* Les marbres forment des couches boudinées pouvant atteindre des épaisseurs de l'ordre de 2 m.

Tableau 5.1 Résumé des principales formations géologiques cristallines des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

AIGUILLES ROUGES	MONT-BLANC
Gneiss	Gneiss
Gneiss et micaschistes (composition: pélitique, grauwackoïde ou granitique). Amphiboleschistes.	Semblables aux Aiguilles Rouges, mais presque partout avec structures de mylonito-schiste.
Granite	Granite
Granite intrusif de Vallorcine: Roche à grains fins, formé de quartz, oligoclase, feldspath potassiques, biotite (souvent chloritisée).	Granite du Monteners: Mylonitoschistes de granite. Granites du Mont-Blanc: Structure macrogenue, formés de quartz, oligoclase, feldspath potassique, biotite, amphibole.
	Rhyolite
	Roche à grains très fins, quartz, plagioclase et feldspath potassique et biotite.
Marbre, calcaire métamorphique	Marbre, calcaire métamorphique
Présent sous forme de lentilles constituées de calcite ou partiellement minéralisées (cornéenne à amphibole et pyroxène).	Il forme des couches boudinées de couleur blanche à jaune.

5.3.3 Minéralisations

Plusieurs indices de minéralisations sont connus dans les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges. Nous avons choisi de citer ici les minéraux qui marquent de manière significative les eaux souterraines.

- *Fluorine:* Ce minéral rose octaédrique a été rencontré en plusieurs points du massif, il a été en particulier décrit par G. Rigault et G. Ferraris (1962) sur la crête entre le col du Requin (3304 m) et l'Aiguille du Plan (3673 m), dans le granite. Il est également facilement observable à l'ancienne mine des Trappistes, près de Sembrancher, Valais, où il est associé à la blende, la galène, la chalcopryrite et à la malachite.
- *Arsenic:* Des gisements filoniens d'arsénopyrite associés à l'or sont connus depuis très longtemps à Salanfe, dans le massif des Aiguilles Rouges (Uromine, 1987).

- *Molybdène*: La molybdénite se trouve disséminée en petites lames dans la "protogine" du Tacul, de l'Aiguille de Talèfre, du col du Géant et de l'Aiguille Noire; elle a été signalée aussi en plusieurs autres endroits de la chaîne du Mont-Blanc, notamment au sommet de l'Aiguille du Midi (Canet, 1960). Des indices de molybdénite ont également été signalés dans la combe d'Orny, au Mont Châtelet (massif du Mont-Blanc suisse) au sein de rhyolite en zones fracturées et mylonitisées (Dumont, 1988).
- *Tungstène*: Des minéralisations de scheelite (CaWO_4) ont été décrites dans le massif des Aiguilles Rouges, aux Marécottes, dans les gneiss du socle, en contact avec le granite intrusif de Vallorcine (Uromine, 1987).
- *Barytine*: Ce minéral est également présent dans la mine des Trappistes, associé à la fluorine, à la galène et à la blende. La barytine a été notamment signalée sur le versant italien du Mont-Blanc, dans la zone du glacier du Miage, ainsi que dans l'ancienne mine de l'Amône (Val Ferret), au contact des sédiments mésozoïques.
- *Uranium*: Le percement du tunnel routier du Mont-Blanc a mis en évidence plusieurs indices. Le granite du Mont-Blanc a livré entre le PK 5035 et le PK 5040 des traces d'autunite, minéralisation sans intérêt économique, mais qui correspond aux indices uranifères étendus qui ont été étudiés en surface du côté italien, par P. Baggio (1958), G. Franceschetti (1960) et D. Ravagnani (1974). Des mesures de spectrométrie gamma effectuées dans les granites du massif du Trient ont montré des indices caractéristiques de l'uranium (Labhart und Rybach, 1974). Enfin, il faut également signaler les gisements de pechblende (UO_2) des Marécottes, situés dans les gneiss anté-herciniens au contact avec le granite de Vallorcine. Ces minéralisations se présentent souvent en minces placages et remplissages de fissures (Von Raumer, 1987).

5.4 Unités hydrogéologiques principales

Sur la base des formations géologiques décrites au paragraphe précédant, qui constituent un important cortège de roches, quatre sous-types d'aquifères principaux ont été retenus pour aborder l'étude systématique du milieu cristallin (figure 5.1). Les différents aquifères ont été nommés de la manière suivante:

Aquifères granitiques du massif du Mont-Blanc	code GraMB
Aquifères gneissiques du massif du Mont-Blanc	code GneMB
Aquifères granitiques du massif des Aiguilles Rouges	code GraAR
Aquifères gneissiques du massif des Aiguilles Rouges	code GneAR

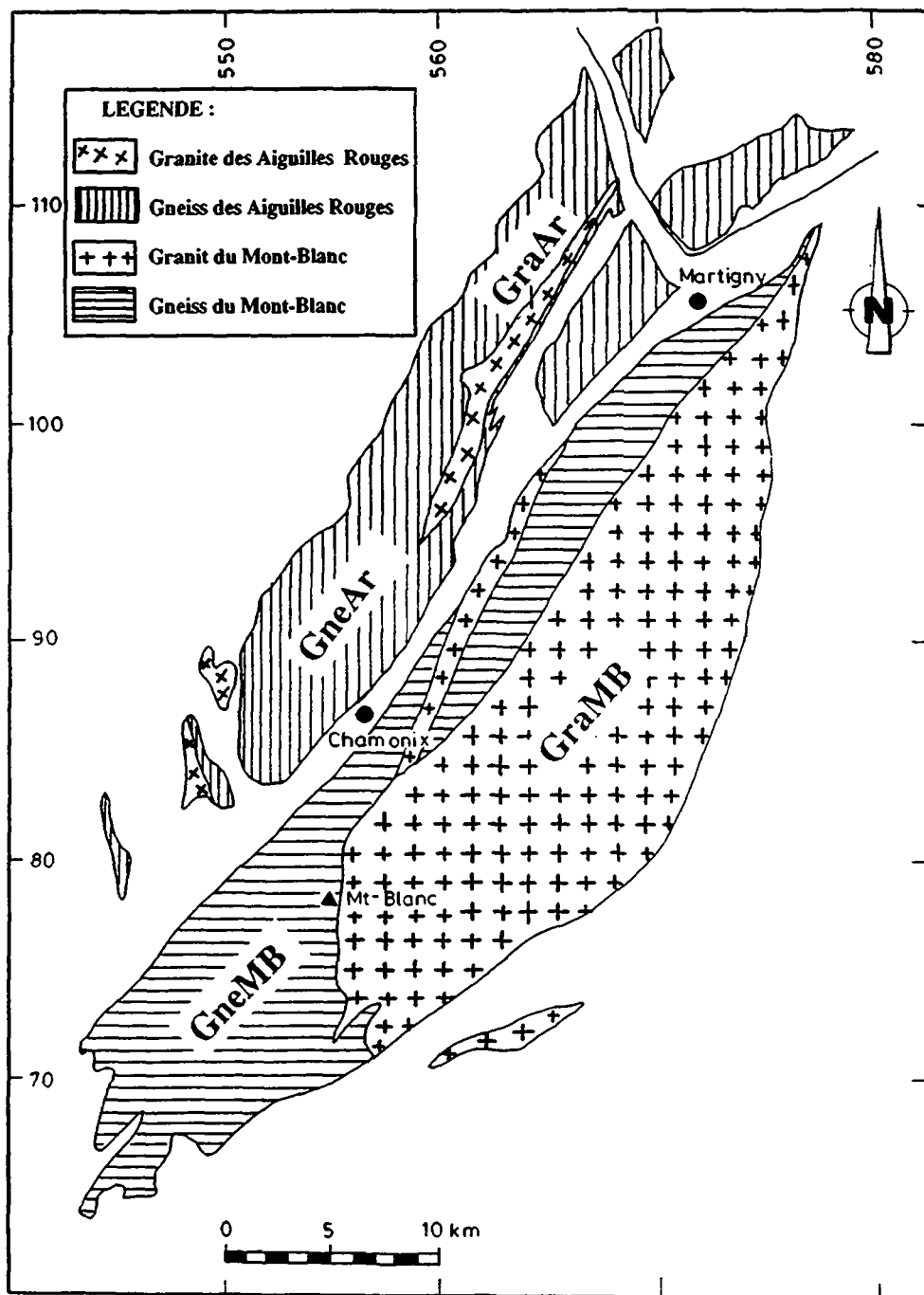


Figure 5.1 Carte de situation des 4 unités hydrogéologiques principales.

5.5 Composition géochimique des roches

Les données géochimiques des roches sont couramment exprimées pour les éléments majeurs en % d'oxyde du poids total de roche analysée, alors que les éléments en traces sont donnés en ppm. Dans le cadre de cette étude hydrogéologique, nous avons transformé les données des pétrographes en % du poids total des éléments majeurs, afin de tenter de comparer les analyses de roches avec celles des eaux.

L'annexe 5.2 et les figures 5.2 et 5.3 présentent les compositions chimiques des principales roches qui constituent les aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges. Ces données proviennent des travaux des auteurs cités plus haut ainsi que de prélèvements effectués dans le cadre de cette recherche.

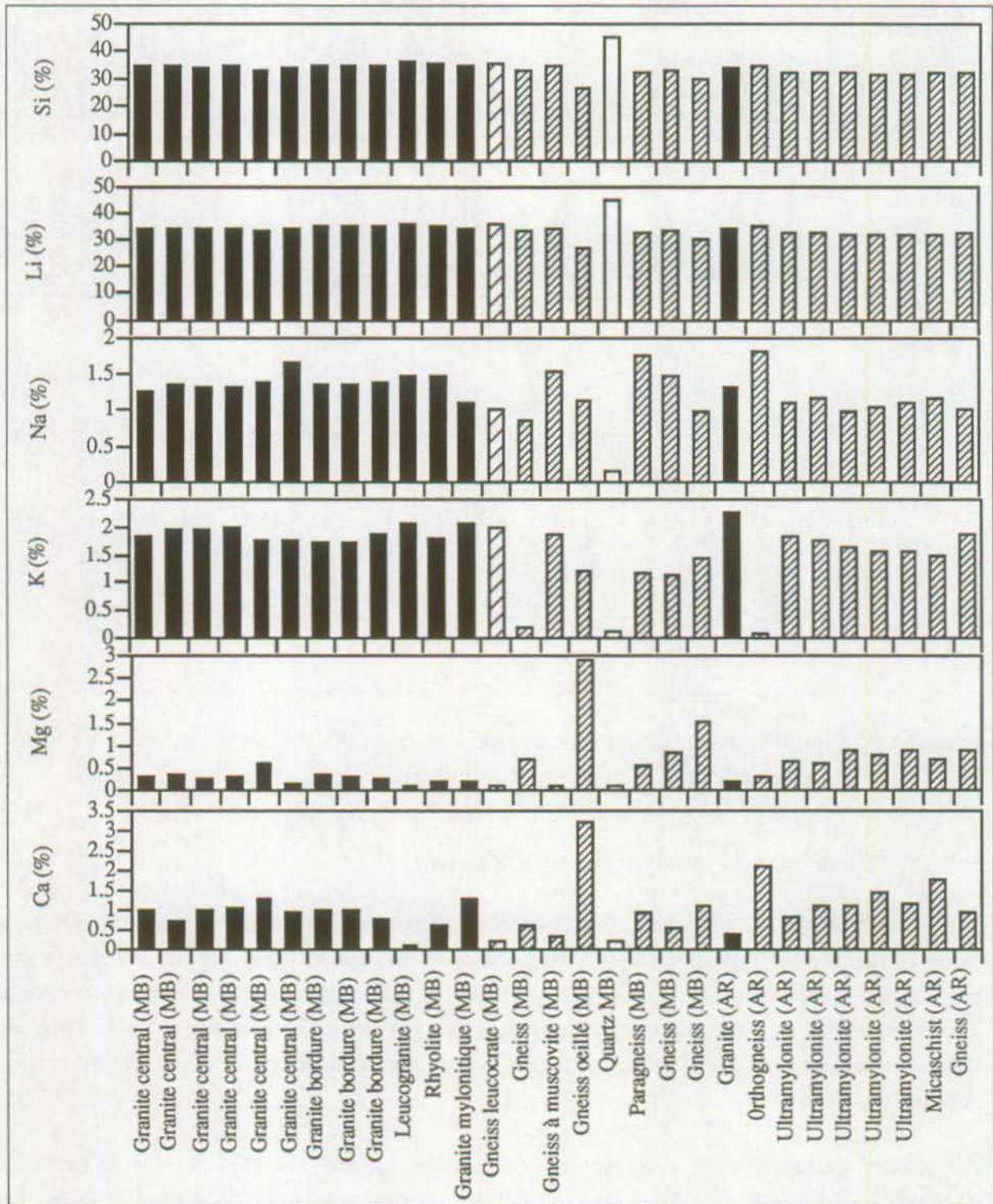


Figure 5.2 Représentation graphique des analyses chimiques (Si, Li, Na, K, Mg, Ca) de quelques roches caractéristiques.

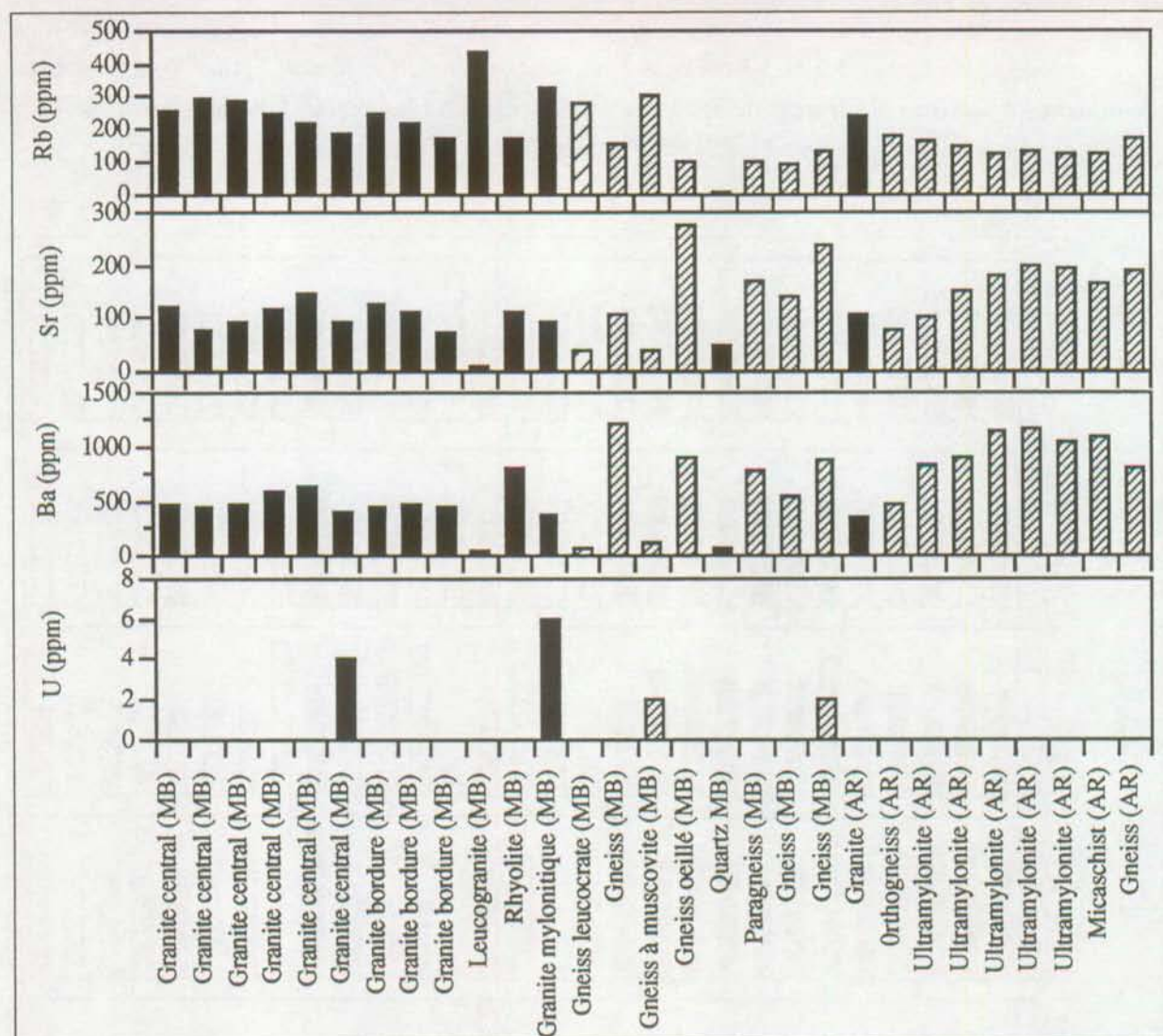


Figure 5.3 Représentation graphique des analyses chimiques (Rb, Sr, Ba, U) de quelques roches caractéristiques.

5.5.1 Test de mise en solution de roche (lixiviats)

Dans le but de simuler, très simplement, la mise en solution naturelle des roches par les eaux souterraines, un certain nombre de roches typiques des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges ont été réduites en poudre puis attaquées à l'eau déionisée avec apport de CO_2 (méthodologie voir chapitre 4). Les résultats analytiques de la mise en solution des roches ainsi que la situation géographique sont rassemblés dans l'annexe 5.3. La figure 5.4 présente les concentrations obtenues pour les différents lixiviats de roche, associées à celles des eaux souterraines de la source du Brocard.

Ces premiers résultats montrent qu'à l'exception du strontium, des fluorures, des sulfates et de l'uranium, l'ensemble des paramètres chimiques des lixiviats possèdent des valeurs très nettement supérieures à celles des concentrations moyennes des eaux souterraines des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges. Ce phénomène doit être mis en relation avec la forte attaque de l'eau saturée en CO_2 sur les poudres de roche, ainsi qu'avec l'extrême finesse des échantillons, qui constituent des surfaces de contact eau-roche beaucoup plus élevées que celles qui existent dans le milieu naturel (figure 5.4 et 5.5).

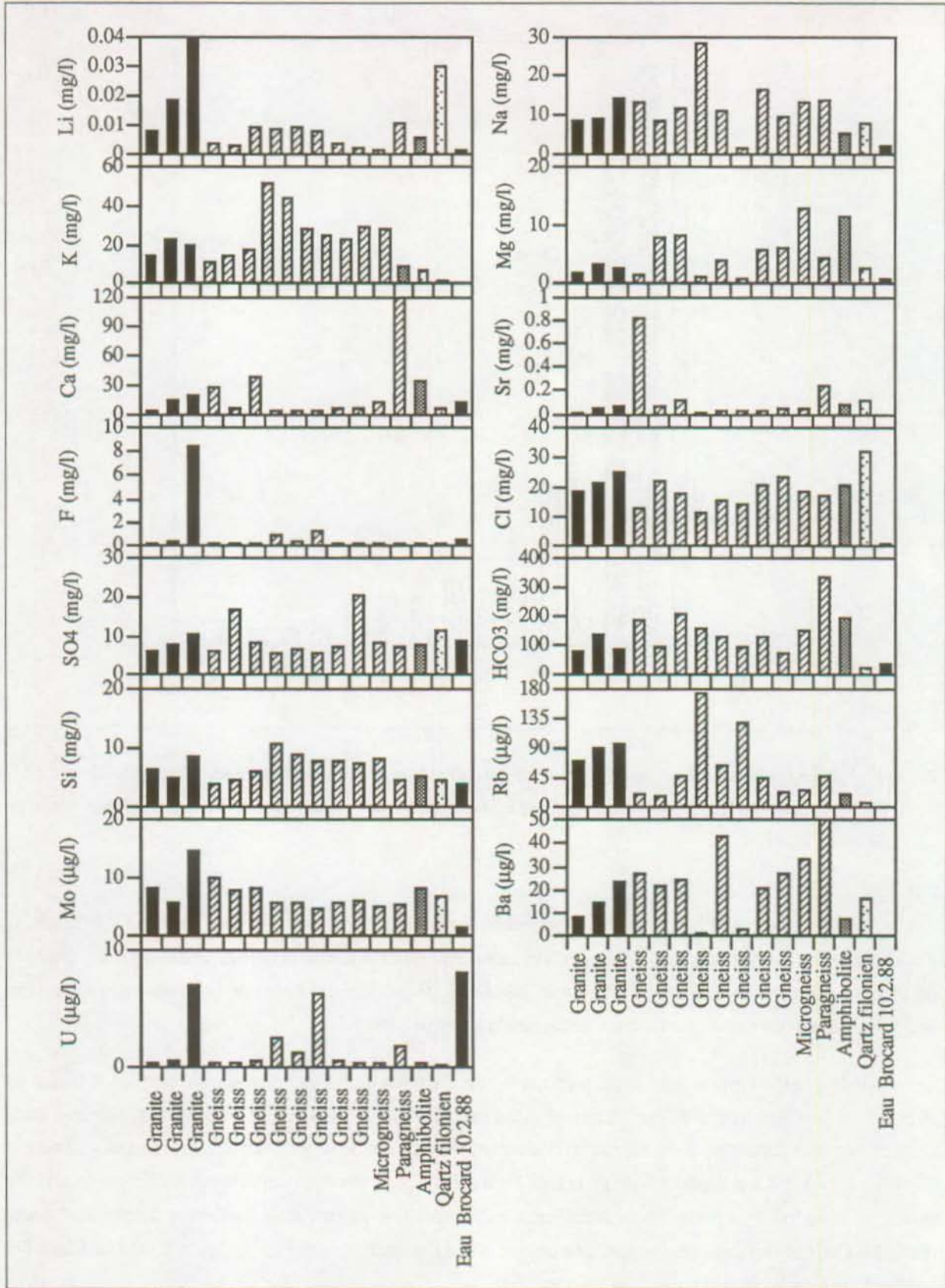


Figure 5.4 Composition chimique des lixiviats de roches en comparaison avec celle des eaux souterraines de la source du Brocard.

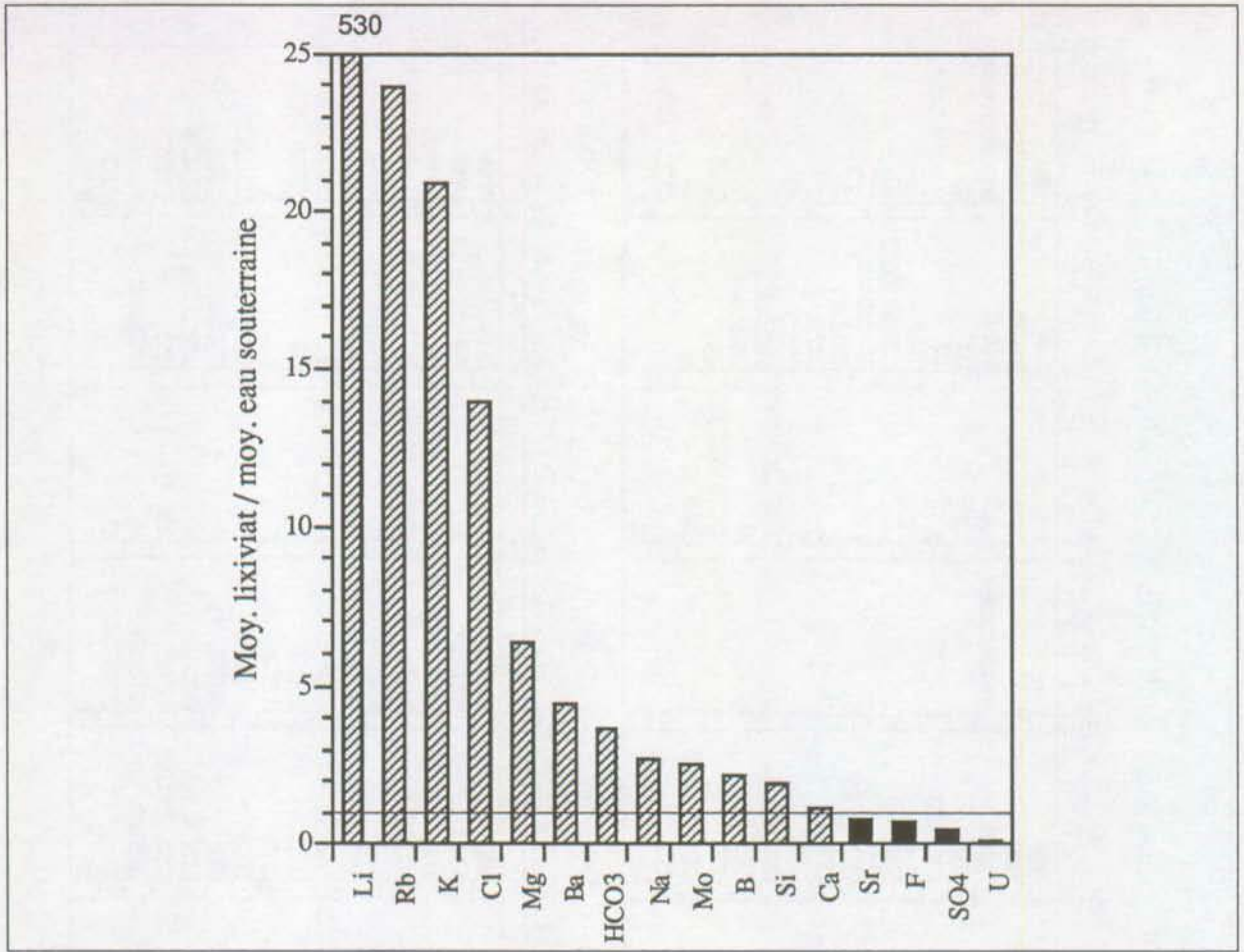


Figure 5.5 Représentation graphique du rapport des concentrations moyennes des lixiviats avec les concentrations moyennes des eaux souterraines des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

Les lixiviats issus de gneiss et de granites ne présentent pas de contrastes éloquentes. C'est pourquoi il a été décidé d'effectuer un classement hiérarchique des lixiviats afin de dégager la composition s'approchant le plus des eaux du Brocard. Cette classification s'est faite sur la base de la comptabilité des écarts de l'ensemble des paramètres analysés pour chaque roche par rapport aux eaux souterraines (tableau 5.1).

Les résultats montrent que le lixiviat qui présente le plus d'affinité de ces paramètres avec ceux de la source du Brocard est issu d'un gneiss foliacé et fissuré provenant du massif de Bovine (bassin versant présumé de la source). Les deux échantillons qui suivent ce classement hiérarchique sont liés à des granites (massif du Trient et Aiguilles Rouges). La composition du granite de Vallorcine n'étant pas significativement différente de celle du granite du Trient, il n'y a pas de forte contradiction avec la position du granite de Vallorcine dans ce classement d'affinité. Cette observation peut révéler une origine mixte des eaux souterraines du Brocard, à la fois dans des aquifères gneissiques et granitiques.

Tableau 5.2 Classement par ordre d'affinité de la composition chimique des différents lixiviats par rapport aux eaux souterraines de la source du Brocard.

N°	Roches	Aquifères*	Classement
13	Gneiss foliacé fissuré	GneMB	1
1	Granite	GraAR	2
2	Granite	GraMB	3
9	Gneiss à muscovite	GraMB	4
10	Microgneiss œillé	GneAR	5
5	Gneiss à muscovite	GneAR	6
15	Amphibolite	GneAR	7
11	Quartz filonien	GneMB	8
8	Gneiss	GneMB	9
6	Gneiss migmatitique	GneMB	10
14	Gneiss	GneMB	11
4	Gneiss migmatitique	GneMB	12
7	Gneiss leucocrate	GneMB	13
3	Granite	GraMB	14
12	Paragneiss	GneMB	15

*Gra = Granite, Gne = Gneiss, MB = Mont-Blanc, AR = Aiguilles Rouges (définition des aquifères, voir 5.4)

5.6 Tectonique

5.6.1 Introduction

Les travaux de Corbin et Oulianoff (1959), Von Raumer (1967), Steck (1966) convergent sur l'existence de quatre orogènes qui ont marqué quatre directions tectoniques majeures:

- 1) N-S ancienne (non datée)
- 2) NE-SW varisque (1er stade), mise en place des granites de Vallorcine et Montenvers
- 3) N 20° varisque (2e stade), mise en place du granite "protogine" du Mont-Blanc
- 4) NE-SW alpine

Les travaux de détail de Jamier (1975) effectués dans le massif de l'Arpille (Aiguilles Rouges), en surface et dans la galerie de Ravoire qui traverse le massif, ainsi que dans la galerie est d'Emosson (massif du Mont-Blanc), permettent de tirer en résumé les informations suivantes:

5.6.2 Tectonique anté-secondaire

Les mesures systématiques de la schistosité ont montré une direction privilégiée N-S et NE-SW, conformément au schéma des auteurs cités plus haut. Il faut souligner que cette phase cassante anté-triasique est associée à des

failles mylonitisées dont l'orientation varie entre N 10° et N 40°. Dans la galerie est du complexe hydroélectrique d'Emosson, les schistes cristallins sont orientés en moyenne N 30°. Les pendages restent constants (env. 70° SE). Les directions peuvent varier en relation avec la direction de compression alpine. Quant aux granites de cette galerie (Trient), ils possèdent une direction nettement marquée: elle correspond à celle des plans de macles des feldspaths, généralement NE–SW, parallèle à la foliation du granite de Vallorcine (Carne, 1971). Cette direction est liée à la mise en place du granite de direction varisque NE–SW et correspond également à la phase responsable de la foliation des gneiss du massif de l'Arpille (Aiguilles Rouges, Jamier, 1975).

5.6.3 Tectonique alpine

Les diaclases

Aussi bien dans le massif des Aiguilles Rouges que dans le Mont-Blanc, deux systèmes principaux de fissures ont été mis en évidence:

Direction horizontale N 55°

Direction horizontale N 145°

Les failles

Les massifs des Aiguilles Rouges et du Mont-Blanc montrent des sens de mouvements analogues:

- Les mylonites alpines N 50° : Elles correspondent dans le Mont-Blanc, d'après les données d'Oulianoff, à des chevauchements vers le NW (stries de plus grande pente) synchrones à l'écrasement interne subi par le granite du Mont-Blanc il y a 40 Mio. d'années (Oligocène).
- Les failles N–S: Très souvent mylonitisées, elles sont soit des cisaillements sénestres, soit des failles à rejet vertical.
- Les failles E–W: Elles jouent en décrochement dextre. Dans la galerie de Ravoire, vers R 3250, deux failles E–W sont des mylonites importantes à éléments bréchiques grossiers.

Dans le massif de l'Arpille il existe encore de nombreuses failles normales orientées N 130° à N 160°, parfois peu ouvertes.

5.6.4 Conclusion

Du point de vue hydrogéologique, les écoulements souterrains majeurs, présents dans les formations gneissiques et granitiques des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, se manifestent principalement dans les failles et les diaclases d'orientation N–S et NE–SW. Ces discontinuités sont fréquemment ouvertes, elles contiennent souvent des matériaux de broyage (quartz, feldspaths et argiles). La mylonitisation est à l'origine des fortes perméabilités de ce système (Jamier, 1975).

6. HYDROLOGIE DE SURFACE

L'interprétation des données hydrologiques des eaux souterraines implique de prendre en compte les données physico-chimiques des différents stades de l'infiltration dans le milieu aquifère ainsi que les caractéristiques géochimiques et pétrographiques des faciès lithologiques traversés (figure 6.1).

Les grands ensembles qui sont à la base du traitement et de la compréhension des mesures et des analyses des eaux souterraines sont les suivants:

1. Les eaux de surface:

Elles proviennent essentiellement des pluies, des neiges et dans certains cas des eaux des torrents qui peuvent recharger les aquifères. Les caractéristiques chimiques de ces eaux sont essentiellement fonction de la pollution atmosphérique.

2. Les eaux de la base des sols:

Ce sont les eaux qui ont percolé dans le milieu pédologique et qui participent à la recharge des eaux souterraines. L'apport géochimique de ces eaux est conditionné essentiellement par la part pétrographique des sols ainsi que par l'activité biologique qui s'y développe.

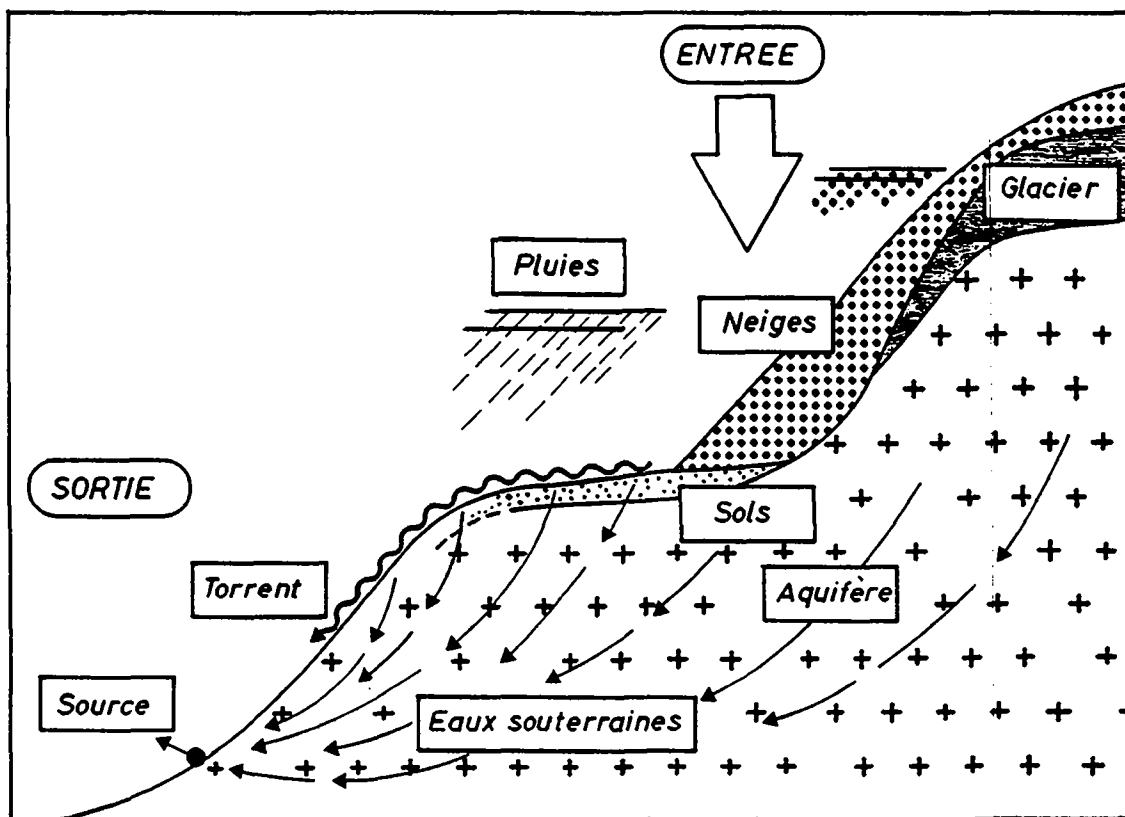


Figure 6.1 Représentation schématique des conditions générales de circulation des eaux souterraines dans le massif du Mont-Blanc.

6.1 Pluies et neiges

L'acquisition des caractéristiques géochimiques des pluies a été difficile à réaliser car les trappes pluviométriques demandent une logistique de prélèvement très lourde. Lors de cette recherche, seuls les échantillons de pluie prélevés dans le cadre du projet AQUISOL (Atteia et al, 1990) à la station de Lognan (Argentière, France) ont été utilisés pour estimer l'apport des différents éléments chimiques avant leur infiltration dans le milieu fracturé. Afin d'acquérir des informations relatives aux caractéristiques des eaux d'infiltration sur un domaine plus large, il est apparu plus facile d'effectuer des prélèvements du stock neigeux accumulé durant la saison d'hiver, sur plusieurs sites répartis à des altitudes différentes sur le massif du Mont-Blanc suisse. Ces prélèvements, effectués en quelques heures par hélicoptère, permettent d'obtenir une image synchrone des caractéristiques chimiques d'une grande partie des neiges qui participent à la recharge des aquifères. Ces données sont extraites d'un réseau plus large mis en place sur la partie occidentale des Alpes suisses (Parriaux et al, 1990).

Caractéristiques chimiques:

La figure 6.2 représente les concentrations des éléments majeurs et en traces dans les eaux de la source du Brocard (Martigny, Suisse) en relation avec celles des neiges et des pluies échantillonnées dans le massif du Mont-Blanc. Elle montre que dans l'ensemble, les concentrations mesurées dans les neiges et les pluies sont nettement inférieures à celles des eaux souterraines de la source du Brocard. Les chlorures et les nitrates font exception à cette règle avec des valeurs proches de celles atteintes par les eaux souterraines. La source du Brocard a été utilisée comme référence, puisque ses caractéristiques chimiques sont comparables à plus de 60 % des eaux souterraines observées dans le massif du Mont-Blanc. La situation des points d'échantillonnage est indiquée sur la figure 4.1 et sur le tableau 6.1. Les tableaux 6.2 et 6.3 présentent les données analytiques des éléments chimiques majeurs et en traces.

En résumé, deux groupes distincts apparaissent:

1. Les cations, qui présentent des concentrations dérisoires par rapport à la source du Brocard.
2. Les chlorures et les nitrates, qui atteignent des concentrations du même ordre de grandeur que celles des eaux de la source.

Entre ces deux groupes, à l'exception des neiges de Lognan, les sulfates, qui sont bien représentés dans les échantillons de neiges, restent toutefois nettement inférieurs à ceux contenus dans les eaux souterraines.

Ces observations montrent que les chlorures de la majorité des eaux ne peuvent pas être utilisés dans les interprétations des relations "eau-roche" du milieu fissuré cristallin.

Tableau 6.1 Situation des sites d'échantillonnage de neige, de pluie et de la source du Brocard.

N°	Site		Massif	Coord Y	Coord. X	Altitude
165	Bel Oiseau	Neige	Aiguilles Rouges	561.010	103.470	2500
177	Emosson	Neige	Aiguilles Rouges	561.870	101.780	1830
179	Giète	Neige	Mont-Blanc	568.430	100.700	1853
180	Lac du Dru	Neige	Mont-Blanc	569.030	092.960	2685
181	Col d'Omy	Neige	Mont-Blanc	569.230	092.960	3250
182	Lognan	Pluie	Mont-Blanc	561.400	090.850	1920
1	Brocard	Eau souterraine	Mont-Blanc	570.300	102.490	570

Tableau 6.2 Concentrations des éléments majeurs des neiges, des pluies et des eaux souterraines de la source du Brocard.

N°	Site	Date de prélèvement	Na (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	Cl (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)
165	Bel Oiseau	15.3.88	0.017	0.006	0.003	0.01	0.3	0.4	0.3
177	Emosson	15.3.88	0.027	0.016	0.003	0.02	0.4	0.4	0.5
179	Giète	15.3.88	0.024	0.016	0.002	0.02	0.5	0.8	0.5
180	Lac du Dru	15.3.88	0.024	0.018	0.002	0.02	0.4	1.0	0.3
181	Col d'Omy	15.3.88	0.006	0.002	0.001	0.01	0.2	0.2	0.5
182	Lognan	25.6.90	0.1	0.050	0	0.45	0.3	0.3	1.0
182	Lognan	1.8.90	0.3	0.050	0	0.25	0.3	0.2	1.3
182	Lognan	7.9.90	0.1	0.050	0	0.25	0.3	0.4	1.7
182	Lognan	8.10.90	0.1	0	0	0.65	0.2	0.2	1.0
1	Brocard	10.2.88	1.71	1.31	0.72	13.4	0.8	1.49	9.0

Tableau 6.3 Concentrations des éléments en traces des neiges, des pluies et des eaux souterraines de la source du Brocard.

N°	Site	Date de prélèvement	Rb (µg/l)	Sr (µg/l)	Ba (µg/l)	Mo (µg/l)	As (µg/l)	W (µg/l)	U (µg/l)
165	Bel Oiseau	15.3.88	0.1	0.6	2.1	0	0	0	0
177	Emosson	15.3.88	0.1	0.9	3.6	0	0	0	0
179	Giète	15.3.88	0.1	0.9	5.9	0	0	0	0
180	Lac du Dru	15.3.88	0.2	0.7	3.7	0	0	0	0
181	Col d'Omy	15.3.88	0	0.1	0.7	0	0	0	0
182	Lognan	25.6.90	0	6.0	3.0	0	0	0	0
182	Lognan	1.8.90	0	8.0	1.0	0	0	0	0
182	Lognan	7.9.90	0	0	2.0	0	0	0	0
182	Lognan	8.10.90	0	0	1.0	0	0	0	0
1	Brocard	10.2.88	0.2	25	0.5	1.6	38.3	-	7.9

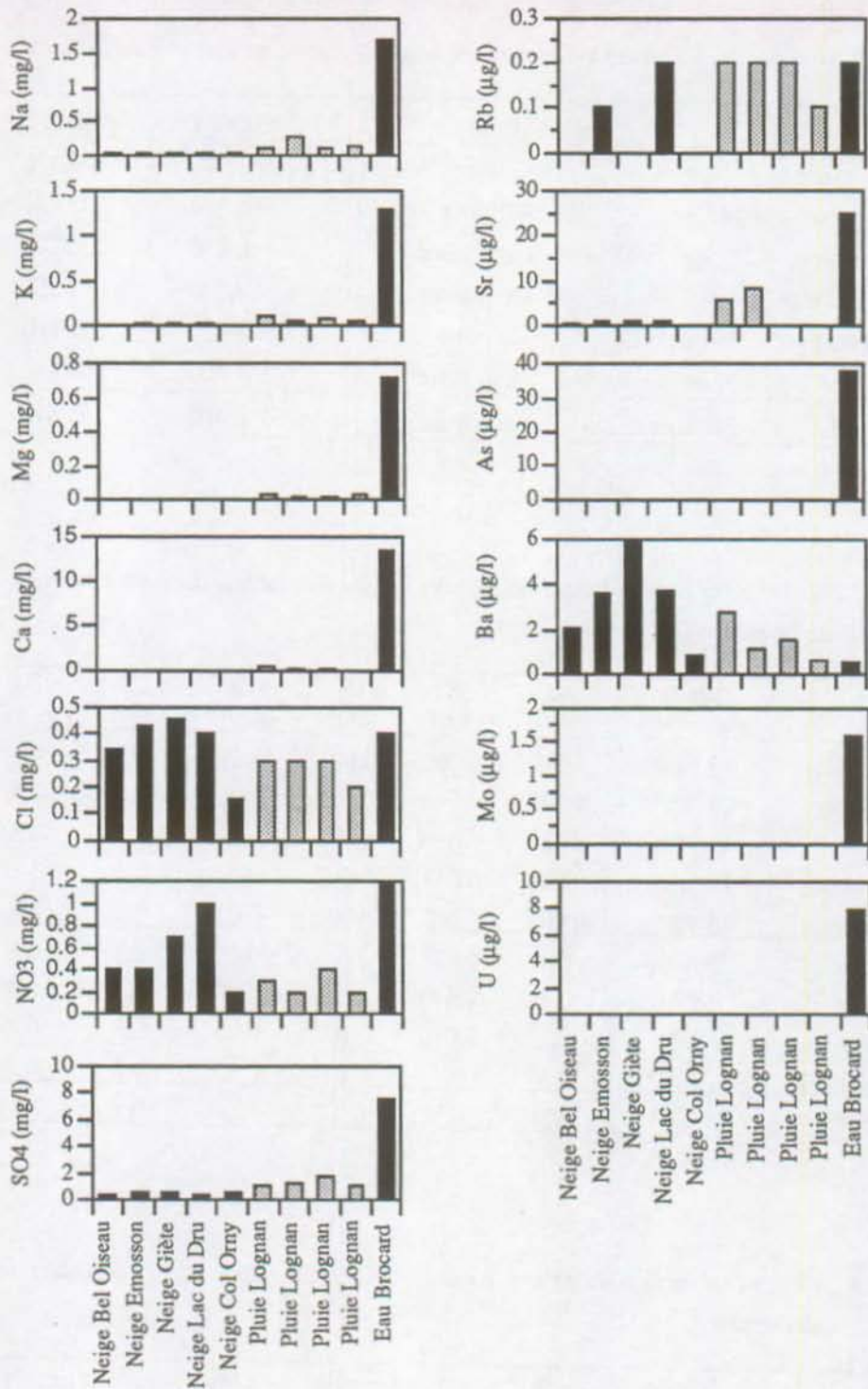


Figure 6.2 Représentation comparative des paramètres chimiques des pluies et des neiges avec les eaux souterraines de la source du Brocard.

Caractéristiques isotopiques

La composition isotopique (oxygène-18, deutérium et tritium) des échantillons de neige a été mesurée parallèlement aux analyses chimiques. Les données disponibles sont présentées dans un article récent (Dray et al, 1990).

6.2 Les torrents

Afin de situer les caractéristiques physico-chimiques des écoulements superficiels (essentiellement les écoulements sous-glaciaires) par rapport aux eaux souterraines, dix torrents répartis sur les versants nord et sud du massif du Mont-Blanc ont été échantillonnés (figures 6.3 et 6.4). Les résultats des mesures et des analyses ont été représentés sur un graphique en relation avec la source de référence du Brocard (tableau 6.4 et figure 6.5).

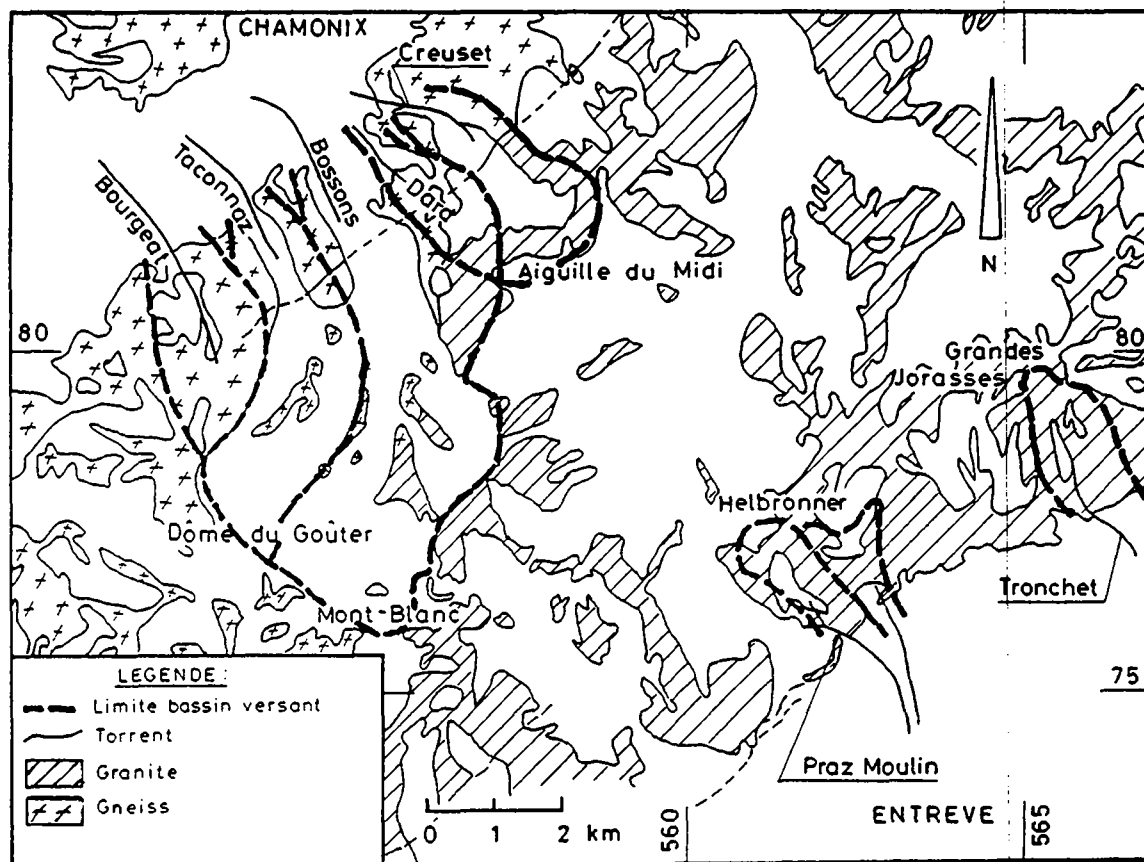


Figure 6.3 Situation des torrents étudiés et contexte géologique des bassins versants (Mont-Blanc français et italien).

La figure 6.5 représente les différentes mesures physico-chimiques des torrents en comparaison avec celles de la source du Brocard. Cette représentation met en évidence, au-delà de la grande variabilité spatiale des paramètres des différents torrents, une relative similitude de leurs caractéristiques avec la composition des eaux du Brocard. En effet seules les concentrations en silice, en rubidium et en baryum contrastent entre les torrents et la source. Dans le premier cas, la silice est en excès dans la source alors que dans le second, le rubidium et le baryum sont en concentrations plus élevées dans les torrents. Ces valeurs de baryum relativement élevées ont également été observées dans les eaux de pluie, de neige et d'infiltration dans les sols. Elles sont probablement en relation avec les rejets dans l'atmosphère des centrales d'incinération d'ordures.

D'une manière générale ces observations indiquent que les torrents ont une relative forte capacité de mise en solution des roches sur lesquelles ils s'écoulent, ou que leur origine est liée à des vidanges d'eaux souterraines. Les torrents situés sur le versant français ont été échantillonnés après les grandes périodes de fonte de neiges et des glaces. Les caractéristiques géochimiques des eaux correspondent probablement à l'écoulement d'eaux souterraines mélangées aux eaux de fonte glaciaire. Cette remarque s'applique très certainement au torrent du Dard, dont les

caractéristiques géochimiques sont typiques des eaux souterraines d'aquifères granitiques (valeurs élevées en Na, F, Cl, Mo et U). Les torrents échantillonnés en Italie, en période de crue, indiquent un très net contact avec les formations calcaires (valeurs élevées en Mg, Ca, HCO₃, Sr), bien que les formations granitiques constituent la majeure partie du bassin versant. Dans ce cas l'apport éventuel d'eaux souterraines est difficilement détectable.

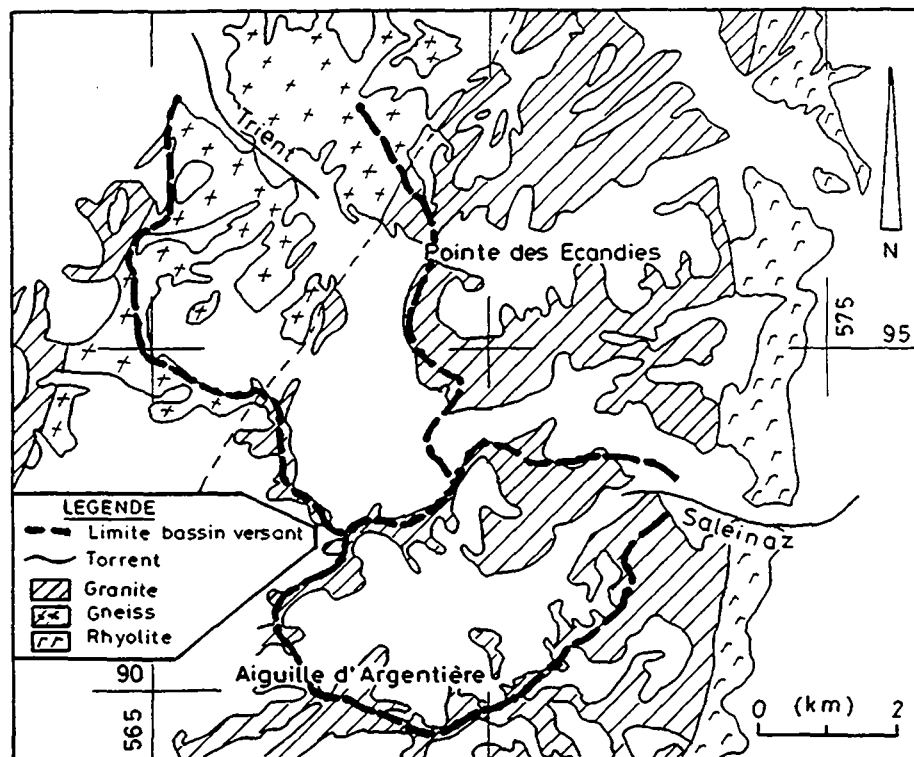


Figure 6.4 Situation des torrents étudiés et contexte géologique des bassins versants (Mont-Blanc suisse).

Tableau 6.4 Caractéristiques physico-chimiques des torrents et de la source du Brocard.

N°	Site	Date de prélèvement	Temp. (°C)	Li (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	Cl (mg/l)	NO ₃ (mg/l)
166	Trient	23.8.89	10.4	0.0008	0.84	1.83	0.27	8.9	0.14	0.4
167	Saleina	23.8.89	2.5	0.0006	0.23	0.32	0.01	1.5	0	0.7
169	Dard	8.9.88	8.6	0.0010	2.1	1.02	0.23	7.2	0.7	0
171	Bosson	8.9.88	3.0	0.0045	0.06	0.72	0.09	3.6	0.1	0
172	Taconnaz	8.9.88	6.4	0.0050	0.43	2.13	0.35	9.8	0.1	0.1
173	Bourgeat	8.9.88	13.6	0.0030	0.8	2.05	0.62	18.3	0.2	0.2
170	Creuset	8.9.88	5.5	0.0042	0.34	1.22	0.27	4.5	0.2	0.2
174	Praz Moulin	15.5.88	6.4	0.0033	0.72	1.32	3.24	37.0	0.4	0.4
175	Meyens	19.5.88	5.5	0.0021	0.05	1.31	2.13	27.5	0.1	0.1
176	Tronchet	19.5.88	5.9	0.0027	0.63	0.69	1.54	17.1	0.3	1.4
1	Brocard	10.2.88	7.2	0.0016	1.7	1.31	0.72	13.40	0.8	1.5
N°	Site	Date de prélèvement	F (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	Rb (µg/l)	Sr (µg/l)	Ba (µg/l)	Mo (µg/l)	As (µg/l)	U (µg/l)
166	Trient	23.8.89	0	4.5	7.4	20.8	2.3	1.6	8.2	1.5
167	Saleina	23.8.89	0	0.2	5.9	3.6	0.8	0	0	0
169	Dard	8.9.88	0.57	12.2	2.4	65.7	0.9	7.3	3.8	5.1
171	Bosson	8.9.88	0.02	3.1	3.0	25.4	3.0	0	0.6	0
172	Taconnaz	8.9.88	0.05	10.8	7.0	59.3	4.0	1.1	2.6	0.2
173	Bourgeat	8.9.88	0.04	26.3	5.5	128	16.5	1.8	35	2.4
170	Creuset	8.9.88	0.14	6.2	0.4	14.6	8.7	1.2	0.4	0.2
174	Praz Moulin	15.5.88	0.06	11.6	3.3	229	9.7	3.0	0.4	4.9
175	Meyens	19.5.88	0.05	9.1	5.4	114	3.0	1.5	0.2	6.1
176	Tronchet	19.5.88	0.06	8.8	2.1	198	3.9	1.7	0.2	1.9
1	Brocard	10.2.88	0.50	9.0	0.2	25	0.5	1.6	38.3	7.9

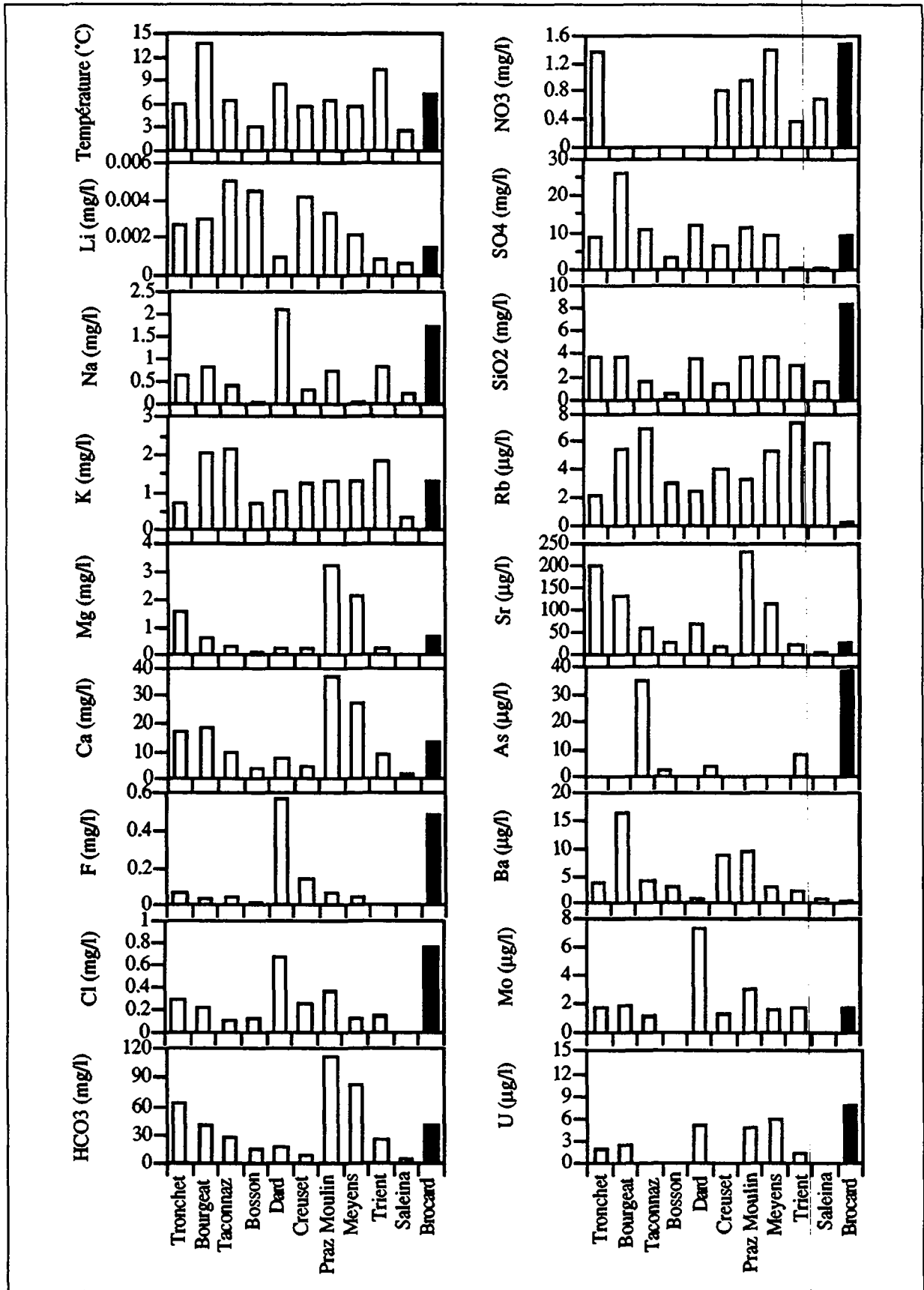


Figure 6.5 Comparaison des données physico-chimiques de torrents situés sur les versants nord et sud du massif du Mont-Blanc et de la source du Brocard.

6.3 Les écoulements dans les sols

Dans le but d'élargir les connaissances liées aux caractéristiques géochimiques des eaux de recharge des aquifères, une station d'observation lysimétrique a été installée en 1990 dans le massif du Mont-Blanc (situation, voir figure 4.1). Cette station a été implantée, dans le cadre du projet AQUISOL, sur une formation morainique du plateau de Lognan, Argentière, France (Atteia et al, 1990). Les caractéristiques pédologiques de cette région sont très représentatives des sols à substratum gneissique et granitique (podzol) de l'ensemble des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges (Dambrine, 1985).

Les données montrent que pour les éléments majeurs analysés dans les eaux d'infiltration (sol), seuls les chlorures présentent des concentrations proches de celles observées dans des eaux souterraines peu minéralisées (p.ex. Brocard). Concernant les éléments en traces, à l'exception du rubidium et du baryum, qui se trouvent en concentrations beaucoup plus élevées dans les sols, les autres éléments contenus dans les eaux des sols sont proches ou en-dessous de la limite de détection (tableaux 6.5 et 6.6). Pour illustrer ces premiers résultats provisoires (ils ne s'appuient que sur une seule station), les concentrations des eaux des sols ont été comparées une fois encore aux eaux souterraines de la source du Brocard (figure 6.6).

Le problème du pergélisol sera traité dans le cadre d'essais de traçage en haute montagne au chapitre 8.

Tableau 6.5 Concentrations en éléments majeurs dans les eaux de percolation des sols de la station lysimétrique de Lognan et des eaux souterraines de la source du Brocard.

N°	Site	Date de prélèvement	Na (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	Cl (mg/l)	NO3(mg/l)	SO4 (mg/l)
182	Lognan	25.6.90	0.5	0.15	0.10	0.95	0.4	0.1	4.4
182	Lognan	1.8.90	0.4	0.05	0.05	0.30	0.3	0.1	1.3
182	Lognan	7.9.90	0.2	0.05	0	0.55	0.3	0.2	1.1
182	Lognan	1.10.90	0.4	0.15	0.10	0.80	0.6	0.1	0.9
182	Lognan	8.10.90	0.5	0.15	0.05	0.35	0.8	0.3	1.9
1	Brocard	10.2.88	1.7	1.31	0.72	13.40	0.8	1.5	9.0

Tableau 6.6 Concentrations des éléments en traces dans les eaux de percolation des sols de la station lysimétrique de Lognan et les eaux souterraines de la source du Brocard.

N°	Site	Date de prélèvement	Rb (µg/l)	Sr (µg/l)	Ba (µg/l)	Mo (µg/l)	As (µg/l)	U (µg/l)
182	Lognan	25.6.90	1	0	52	0	0	0.04
182	Lognan	1.8.90	1	0	3	0	0	0.04
182	Lognan	7.9.90	1	0	21	0	0	0.02
182	Lognan	1.10.90	1	0	16	0	0	0.05
182	Lognan	8.10.90	1	0	32	0	0	0.02
1	Brocard	10.2.88	0.2	25	0.5	1.6	38.3	7.90

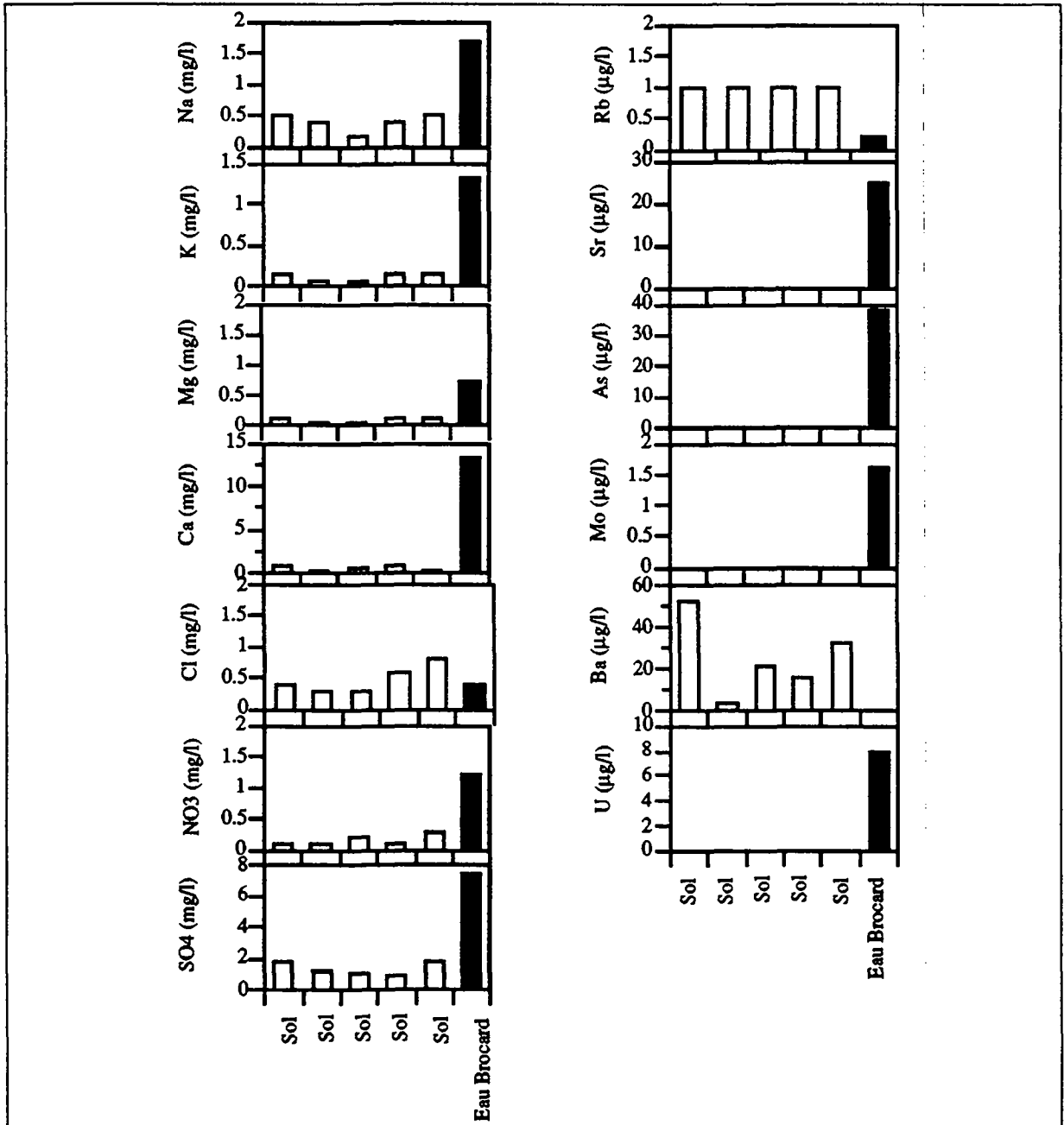


Figure 6.6 Comparaison des concentrations des ions majeurs et des éléments en traces dans les eaux d'infiltration de sol et les eaux souterraines du Brocard.

Conclusions

Les comparaisons des caractéristiques des écoulements de surface ont été effectuées, à ce stade, avec les eaux souterraines de la source du Brocard. Bien que cette dernière ne représente pas l'ensemble des sources étudiées, elle correspond toutefois aux caractéristiques hydrochimiques d'un très grand nombre d'eaux faiblement minéralisées, que l'on observe aussi bien dans le massif du Mont-Blanc que dans celui des Aiguilles Rouges. Ces premières observations, qui n'ont pas la prétention de représenter rigoureusement les caractéristiques régionales de l'ensemble des eaux d'infiltration qui participent à la recharge des aquifères, permettent cependant de tirer les conclusions préliminaires suivantes:

- 1) Les chlorures (à l'exception de ceux des eaux profondes des aquifères granitiques) et les nitrates analysés dans la majorité des eaux souterraines des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges ont une origine atmosphérique acquise avant leur infiltration dans les aquifères cristallins.
- 2) Le baryum dans l'eau des pluies, des neiges, des torrents et des sols a montré des concentrations élevées par rapport à celles du Brocard. Les interprétations de cet élément dans le cadre des eaux souterraines devront être effectuées avec prudence.
- 3) Les eaux des torrents ont montré dans l'ensemble des caractéristiques physico-chimiques relativement semblables à celles des eaux souterraines.

7. LES EAUX SOUTERRAINES

Afin de mener à bien cette étude, plus de 160 points d'eau ont été sélectionnés, mesurés et échantillonnés sur l'ensemble des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, aussi bien en surface qu'en galeries. L'annexe 4.1 fournit la liste et la situation géographique et géologique des différentes émergences, alors que l'annexe 7.1 rassemble l'ensemble des données physico-chimiques qui sont à la base des interprétations hydrogéologiques de ce travail.

7.1 Classification des eaux souterraines

Elle est basée sur l'analyse d'échantillons prélevés en période d'étiage, lorsque les eaux sont le plus représentatives des aquifères dont elles sont issues. La classification a donc été établie sur la base de mesures et d'analyses discrètes de chaque point d'émergence.

7.1.1 Classification thermique

Il existe de nombreuses classifications thermiques des eaux souterraines (Castagny, 1963; Schoeller, 1962). Toutefois, dans le cadre de cette étude, nous avons choisi les limites proposées par Vuataz (1982), bien adaptées aux caractéristiques thermiques des eaux observées couramment dans les Alpes. Elles sont divisées en trois groupes:

- Eau froide < 12 °C
- Eau subthermale 12 - 20 °C
- Eau thermale > 20 °C

Les eaux froides constituent environ 85 % des eaux souterraines étudiées. Elles sont distribuées naturellement dans l'ensemble des formations aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

Les eaux subthermales et thermales représentent respectivement 5 % et 10 % de l'ensemble des émergences observées.

Toutes les sources de ce dernier groupe sont exclusivement en relation avec des aquifères granitiques du massif du Mont-Blanc. Il faut souligner qu'à l'exception de la source thermale de Bovermier, toutes les venues subthermales et thermales ont été observées en galeries (Tunnel du Mont-Blanc et galerie est d'Emosson, figure 4.1 et annexe 4.1).

7.1.2 Classification chimique

Afin de classer les différentes eaux souterraines, nous avons appliqué pour chaque point d'eau la classification de Schmassmann (in Högl, 1980), basée sur les ions majeurs représentant plus de 20 % de la somme des cations ou des anions exprimée en milliéquivalents par litre (meq/l). L'ensemble des émergences (eaux souterraines

observées en surface et en galeries) sont ainsi classées (annexe 7.2). Les eaux étudiées se répartissent en trois groupes principaux:

- 1) Les eaux bicarbonatées (calciques et sodiques)
- 2) Les eaux sulfatées (calciques et sodiques)
- 3) Les eaux chlorurées (sodiques).

Le tableau 7.1 présente les différents types géochimiques observés dans les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges en relation avec les températures, la minéralisation totale, les aquifères correspondants, ainsi que l'abondance relative en % des différents groupes géochimiques. En résumé, il apparaît qu'environ 90 % des eaux souterraines observées sont de type bicarbonaté et qu'environ 8,5 % sont de type sulfaté. Les autres sources sont de type chloruré.

Tableau 7.1 Classification chimique basée sur les éléments majeurs des sources observées dans les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

Classification	G	Formule	T (°C) ¹	TSD (mg/l) ¹	Aquifères ²	%	%
Bicarbonatée	calcique	1 Ca-HCO ₃	2.2-8.0	27-110	Gra(MB,AR),Gne(AR)	8.3	
		2 Ca-HCO ₃ >SO ₄	0.2-9.9	20-312	Gra(MB,AR),Gne(MB,AR)	64.0	
	sodique	3 Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	9.9-30	58-99	Gra (MB)	12.0	90.3
		4 Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄ >F	5.0-13.0	41-83	Gra (MB)	5.4	
Sulfatée	calcique	6 Ca-SO ₄ >HCO ₃	3.8-7.1	97-188	Gne (MB,AR)	3.6	
		7 Ca>Na-SO ₄	24.0	630	Gra (MB)	0.6	8.5
	sodique	8 Ca>Na-SO ₄ >HCO ₃	3.0-37.5	71-230	Gra (MB)	4.3	
		9 Na>Ca-SO ₄ >HCO ₃ >Cl	15.0	106	Gra (MB)	0.6	
Chlorurée	sodique	10 Na>Ca-Cl>SO ₄ >HCO ₃	21-26	213-284	Gra (MB)	1.2	1.2

G = groupe

¹ Variation spatiale de la température et de la minéralisation totale au sein du groupe.

² Gra = Granite, Gne = Gneiss, MB = Mont-Blanc, AR = Aiguilles Rouges.

La présence du sodium et du fluor dans les formules géochimiques (bicarbonatées ou sulfatées calciques) est principalement liée aux circulations profondes dans les aquifères granitiques (tableau 7.1). Il apparaît que le groupe 2 de type (Ca-HCO₃ > SO₄) forme 64 % des sources étudiées. Ce groupe d'eaux souterraines est associé aussi bien à des aquifères granitiques que gneissiques et ceci indifféremment dans les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges. Ceci montre les limites de ce type de classification et souligne l'intérêt de l'analyse des éléments en traces pour dégager les relations intimes qui existent entre les roches et les eaux souterraines, dont il sera question au chapitre 7.3. La figure 7.1 présente les caractéristiques géochimiques de la source du Brocard, qui appartient au groupe 2, sous forme de diagramme à secteurs, dont les différents ions sont exprimés en milliequivalents. La silice, bien qu'exprimée de manière significative dans les eaux souterraines, n'est pas dissociée et n'entre pas dans le calcul des balances ioniques. Pour cette raison, afin de donner une image exacte de la minéralisation en éléments majeurs, chaque graphique est associé à une représentation de la même analyse où seule la concentration en SiO₂ (en mg/l) est représentée en relation avec la somme des cations et des anions (en

mg/l). L'annexe 7.3 montre pour tous les autres groupes ce même type de représentation graphique, illustrant ainsi les caractéristiques de différentes eaux souterraines.

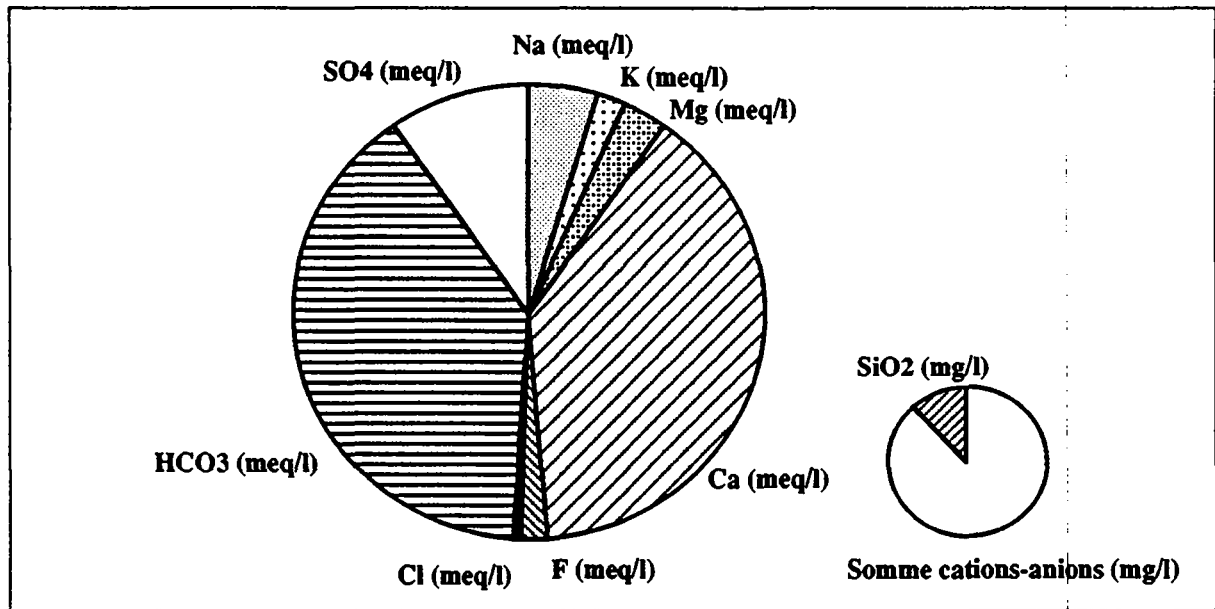


Figure 7.1 Représentation graphique des caractéristiques géochimiques du groupe 2, exemple de la source du Brocard (n° 1), Martigny, Suisse. (Pour les autres types géochimiques, voir annexe 7.3).

7.2 Variations temporelles des principales sources

7.2.1 Introduction

L'étude des variations temporelles des écoulements souterrains en milieu cristallin fissuré a porté sur sept sources (réseau I d'observation), réparties sur les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, à l'émergence d'aquifères aussi bien gneissiques que granitiques (figure 4.1). Le tableau 7.2 présente les sources observées ainsi que leur situation géographique, géologique et tectonique.

Tableau 7.2 Situation des sources et environnement géologique.

*N°	Sources	Région		Mesures	Aquifère	Unité tectonique
19	Fontaines	Finhaut	Suisse	Continues	Granite	Aiguilles Rouges
27	Col des Montets	Argentière	France	Discrètes	Gneiss	"
1	Brocard	Martigny	Suisse	Continues	Gneiss	Mont-Blanc
6	Bonnette	"	"	"	Granite	"
7	Chamois	"	"	Discrètes	Granite	"
33	Nant Provent	Chamonix	France	Continues	Gneiss	"
31	Chapeau sup.	Argentière	France	Discrètes	Granite	"

* La numérotation permet de situer les sources sur la figure 4.1, situation générale des émergences.

7.2.2 Séries temporelles, interprétations graphiques

Pour chaque émergence du réseau d'observation I, les données physico-chimiques ont été représentées en fonction du temps et en relation avec les mesures météorologiques de base. A titre d'exemple, les résultats des investigations réalisées sur la source de Bonnette sont présentés sur la figure 7.2. Les représentations graphiques des autres sources sont rassemblées à l'annexe 7.4.

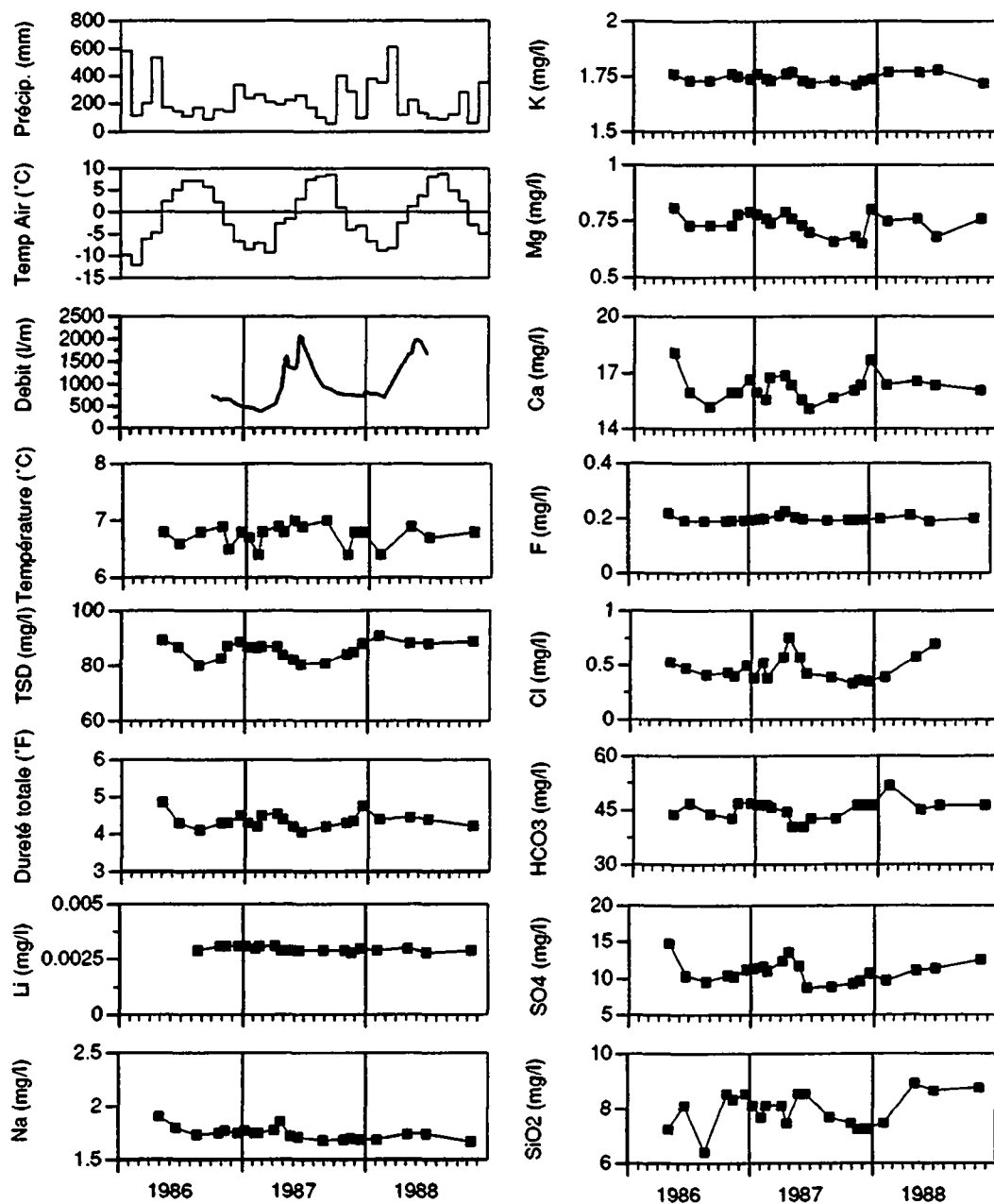


Figure 7.2 Source de Bonnette, Martigny, Suisse: Représentation graphique de la variation des paramètres physico-chimiques en relation avec les conditions météorologiques (station météorologique du Grand St-Bernard; pour les graphiques des autres sources voir annexe 7.4).

Cependant, les interprétations relatives aux types de perméabilité et de systèmes d'écoulement ont été effectuées essentiellement par l'observation du comportement des principaux paramètres hydrogéologiques (débit, température et minéralisation totale) dans le temps ainsi que leurs relations réciproques (figures 7.3 et 7.4). L'ensemble de ces données a débouché sur les conclusions suivantes:

- 1) *Variations des débits.* Les fluctuations des débits sont essentiellement liées aux conditions de la couverture neigeuse en altitude. En effet les périodes d'étiage se situent entre janvier et mars, lorsque les températures de l'air sont très basses et que l'ensemble des précipitations sont stockées sous forme de neige. Par opposition, les débits maximum sont atteints entre mai (fonte des neiges) et juillet (fonte des neiges et des glaces en haute altitude), associés à l'élévation des températures de l'air. La source du Brocard fait exception à cette règle. En effet, bien que son bassin d'alimentation principal se situe au-dessus de 2000 m, le régime des débits est nettement influencé par les pluies. Ce phénomène particulier pour cette région sera expliqué plus loin.
- 2) *Variation de la température.* Les sources ont montré dans leur ensemble une très grande stabilité de température, les fluctuations de débit n'ayant pas d'influence significative. Cela implique que les aquifères sont de grande capacité et que la zone de recharge principale des eaux souterraines doit être éloignée de l'émergence des sources, puisque l'on observe l'homogénéisation thermique complète des eaux froides d'infiltration. Ces caractéristiques permettent d'exclure également tout mélange notable des eaux souterraines par des eaux superficielles dans la zone d'émergence des sources (figures 7.3, 7.4 et annexe 7.4).
- 3) *Variation de la minéralisation..* Le comportement de la minéralisation permet de dégager deux groupes d'écoulement principaux:

Groupe I: Ce groupe est constitué des sources qui présentent une grande stabilité de leur minéralisation, même face à des variations de débit très intenses (figure 7.3). Cette observation confirme les interprétations tirées de l'observation du comportement de la température présenté plus haut. Cette caractéristique implique également que les circulations se réalisent dans un réseau de microdiscontinuités rocheuses, au sein d'un seul type d'aquifère cristallin fissuré (tableau 7.3).

Groupe II : Il est formé des sources qui présentent de faibles mais significatives diminutions de l'ensemble des paramètres chimiques avec l'augmentation des débits (figure 7.4). Bien que l'on observe une grande stabilité des températures, la diminution de la minéralisation souligne l'existence d'un mélange, en période d'intense infiltration, d'eau peu minéralisée à écoulement rapide, transitant au sein de discontinuités rocheuses majeures. Dans ce cas, il existe très probablement à la fois des circulations relativement lentes dans les microdiscontinuités, et un apport d'eau plus récent à circulations rapides en période de fortes infiltrations (fontes de neige), lié à des macrodiscontinuités aquifères (tableau 7.3).

Remarque et discussions

La source du Brocard, classée dans le groupe I, pose un problème. En effet, bien qu'à l'évidence la zone de recharge principale des eaux souterraines se situe en altitude (2000-3000 m), les élévations subites de débit ne sont pas dues à l'effet de fonte des neiges, comme dans le cas des autres sources, mais sont directement corrélées aux événements pluvieux. Ceci implique, comme cela a été vérifié en 1969 par traçage artificiel (Mornod, 1970), qu'il existe une infiltration, à basse altitude, proche de la zone sourcière. Cette dernière composante, de minérali-

sation relativement semblable aux eaux de type plus profond, ne marque pas de manière significative la minéralisation globale des eaux souterraines. La température n'est pas non plus marquée par ces eaux d'infiltration relativement superficielles, à cause du phénomène d'homogénéisation thermique lié au débit de base élevé de la source du Brocard (env. 2000 l/mn). Enfin, l'effet de fonte des neiges en altitude marque peu les régimes de débit, compte tenu de la très grande capacité aquifère et du type microfissuré des aquifères gneissiques du massif du Mont-Blanc.

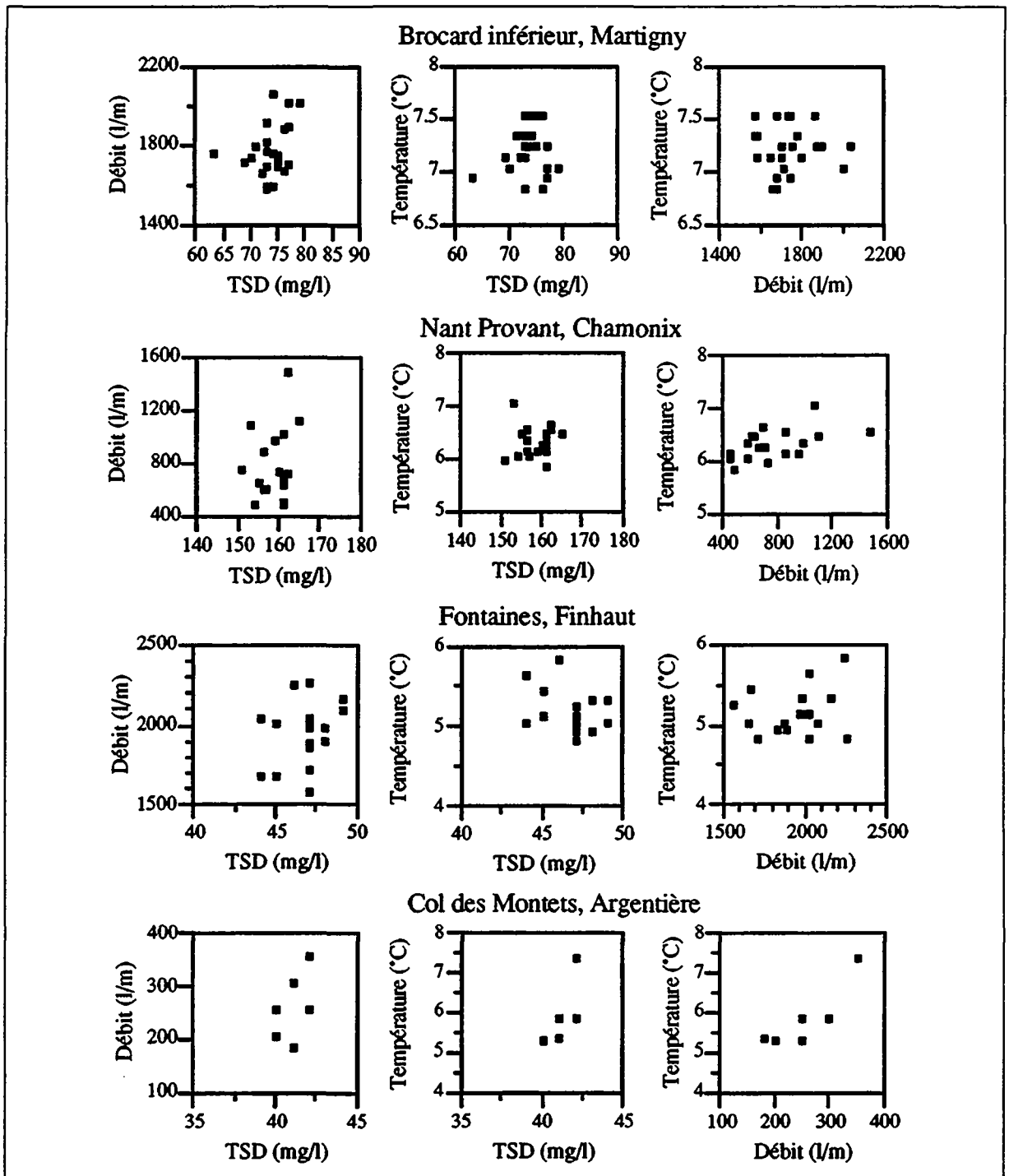


Figure 7.3 Relation entre la température, la minéralisation et les variations de débit des sources du groupe I (aquifère de type gneissique). TSD = Total des Solides Dissous.

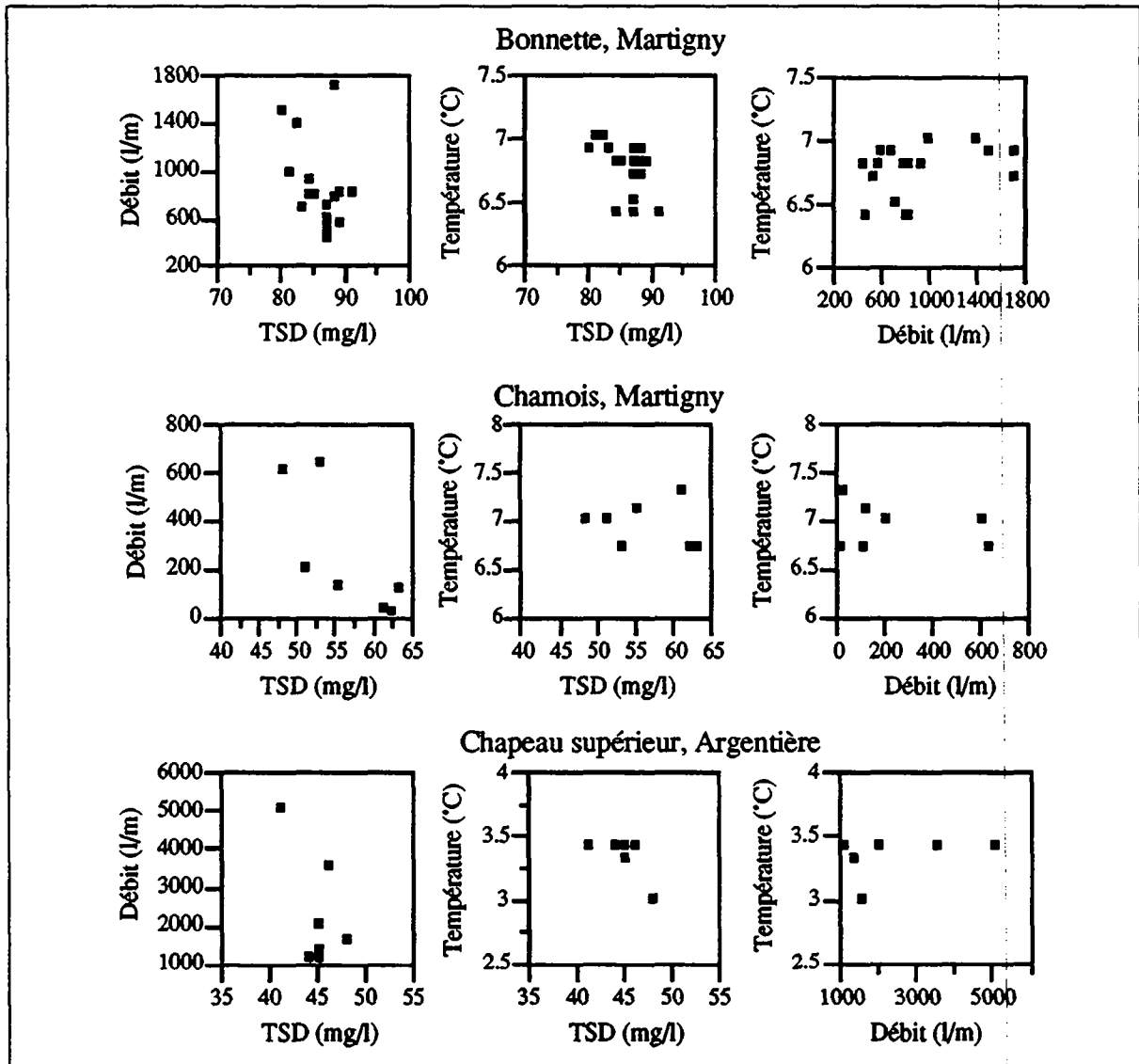


Figure 7.4 Relation entre la température, la minéralisation et les variations de débit des sources du groupe II (aquifère de type granitique). TSD = Total des Solides Dissous.

Tableau 7.3 Classification des sources en fonction du comportement relatif des principaux paramètres hydrogéologiques des sources étudiées.

Var. relatives	Groupes	Sources	Aquifères	Unités tectoniques
Q ↗	I	Brocard inf.	Gneiss	Massif du Mont-Blanc
T →		Nant Provent	Gneiss	Massif du Mont-Blanc
TSD →		Fontaines	Gneiss, granite *	Massif des Aiguilles Rouges
		Col des Montets	Gneiss	Massif des Aiguilles Rouges
Q ↗	II	Bonnette	Granite	Massif du Mont-Blanc
T →		Chamois	Granite	Massif du Mont-Blanc
TSD ↘		Chapeau sup.	Granite	Massif du Mont-Blanc

* Emergence dans les granites mais la plus grande partie du bassin versant est constitué de gneiss.

Augmentation ↗ Stabilité → Diminution ↘

7.2.3 Séries temporelles, analyse statistique simple de la variabilité des principaux paramètres

Les tableaux 7.4, 7.5 et 7.6 présentent le domaine de variabilité des principaux paramètres hydrogéologiques des sources étudiées. Ils montrent que dans tous les cas, les variations de débit sont très nettement supérieures aux variations de température et de minéralisation. Le tableau 7.7 représente le classement par ordre croissant des coefficients de variation des principaux paramètres. L'on observe que l'ordre de classement des sources n'est pas reproduit pour chaque paramètre. Toutefois, les sources du groupe I sont caractérisées par les variations de débit et de minéralisation les plus faibles, alors que les sources du groupe II présentent les plus grandes variabilités de débit et de minéralisation (tableaux 7.7 et 7.8).

Tableau 7.4 Variabilité des mesures de débit.

Sources	N°	Débit (l/mn)				Coef. var (%)	Nb
		Min.	Max.	Moy.	Ecart-type		
Fontaine	19	1560	2250	1905	185	9.7	25
Bonnette	6	429	1668	891	394	44.2	21
Brocard inf.	1	1563	1563	1736	127	7.3	33
Chamois	7	15	630	242	243	100	7
Nant Provent	33	453	1473	771	260	33.7	21
Chapeau sup.	31	1100	5000	2450	1409	57.5	8
Col des Montets	27	180	350	255	57.4	22.5	6

Tableau 7.5 Variabilité des mesures de température.

Sources	N°	Température (°C)				Nb
		Min.	Max.	Moy.	Ecart-type	
Fontaine	19	4.8	5.6	5.1	0.2	25
Bonnette	6	6.4	7.0	6.8	0.2	21
Brocard inf.	1	6.8	7.5	7.2	0.2	33
Chamois	7	6.7	7.3	6.9	0.2	7
Nant Provent	33	5.8	7.8	6.3	0.4	21
Chapeau sup.	31	3.0	3.4	3.3	0.1	8
Col des Montets	27	5.2	7.3	5.8	0.7	6

Tableau 7.6 Variabilité de la minéralisation totale.

Sources	N°	TSD (mg/l)				Coef. var (%)	Nb
		Min.	Max.	Moy.	Ecart-type		
Fontaine	19	39	44	41.5	1.5	3.6	25
Bonnette	6	80	91	86.0	3.0	3.5	21
Brocard inf.	1	69	80	74.7	2.8	3.8	33
Chamois	7	49	63	55.5	5.3	9.5	7
Nant Provent	33	149	161	158.0	4.1	2.5	21
Chapeau sup.	31	41	48	45.0	1.9	4.2	8
Col des Montets	27	36	38	36.6	0.8	2.0	6

Tableau 7.7 Classement par ordre croissant des coefficients de variabilité des principaux paramètres hydrogéologiques des sources étudiées.

Débit		Température		TSD	
Sources	Coef var. (%)	Sources	Ecart-type	Sources	Coef var. (%)
Brocard inf.	7.3	Nant Provent	0.1	Col des Montets	2.0
Fontaines	9.7	Brocard inf.	0.2	Nant Provent	2.5
Col des Montets	22.5	Bonnette	0.2	Bonnette	3.6
Nant Provent	33.7	Col des Montets	0.2	Fontaines	3.6
Bonnette	44.2	Fontaines	0.2	Brocard inf.	3.8
Chapeau sup.	57.5	Chapeau sup.	0.4	Chapeau sup.	4.2
Chamois	100	Chamois	0.7	Chamois	9.5

Tableau 7.8 Domaines de variabilité des principaux paramètres des deux groupes de sources étudiées.

Groupes	Aquifères	Débit Var. (%)	Température Ecart-type	TSD Var. (%)
I	Gneiss	7.3 - 33.7	0.2 - 0.7	2.0 - 3.8
II	Granite	44.2 - 100	0.1 - 0.2	3.9 - 9.5

7.2.4 Conclusions

L'observation graphique et l'analyse statistique simple de la variabilité des paramètres hydrogéologiques convergent sur la définition de deux systèmes d'écoulements (groupe I et groupe II).

Les écoulements du groupe I

Ils se répartissent dans les aquifères gneissiques des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges. Ces systèmes d'écoulement s'effectuent dans des aquifères constitués par des réseaux complexes de microdiscontinuités (microfissures, diaclases).

Les écoulements du groupe II

Ils se réalisent dans les aquifères granitiques du massif du Mont-Blanc. Dans ce cas, ces derniers possèdent des écoulements mixtes (double perméabilité), à la fois dans un système de microdiscontinuités (microfissures, diaclases) et dans des réseaux de macrodiscontinuités tectoniques majeures (failles alpines essentiellement SW-NE et N-S, voir paragraphe 5.6).

D'une manière générale, l'ensemble des sources du réseau I, étudiées en surface (par opposition aux sources des galeries), ont mis en évidence des aquifères de grande capacité à circulations peu profondes, caractérisés par des renouvellements rapides et dont les zones de recharge principales sont éloignées des émergences.

7.3 Variations spatiales des paramètres hydrogéologiques à l'échelle des massifs et origine de la minéralisation des eaux

L'ampleur des variations spatiales a surtout été mise en évidence par l'observation des venues d'eau souterraine en galeries. En effet les ouvrages souterrains qui traversent les massifs sur des dizaines de kilomètres ont offert des coupes hydrogéologiques exceptionnelles. L'ensemble du réseau de galeries du complexe hydroélectrique d'Emosson ainsi que le tunnel routier du Mont-Blanc ont été systématiquement échantillonnés dans le cadre de cette étude. Ces données permettent d'observer la variabilité spatiale des paramètres des eaux souterraines aussi bien sur de courtes distances qu'à l'échelle kilométrique.

L'annexe 7.5 présente pour chaque galerie la distribution des sources avec l'ensemble de leurs paramètres physico-chimiques. A titre d'exemple, le collecteur est du réseau hydroélectrique d'Emosson est donné à la figure 7.5. Les différents points d'eau sont situés dans leur environnement à l'aide d'un profil géologique simplifié. Ces données ont également été représentées sous forme de cartes où figurent des mesures et analyses correspondant à des valeurs ponctuelles choisies d'une manière générale en période de basses eaux. En annexe, les données brutes de chaque paramètre ont été reportées sur quatre cartes géologiques simplifiées couvrant l'ensemble des massifs (annexe 7.6). Cette annexe contient une carte de situation des sources ainsi qu'une liste qui précise les dates de prélèvement des différentes sources qui ont permis de rédiger les cartes de répartition spatiale. Ces résultats ont été utilisés notamment pour les traitements statistiques (tableau 7.9).

7.3.1 Amplitude de la variabilité spatiale

En rassemblant les différents domaines de variabilité des paramètres de l'ensemble des sources (tableau 7.9), il apparaît que la plupart des paramètres majeurs (température, TSD, Ca, HCO₃ et K) présentent les variabilités les moins élevées (classe 50 à 100 %), alors que d'une manière générale, les éléments caractérisés par de très faibles concentrations atteignent les classes de variabilité les plus élevées (150 à 300 %). Seuls parmi les composés majeurs, les sulfates font exception à cette classification (tableaux 7.9 et 7.10).

7.3.2 Etude systématique de la variabilité spatiale des paramètres hydrogéologiques

Afin de passer en revue le comportement de l'ensemble des mesures et analyses effectuées, il a été choisi de présenter tout d'abord les paramètres hydrogéologiques classiques (débit, température et minéralisation totale). Puis suivent les paramètres chimiques majeurs selon l'ordre d'abondance relative défini par la classification chimique. Enfin, les éléments en traces apparaissent selon l'ordre du tableau périodique des éléments.

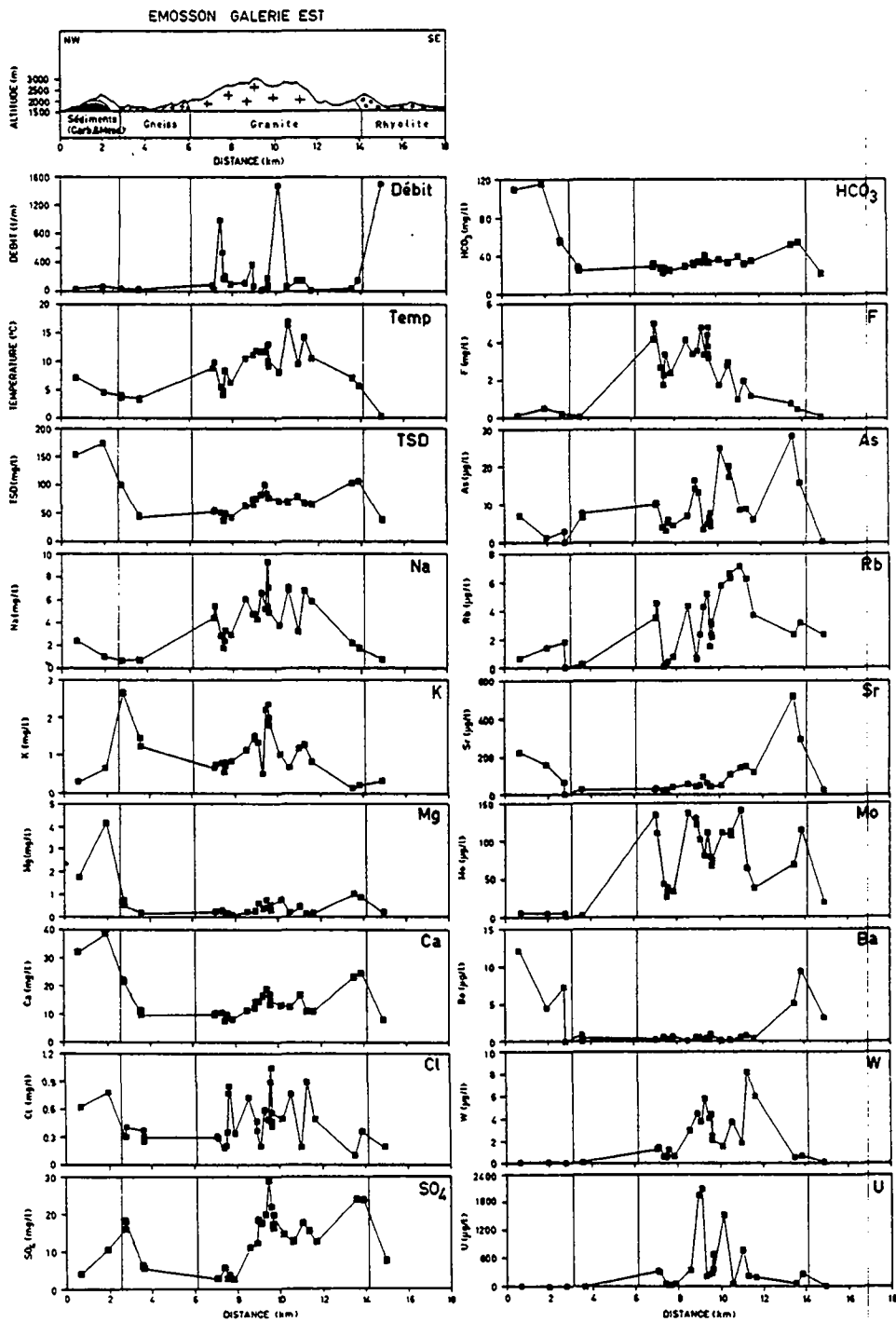


Figure 7.5 Galerie est d'Emosson (Trient), répartition spatiale des paramètres en fonction de la topographie et des formations géologiques (l'ensemble des galeries et tunnel sont rassemblés dans l'annexe 7.5).

Tableau 7.9 Variabilité spatiale de l'ensemble des paramètres des sources échantillonnées en galeries et en surface.

Paramètres	Unités	Min.	Max.	Moy.	Ecart-type	Coef. var (%)	N*
Température	(°C)	0.2	34.0	8.4	6.7		138
TSD	(mg/l)	20	645	90.4	70.3	77.8	140
Dureté totale	(°F)	0.9	12.0	3.6	4.6	128	136
Li	(mg/l)	0	0.5	0.02	0.06	300	140
Na	"	0.47	62.0	4.3	8.3	193	140
K	"	0.1	3.86	1.1	0.8	72.7	140
Mg	"	0.07	4.5	0.78	0.9	115	140
Ca	"	2.9	133	16.6	13.7	82.5	140
Sr	(µg/l)	0.043	1.9	0.139	226	163	133
F	(mg/l)	0	5.5	1.2	1.5	125	136
Cl	"	0	45.0	1.4	4.8	343	140
HCO ₃	"	10.4	159	37.7	20.6	54.6	138
SO ₄	"	2.8	396	20.3	37.4	184	140
SiO ₂	"	3.4	85.6	7.5	7.6	101	135
B	(µg/l)	1.0	625	31.7	65.9	208	115
As	"	0	225	16.9	28.7	170	133
Rb	"	0.1	31.1	2.4	4.0	167	133
Mo	"	0	137	28.9	38.2	132	133
Ba	"	0	40.1	4.8	7.3	152	134
W	"	0	47.1	4.5	9.0	200	91
U	"	0	2092	117	339	290	133

* Nombre de mesures.

Tableau 7.10 Classement croissant par tranches de variabilité des différents paramètres.

Paramètres	Coefficient de variation (%)
HCO ₃ , K, TSD, Ca	50 - 100
SiO ₂ , Mg, F, Mo	100 - 150
Ba, Sr, Rb, As, SO ₄ , Na, W, B	150 - 200
Li, Cl, U	250 - 300

7.3.2.1 Le débit

A l'échelle des massifs, la variabilité spatiale des débits est naturellement très élevée et cette approche est extrêmement difficile à appréhender, car il est pratiquement impossible d'effectuer des mesures synchrones sur une surface de plusieurs centaines de km² et car la variabilité dépend également fortement des choix du réseau d'observation. L'histogramme des débits (figure 7.6) souligne la grande dispersion des valeurs, mais indique nettement l'existence de deux groupes. Un premier ensemble de débits, représentant la majorité des émergences, varie entre 1 et 250 l/mn. Le deuxième groupe est formé des débits de grande intensité, liés aux macrodiscontinuités tectoniques, où les valeurs se répartissent entre 250 et 4500 l/mn.

La figure 7.7 et l'annexe 7.6 permettent de visualiser la répartition des débits pour l'ensemble des émergences observées.

Les mesures en galeries ont permis de mesurer en un ou deux jours un grand nombre de venues sur des distances de plusieurs kilomètres et de donner une image plus proche de la réalité de la variabilité spatiale des venues d'eau à l'échelle d'un massif. Ces observations ont montré que la variabilité spatiale des débits au sein des massifs cristallins est très élevée (de 1.3 % à 285 % dans les cinq galeries étudiées, tableau 7.11).

La figure 7.5 et l'annexe 7.5, qui représentent notamment la répartition des débits le long des galeries souterraines, indiquent que les venues d'eau, nombreuses et abondantes, se concentrent de manière privilégiée dans les formations granitiques. Les gneiss interceptés dans toutes les galeries n'ont montré généralement que de faibles venues (figure 7.7). Le tableau 7.12 donne les débits spécifiques approximatifs estimés sur la base des mesures effectuées en galeries pour les différentes zones aquifères. Ces résultats confirment le fort contraste de perméabilité qui existe entre les deux principales formations aquifères (granite et gneiss). Bien que ces calculs soient très approximatifs, ils sont toutefois plus tangibles et plus stables que des calculs de perméabilité selon la théorie de Darcy, qui est difficilement applicable à des formations fissurées telles que nous les observons dans le massif du Mont-Blanc. Nos observations ne sont cependant pas en désaccord avec les conclusions basées sur des calculs effectués dans le cadre des lois de l'hydraulique (Jamier, 1975).

Les graphes de la figure 7.8 montrent que les débits possèdent pour l'ensemble des sources de très grandes variabilités. Les corrélations avec la minéralisation totale des eaux souterraines sont absentes pour les aquifères gneissiques, alors qu'il existe une relation évidente entre ces paramètres pour les aquifères granitiques du massif du Mont-Blanc (GraMB).

Ce même type de liaison se répète également pour la relation entre le débit et la température, toujours dans le cas des aquifères granitiques (GraMB, figure 7.9). En effet, d'une manière générale, les forts débits au sein des aquifères granitiques induisent des diminutions de la minéralisation et de la température. Dans le cas des aquifères gneissiques, les débits ne semblent pas influencer de manière notable ces deux paramètres. Ce phénomène peut

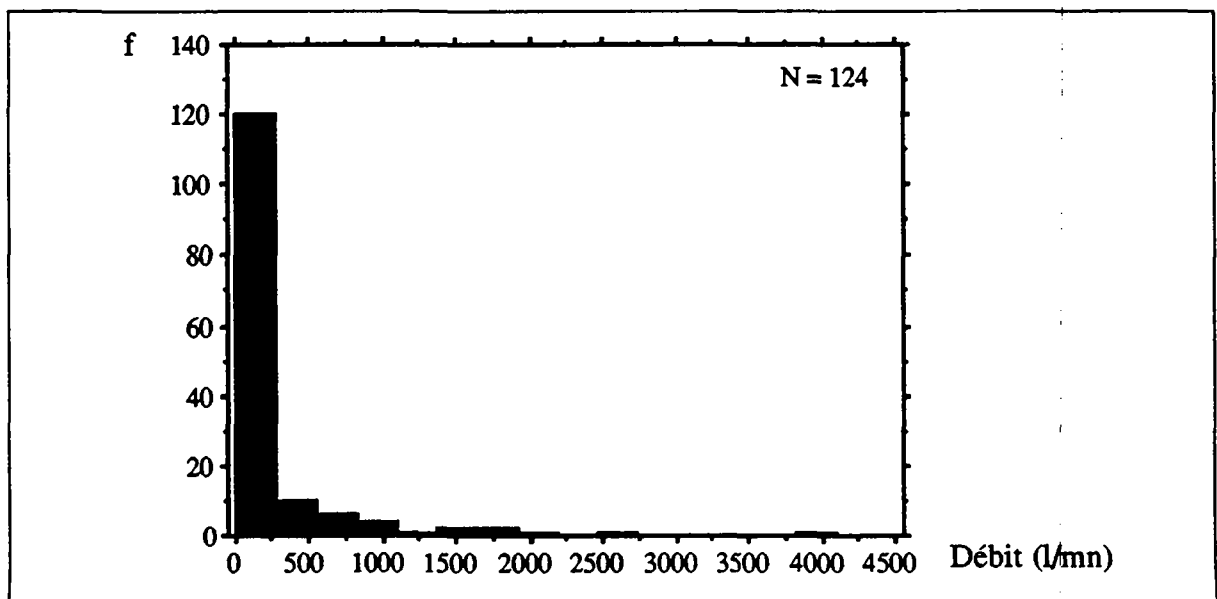


Figure 7.6 Histogramme des fréquences des débits.

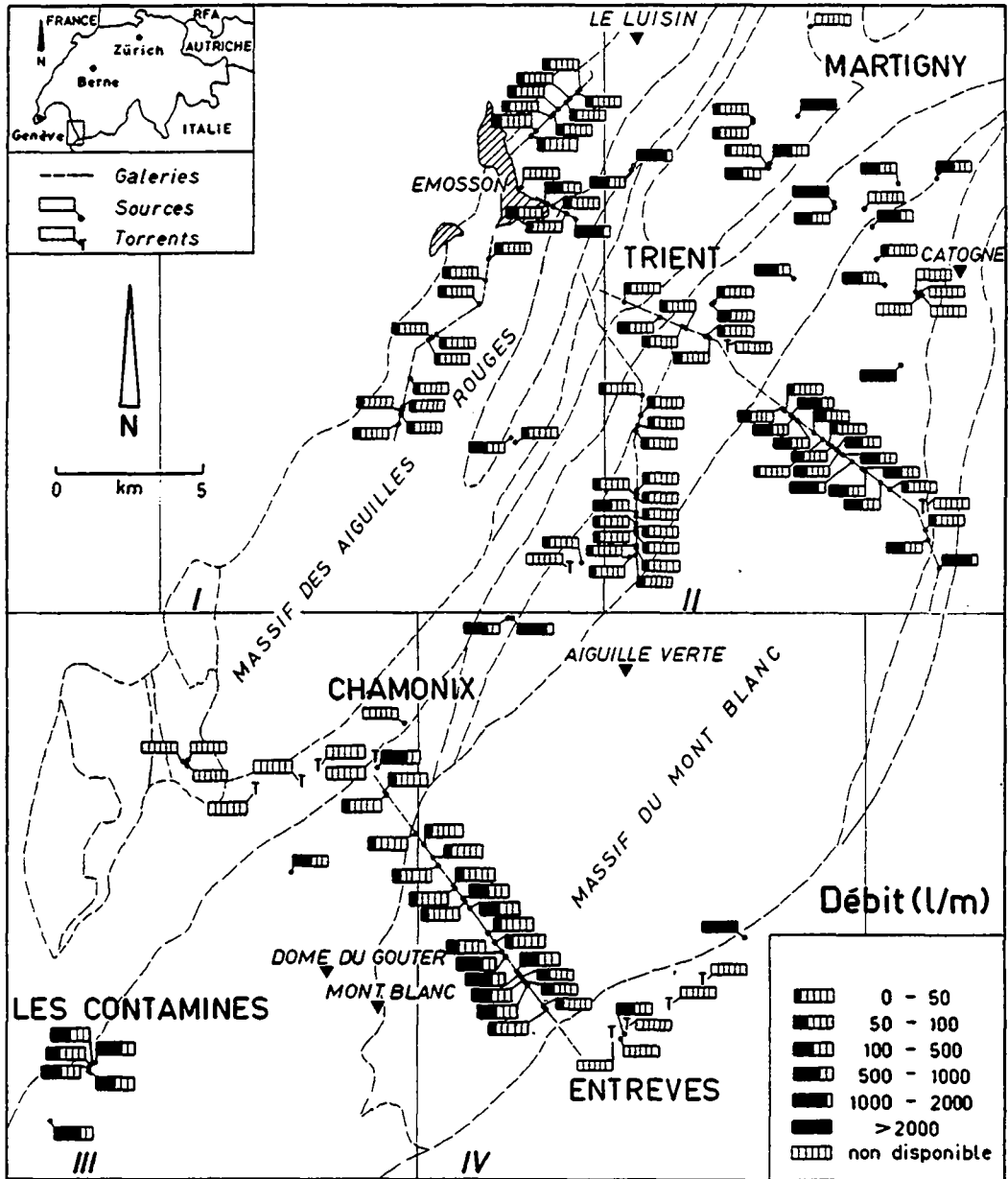


Figure 7.7 Carte de répartition spatiale des débits à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges (les chiffres I, II, III et IV définissent le découpage des cartes de détail disponibles en annexe 7.6).

Tableau 7.11 Variabilité spatiale du débit des sources échantillonnées en galeries

Sources	Min.	Max.	Moy.	Ecart-type	Coef var. (%)
Tunnel du Mont-Blanc	6.8	1000	136	226	166
Galerie est d'Emosson	10.7	1500	178	309	174
Galerie sud d'Emosson	0.2	250	21.5	61	285
Galerie ouest d'Emosson	0.1	30.0	6.1	7.9	1.3
Galerie nord d'Emosson	0.8	27.3	11.3	7.1	63

Tableau 7.12 Comparaison des débits spécifiques approximatifs par kilomètre mesurés dans les ouvrages souterrains pour les deux types principaux d'aquifères (granite et gneiss).

Galeries et tunnel	Aquifères considérés	Débit par km (l/mn/km)
Galerie est, Emosson	GraMB	590
Tunnel du Mont-Blanc	GraMB	400
Galerie sud, Emosson	GneMB	65
Galerie nord, Emosson	GneAR	45
Galerie ouest	GneAR	10

Gra = Granite, Gne = Gneiss, MB = massif du Mont-Blanc, AR = massif des Aiguilles Rouges

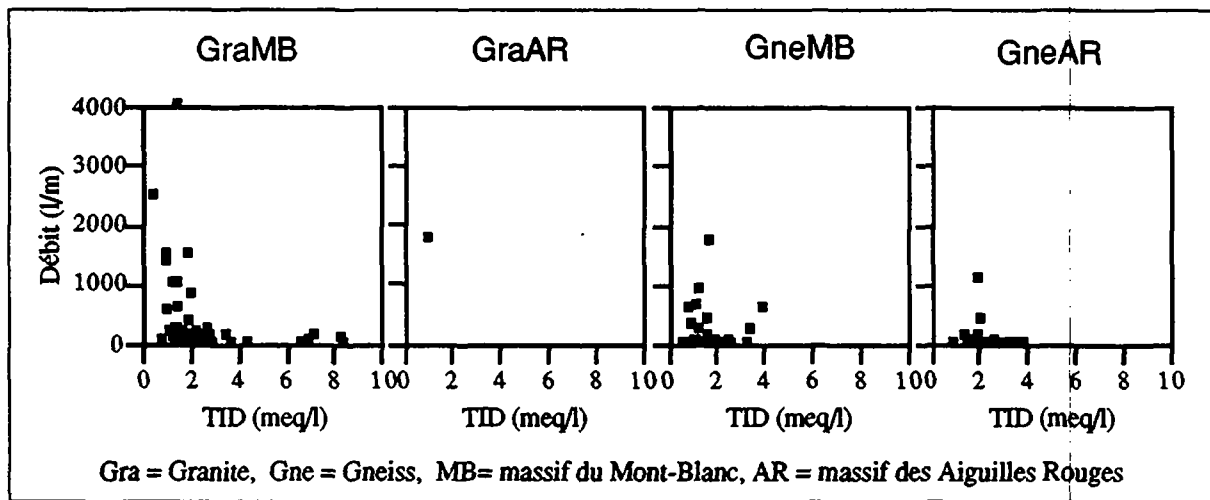


Figure 7.8 Comportement de la minéralisation totale en fonction du débit. TID = Total des Ions Dissous.

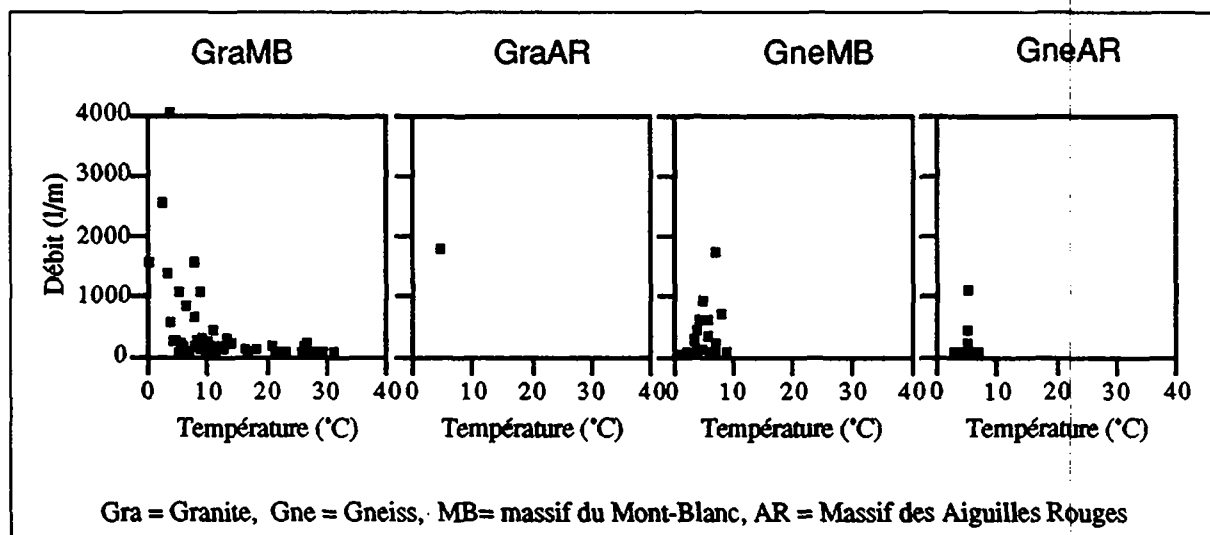


Figure 7.9 Comportement de la température en fonction du débit.

être relié aux observations qui ont été faites lors de l'étude des variations temporelles des paramètres majeurs des sources. En effet, l'élévation des débits entraîne une baisse de la minéralisation des eaux, et ceci essentiellement dans le cas des aquifères granitiques. Les observations à l'échelle régionale confirment le net contraste de perméabilité et de type d'écoulement qui existe entre les formations gneissiques et granitiques (voir paragraphe 7.2).

7.3.2.2 La température

Dans ce cas également la variabilité des mesures est élevée, puisque des températures minimales proches de 0 °C et maximales de 34.0 °C ont été mesurées dans le tunnel du Mont-Blanc. En prenant en compte l'ensemble des sources, mesurées en galeries et en surface, la variabilité de la température à l'échelle du massif possède un écart-type de l'ordre de 6.7 °C (tableau 7.9). L'histogramme des fréquences démontre que la grande majorité des températures se situent autour de 6 °C. Il fait également apparaître nettement deux ensembles distincts, les eaux froides, situées entre 0 et 12 °C et les eaux thermales, essentiellement interceptées dans le tunnel du Mont-Blanc, qui se répartissent entre environ 20 et 30 °C (figure 7.10).

Les observations effectuées en galeries montrent clairement que les températures sont directement en relation avec l'épaisseur de la couverture rocheuse surplombant l'ouvrage et avec l'intensité des débits. Cette dernière observation est particulièrement frappante dans la partie italienne du tunnel du Mont-Blanc, où de très importants débits (environ 1000 l/mn) induisent une très significative baisse des températures de l'eau, bien que la couverture rocheuse soit considérable (env. 2000 m, annexe 7.5). Ce phénomène indique que les eaux s'écoulent principalement de manière subverticale à partir de la surface en direction du tunnel. Il n'y a probablement pas de remontée d'eau thermale de la profondeur vers les galeries. Les analyses chimiques des eaux ne présentent pas de caractère thermal, typique des circulations profondes et lentes, pouvant indiquer la présence de remontées d'eau chaude dans l'ouvrage. Les mesures du tritium ont notamment révélé la présence de circulations rapides qui permettent également d'exclure l'existence de thermalisme profond (Fontes et al, 1978).

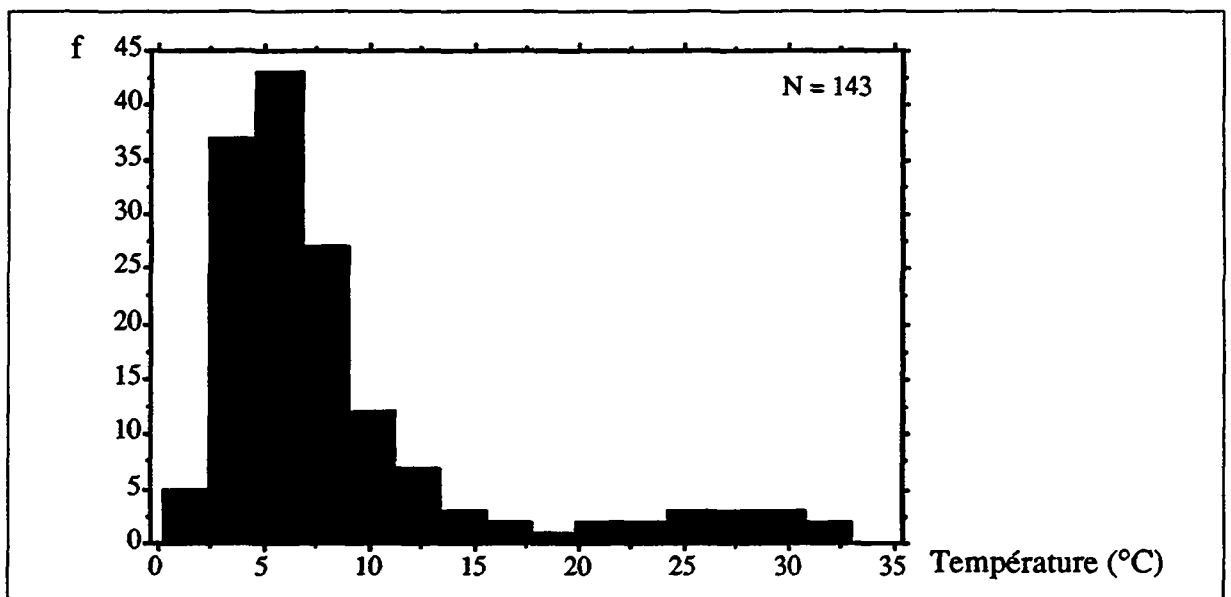


Figure 7.10 Histogramme des fréquences des températures.

Le gradient géothermique calculé pour le tunnel du Mont-Blanc et la galerie est d'Emosson est de l'ordre de 15 °C/km (Jamier, 1975). Ce gradient, relativement faible par rapport à la moyenne générale de l'écorce terrestre (env. 30 °C/km), doit être mis en relation avec le refroidissement intense des roches par les fortes infiltrations d'eaux froides dans les zones de recharge (proches de 0 °C). Le refroidissement du massif rocheux peut également être dû au transit d'eau de surface (galeries hydroélectriques d'Emosson en phase d'exploitation) et de circulation d'air (tunnel du Mont-Blanc). Il faut noter que la plupart des gradients mesurés dans les Alpes sont relativement bas, à l'exception du massif du Simplon. Les données disponibles indiquent des valeurs situées entre environ 15 et 30 °C/km (tableau 7.13).

Bien que la corrélation globale soit faible, les figures 7.11 et 7.9 montrent que d'une manière générale, l'augmentation de la minéralisation est liée à l'élévation des températures et les hautes températures sont liées aux faibles débits. Ce phénomène est particulièrement frappant pour la grande majorité des venues liées aux aquifères granitiques (GraMB).

La carte de répartition des températures à l'échelle des massifs montre la présence de températures élevées dans les formations granitiques profondes du massif du Mont-Blanc. Ces émergences se développent à partir du sud de la carte (tunnel routier du Mont-Blanc) jusqu'à la source de Bovernier, située au nord du massif granitique, en passant par les sources subthermales mesurées dans la galerie est d'Emosson (figure 7.12 et annexe 7.6).

Tableau 7.13 Gradient géothermique de quelques massifs alpins.

Massifs	Gradients géothermiques	Auteurs
Mont-Blanc (Tunnel et galerie est)	15 °C/km	Jamier, 1975
Aar (Tunnel du Lötschberg)	25 °C/km	Sydney et al, 1956
Belledonne (Rissiou)	12 °C/km	Gourdand, 1983
Simplon (Tunnel)	30 °C/km	Sydney et al, 1956

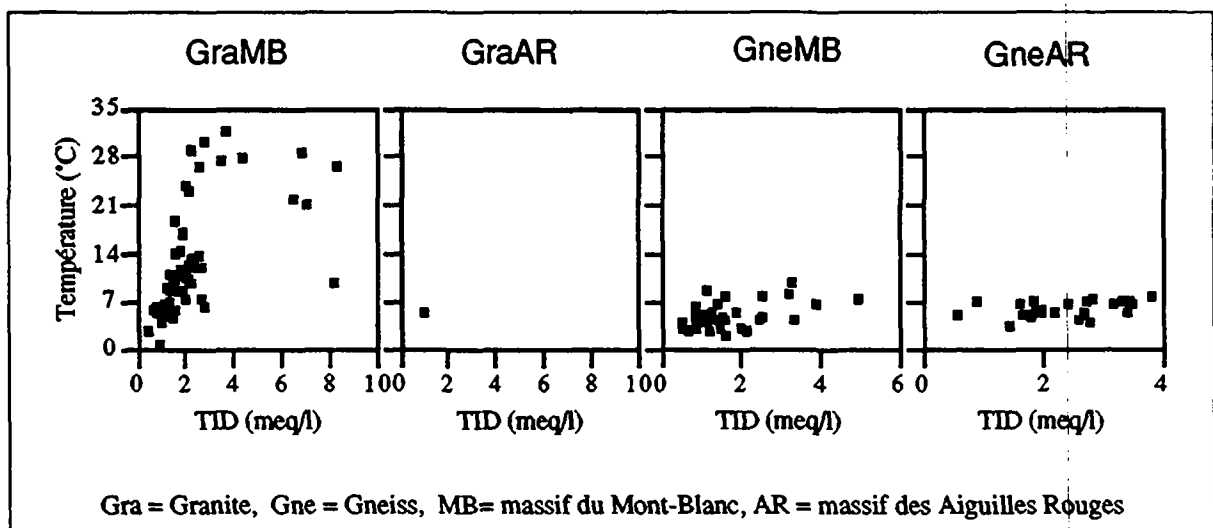


Figure 7.11 Comportement de la minéralisation en fonction de la température.

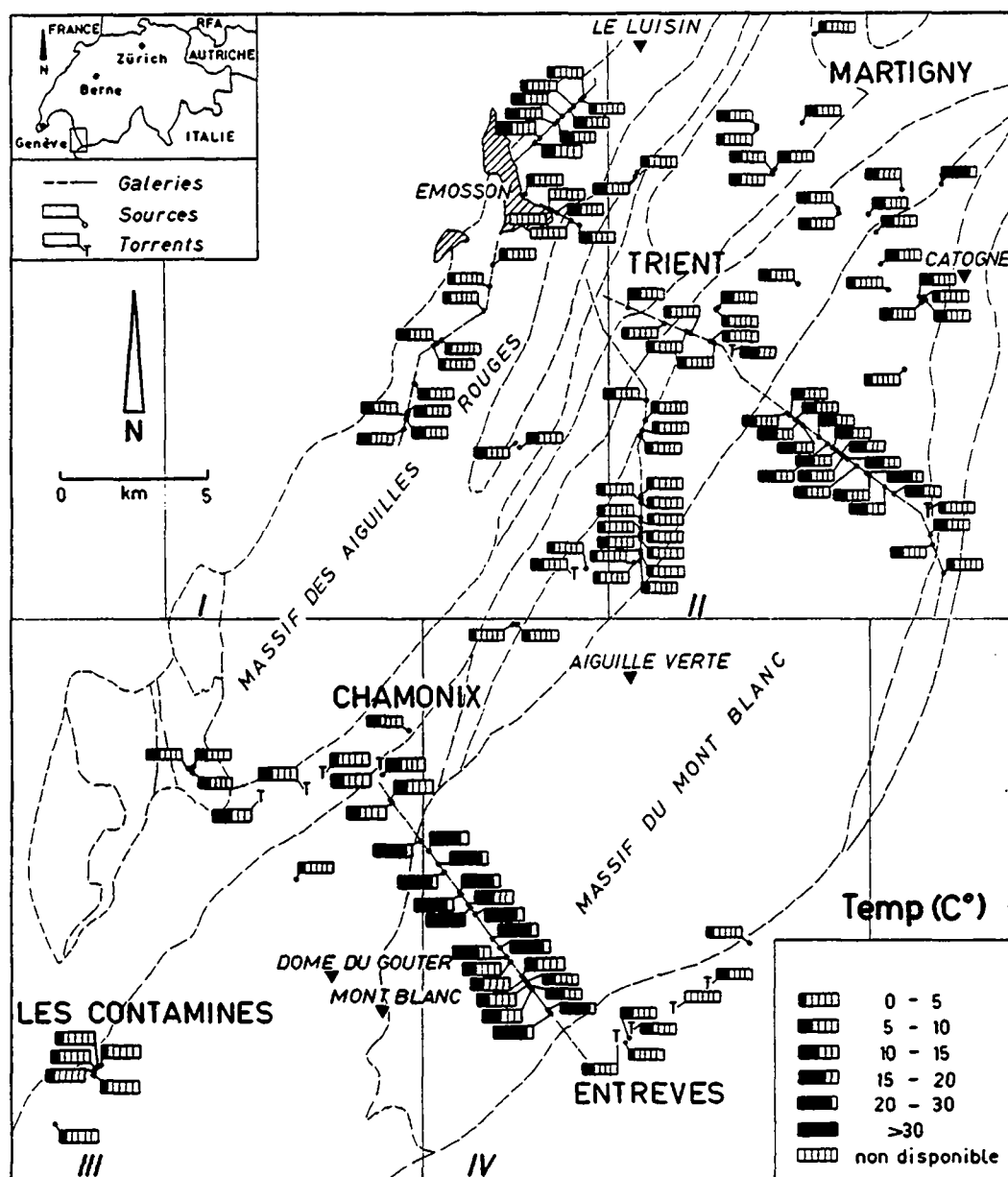


Figure 7.12 Carte de répartition spatiale des températures à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

7.3.2.3 Le pH

L'histogramme des fréquences fait apparaître une répartition bimodale caractéristique. Le premier ensemble de valeurs se situe autour d'un pH relativement acide de l'ordre de 6.3 à 6.5, alors que le deuxième groupe possède une valeur centrale légèrement basique située entre 7.5 et 8 (figure 7.13).

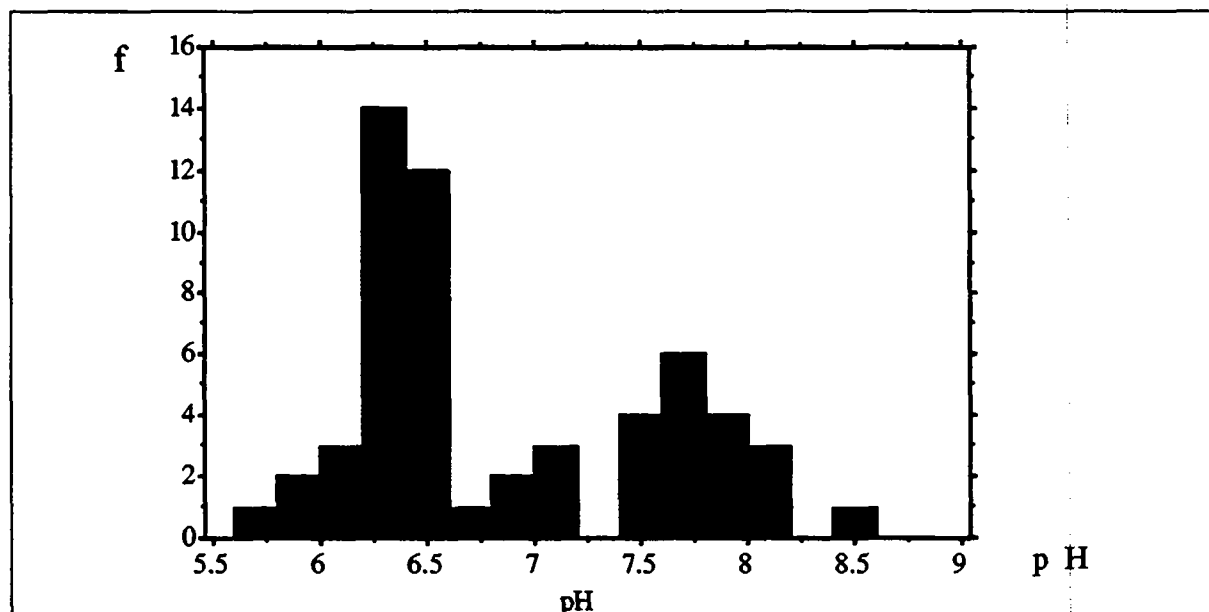


Figure 7.13 Histogramme des fréquences des mesures de pH.

L'observation des mesures de pH, en relation avec les conditions hydrogéologiques, indique que d'une manière générale, les pH acides du premier groupe sont étroitement liés aux aquifères granitiques et gneissiques du massif du Mont-Blanc. Les valeurs proches de la neutralité ou légèrement basiques sont associées principalement aux aquifères gneissiques des Aiguilles Rouges et aux aquifères granitiques profonds du massif du Mont-Blanc (ex. source thermale de Bovernier et venues thermales interceptées dans le tunnel du Mont-Blanc) (annexe 7.1). La figure 7.14 représente la répartition des valeurs de pH en relation avec les différents aquifères.

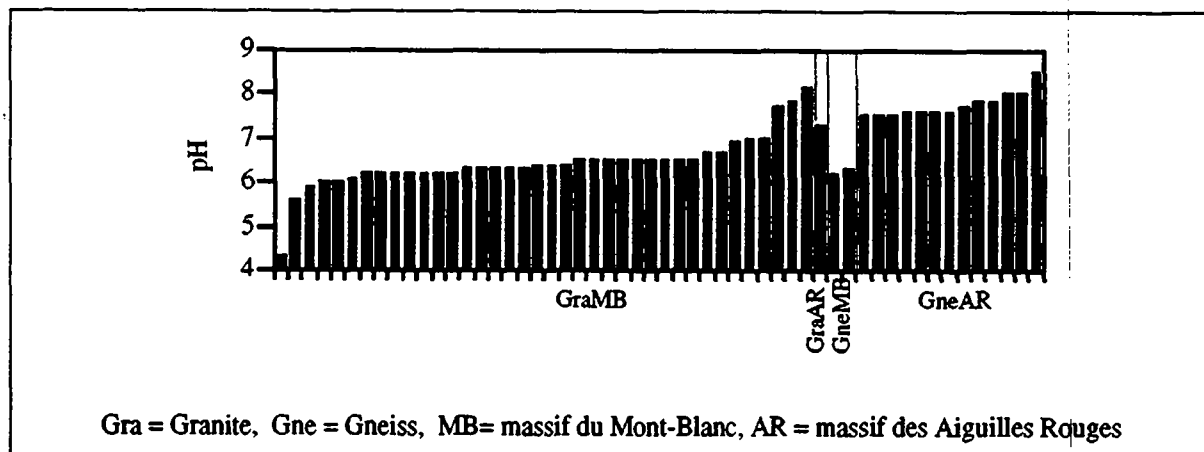


Figure 7.14 Représentation des valeurs de pH en relation avec les différents aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

7.3.2.4 La minéralisation totale (TSD)

Comme nous l'avons vu plus haut, la minéralisation totale possède un domaine de variabilité parmi les moins élevés (tableau 7.9). L'histogramme de la minéralisation totale confirme le caractère monotone de ce paramètre (figure 7.15). En effet, la plupart des eaux se regroupent autour de 100 mg/l, avec cependant, comme dans le cas des mesures de température, une sensible déviation des fréquences vers les eaux plus minéralisées.

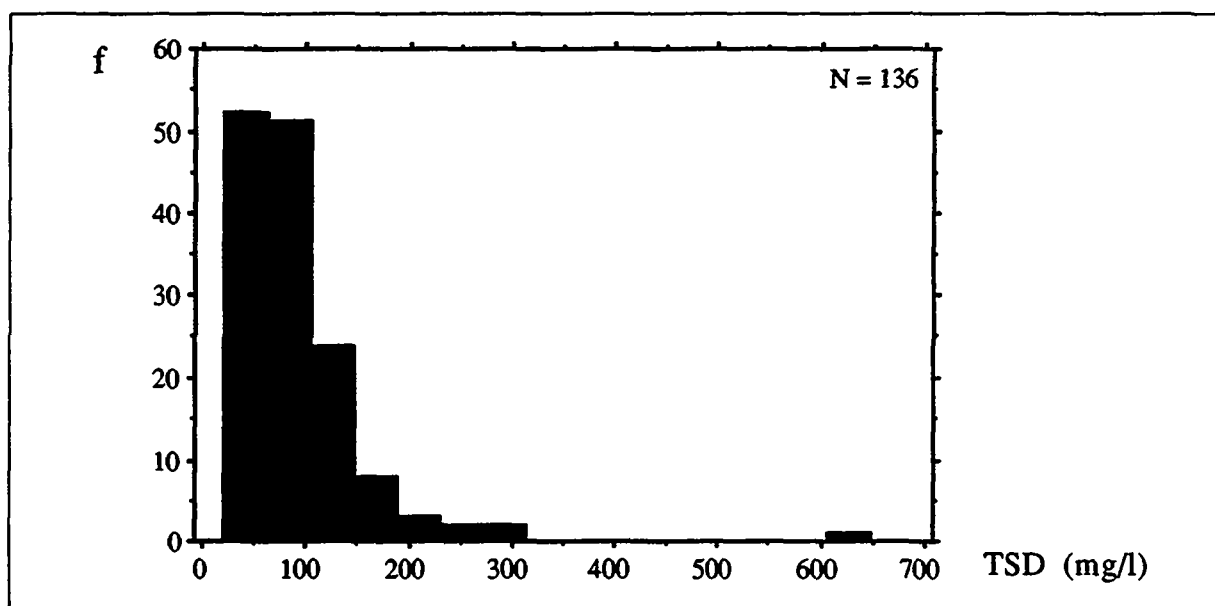


Figure 7.15 Histogramme des fréquences de la minéralisation totale des eaux souterraines.
TSD = Total des Solides Dissous

La répartition des valeurs à l'échelle des massifs est relativement peu contrastée et ne permet pas un marquage significatif des différents aquifères (figure 7.16 et annexe 7.6). Cette dernière remarque implique que la géochimie globale des eaux souterraines du massif cristallin donne une bonne image au sens large des caractéristiques des aquifères, cependant si l'on veut observer les différents sous-types, il est impératif de prendre en compte l'ensemble des paramètres chimiques, aussi bien sous forme d'éléments majeurs que d'éléments en traces.

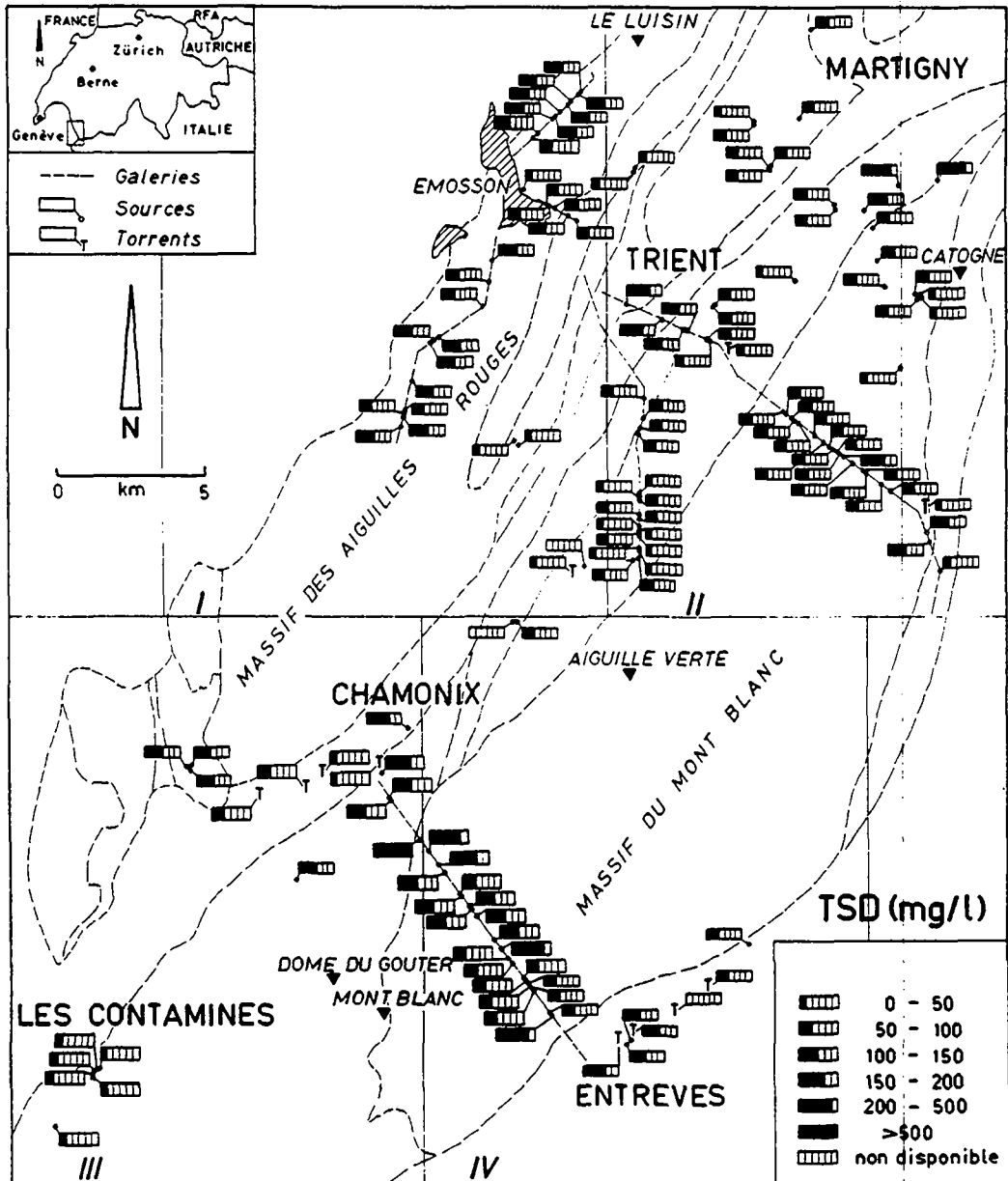


Figure 7.16 Carte de répartition spatiale de la minéralisation totale à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

7.3.2.5 Les hydrogénocarbonates (HCO_3^-)

La distribution des échantillons illustre l'homogénéité des concentrations à l'échelle des massifs. L'ensemble des échantillons se regroupe autour d'une valeur moyenne de l'ordre de 37 mg/l, avec cependant une décroissance régulière des valeurs vers les eaux les plus minéralisées (figure 7.17).

Les hydrogénocarbonates présentent de faibles variations spatiales (env. 55 %, variant entre 10,4 et 159 mg/l), ils trouvent leurs concentrations les plus élevées en relation avec les formations gneissique des Aiguilles Rouges (figure 7.18 et annexe 7.6). Le massif des Aiguilles Rouges est, comparativement au Mont-Blanc, plus touché par les phénomènes de pédogenèse, liés à des bassins versants situés à des altitudes inférieures.

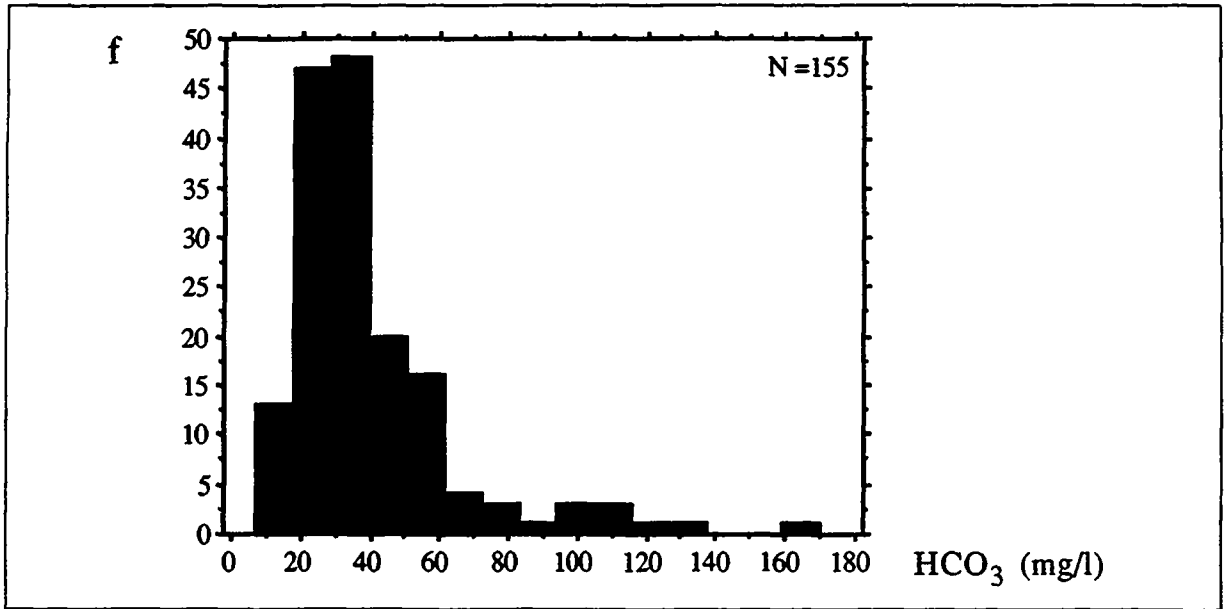


Figure 7.17 Histogramme des fréquences des concentrations des hydrogencarbonates.

Parallèlement au calcium, les hydrogencarbonates contrôlent en grande partie la minéralisation des eaux des massifs cristallins. Les graphes de corrélations tracés pour les différents aquifères indiquent que la variabilité de cet élément est nettement associée à celle de la minéralisation (figure 7.19). En effet, le calcium et les hydrogencarbonates représentent avec les sulfates la grande majorité de la charge chimique des eaux des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

Origine des hydrogencarbonates

Leur origine dans les aquifères cristallins a souvent été attribuée au CO_2 dissous dans l'eau provenant de l'atmosphère ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$, Jamier, 1975).

Cependant, si l'on effectue des calculs simples, il apparaît que les quantités de carbone fournies par l'atmosphère peuvent varier considérablement en fonction des conditions d'infiltration. Les calculs ont été effectués à partir des équations d'équilibre suivantes (Garrels et Christ, 1967):

$$\text{H}_2\text{CO}_3 = \text{HCO}_3^- + \text{H} + \text{KH}_2\text{CO}_3 = \frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} = 10^{-6.3}$$

et

$$\text{HCO}_3^- = \text{CO}_2^- + \text{H} + \text{KH}_2\text{CO}_3 \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^-]}{[\text{HCO}_3^-]} = 10^{-10.3}$$

Des situations extrêmes on été calculées pour les cas suivants:

1. Cas d'un aquifère cristallin saturé et sans relation avec des sols lors de l'infiltration

Hypothèse: Eau en équilibre avec le CO_2 atmosphérique, soit: $P_{\text{CO}_2} = 10^{-3.5}$ atm.

Si le système est fermé (sans apport supplémentaire de CO_2), on considère que la concentration maximum de HCO_3^- que l'on peut obtenir est égale à la concentration de H_2CO_3 dans l'eau au départ, quand tout le H_2CO_3 se transforme en HCO_3^- .

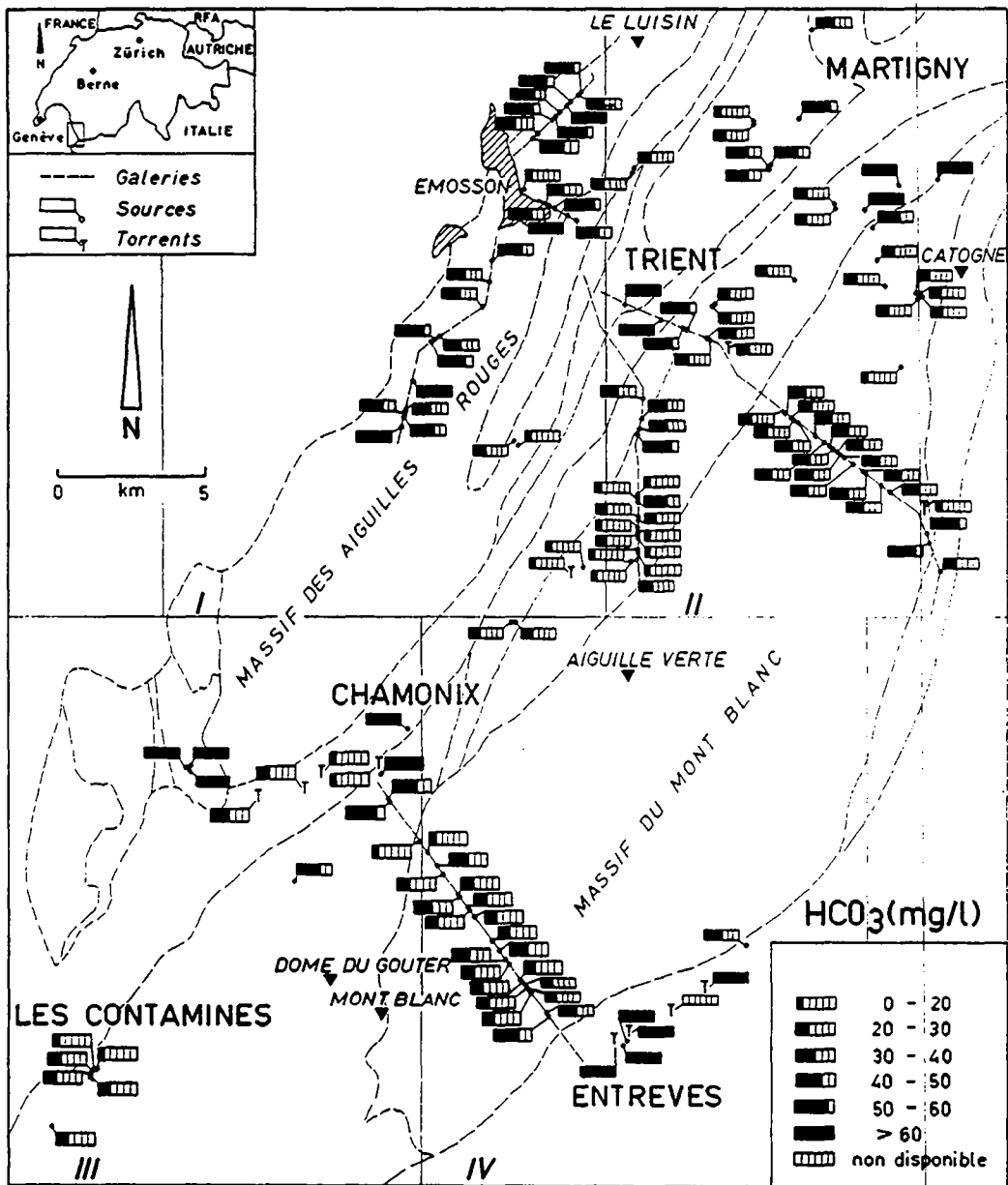


Figure 7.18 Carte de répartition spatiale des hydrogénocarbonates à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

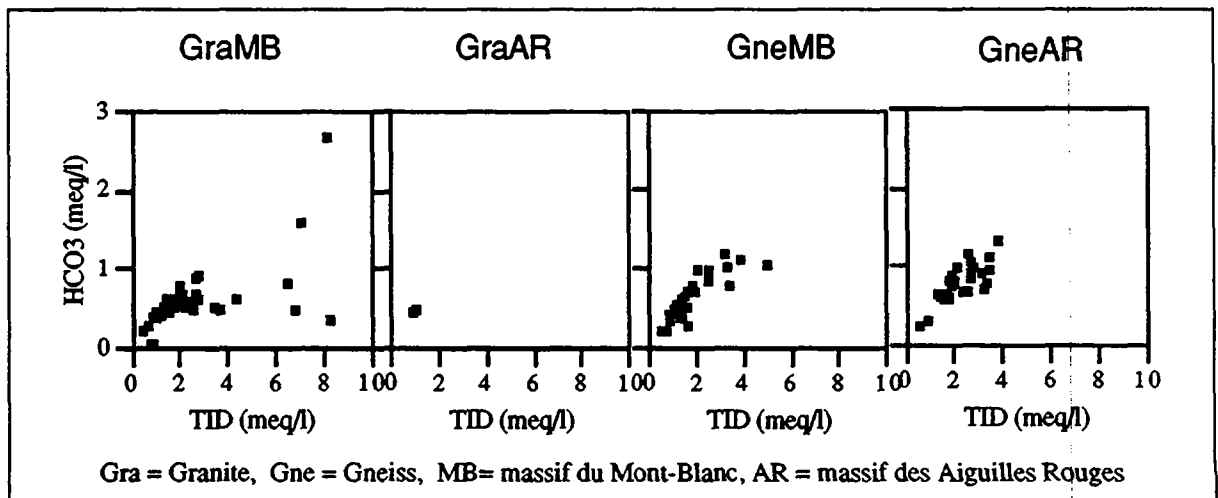


Figure 7.19 Relation entre la minéralisation totale et les hydrogénocarbonates.

Connaissant P_{CO_2} atmosphérique, on peut calculer la concentration de CO_2 dissous dans l'eau et exprimé sous forme de H_2CO_3 selon la relation d'Henri:

$$[H_2CO_3] = K_H \cdot P_{CO_2} = 10^{-1.2} \cdot 10^{-3.5} = 10^{-4.7} \text{ mol/l}$$

Après neutralisation de H_2CO_3 qui se traduit par une augmentation du pH:

$$[HCO_3^-]_{\max} = [H_2CO_3]_{\text{initial}} = 10^{-4.7} \text{ mol/l} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol/l de } HCO_3^-$$

soit

$$2 \cdot 10^{-5} \cdot 61 \text{ g/l ou } 1.22 \text{ mg/l de } HCO_3^-$$

Afin de vérifier les hypothèses définies ci-dessus, nous avons calculé le pH avant l'infiltration dans l'aquifère, en considérant qu'il est fonction seulement du H_2CO_3 en équilibre avec la P_{CO_2} de l'atmosphère.

$$\frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3]} = 10^{-6.3}$$

$$[H^+]^2 = 10^{-6.3} \cdot 10^{-4.7} = 10^{-11} \text{ mol}^2/\text{l}^2$$

$$[H^+] = 10^{-5.5} \text{ mol/l}$$

$$\text{pH} = 5.5$$

Cette valeur de pH est en accord avec celles mesurées dans les neiges de la région (Parriaux et al, 1990).

2. Cas d'un aquifère cristallin saturé avec infiltration par l'intermédiaire d'un sol

Hypothèse: Eau en équilibre avec la P_{CO_2} du sol qui peut varier entre 10^{-2} et 10^{-1} atm. De plus les hypothèses énoncées pour le cas 1 restent valables.

a) Cas avec P_{CO_2} de 10^{-2} atm.

$$[HCO_3^-]_{\max} = [H_2CO_3]_{\text{initial}} = 10^{-1.2} \cdot 10^{-2} = 10^{-3.2} = 6.3 \cdot 10^{-4} \text{ mol/l de } HCO_3^-$$

soit

$$6.4 \cdot 10^{-4} \cdot 61 \text{ g/l ou } 38.5 \text{ mg/l de } HCO_3^-$$

b) Cas avec P_{CO_2} de 10^{-1} atm.

$$[HCO_3^-]_{\max} = [H_2CO_3]_{\text{initial}} = 10^{-1.2} \cdot 10^{-1} = 10^{-2.2} = 6.3 \cdot 10^{-3} \text{ mol/l de } HCO_3^-$$

soit

$$6.4 \cdot 10^{-3} \cdot 61 \text{ g/l ou } 385 \text{ mg/l de } HCO_3^-$$

En conclusion, ces calculs montrent que si les eaux souterraines n'ont pas été en contact avec des sols, ce qui est le cas pour environ 50% de l'impluvium du massif du Mont-Blanc, et que l'on raisonne de manière extrême en système fermé, les hydrogénocarbonates analysés devraient être principalement d'origine géologique. Cette situation peut s'expliquer par l'altération très ancienne des feldspaths des granites par du CO_2 d'origine profonde et la formation de calcite par saussuritisation, ou encore, par l'altération des marbres dans le cas des gneiss. Toutefois, à partir de cette hypothèse, il apparaît que les conditions acides liées à l'apport atmosphérique ne sont pas suffisantes pour expliquer les concentrations de HCO_3^- analysées dans les eaux souterraines (moyenne env. 38 mg/l). Le complément acide nécessaire est très probablement fourni par l'acide sulfurique lié à l'oxydation des sulfures de fer (pyrites) très abondantes, aussi bien dans les granites que les gneiss.

En présence de sols, les conditions initiales de pression de CO_2 permettent de produire dans les eaux souterraines des concentrations d'hydrogencarbonates très variables et difficiles à estimer (entre approx. 40 et 400 mg/l). Dans ce cas, l'origine des hydrogencarbonates est en relation à la fois avec le CO_2 de l'atmosphère et l'altération des feldspaths et des plagioclases.

Dans l'hypothèse d'un système ouvert, qui caractérise la zone non saturée des aquifères, l'apport en CO_2 de l'atmosphère est naturellement plus important et augmente alors la capacité des eaux d'infiltration à altérer les minéraux qui constituent les roches cristallines.

7.3.2.6 Le calcium (Ca^{++})

L'histogramme illustre le faible domaine de variabilité du calcium, où la majorité des échantillons se groupent autour d'une concentration de l'ordre de 20 mg/l (figure 7.20).

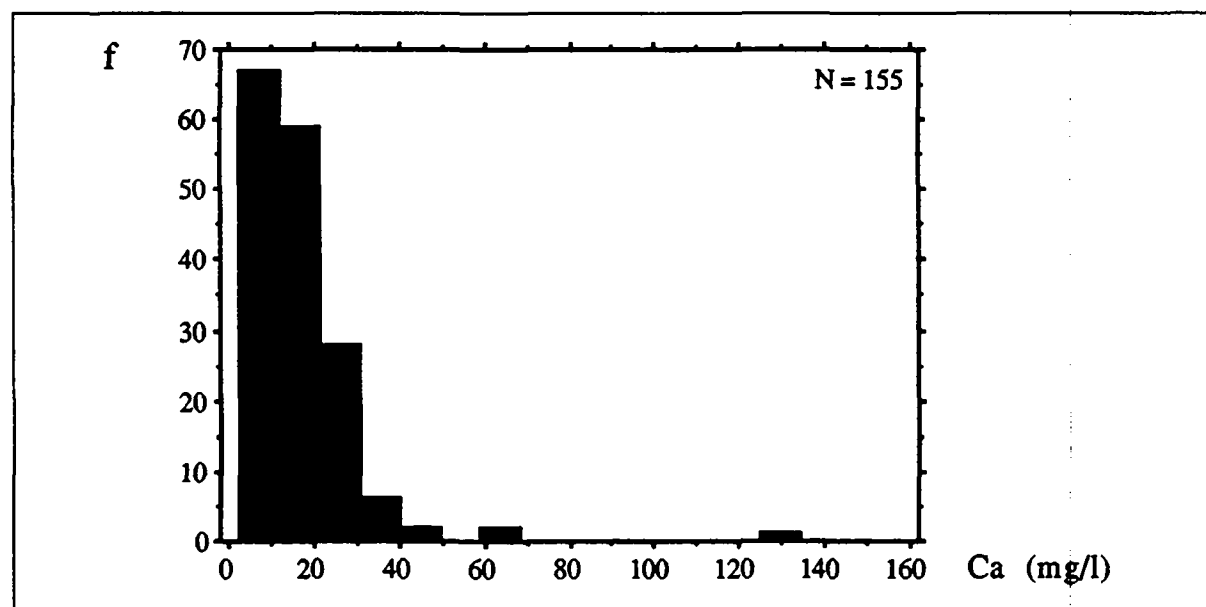


Figure 7.20 Histogramme des fréquences des concentrations en calcium.

Le calcium, avec le potassium et les hydrogencarbonates, possède un domaine de variabilité relativement peu élevé (env. 83 %, répartis entre 2.9 et 133 mg/l, tableau 7.9). A l'image de la minéralisation totale, le calcium est réparti de façon assez monotone, ce qui ne permet pas de mettre en évidence de marquage significatif des différents aquifères. Les cartes de représentation des données confirment la faible variabilité spatiale de ce paramètre (figure 7.21 et annexe 7.6).

Les graphes de corrélation, qui représentent le comportement des différents paramètres en fonction de la minéralisation totale (TID en meq/l) de l'ensemble des eaux souterraines, montrent dans tous les cas que le calcium contrôle pratiquement à lui seul l'ensemble de la minéralisation des cations des eaux souterraines des massifs cristallins. En effet, toutes les sources échantillonnées, quelles que soient les formations géologiques, se distribuent autour d'une droite de corrélation positive (figure 7.22).

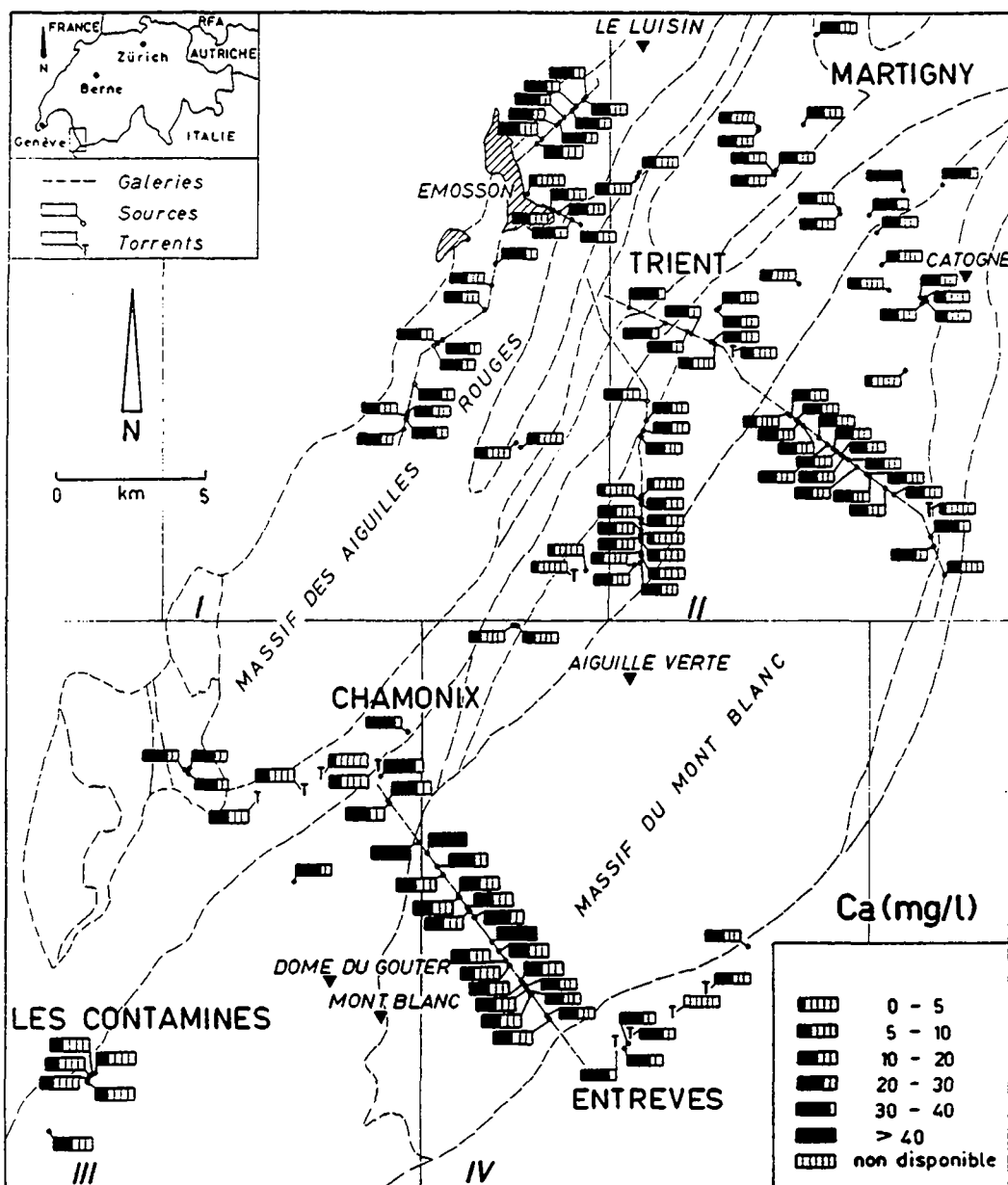


Figure 7.21 Carte de répartition spatiale du calcium à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

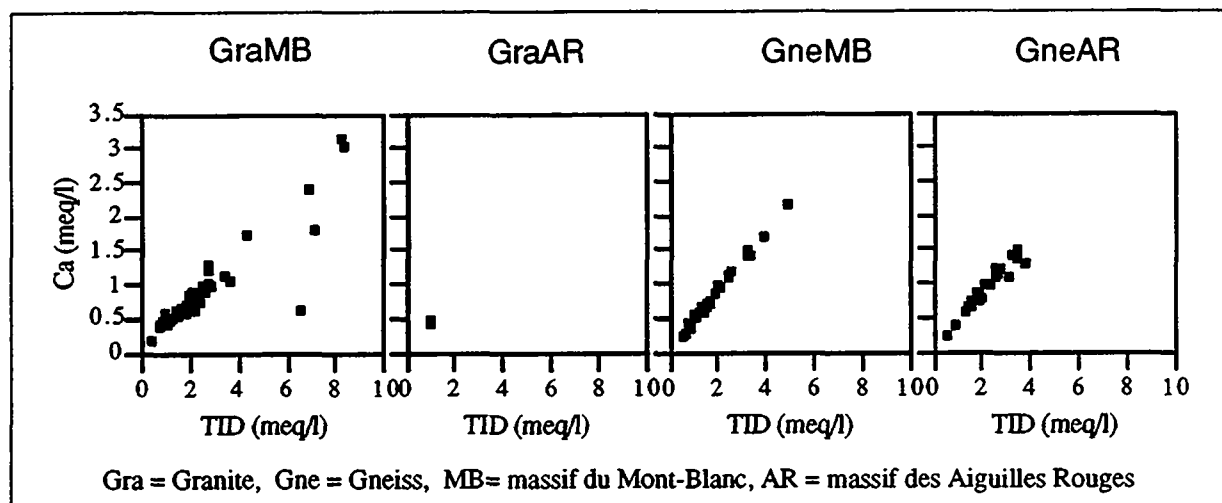
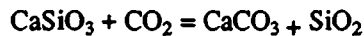


Figure 7.22 Relation entre le calcium et la minéralisation totale.

Dans l'ensemble les lixiviats de poudre de gneiss ont mis en solution davantage de calcium que ceux réalisés à partir des granites. Cette dernière remarque peut expliquer l'excellente corrélation qui existe entre le calcium et la minéralisation totale pour les eaux ayant circulé dans les gneiss.

Origine du calcium

Les sources en contact possible avec des terrains sédimentaires (par exemple le synclinal de Martigny-Chamonix) ont été systématiquement écartées des traitements graphiques ou statistiques. Les eaux souterraines échantillonnées au sein des massifs cristallins n'ont pas montré de signe évident de contact avec des niveaux de marbre. Pour ces dernières raisons, le calcium analysé dans les eaux souterraines des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges provient des minéraux silicatés et essentiellement de l'altération du plagioclase, anorthite $\text{CaAl}_2\text{SiO}_2\text{O}_8$, des épidotes $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_3(\text{SiO}_3)_4(\text{OH})$ et dans une moindre mesure d'autres silicates contenant du calcium. L'altération du calcium des roches silicatées est contrôlée par le CO_2 atmosphérique. Le modèle très schématique de l'altération des silicates calciques est le suivant (Miller & Urey, 1959):



Toutefois, les calculs d'équilibre ont montré que les eaux souterraines représentatives de l'ensemble des groupes géochimiques étudiés dans le massif du Mont-Blanc (voir paragraphe 7.2) sont, à l'exception d'une eau thermale échantillonnée dans le tunnel du Mont-Blanc (TMB km 2610), en fort déséquilibre avec la calcite (figure 7.23).

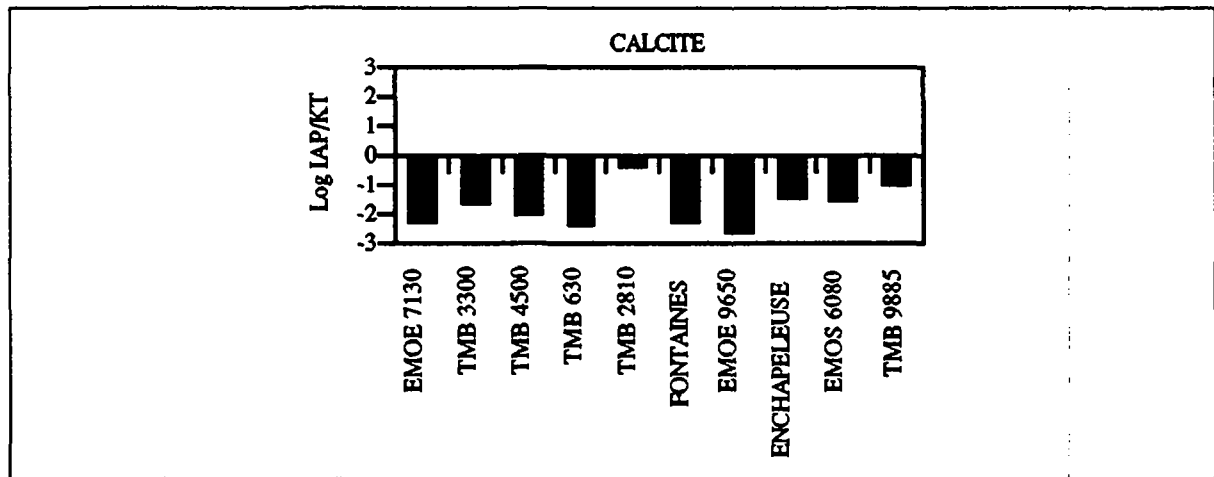


Figure 7.23 Représentation graphique des indices de saturation des eaux souterraines par rapport à la calcite. (IAP = Indice de saturation, KT = constante d'équilibre).

7.3.2.7 Les sulfates (SO_4^{2-})

L'histogramme des fréquences montre que la très grande majorité des échantillons possèdent des concentrations inférieures à 25 mg/l. Seules quelques valeurs se répartissent entre 25 et 400 mg/l (figure 7.24).

Les sulfates, avec les éléments en traces, présentent une très grande variabilité spatiale (environ 185 %, tableau 7.9). A l'exception des eaux thermales observées dans les formations granitiques du massif du Mont-Blanc, les

sulfates se développent de manière peu contrastée dans les eaux souterraines de l'ensemble des aquifères (figure 7.25 et annexe 7.6).

Les graphes de corrélation qui opposent les concentrations en sulfates avec la température confirment la liaison qui existe entre ces deux paramètres dans les aquifères granitiques. Toutefois, en-dessous de 20 °C, il n'existe plus entre eux de liaison significative (figure 7.26).

Les sulfates, qui constituent avec les hydrogénocarbonates la majorité des anions, sont naturellement fortement liés à la minéralisation totale, quels que soient les types d'aquifères (figure 7.27).

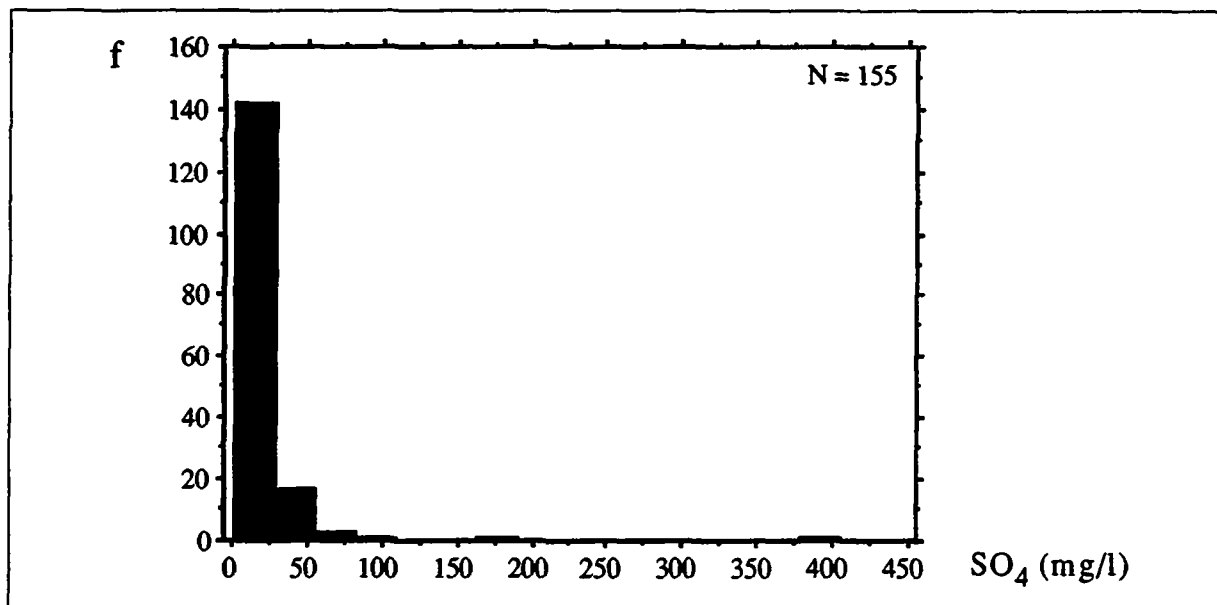


Figure 7.24 Histogramme des fréquences des concentrations des sulfates.

Origine des sulfates

Les analyses de la composition chimique de la couverture neigeuse d'une partie du massif du Mont-Blanc ont montré que l'apport atmosphérique des sulfates était négligeable (Parriaux et al, 1990). Il en est de même des eaux des sols où les concentrations sont inférieures à 5 mg/l (voir chapitre 6, paragraphe 6.3).

L'origine des sulfates de la grande majorité des eaux souterraines des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges doit être essentiellement liée à l'oxydation des sulfures et notamment de la pyrite (FeS_2), qui est très abondante dans les granites. La figure 7.5, qui représente les caractéristiques hydrogéologiques des venues de la galerie est d'Emosson, montre que les concentrations des sulfates augmentent parallèlement au molybdène provenant du sulfure de molybdène (MoS_2). Des valeurs élevées (env. 160 mg/l), contrastant avec les autres mesures, ont été analysées dans des échantillons provenant des formations gneissiques du tunnel du Mont-Blanc. Dans ce cas, il est possible que ces eaux souterraines thermales aient été en contact avec des écailles évaporitiques d'origine triasique, insérées lors de l'orogénèse du massif dans les schistes cristallins (Lebdioui, 1985).

Il faut également signaler les analyses effectuées dans les forages profonds réalisés dans les granites du nord de la Suisse (NAGRA), où des concentrations très élevées (200-3000 mg/l) ont été observées. Ces valeurs doivent être mises en relation avec le caractère profond et ancien de ces eaux thermales. L'origine des sulfates est également attribuée aux phénomènes d'oxydation des sulfures (Schmassmann et al, 1984).

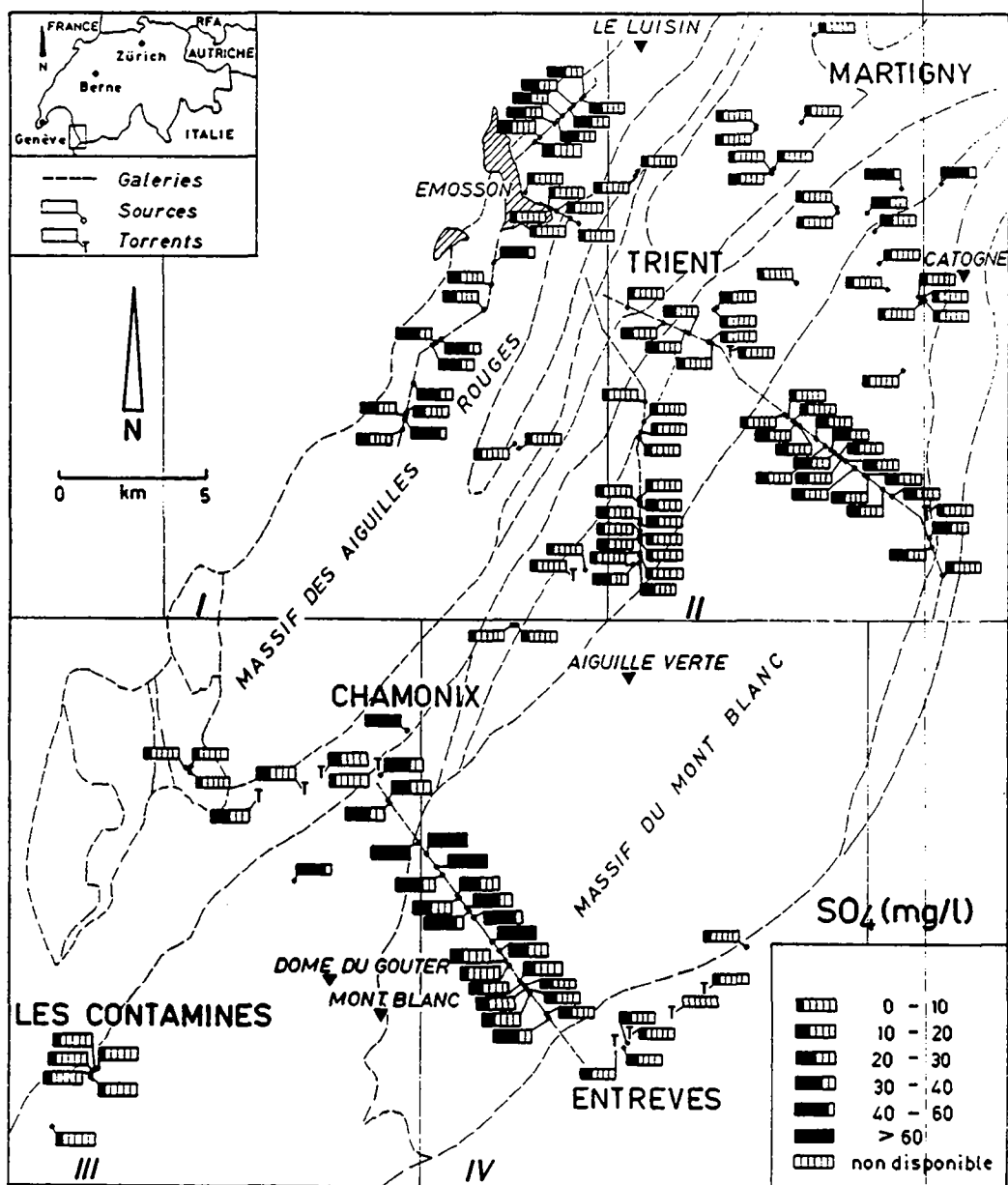


Figure 7.25 Carte de répartition spatiale des sulfates à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

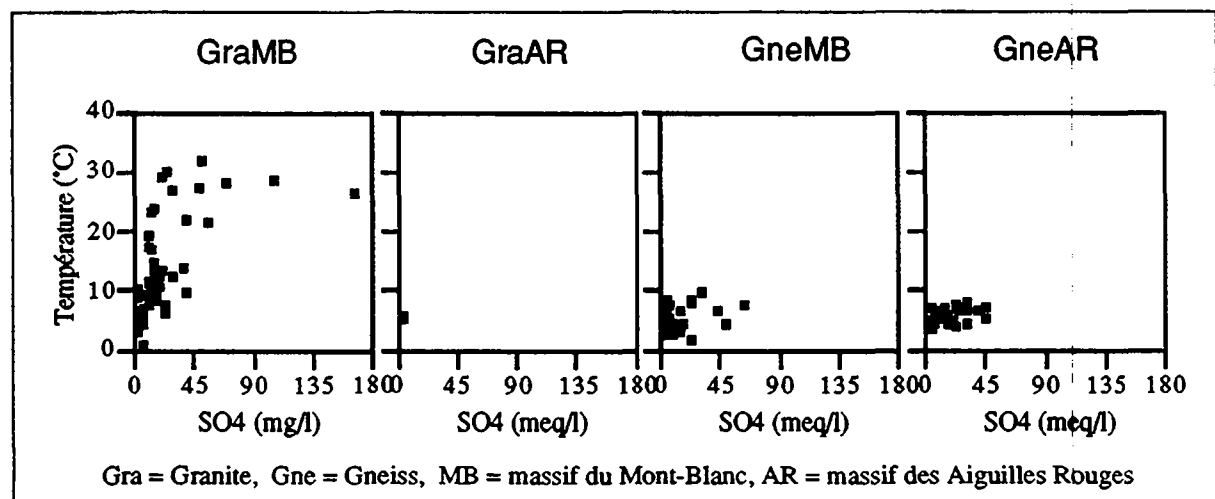


Figure 7.26 Relation entre les concentrations des sulfates et la température.

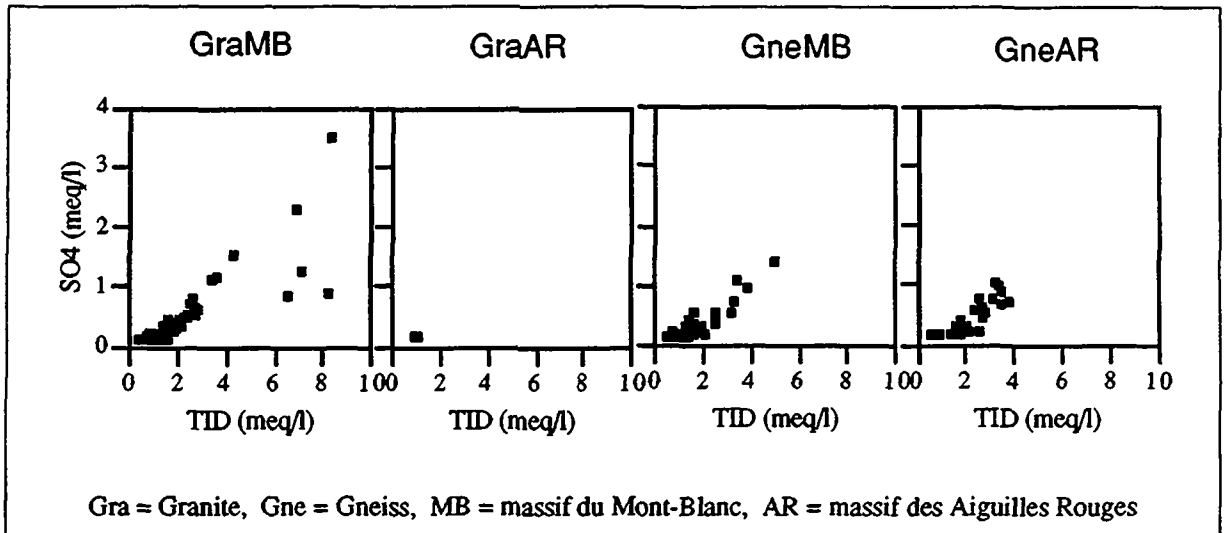


Figure 7.27 Relation entre les concentrations des sulfates et la minéralisation totale.

Les lixiviats ont montré que les différentes poudres de roche permettaient la mise en solution de sulfates, avec cependant peu de contrastes d'intensité de concentration entre les granites et les gneiss (voir chapitre 5, paragraphe 5.5, figure 5.4). Les analyses ont notamment montré qu'il existait un rapport de 1/3 entre les lixiviats et les eaux souterraines, ce qui prouve que les sulfates proviennent bien des roches. Les concentrations comparativement élevées mesurées dans les eaux souterraines peuvent être expliquées par l'altération et un lessivage superficiel des roches préoxydées qui forment les bassins versants.

7.3.2.8 La silice (SiO_2)

L'histogramme des fréquences montre que la grande majorité des concentrations se situent en-dessous de 10 mg/l, alors que le reste des échantillons se répartissent entre 10 et 20 mg/l (figure 7.28).

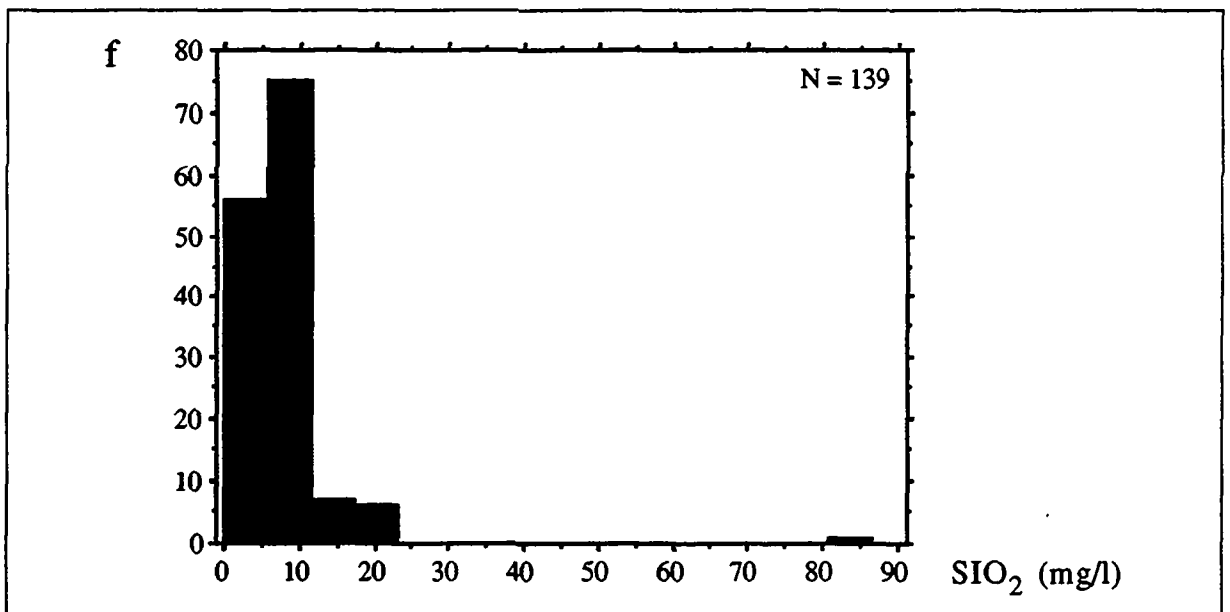


Figure 7.28 Histogramme des fréquences concentration de la silice.

Les graphiques de la figure 7.30, où l'ensemble des sources ont été reportées, montrent une forte corrélation des concentrations de silice avec la température dans les aquifères granitiques et souligne l'intérêt de la silice pour l'estimation des températures en profondeur par l'utilisation des géothermomètres (Ellis & Mahon, 1977).

De variabilité spatiale moyenne (env. 100 %, tableau 7.9), la silice marque principalement les eaux thermales mesurées dans le tunnel du Mont-Blanc et à Bovernier, où les concentrations les plus élevées ont été mesurées (figure 7.29).

Dans le cas des aquifères granitiques, la concentration en silice des eaux souterraines est liée à la minéralisation totale. Les valeurs les plus élevées sont également représentées par les eaux thermales (figure 7.31).

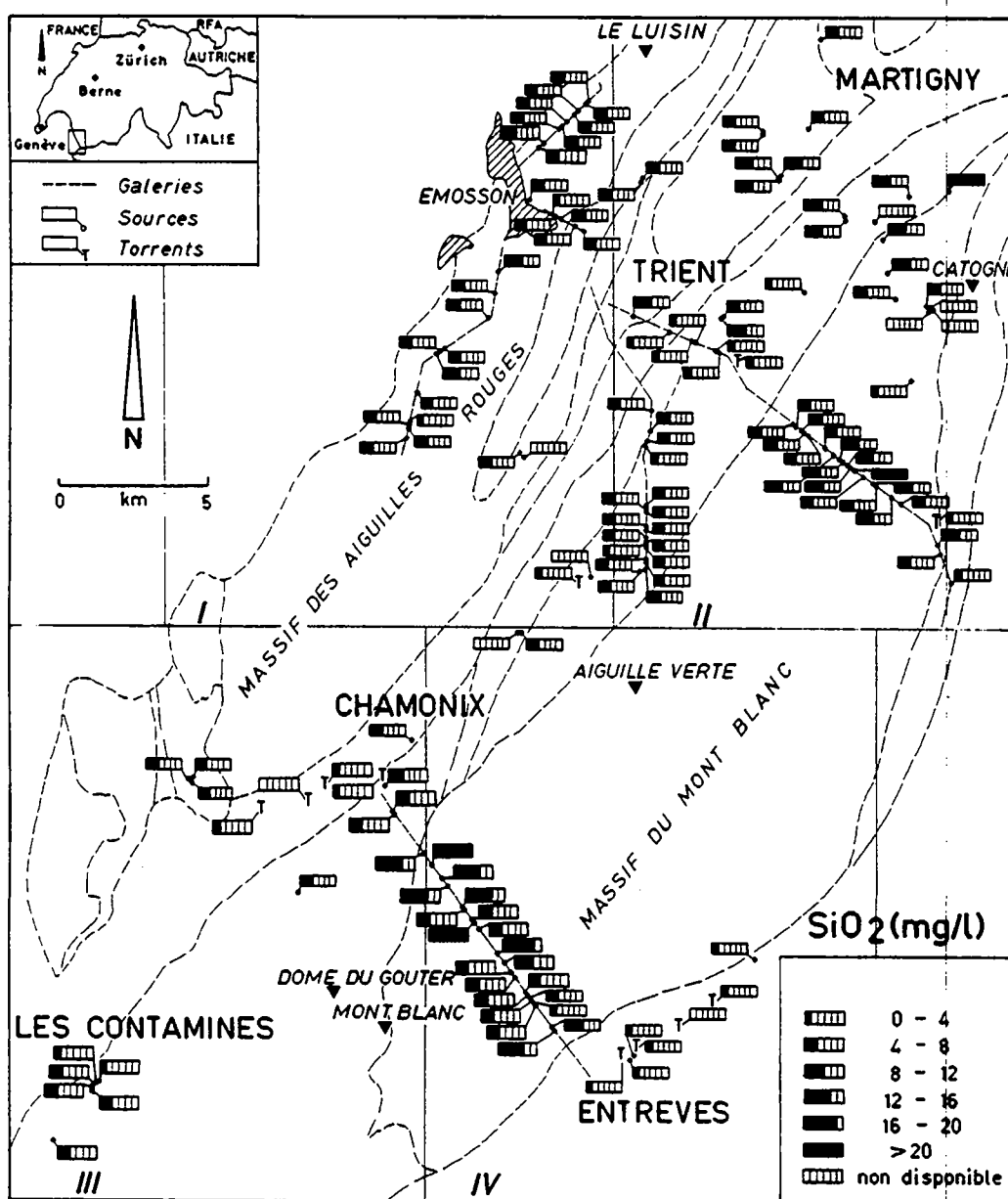


Figure 7.29 Carte de répartition spatiale de la silice à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

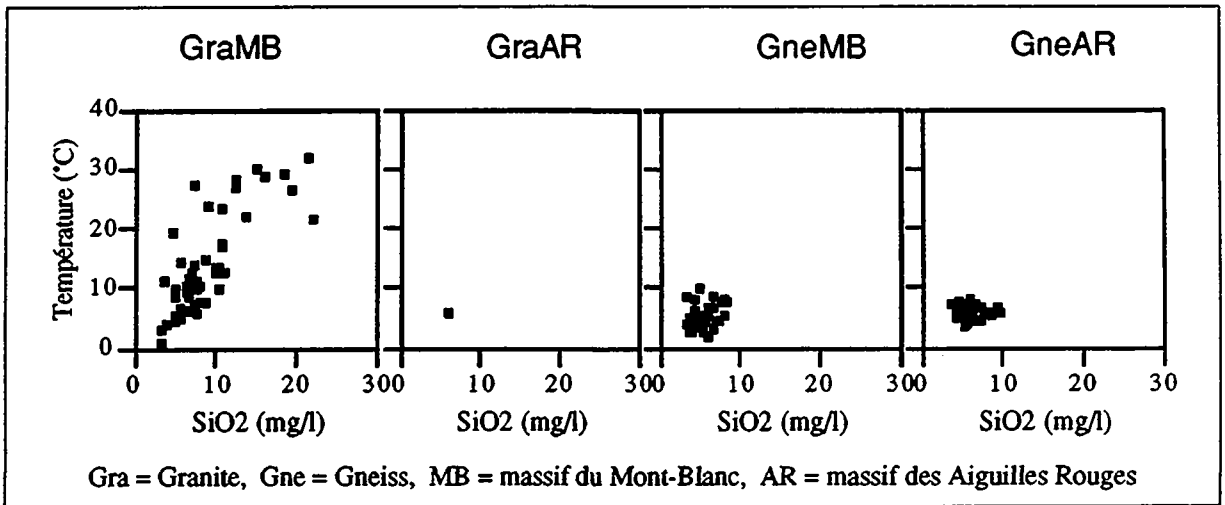


Figure 7.30 Relation entre les concentrations de silice et la température.

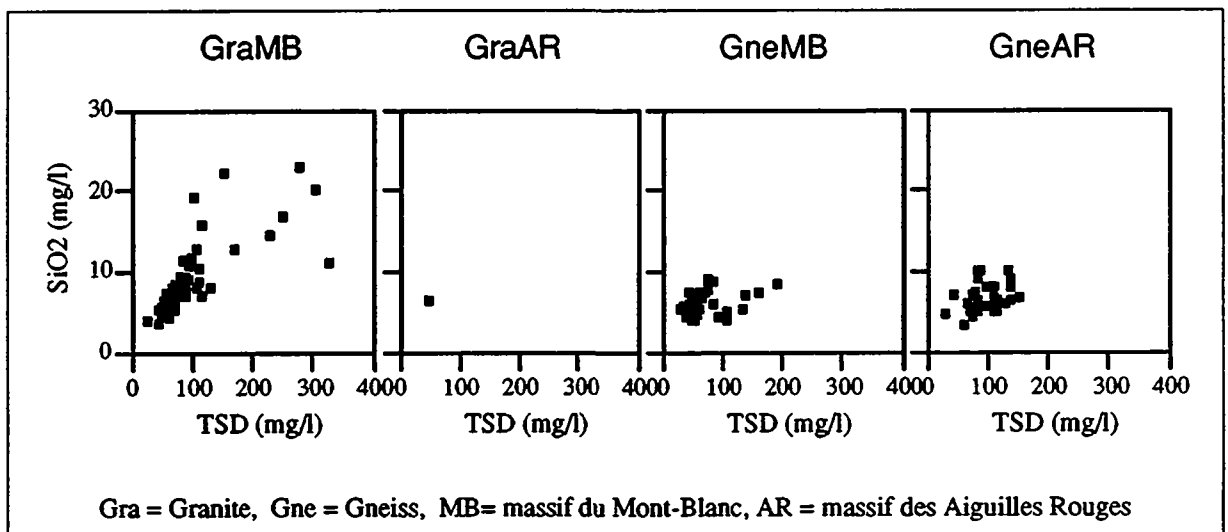


Figure 7.31 Relation entre la minéralisation totale et les concentrations de silice.

Origine de la silice

D'une manière générale, la silice constitue environ 60 % des gneiss et 80 % des granites et elle est présente dans la majorité des minéraux qui forment les aquifères faisant l'objet de cette recherche (Bussy, 1990). La silice, qui forme la matrice des roches silicatées, se trouve à la fois sous forme très peu soluble (quartz) et sous forme soluble (feldspaths et plagioclases). Elle est également exprimée en néoformations dans les fissures (par exemple veine de quartz ou silice amorphe). Les fissures peuvent être obturées ou ouvertes, dans ce cas elles permettent la circulation des eaux souterraines et la mise en solution de silice.

Les calculs d'équilibre des eaux souterraines par rapport aux différentes formes de la silice montrent que dans la plupart des cas, elles sont en déséquilibre avec la silice amorphe, la calcédoine et la cristobalite, alors qu'elles sont en équilibre ou sursaturées par rapport au quartz, qui est peu soluble (figure 7.32). La cristobalite est donnée par le programme de calcul, mais n'est probablement pas présente dans le massif du Mont-Blanc.

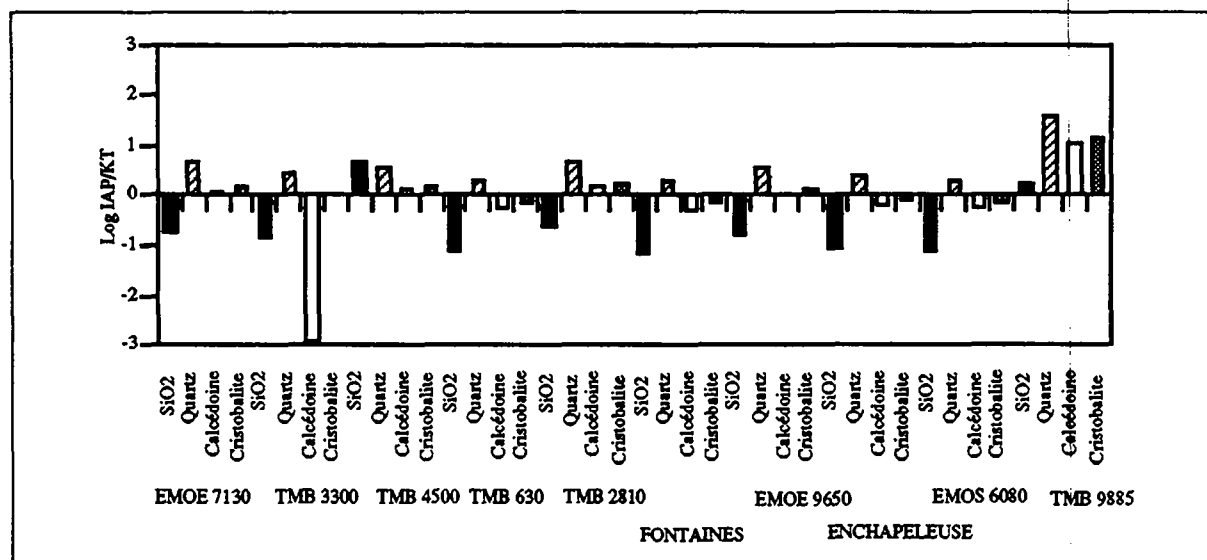


Figure 7.32 Représentation graphique des indices de saturation des eaux souterraines par rapport aux différentes formes de la silice (IAP = Indice de saturation, KT = constante d'équilibre).

7.3.2.9 Le sodium (Na^+)

L'histogramme des fréquences montre que la grande majorité des échantillons possèdent des concentrations inférieures à 5 mg/l, avec cependant une répartition exponentielle décroissante vers les valeurs les plus élevées, de plus de 60 mg/l (figure 7.33).

La carte de répartition spatiale des concentrations de sodium indique que les valeurs les plus élevées sont en relation étroite avec les eaux profondes des aquifères granitiques du massif du Mont-Blanc et contrastent avec les émergences observées dans les milieux gneissiques. Son domaine de variabilité est de l'ordre de 190 %, les concentrations varient de 0.47 à 62 mg/l (tableau 7.9, figure 7.34 et annexe 7.6).

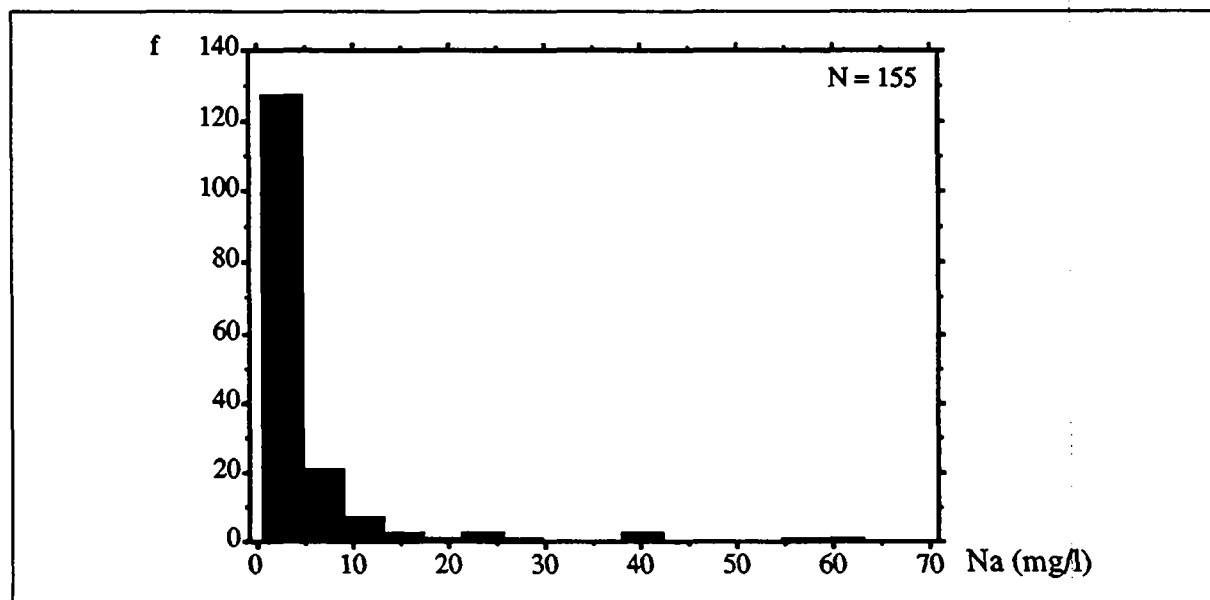


Figure 7.33 Histogramme des fréquences des concentrations en sodium.

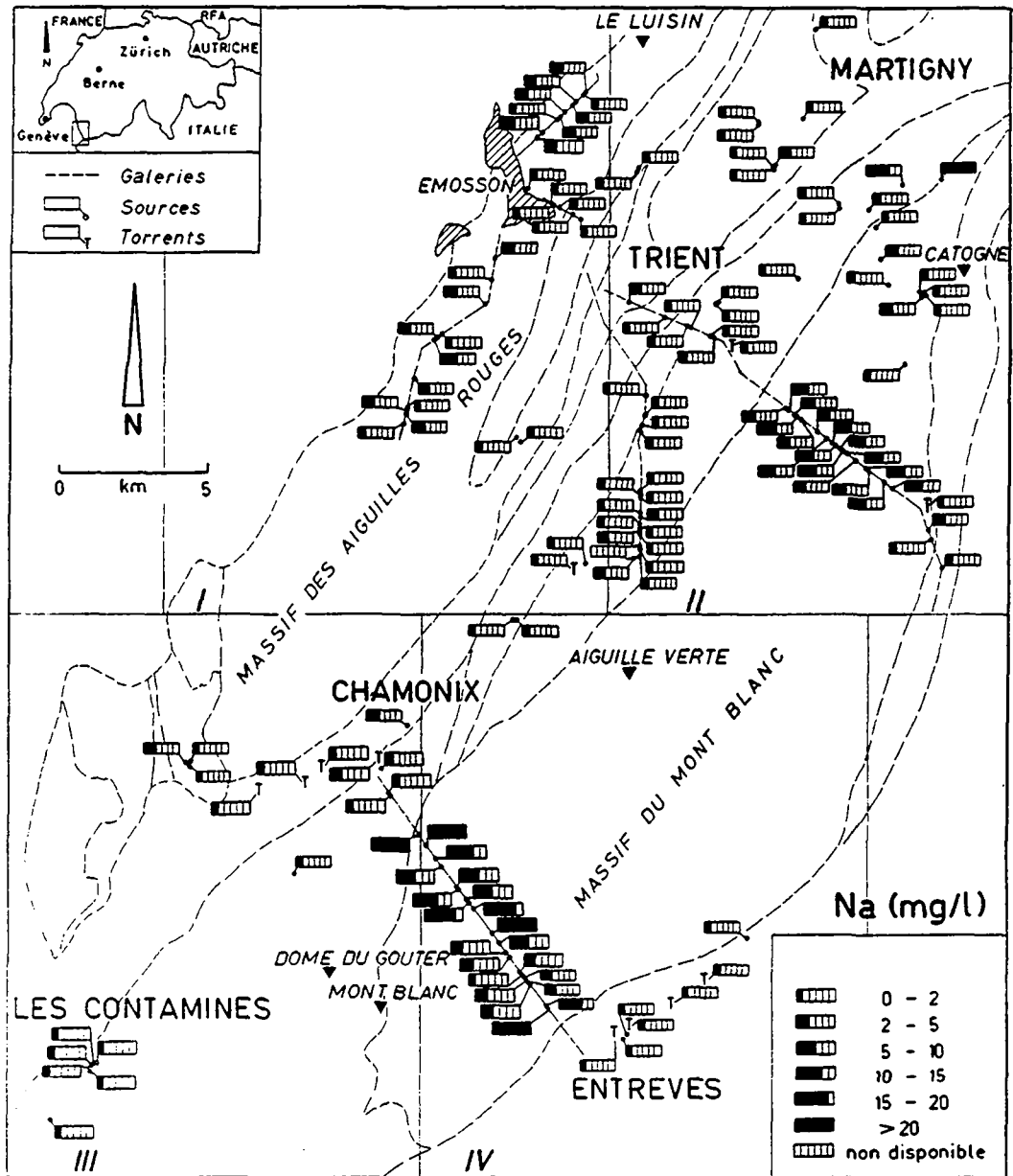


Figure 7.34 Carte de répartition spatiale du sodium à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

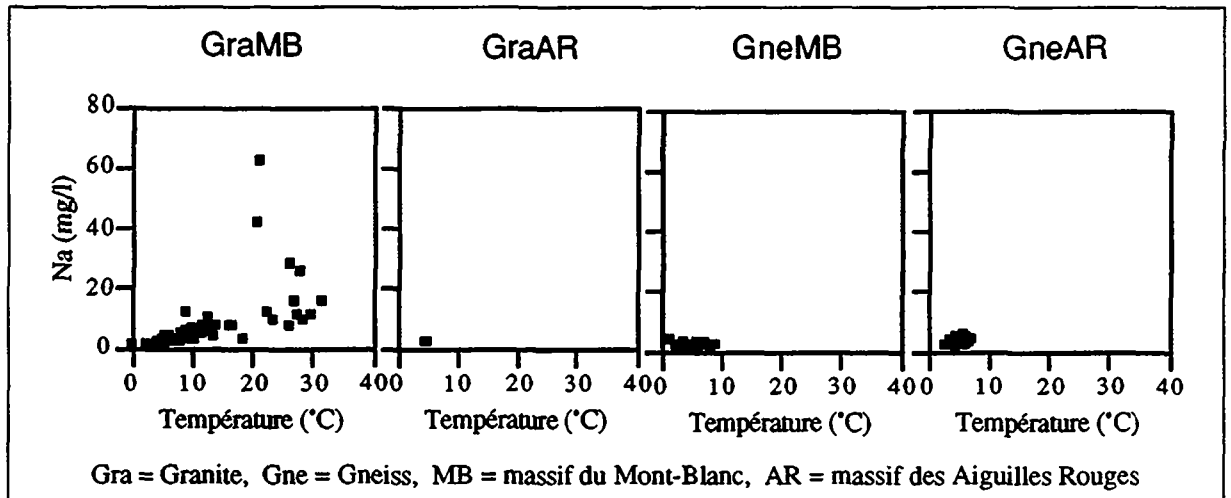
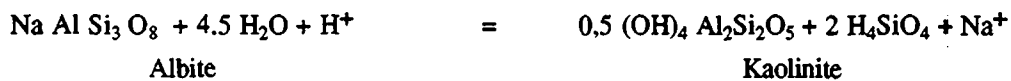


Figure 7.35 Relation entre les concentrations en sodium et les températures.

La variabilité du sodium dans les aquifères granitiques est assez bien corrélée avec les variations de la température et de la minéralisation (figure 7.35). Il apparaît que les eaux provenant d'aquifères granitiques forment un ensemble distinct face à celles liées aux aquifères de type gneissique. De surcroît, les graphes indiquent que les eaux des granites possèdent des concentrations en sodium très nettement plus élevées que celles issues des formations gneissiques (figure 7.41). Cette dernière remarque souligne le rôle marqueur du sodium pour les eaux thermales des aquifères granitiques. Les analyses de roche confirment le caractère dominant du sodium dans les granites et se différencient nettement de celles des autres roches (voir géochimie des roches, chapitre 5, paragraphe 5.5, figure 5.2). Lors des tests de mise en solution de poudre de roche, le sodium a été nettement mis en évidence, sans toutefois présenter de contraste significatif entre les granites et les autres roches choisies pour représenter les différents faciès du massif (voir chapitre 5, paragraphe 5.5, figure 5.4). Il faut remarquer cependant que les concentrations dans les eaux souterraines sont relativement semblables pour des températures inférieures à 10 °C (figure 7.35). Les tests de lixiviation en laboratoire ont été effectués pour l'ensemble des roches à la même température (env. 20 °C), ce qui explique probablement l'homogénéisation des concentrations obtenues par rapport aux forts contrastes thermiques observés dans les eaux souterraines.

Origine du sodium

Le sodium contenu dans les eaux souterraines des aquifères du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges provient en grande partie de l'altération des plagioclases acides (albite, oligoclase), dont la réaction est présentée ci dessous:



Une deuxième origine possible du sodium peut être liée aux clinopyroxènes (aégirine, $\text{NaFeSi}_2\text{O}_6$) et aux amphiboles (Edenite: $\text{Na Ca}_2 \text{Mg}_5 \text{Al Si}_7 \text{O}_{22} (\text{OH})_2$).

7.3.2.10 Les chlorures (Cl⁻)

D'une manière générale, les concentration en chlorures sont très faibles (en moyenne 1.4 mg/l). L'histogramme des fréquences montre qu'à l'exception de quelques sources, la très grande majorité des échantillons se situent au-dessous de 3 mg/l (figure 7.36).

Le domaine de variabilité spatiale est parmi les plus élevés (env 340 %). Il faut toutefois souligner que cette valeur peut être expliquée en partie par des difficultés d'ordre analytique (tableau 7.9). Seules quelques sources présentent des concentrations qui dépassent la moyenne, mais de façon très intense (4,5 à 45 mg/l). Les cartes de répartition spatiale des données font apparaître clairement que les concentrations les plus élevées se réalisent pour les eaux souterraines profondes et chaudes des aquifères granitiques. Ces concentrations élevées ont été essentiellement mesurées dans le tunnel du Mont-Blanc et, dans la partie nord du massif, à la source thermale de Bovermier (figure 7.37 et annexe 7.6).

La figure 7.38 représente les relations entre les concentrations des chlorures et la température. Elle montre que les hautes concentrations sont essentiellement fonction des températures élevées, mesurées dans les formations granitiques. Les relations entre les chlorures et la minéralisation soulignent l'abondance des concentrations en

chlorures liées aux eaux profondes, chaudes et plus fortement minéralisées des aquifères granitiques par opposition aux eaux froides provenant des formations gneissiques (figures 7.38 et 7.39).

Cependant la source de Bovernier-gare possède une concentration en chlorures relativement élevée (env. 18 mg/l) pour une température faible de 9 °C (figure 7.38). Cette relation montre que dans ce cas, les caractéristiques de l'eau ne sont pas représentatives de la température à l'émergence, mais que les concentrations élevées sont probablement liées à des températures plus élevées en profondeur.

Origine des chlorures

Une partie des chlorures présents dans les eaux souterraines doit être attribuée à l'apport atmosphérique. Des analyses effectuées sur des neiges du massif du Mont-Blanc suisse ont montré des concentrations moyennes de l'ordre de 0.3 mg/l (ou 0.009 meq/l, Parriaux et al, 1990). Au-delà de cette limite, on peut considérer que les chlorures qui marquent les eaux souterraines sont dus, d'après Leelanandam, à l'altération des micas et des amphiboles (Leelanandam, 1953). Les analyses des lixiviats confirment la mise en solution des chlorures à partir de roche cristalline. Les concentrations obtenues sont sensiblement semblables pour l'ensemble des échantillons de roche (voir chapitre 5, paragraphe 5.5, figure 5.4).

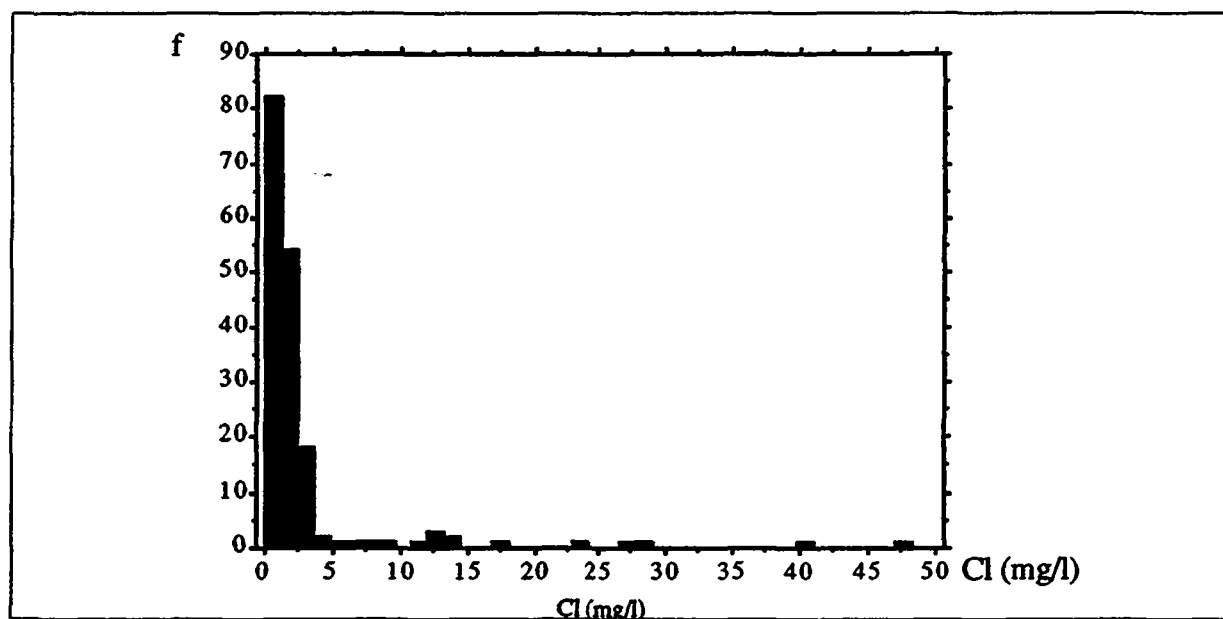


Figure 7.36 *Histogramme des fréquences des concentrations des chlorures.*

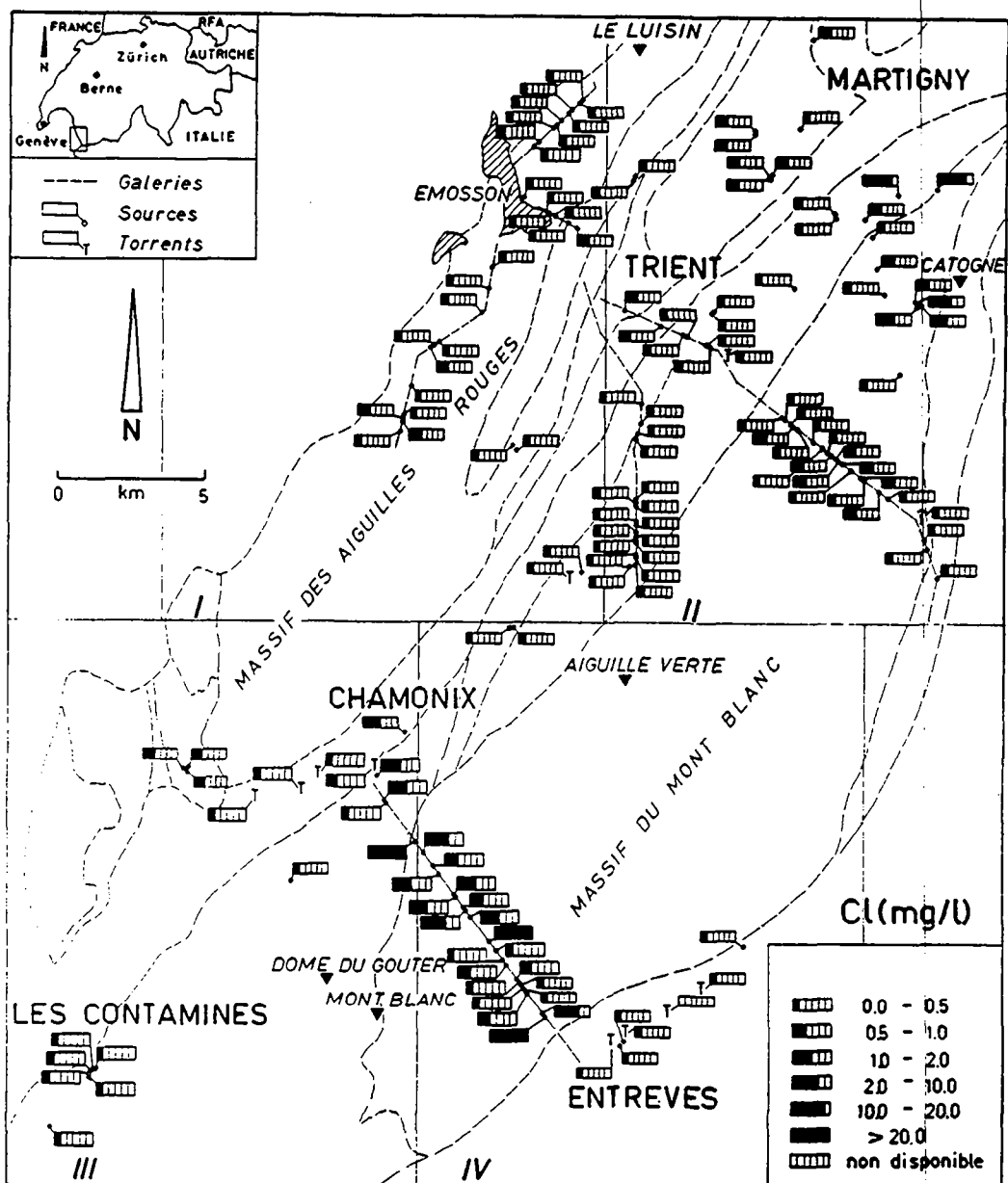


Figure 7.37 Carte de répartition spatiale des chlorures à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

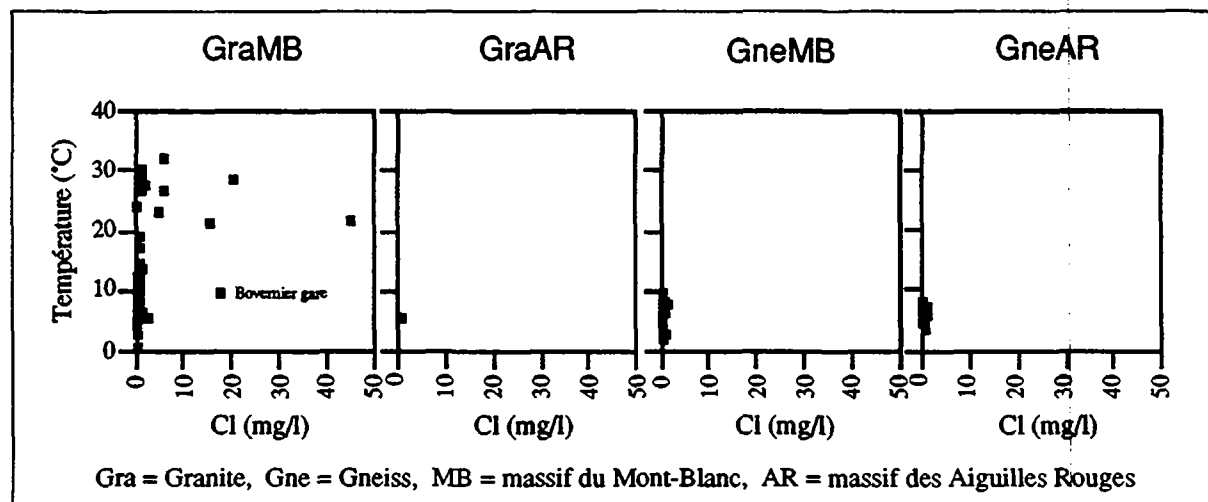


Figure 7.38 Relation entre la concentration en chlorures et la température.

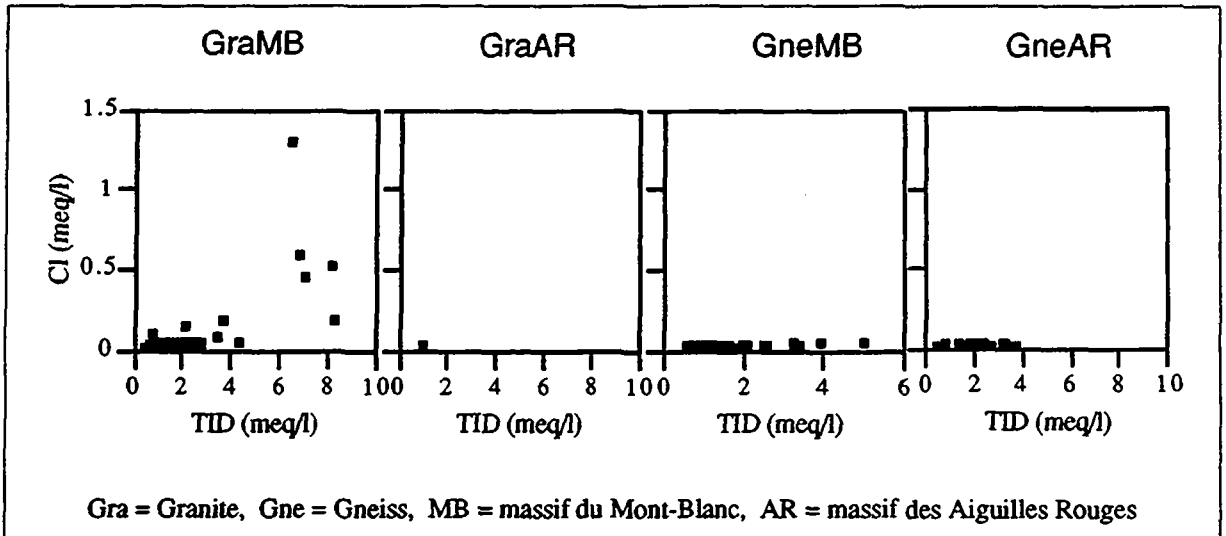


Figure 7.39 Relation entre les chlorures et la minéralisation totale.

7.3.2.11 Le fluor

Le fluor présente des variations spatiales moyennes (env. 125 %). La distribution des fréquences fait apparaître deux entités, de forme modale. Le premier groupe est formé des concentrations inférieures à 1 mg/l, alors que pour le deuxième ensemble, le mode se situe approximativement à 3.5 mg/l (figure 7.40).

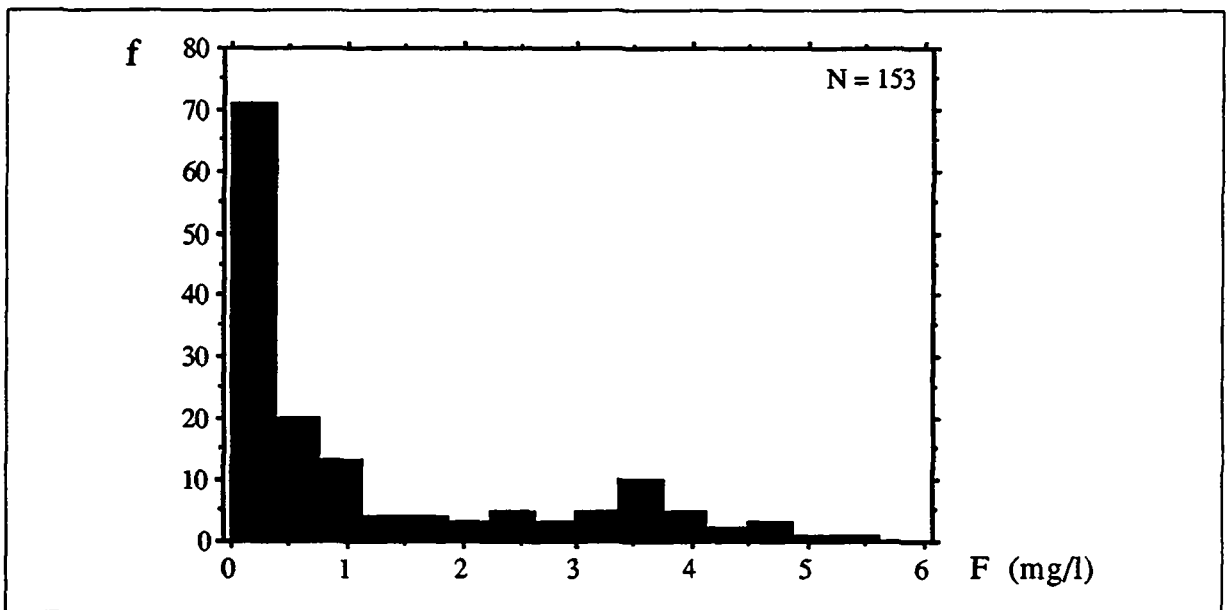


Figure 7.40 Histogramme des fréquences des concentrations en fluor.

Les cartes de répartition spatiale indiquent que le fluor est un très bon marqueur des eaux souterraines profondes des aquifères granitiques du massif du Mont-Blanc (figure 7.41). Les concentrations mesurées dans les eaux froides des formations granitiques ou gneissiques varient entre 0.0 et 1.4 mg/l, alors que la majorité des sources à circulations profondes s'effectuant dans les granites possèdent des concentrations de l'ordre de 2 à 4 mg/l. Ces

valeurs ont été observées surtout dans les galeries souterraines (tunnel du Mont-Blanc et collecteur est d'Emosson).

De plus, les graphes de corrélation soulignent le fort contraste existant entre les concentrations des eaux des granites et des gneiss (figure 7.42). Ils montrent également qu'il n'existe pas de liaison privilégiée entre le fluor et la minéralisation totale des eaux. Bien que la corrélation soit faible, il existe cependant une relation évidente entre les concentrations de fluor et la température (figure 7.43). Cette observation confirme le caractère marqueur du fluor pour les eaux souterraines des aquifères granitiques profonds (Dubois et Parriaux, 1990).

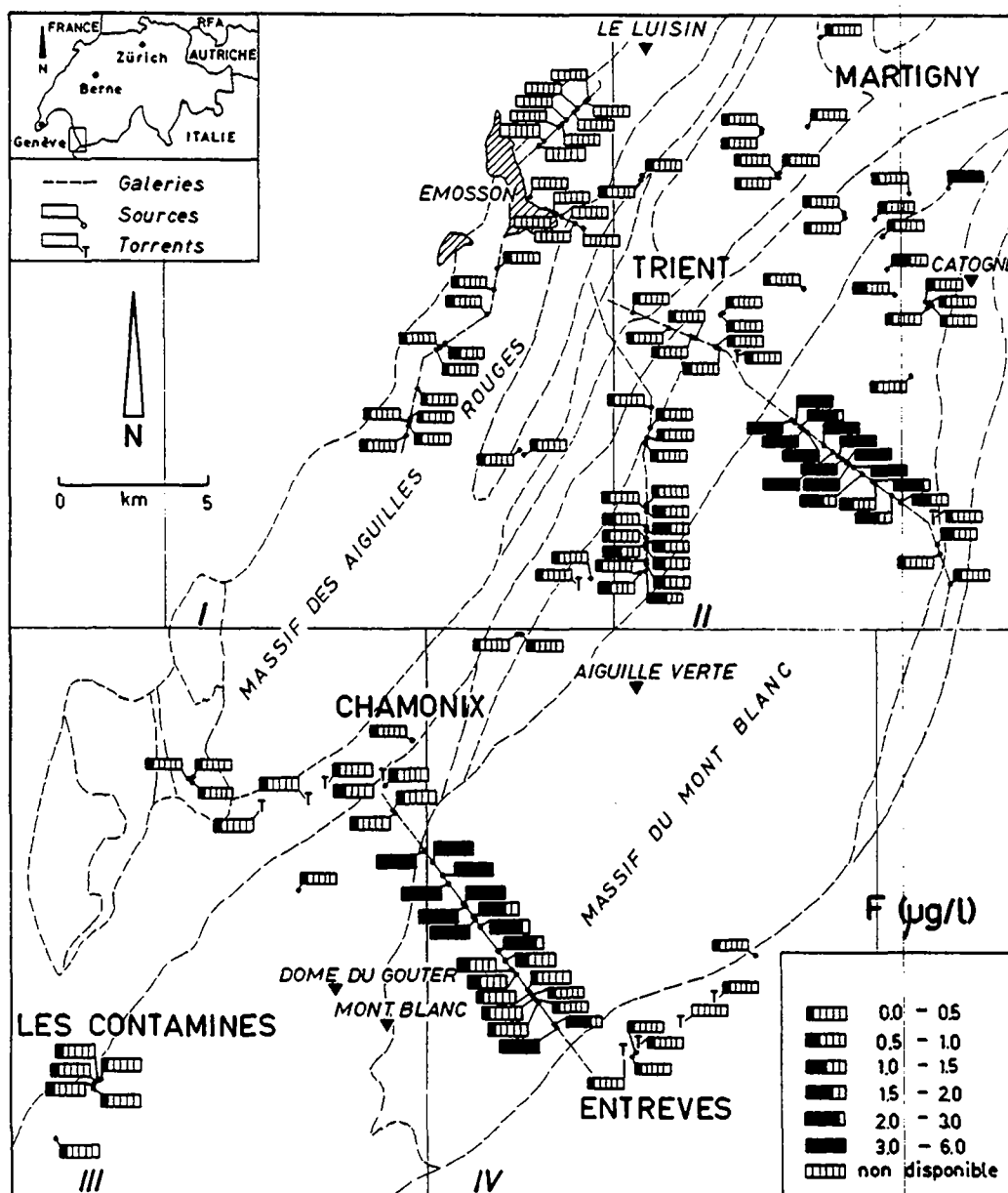


Figure 7.41 Carte de répartition spatiale du fluor à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

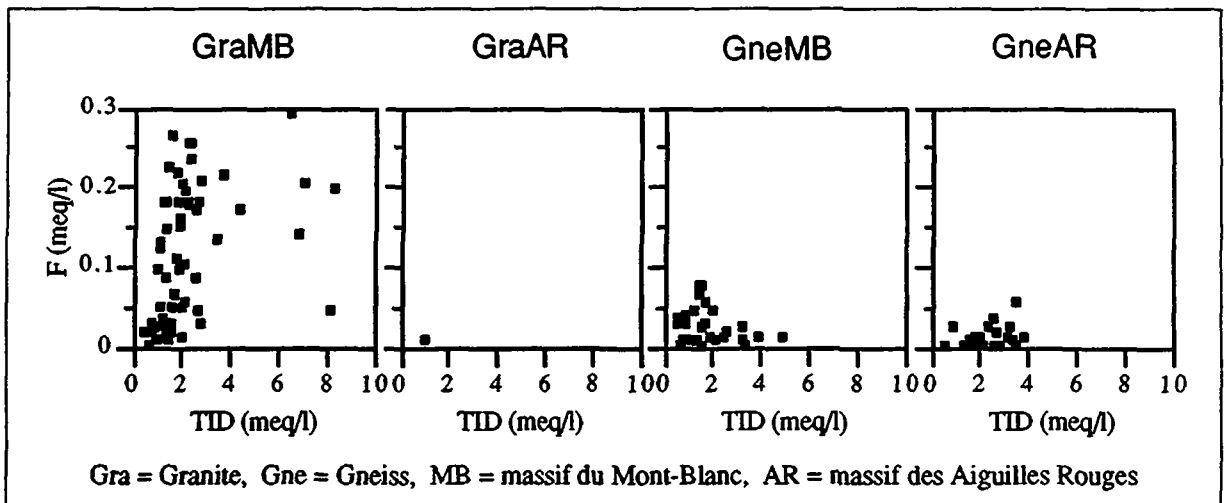


Figure 7.42 Relation entre les concentrations en fluor et la minéralisation totale.

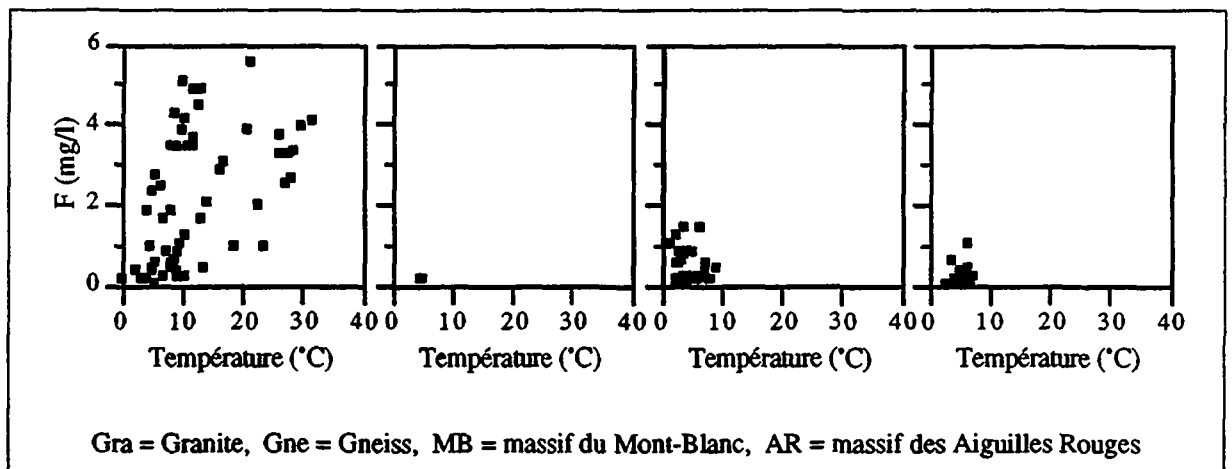


Figure 7.43 Relation entre les concentrations en fluor et la température.

Origine du fluor

Les granites peuvent contenir des quantités de fluor de l'ordre de 800 ppm (Kostetskaya et Mordavinova, 1968). Le fluor dans les roches cristallines est présent dans un grand nombre de minéraux, dont les principaux sont la fluorine (CaF_2) et l'apatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$). D'après ce dernier auteur, la biotite et les amphiboles, bien que contenant peu de fluor, peuvent, par l'abondance de ces minéraux dans les roches cristallines, contribuer aux concentrations observées dans les eaux.

Enfin, le sphène et le topaze contiennent également du fluor, mais la faible représentation de ces minéraux n'implique que de manière négligeable la géochimie des eaux souterraines.

Les calculs d'équilibre ont montré que les eaux subthermales et thermales provenant des formations granitiques étaient en équilibre avec la fluorine, alors que les eaux froides présentent des états de sous-saturation (figure 7.44).

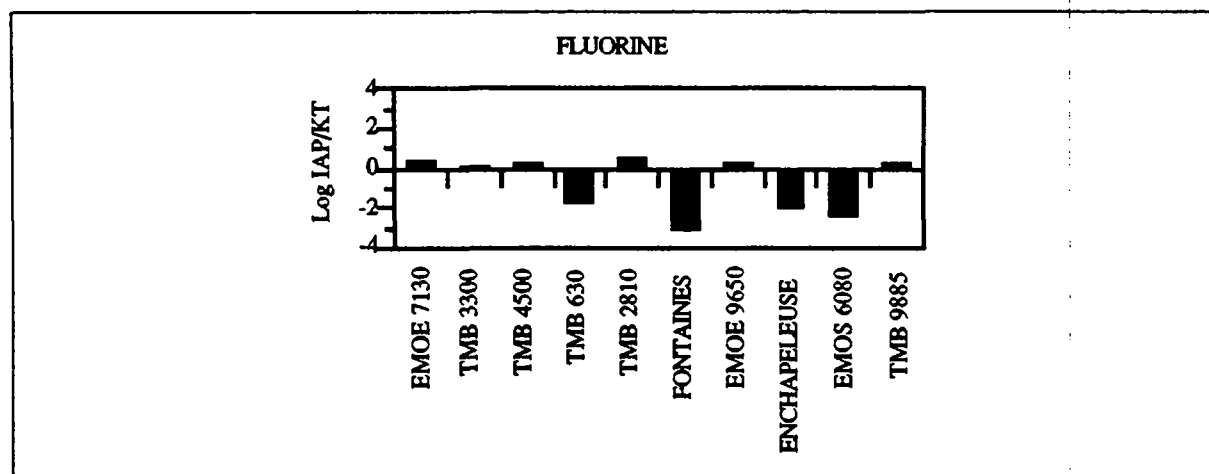


Figure 7.44 Représentation graphique des indices de saturation des eaux souterraines par rapport à la fluorine (IAP = Indice de saturation, KT = constante d'équilibre).

Les analyses effectuées sur des lixiviats de poudre de roche montrent clairement la présence privilégiée du fluor dans un des granites (voir chapitre 5, paragraphe 5.5, figure 5.4) et expliquent ainsi les concentrations mesurées dans les eaux souterraines. Plusieurs gisements de fluorine sont connus dans le massif du Mont-Blanc (voir chapitre 5), ce qui permet de penser que de nombreuses minéralisations non observées existent ailleurs.

7.3.2.12 Le lithium

L'histogramme montre que la grande majorité des échantillons possèdent des concentrations inférieures à 0.05 mg/l, avec toutefois une répartition exponentielle décroissante vers les valeurs les plus élevées (figure 7.45).

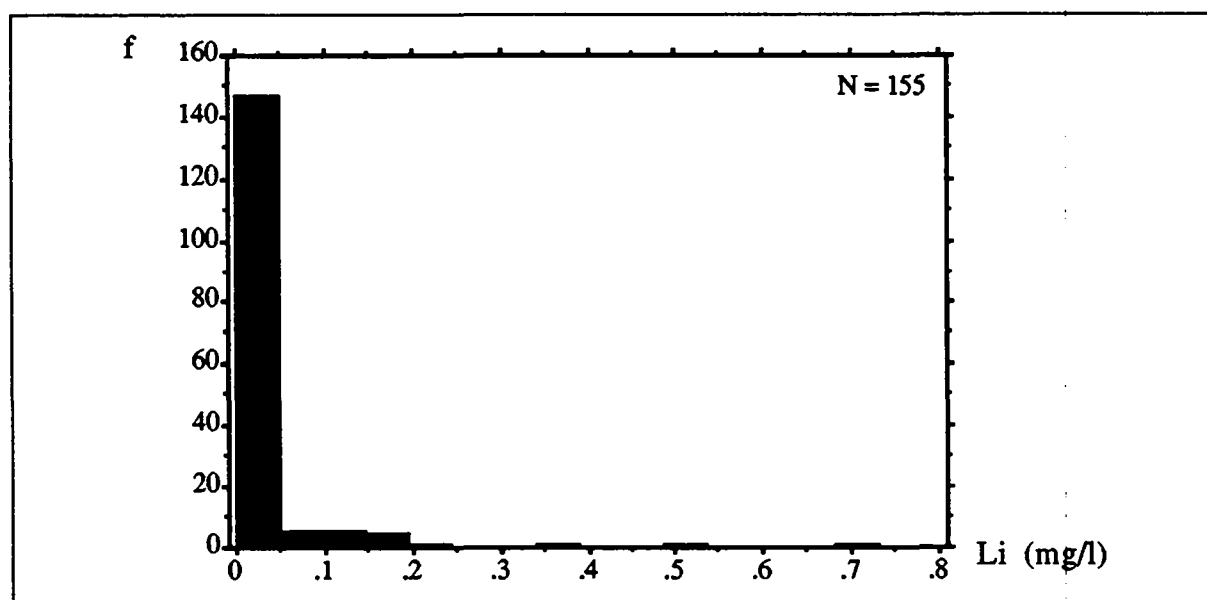


Figure 7.45 Histogramme des fréquences des concentrations en lithium.

Cet élément a montré une variabilité très élevée (300 %, tableau 7.9). Les concentrations les plus élevées ont été mesurées dans les eaux chaudes des aquifères granitiques du massif du Mont-Blanc (tunnel du Mont-Blanc et source thermale de Bovermier, figure 7.46 et annexe 7.6).

La figure 7.47 indique que seuls les échantillons d'eau subthermale et thermale prélevés dans les formations granitiques présentent une certaine relation avec la température et la minéralisation totale. Ce phénomène connu souligne le caractère marqueur du lithium pour les eaux thermales des aquifères granitiques (Fouillac et Michard, 1981).

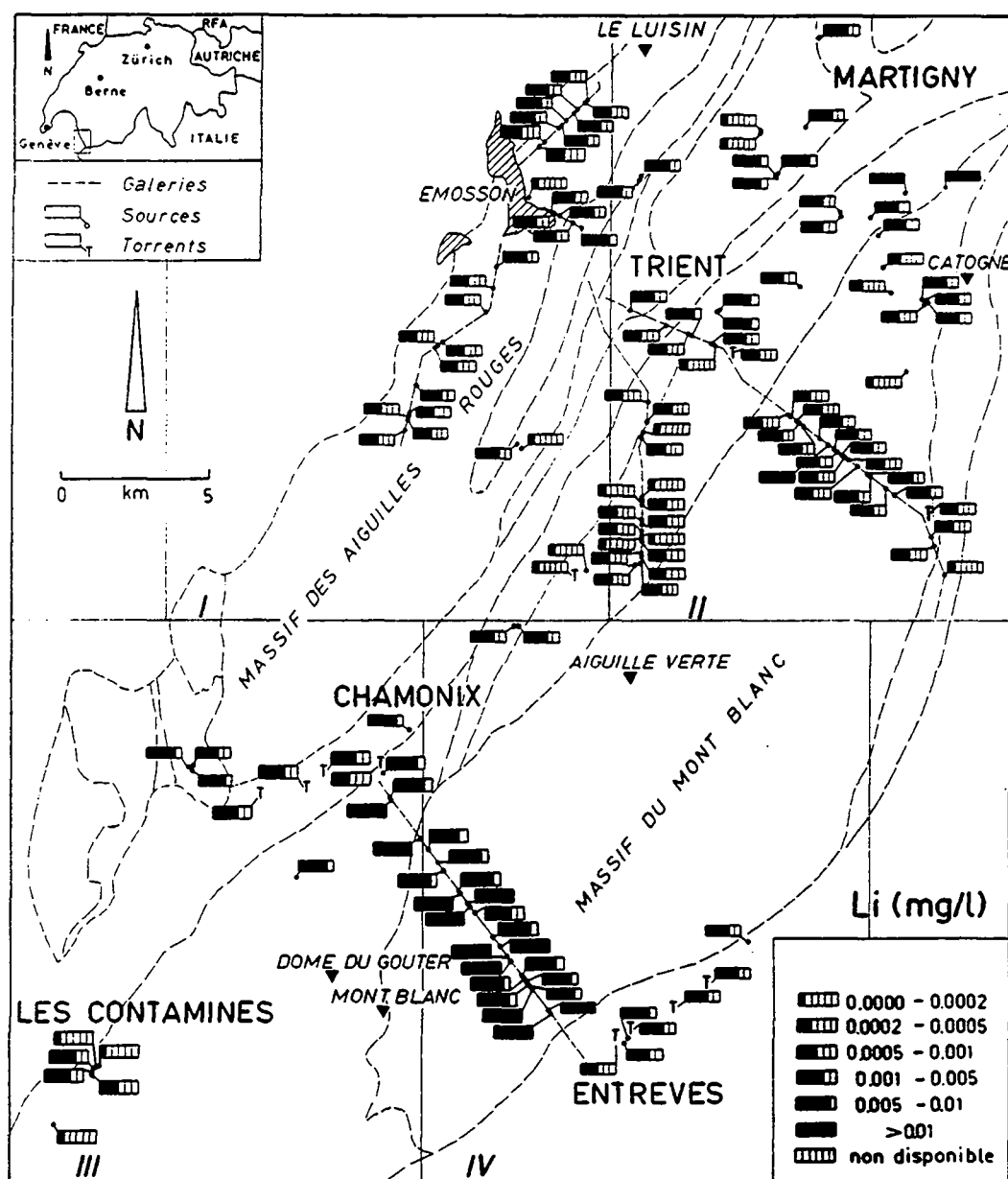


Figure 7.46 Carte de répartition spatiale du lithium à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

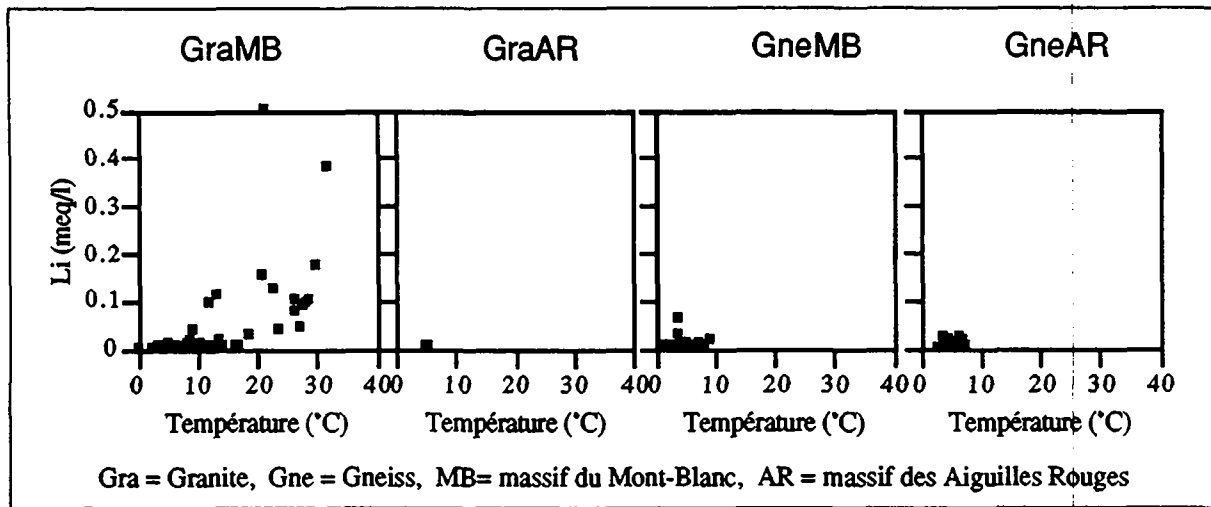


Figure 7.47 Relation entre la température et le lithium.

Les analyses effectuées sur les lixiviats montrent une distribution homogène des concentrations entre les gneiss et les granites. Une fois encore, il faut rappeler que les tests ont été effectués dans des conditions de température et de temps de contact eau-roche identiques pour l'ensemble des échantillons, ce qui peut expliquer l'absence de distinction des formations granitiques dans ce type d'expérimentation (voir chapitre 5, figure 5.4).

Origine du lithium

Le lithium contenu dans les formations granitiques du Mont-Blanc provient essentiellement des micas blancs (lepidolite, $K_2Li_3Al_2Si_7O_{21}(OH,F)_3$). Il est également présent dans les pyroxènes (spodumène, $LiAlSi_2O_6$) et dans les amphiboles (Vorontsov & Lin, 1966). Toutefois ces deux derniers minéraux sont relativement peu abondants dans le massif du Mont-Blanc et ne peuvent expliquer les concentrations mesurées dans les eaux souterraines.

La concentration moyenne approximative du lithium dans les granites est de l'ordre de 40 ppb (Turekian & Wedepohl, 1961).

7.3.2.13 Le potassium

L'histogramme des fréquences des concentrations présente une répartition peu définie, mais où la majorité des valeurs se développent entre env. 0.1 et 1.5 mg/l. Le deuxième ensemble se répartit approximativement entre 2 et 3 mg/l (figure 7.48).

Le domaine de variabilité du potassium est relativement peu élevé (env. 73 %, variant entre 0.1 et 3.6 mg/l, tableau 7.9). Le domaine des concentrations élevées correspond une fois encore aux eaux chaudes des aquifères granitiques et contraste avec celles des aquifères gneissiques et granitiques peu profonds.

La carte de répartition des concentrations des eaux souterraines à l'échelle du massif illustre la présence des valeurs élevées de potassium dans les eaux profondes échantillonnées dans le tunnel du Mont-Blanc (figure 7.49).

Les analyses de roche indiquent des valeurs en potassium sensiblement plus élevées dans les granites, ce qui est en accord avec les contrastes observés dans les eaux souterraines (voir géochimie des roches, chapitre 5,

paragraphe 5.5, figure 5.2). La variabilité du potassium au sein des aquifères gneissiques du massif du Mont-Blanc est relativement bien corrélée avec celle de la minéralisation (figure 7.50).

Origine du potassium

Le potassium, avec le sodium et le calcium, est un cation important de plusieurs groupes de silicates, dont les principaux sont les feldspaths et accessoirement les micas. Dans le cas des eaux des aquifères granitiques du Mont-Blanc, les concentrations en potassium sont essentiellement expliquées par l'altération des feldspaths potassiques (constituant orthose: KAlSi_3O_8) et des micas blancs. La réaction ci-dessous présente le phénomène de mise en solution des feldspath potassiques en argile et la libération de l'ion potassium.

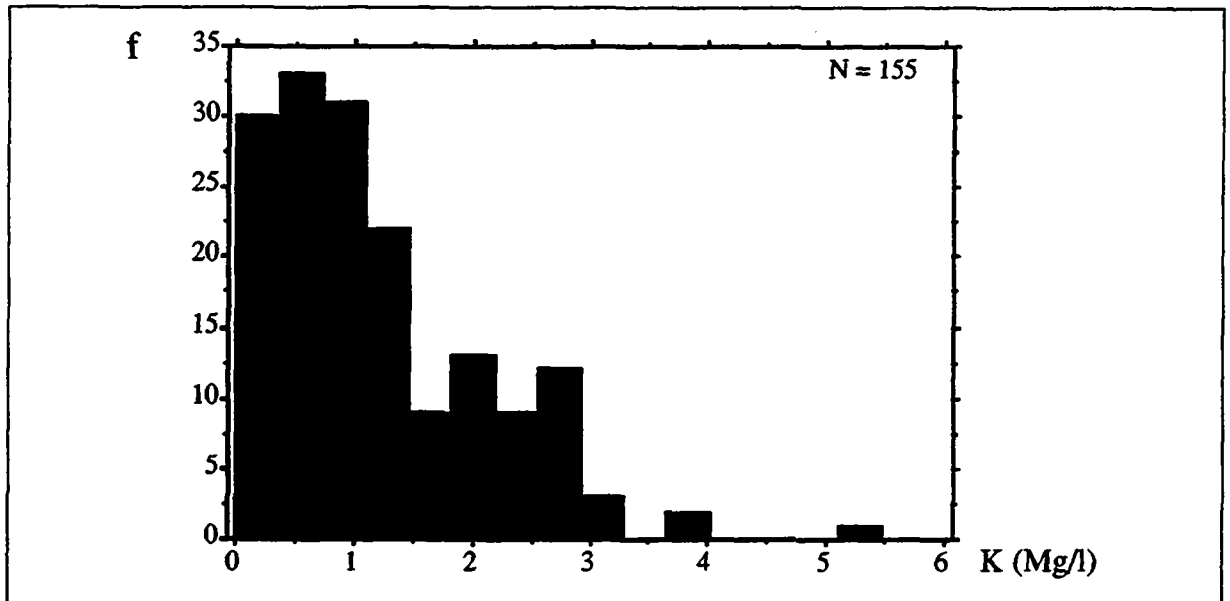
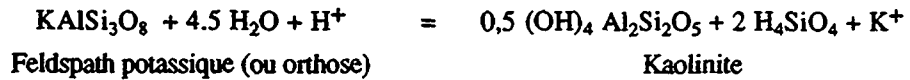


Figure 7.48 *Histogramme des fréquences des concentration en potassium.*

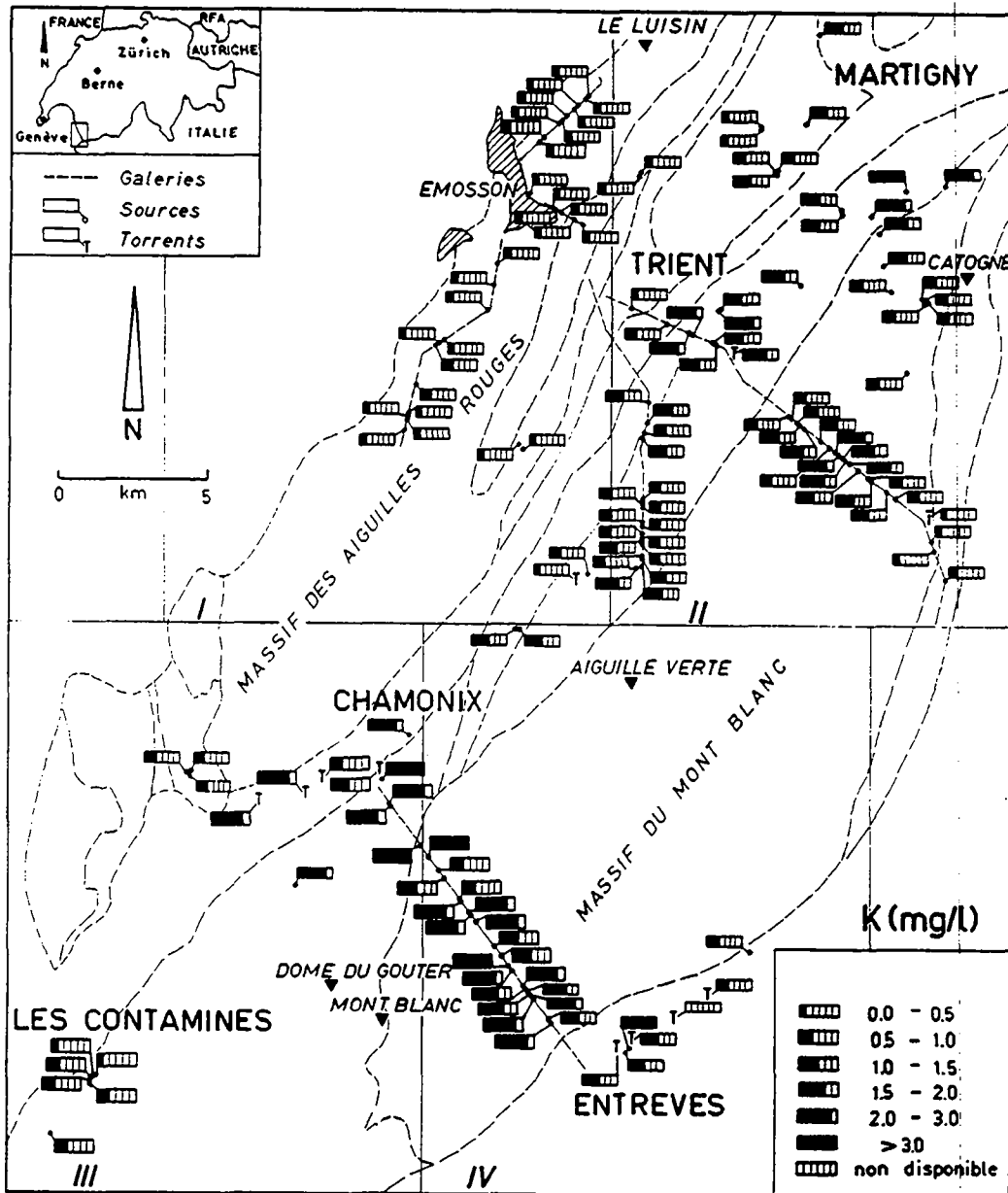


Figure 7.49 Carte de répartition spatiale du potassium à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

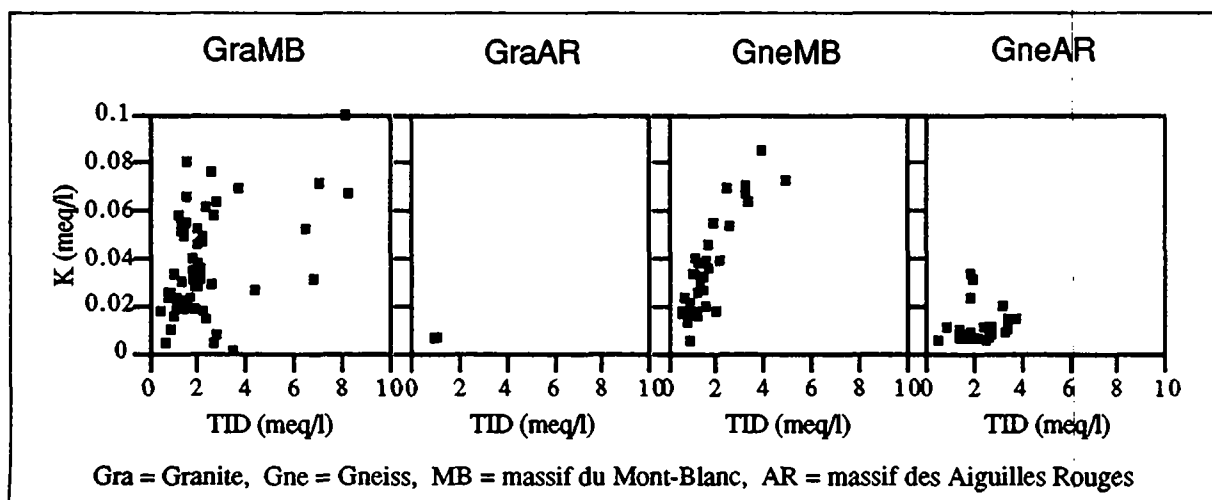


Figure 7.50 Relation entre les concentrations en potassium et la minéralisation totale.

7.3.2.14 Le magnésium

La répartition des fréquences est de forme exponentielle décroissante. La majeure partie des échantillons se situent en-dessous de 1 mg/l, alors qu'une faible proportion de sources se répartissent avec des concentrations beaucoup plus élevées, entre 1 et 7 mg/l (figure 7.51).

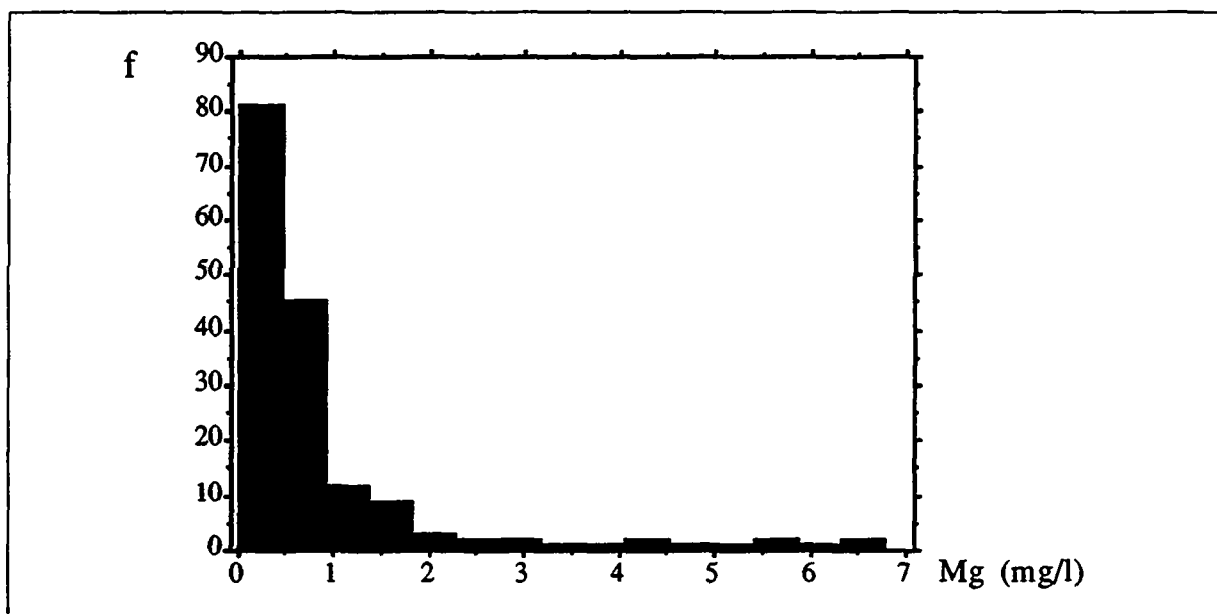


Figure 7.51 Histogramme des fréquences des concentrations en magnésium.

Ce paramètre de variabilité élevée (115 %, variant entre 0.07 et 4.5 mg/l, tableau 7.9), présente dans l'ensemble des concentrations plus hautes dans les eaux des formations gneissiques du massif des Aiguilles Rouges, alors qu'il n'existe pratiquement pas de contraste entre les eaux des aquifères granitiques et gneissiques du massif du Mont-Blanc (figure 7.52 et annexe 7.6).

Les tests de mise en solution de poudre de roche soulignent l'abondance du magnésium dans les gneiss par rapport aux granites (voir chapitre 5, paragraphe 5.5, figure 5.4). Cette dernière observation est parfaitement en accord avec la composition chimique des eaux souterraines des aquifères gneissiques des Aiguilles Rouges, bien que les concentrations obtenues soient approximativement deux fois supérieures dans les lixiviats.

Les concentrations en magnésium sont, pour l'ensemble des eaux souterraines étudiées dans les formations gneissiques, assez bien corrélées avec la minéralisation totale (figure 7.53). Cette dernière relation est due à la bonne corrélation qui existe entre le calcium et le magnésium dans les formations gneissiques (figure 7.54). En effet, le calcium à lui seul représente la grande majorité de la charge cationique des eaux souterraines des massifs cristallins et principalement des eaux issues des aquifères gneissiques.

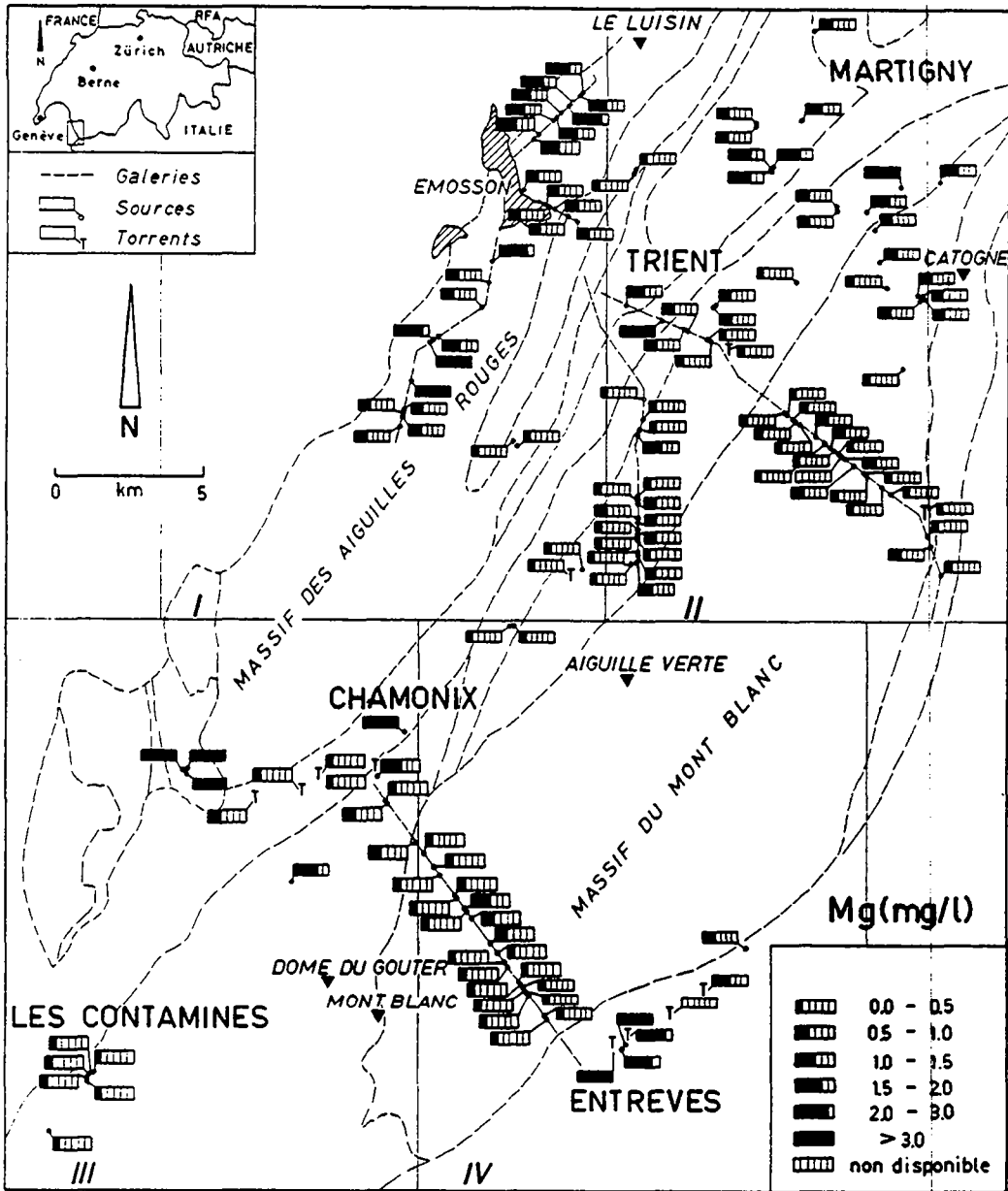


Figure 7.52 Carte de répartition spatiale du magnésium à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

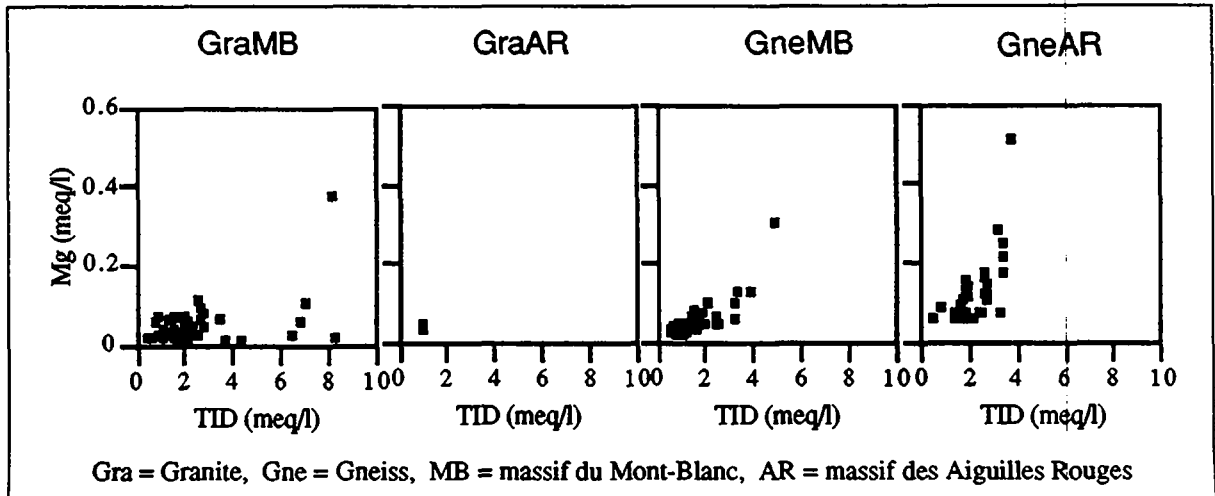


Figure 7.53 Relation entre la minéralisation totale et le magnésium.

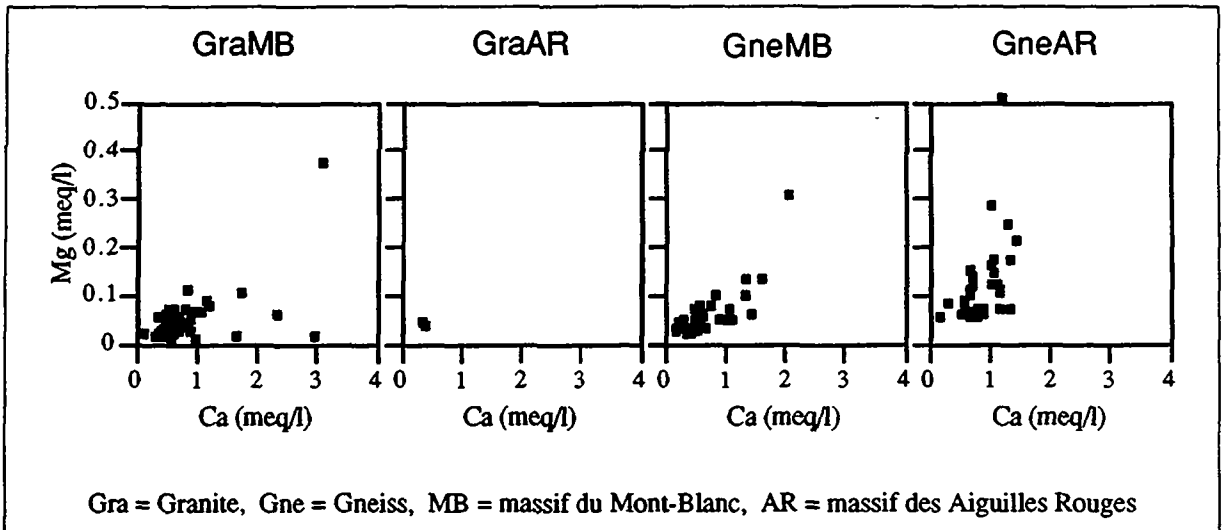


Figure 7.54 Relation entre les concentrations en calcium et en magnésium.

Origine du magnésium

L'origine du magnésium dans les eaux des aquifères du Mont-Blanc est essentiellement fonction de l'altération de la biotite $(K(Mg,Fe)_3 AlSi_3O_{10} (OH,F)_2)$, des grenats $(Mg_3 Al_2 Si_3 O_{12})$ et dans une moindre mesure de l'hornblende $(Ca,Na)_{2-3}(Mg,Fe,Al)_5(Si,Al)_8O_{22} (OH)_2$. La bonne corrélation qui existe au sein des gneiss avec la minéralisation totale est probablement liée à la plus grande abondance de la biotite (0 à 20 %, Laurent, 1968) dans les roches métamorphiques, par opposition aux granites (0 à 8 %, Marro, 1986).

7.3.2.15 Le strontium

L'histogramme des fréquences indique que la grande majorité des eaux souterraines se situent en-dessous de 0.1 mg/l. Un deuxième groupe de valeurs se répartissent entre 0.1 et 0.9 mg/l (figure 7.55).

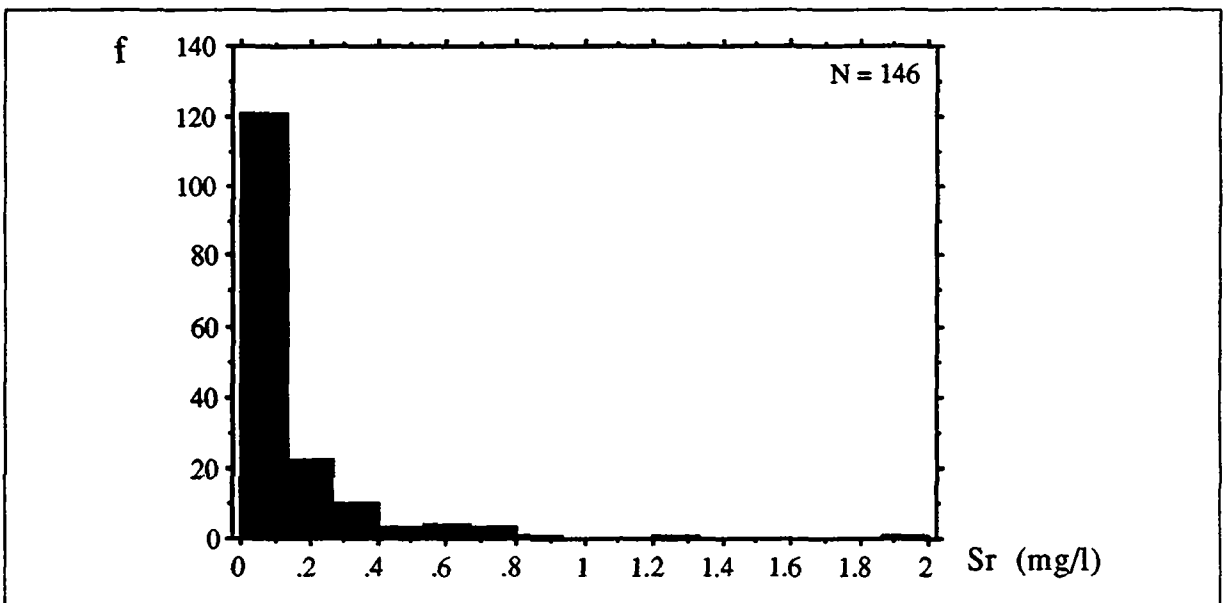


Figure 7.55 Histogramme des fréquences des concentrations en strontium.

Le strontium présent en très faibles concentrations (0.004 à 1.9 mg/l) montre une très grande variabilité à l'échelle des massifs (env. 160 %, tableau 7.9). Dans l'ensemble, les eaux souterraines issues des gneiss des Aiguilles Rouges atteignent les plus hautes concentrations et se démarquent des eaux qui sont en relation avec les gneiss du massif du Mont-Blanc (figure 7.56).

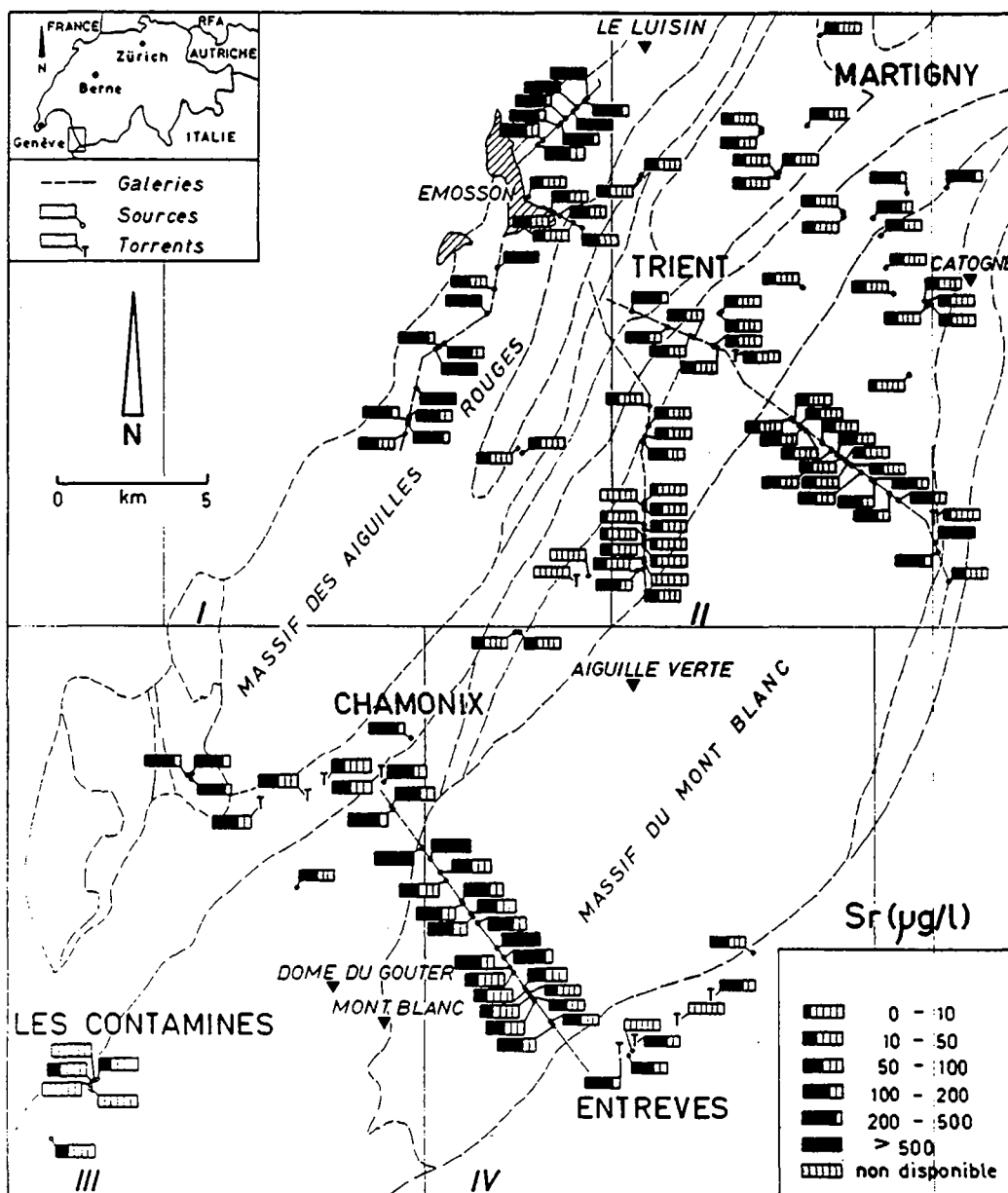


Figure 7.56 Carte de répartition spatiale du strontium à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

Les lixiviats ont mis en évidence des concentrations de strontium sensiblement supérieures pour les roches gneissiques, et notamment un échantillon qui a atteint une concentration très nettement plus élevée que toutes les autres roches (voir chapitre 5, paragraphe 5.5, figure 5.4). De surcroît, les variations spatiales des concentrations dans les aquifères gneissiques sont fortement liées à celles de la minéralisation (figure 7.57).

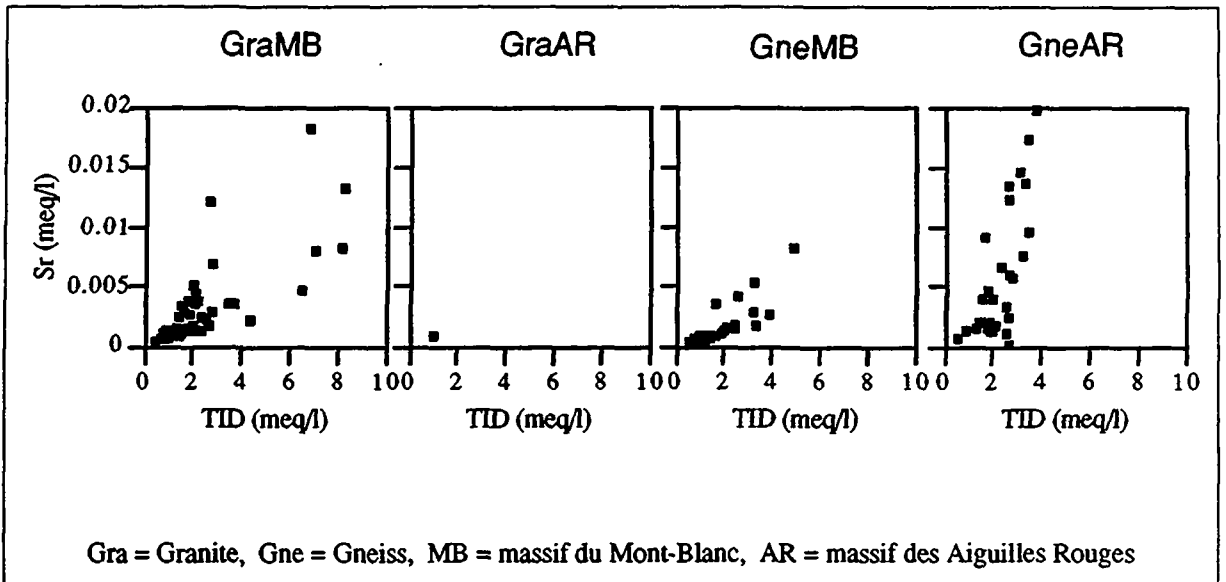


Figure 7.57 Relation entre la minéralisation totale et les concentrations en strontium.

Origine du strontium

Dans les roches cristallines, le strontium est présent essentiellement dans les plagioclases, les feldspaths potassiques, les micas, les clinopyroxènes et les amphiboles. Les roches granitiques du massif du Mont-Blanc atteignent des concentrations approximatives en strontium de l'ordre de 20 à 140 ppb, alors que les gneiss des Aiguilles Rouges varient entre 30 et 230 ppb (annexe 5.2).

7.3.2.16 L'arsenic

L'histogramme des fréquences montre que la grande majorité des eaux possèdent des valeurs inférieures à 15 ppb. Il présente également une nette décroissance régulière vers les fortes concentrations (figure 7.58).

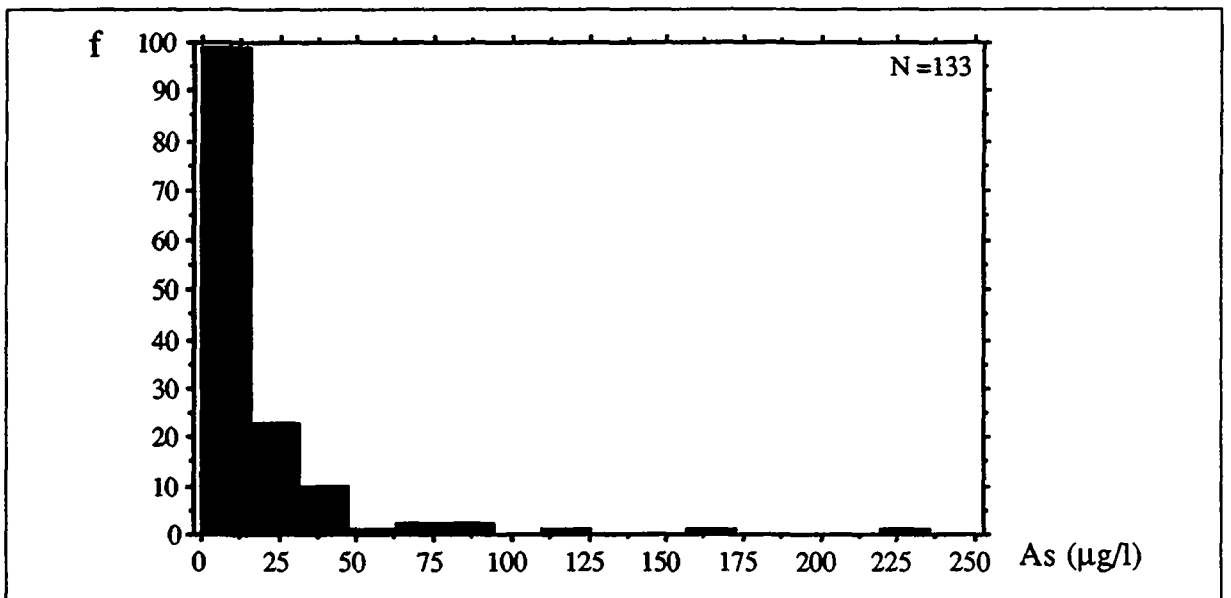


Figure 7.58 Histogramme des concentration de l'arsenic.

L'arsenic présente comme tous les éléments en traces une très grande variabilité spatiale (env.170 %, tableau 7.9). Les concentrations analysées varient entre 0 et 225 $\mu\text{g/l}$. Toutefois les plus élevées se regroupent systématiquement dans les eaux souterraines en relation avec des aquifères gneissiques, aussi bien dans le massif des Aiguilles Rouges que dans le massif du Mont-Blanc. Cette relation est clairement exprimée sur les cartes de répartition spatiale (figures 7.59 et annexe 7.6).

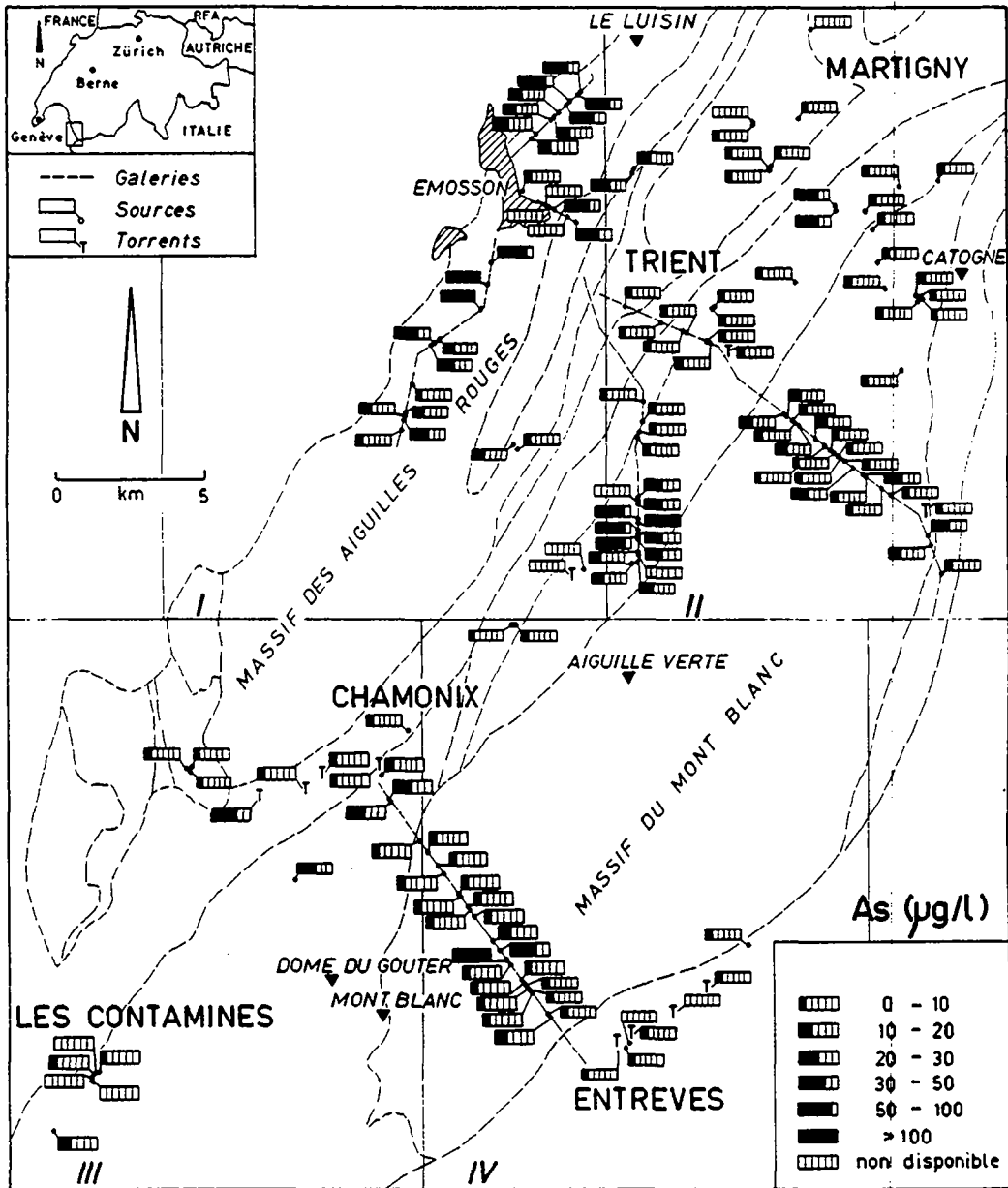


Figure 7.59 Carte de répartition spatiale de l'arsenic à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

Les graphes de corrélation entre la minéralisation totale et l'arsenic illustrent les contrastes qui existent entre les concentrations élevées des eaux souterraines des formations gneissiques par opposition aux aquifères granitiques (figure 7.60).

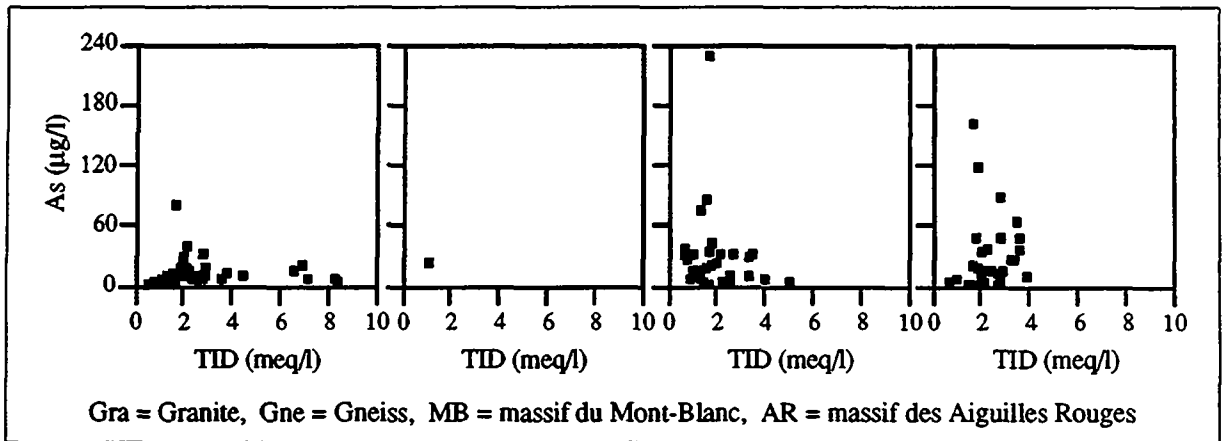


Figure 7.60 Relation entre la minéralisation totale et l'arsenic.

Origine de l'arsenic

L'arsenic est présent dans de très nombreux minéraux; parmi eux l'arsénopyrite est le minéral le plus courant (FeAsS). Des anomalies d'arsenic sont connues dans les gneiss des Aiguilles Rouges, dans le vallon d'Emaney et au sud du Lac d'Emosson, ainsi que dans les filons d'arsénopyrite de la région de Salanfe.

Dans les gneiss du massif du Mont-Blanc, plusieurs anomalies ont également été mises en évidence, de chaque côté de la vallée du Trient, à la hauteur de l'Alpe des Pétoules d'en Haut (Woodtli et al, 1987).

Les concentrations moyennes mondiales approximatives en arsenic dans les roches ignées sont de l'ordre de 1.5 ppm (Onishi & Sandell, 1955).

7.3.2.17 Le rubidium

L'histogramme des fréquences montre que la plupart des sources possèdent des concentrations inférieures à 2.5 $\mu\text{g/l}$. Un deuxième ensemble d'émergences atteignent des valeurs comprises entre environ 2.5 et 30 $\mu\text{g/l}$ (figure 7.61).

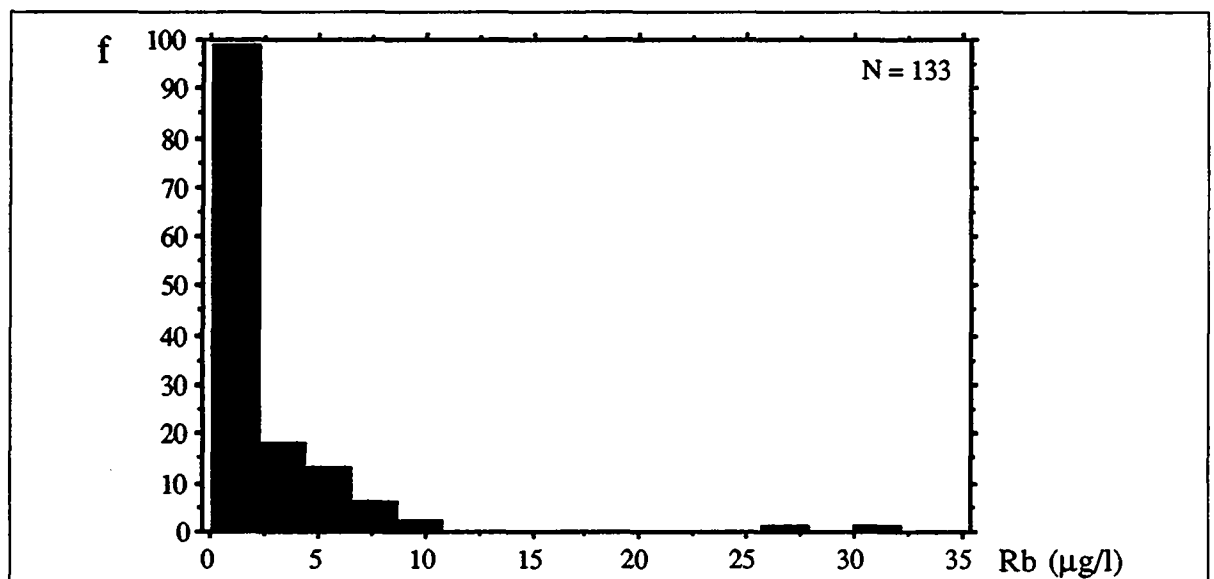


Figure 7.61 Histogramme des fréquences des concentrations en rubidium.

La variabilité spatiale du rubidium est de l'ordre de 165 % (tableau 7.9). Les concentrations les plus hautes apparaissent principalement dans les eaux souterraines à écoulements profonds des aquifères granitiques. En effet, la source thermique de Bovernier, située au nord de la carte, ainsi que certaines sources thermales ou subthermales observées dans le tunnel du Mont-Blanc, présentent des valeurs maximum de l'ordre de 8 à 30 $\mu\text{g/l}$. Ces concentrations élevées contrastent avec la majorité des eaux souterraines issues à la fois des aquifères gneissiques et granitiques peu profonds, qui présentent des concentrations très basses (0.1 à 1.3 $\mu\text{g/l}$, tableau 7.9, figure 7.62 et annexe 7.6).

La figure 7.63 représente la minéralisation totale des eaux souterraines en fonction du rubidium. Elle souligne que d'une manière générale, seules les concentrations mesurées sur les venues des aquifères granitiques profonds se démarquent de l'ensemble des autres émergences.

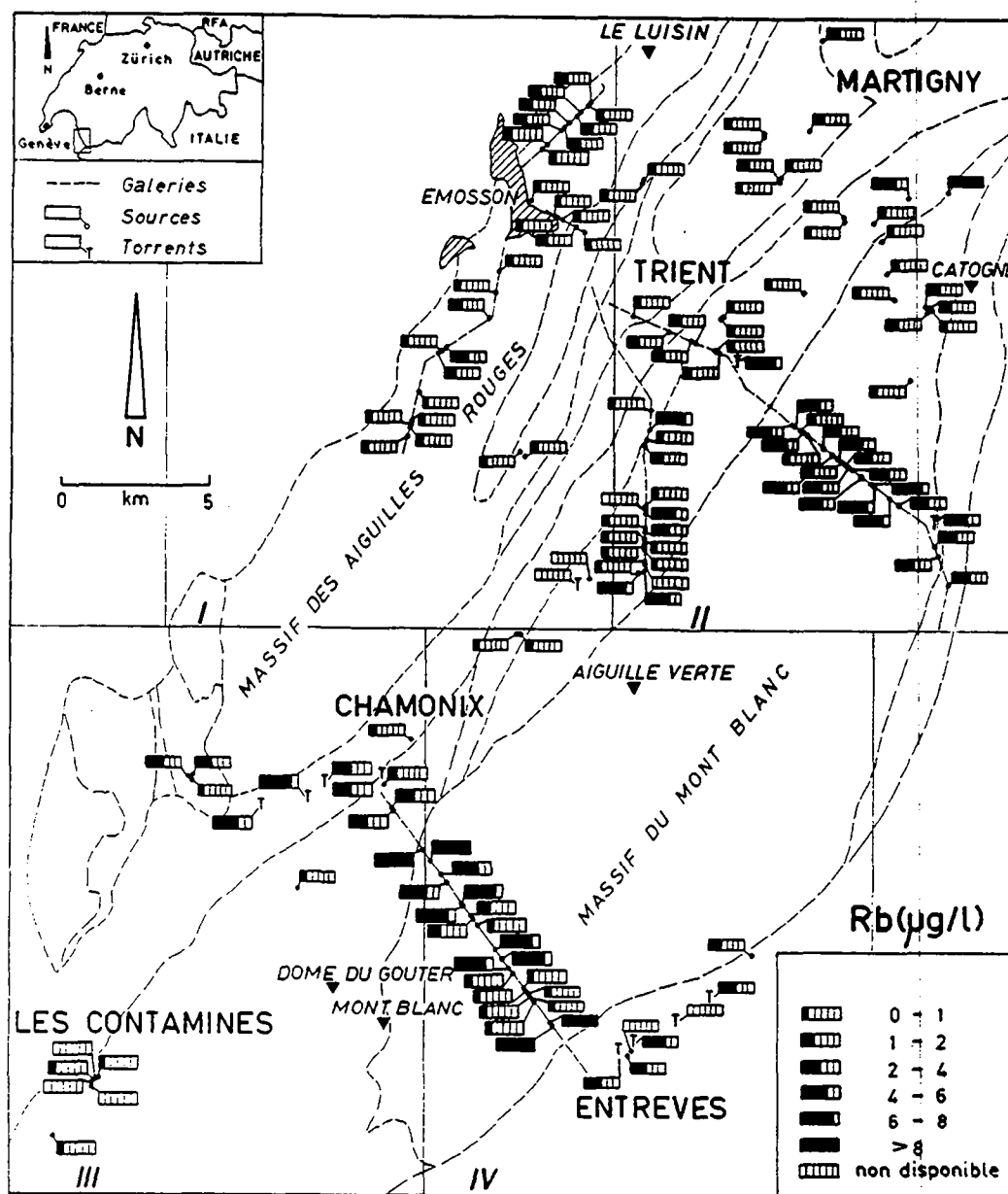


Figure 7.62 Carte de répartition spatiale du rubidium à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

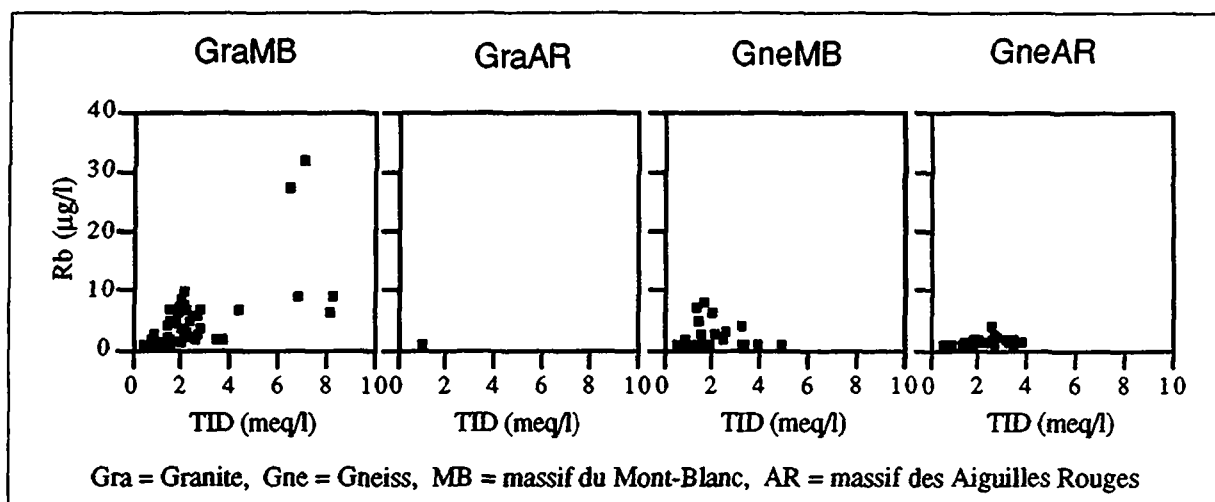


Figure 7.63 Relation entre la minéralisation totale et le rubidium.

Origine du rubidium

Le rubidium est toujours incorporé dans des silicates potassiques et ne forme pas de minéraux qui lui soient propres. Les principaux minéraux qui contiennent le rubidium sont les feldspaths potassiques et les micas (Heier & Adams, 1964).

Les lixiviats ont révélé la présence de rubidium dans les poudres de roches et ceci en concentrations beaucoup plus élevées que dans les eaux souterraines. Ils ont toutefois donné des valeurs relativement hétérogènes, bien que dans l'ensemble elles soient sensiblement supérieures dans les granites, par opposition aux gneiss (voir chapitre 5, figure 5.4).

7.3.2.18 Le molybdène

La distribution des fréquences fait apparaître, au-delà des faibles concentrations (moins de 20 µg/l), plusieurs ensembles d'échantillons qui mettent en évidence la forte signature du molybdène dans les eaux souterraines (figure 7.64).

De variabilité moyenne (env. 130 %), cet élément marque de manière très sélective les eaux profondes des aquifères granitiques du massif du Mont-Blanc et contraste très rigoureusement avec les aquifères peu profonds, aussi bien gneissiques que granitiques, de l'ensemble des massifs (tableau 7.9, figure 7.65, annexe 7.6).

Les graphes de corrélation du molybdène avec la minéralisation totale soulignent encore le contraste existant entre les concentrations de molybdène des différents aquifères en présence. Ils font également apparaître qu'il existe une assez bonne corrélation pour les eaux faiblement minéralisées des aquifères granitiques, alors que les eaux les plus minéralisées forment un groupe séparé et ne possèdent que des valeurs de molybdène relativement basses (figure 7.66).

Dans le cas des aquifères granitiques du Mont-Blanc (GraMB), une relation faible mais réelle existe entre la température et les concentrations de molybdène, essentiellement pour les eaux froides et subthermales (figure 7.67).

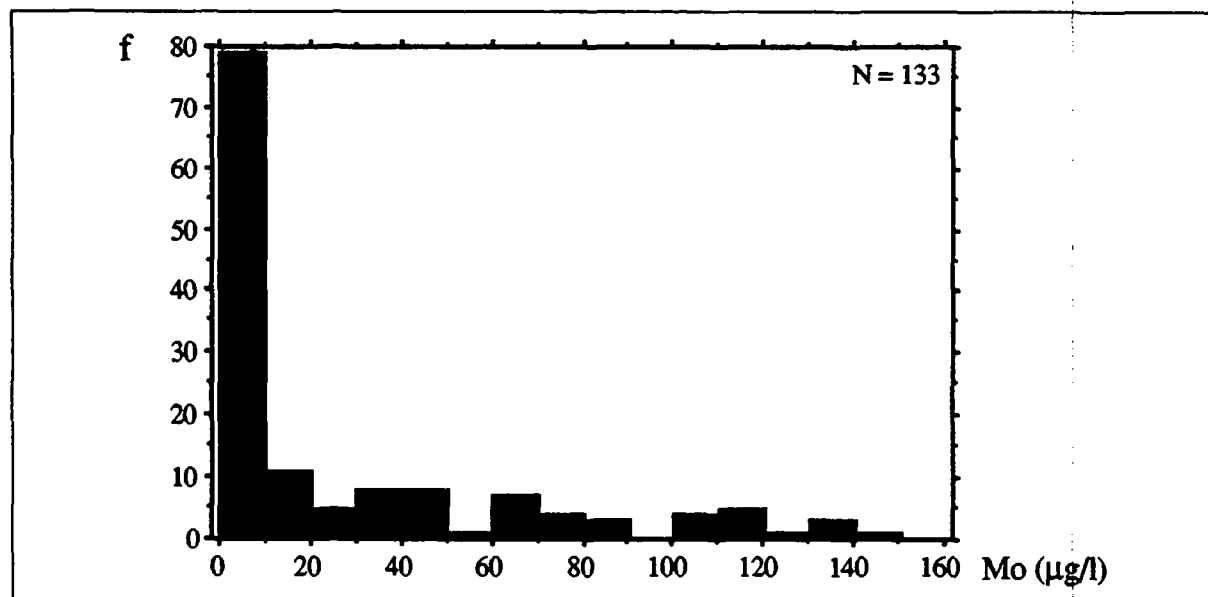


Figure 7.64 Histogramme des fréquences des concentrations en molybdène.

Les eaux thermales, qui sont également les plus minéralisées, forment un ensemble distinct, identique à celui déjà observé plus haut pour la minéralisation totale. Le molybdène apparaît dès maintenant comme un traceur privilégié des aquifères granitiques, aussi bien de subsurface que profonds.

Origine du molybdène

Le molybdène en solution dans les eaux souterraines du massif du Mont-Blanc provient très vraisemblablement de l'altération de la molybdénite (MoS_2). Des études ont montré que le molybdène était rarement abondant dans les masses granitiques mais qu'il était plutôt concentré dans les zones de fractures (Kanishchev & Memaker, 1974). Ces observations peuvent expliquer les hautes concentrations de molybdène dans les eaux souterraines de la galerie est d'Emosson, où les venues sont concentrées dans les zones granitiques fortement fracturées (figure 7.5). Des minéralisations de molybdénite ont été signalées au sein de rhyolites mylonitisées, situées dans la combe d'Orny, Mont Châtelet (Dumont, B., 1988). D'autres minéralisations sont connues dans les granites "protogines" du Mont-Blanc (voir chapitre 5). Il faut signaler que la présence de la molybdénite a également été décrite dans les granites du massif de l'Aar (Steck & Hügi, 1970), ce qui permet d'envisager dès maintenant que le marquage du molybdène dans les eaux souterraines n'est pas exclusivement lié au massif du Mont-Blanc, mais qu'il est très probablement typique des formations granitiques d'autres unités.

Les analyses des lixiviats ont mis en évidence l'existence du molybdène dans les roches et, paradoxalement, en concentrations très proches de celles mesurées dans les eaux souterraines. Il apparaît cependant peu de différence entre les divers échantillons. Ce résultat permet de penser que le molybdène est peu présent dans la masse rocheuse, mais qu'il se trouve essentiellement dans les fractures et les zones mylonitisées qui n'ont pas été l'objet de tests de mise en solution.

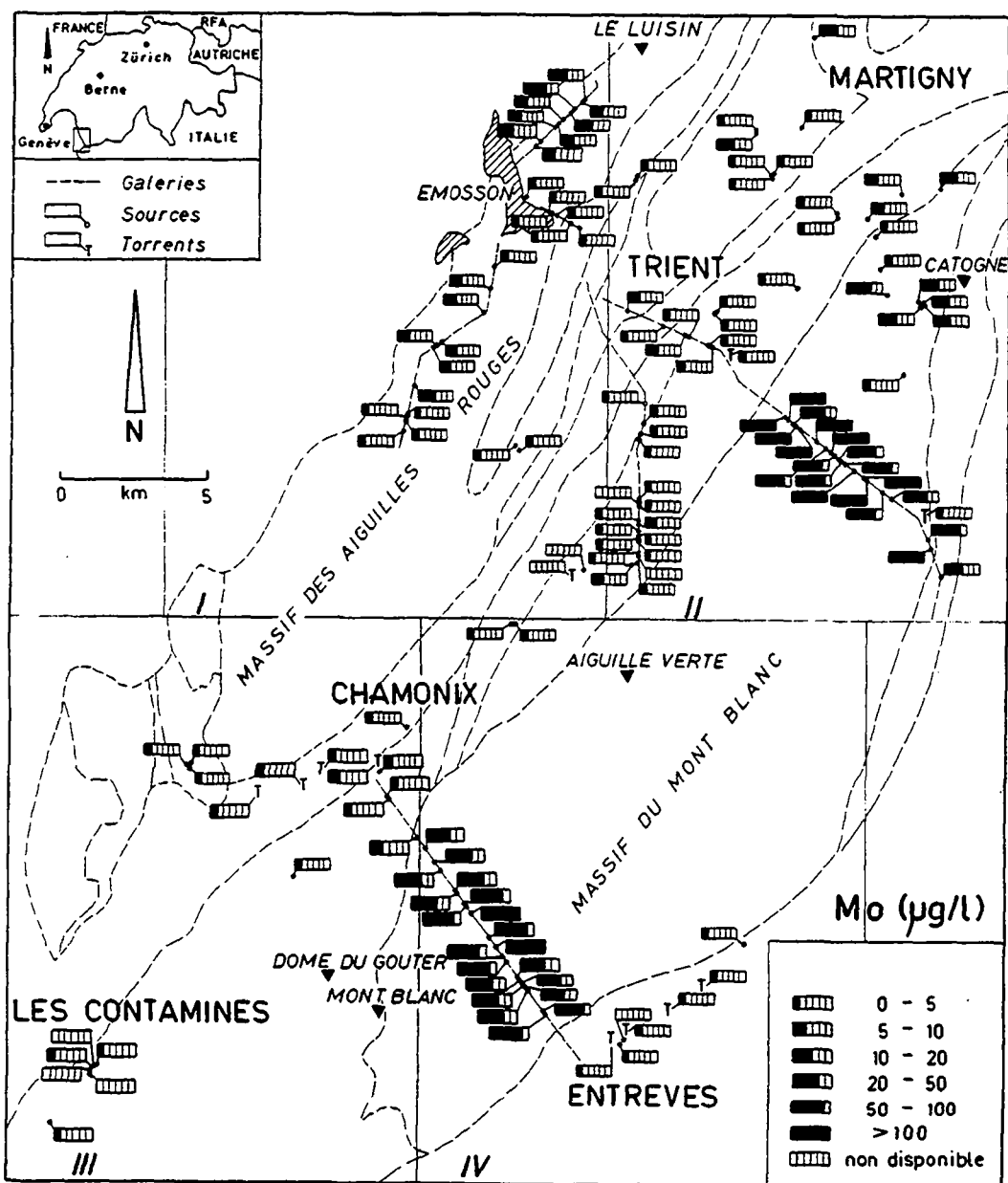


Figure 7.65 Carte de répartition spatiale du molybdène à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

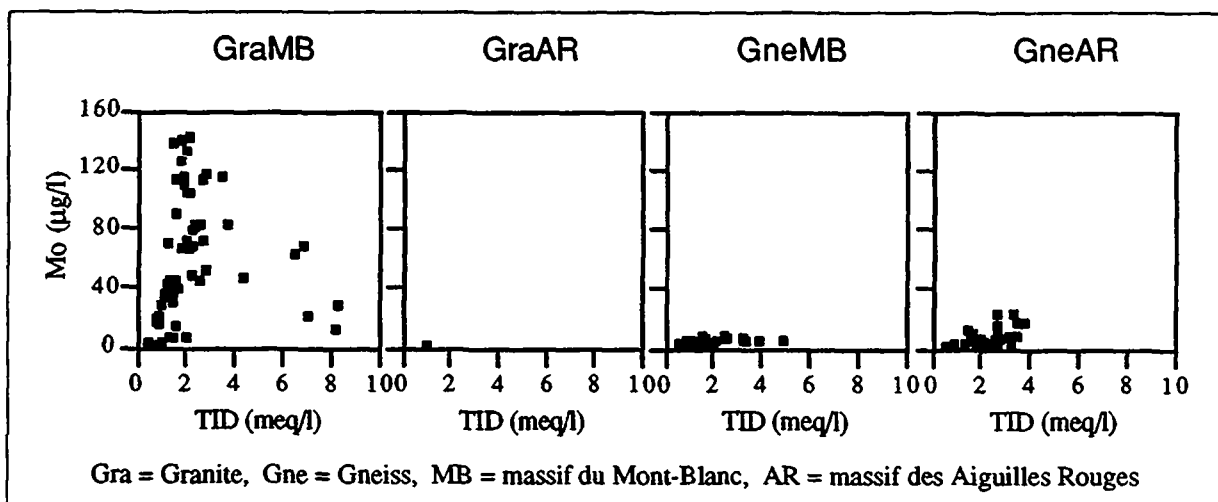


Figure 7.66 Relation entre la minéralisation totale et les concentrations en molybdène.

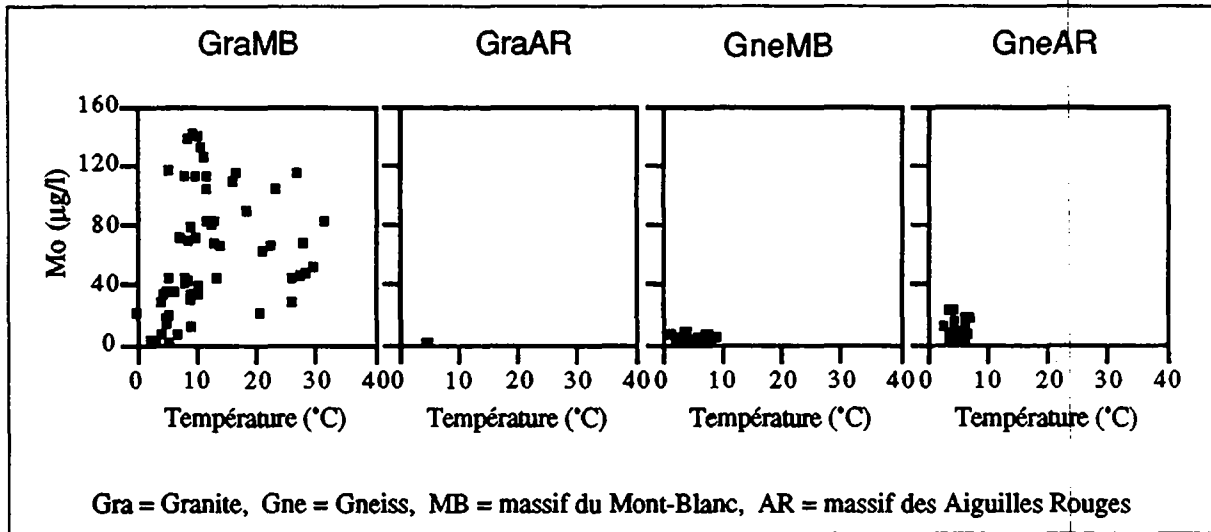


Figure 7.67 Relation entre la température et les concentrations en molybdène.

7.3.2.19 Le baryum

La répartition des fréquences des concentrations du baryum montre que la plupart des émergences possèdent des concentrations inférieures à 5 µg/l. Au delà, les fréquences diminuent progressivement. Les concentrations maximum sont de l'ordre de 90 µg/l (figure 7.68).

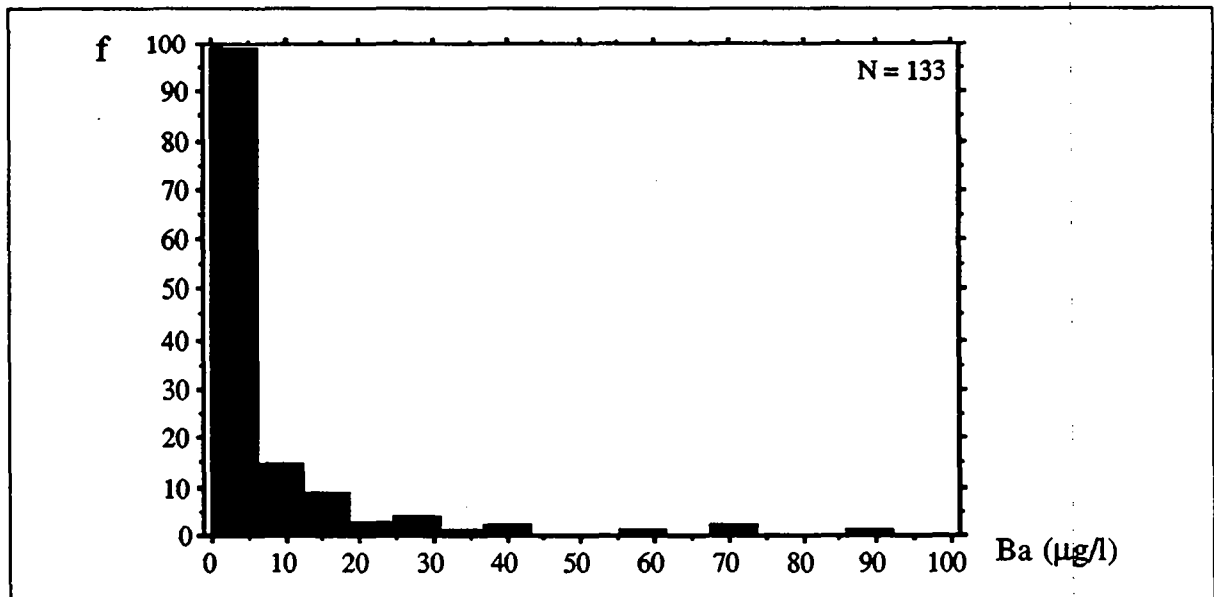


Figure 7.68 Histogramme des fréquences des concentrations en baryum.

Le domaine de variabilité est une fois encore élevé (env. 150 %, tableau 7.9). Les eaux souterraines du massif du Mont-Blanc présentent des concentrations inférieures à 2 µg/l, alors que les sources analysées dans les gneiss des Aiguilles Rouges indiquent des valeurs très supérieures (figure 7.69, annexe 7.6).

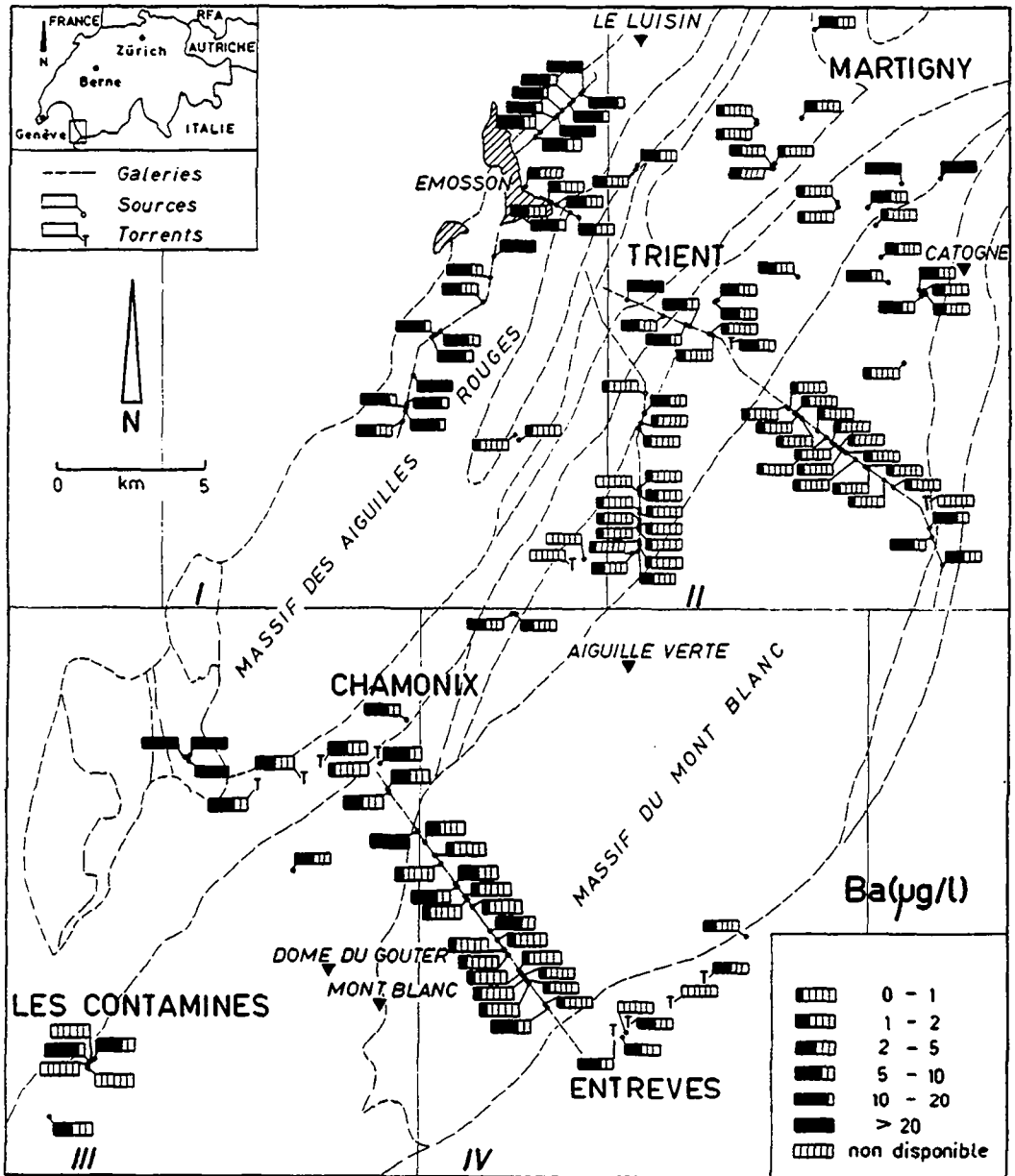


Figure 7.69 Carte de répartition spatiale du baryum à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

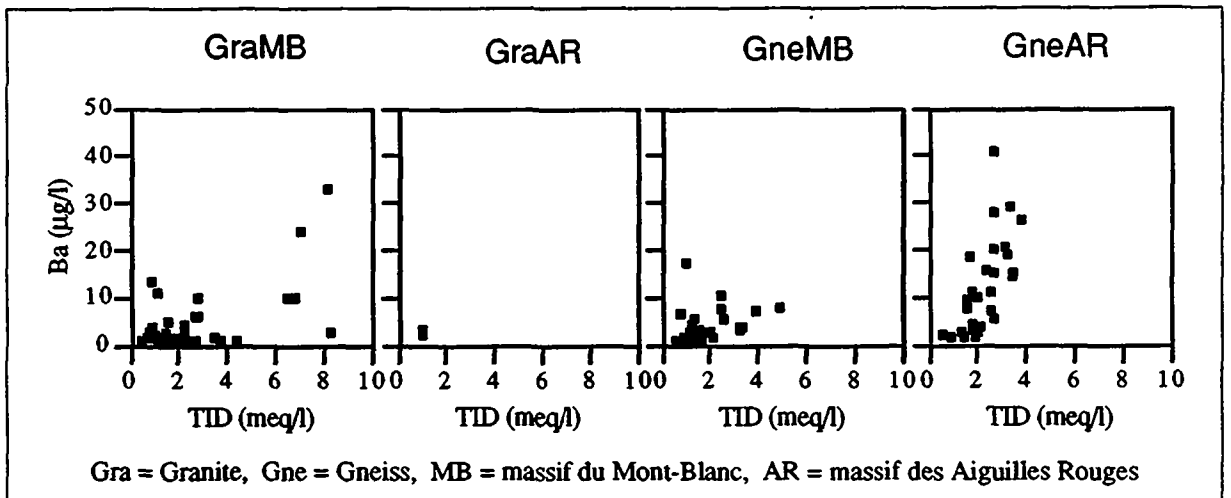


Figure 7.70 Relation entre la minéralisation totale et les concentrations en baryum.

La source thermale de Bovernier, bien qu'en relation directe avec un aquifère granitique, effectue sa remontée au contact de l'encaissant gneissique. Les conditions hydrogéologiques de l'émergence de la source peuvent expliquer le marquage par le baryum des eaux souterraines (figure 7.69 et annexe 7.6).

La figure 7.70 montre que les concentrations de baryum dans les eaux des aquifères gneissiques des Aiguilles Rouges sont fortement corrélées à la minéralisation totale. Cette dernière observation confirme le poids du baryum en tant qu'élément caractéristique de ces aquifères.

Les lixiviats des gneiss ont donné des résultats très hétérogènes par rapport aux granites, qui indiquent des concentrations plus régulières. Toutefois, les valeurs les plus élevées ont été atteintes par les formations gneissiques, conformément avec les contrastes de concentration observés dans les eaux souterraines (voir chapitre 5, figure 5.4).

Origine du baryum

Le baryum provient principalement de la barytine (BaSO_4) et, dans une moindre mesure, des feldspaths potassiques, où la substitution la plus importante se fait avec le potassium, qui possède une taille ionique très semblable à celle du baryum. Des substitutions avec le calcium des plagioclases, des pyroxènes et des amphiboles sont également couramment observées (Roy, 1965). Dans l'ensemble, les analyses du baryum effectuées sur les roches montrent que les concentrations sont plus élevées dans les gneiss des Aiguilles Rouges que dans les formations du massif du Mont-Blanc (Marro, 1986; Bussy, 1990; Dubois, annexe 5.2), ce qui est en accord avec l'observation des eaux souterraines. Plusieurs gisements de barytine sont connus dans le massif du Mont-Blanc; ils sont présentés au chapitre 5, géologie.

7.3.2.20 Le tungstène

A l'image de la plupart des éléments en traces, l'histogramme des fréquences fait apparaître que la grande majorité des échantillons présentent de très faibles concentrations. Elles sont généralement inférieures à $2.5 \mu\text{g/l}$. Cependant, la distribution montre une forte dispersion des concentrations élevées (figure 7.71).

La variabilité spatiale est très élevée (env. 200 %), les concentrations se répartissent entre 0 et $47 \mu\text{g/l}$ (tableau 7.9). Le domaine des faibles concentrations est représenté par l'ensemble des aquifères, alors que les valeurs élevées sont en relation étroite avec les aquifères granitiques profonds.

La galerie est d'Emosson donne un exemple de l'influence des formations granitiques sur les concentrations en tungstène des eaux souterraines (figure 7.5). Les eaux des aquifères gneissiques ne dépassent pas $2.5 \mu\text{g/l}$, alors que les eaux profondes des granites atteignent des concentrations de l'ordre $45 \mu\text{g/l}$ (figure 7.72, annexe 7.6).

Les graphes de corrélation entre la minéralisation et les concentrations de tungstène illustrent essentiellement le fort contraste qui existe entre les valeurs élevées observées dans les eaux des granites en opposition à celles des formations gneissiques (Dubois et Parriaux, 1990). Ces relations montrent également une liaison générale entre les valeurs de tungstène et la minéralisation, confirmant ainsi les teneurs élevées liées aux eaux plus minéralisées des aquifères granitiques profonds (figure 7.73).

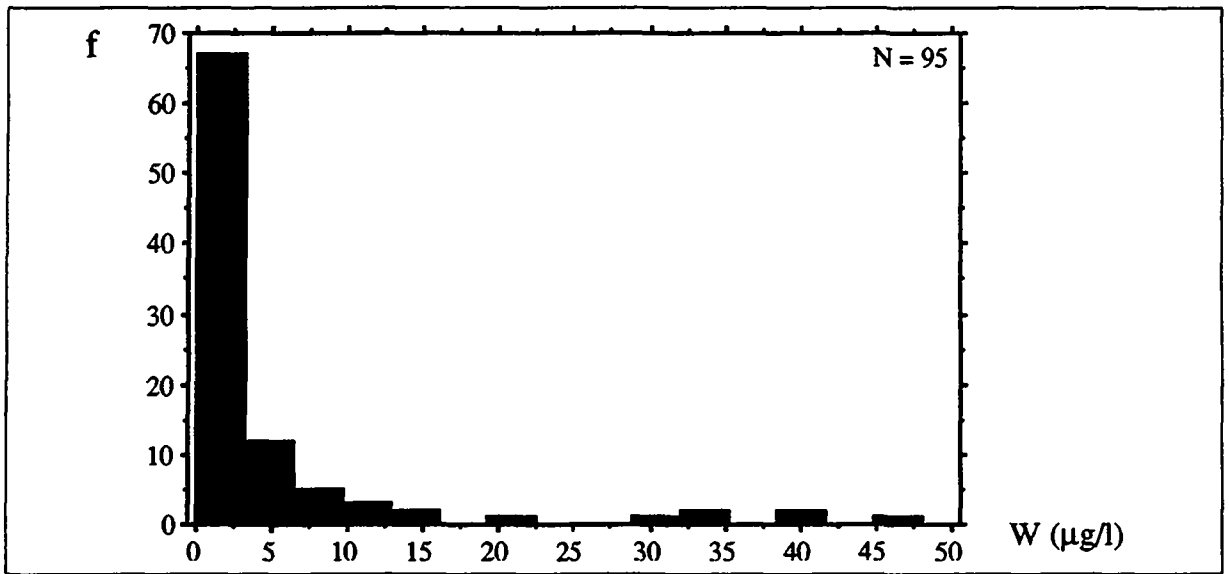


Figure 7.71 Histogramme des fréquences des concentrations du tungstène.

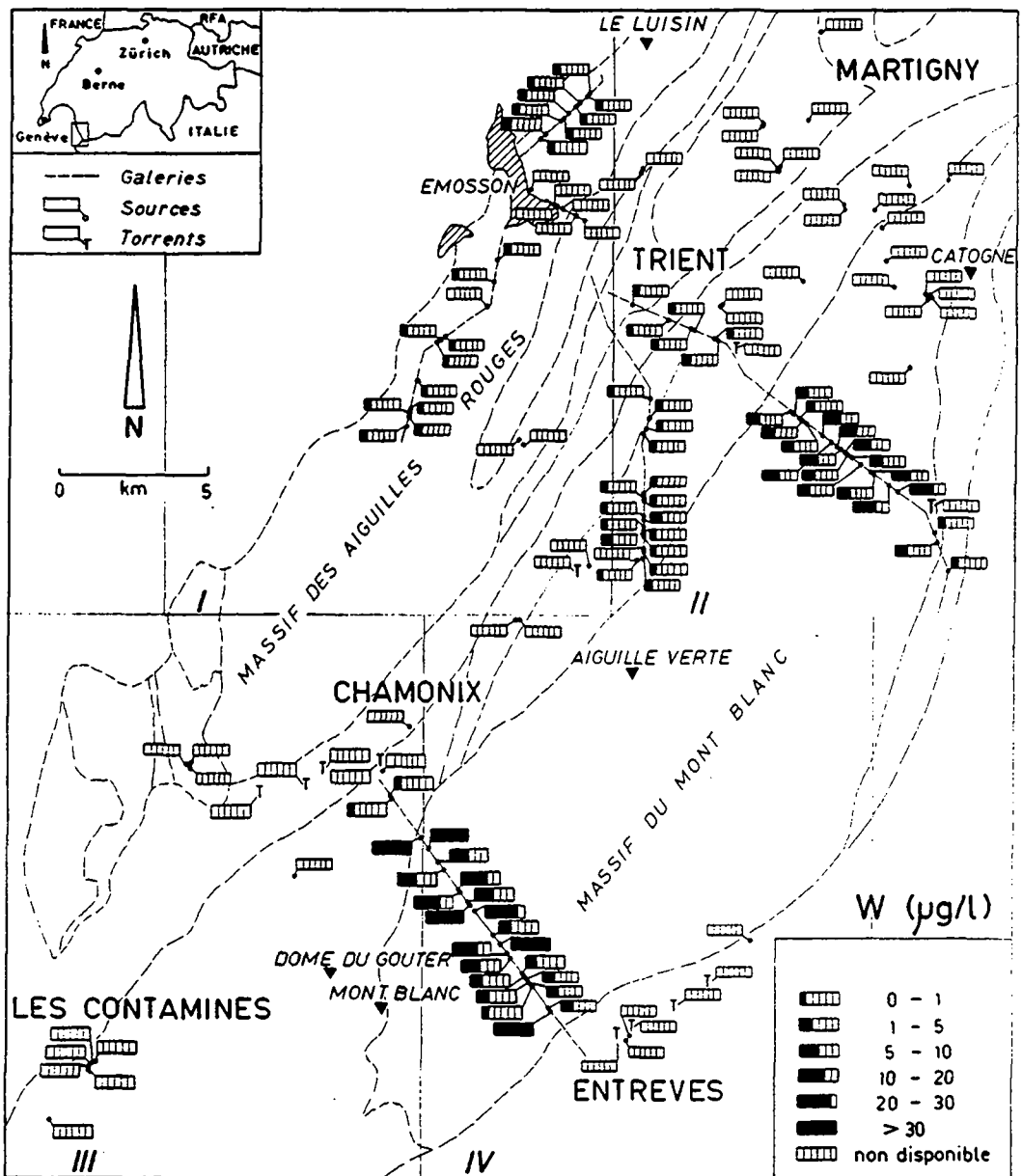


Figure 7.72 Carte de répartition spatiale du tungstène à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

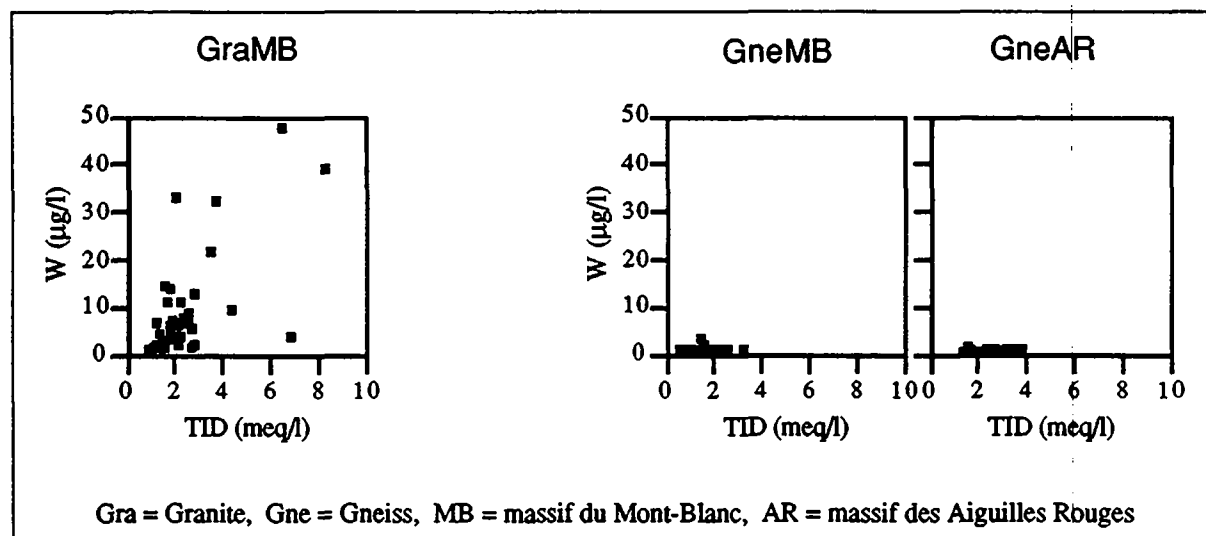


Figure 7.73 Relation entre la minéralisation totale et le tungstène.

Les graphes de corrélation entre la minéralisation et les concentrations de tungstène illustrent essentiellement le fort contraste qui existe entre les valeurs élevées observées dans les eaux des granites en opposition à celles des formations gneissiques (Dubois et Parriaux, 1990). Ces relations montrent également une liaison générale entre les valeurs de tungstène et la minéralisation, confirmant ainsi les teneurs élevées liées aux eaux plus minéralisées des aquifères granitiques profonds (figure 7.73).

Origine du tungstène

L'origine du tungstène dans les eaux souterraines est le plus facilement expliquée par la mise en solution de la Wolframite $(Fe,Mn)WO_4$ ou de la Scheelite $(CaWO_4)$ contenues dans les granites. Le principal site connu de minéralisation de tungstène est celui de Salanfe dans les Aiguilles Rouges. Cependant les études sur la géochimie des sédiments de rivière ont montré que le bruit de fond géochimique du tungstène était nettement plus élevé dans les zones granitiques intrusives du massif du Mont-Blanc que dans les gneiss des Aiguilles Rouges (Woodtli et al, 1987). Cette dernière information est bien corrélée aux concentrations observées dans les eaux souterraines.

La teneur moyenne mondiale en tungstène des granites est de l'ordre 1.5 ppm (Turekian & Wedepohl, 1961).

7.3.2.21 L'uranium

L'uranium montre également un très large domaine de variabilité (env. 290%, tableau 79). L'histogramme des fréquences indique que la majorité des échantillons possèdent des concentrations inférieures à 100 µg/l, mais qu'un deuxième groupe très étendu se répartit entre environ 200 et 2000 µg/l (figure 7.74).

En effet, les contrastes sont très aigus, puisque les eaux souterraines des formations gneissiques varient entre 0 et 50 µg/l, alors que les eaux profondes des aquifères granitiques se répartissent entre 0.1 et 2090 µg/l, avec une moyenne de l'ordre de 370 µg/l (tableau 7.9).

Les observations effectuées en galerie ont montré que les plus fortes concentrations se situent dans les zones fortement tectonisées. Les meilleurs exemples se situent dans la galerie est d'Emosson (Trient) entre les km 8.950 et 9.150 (figure 7.5).

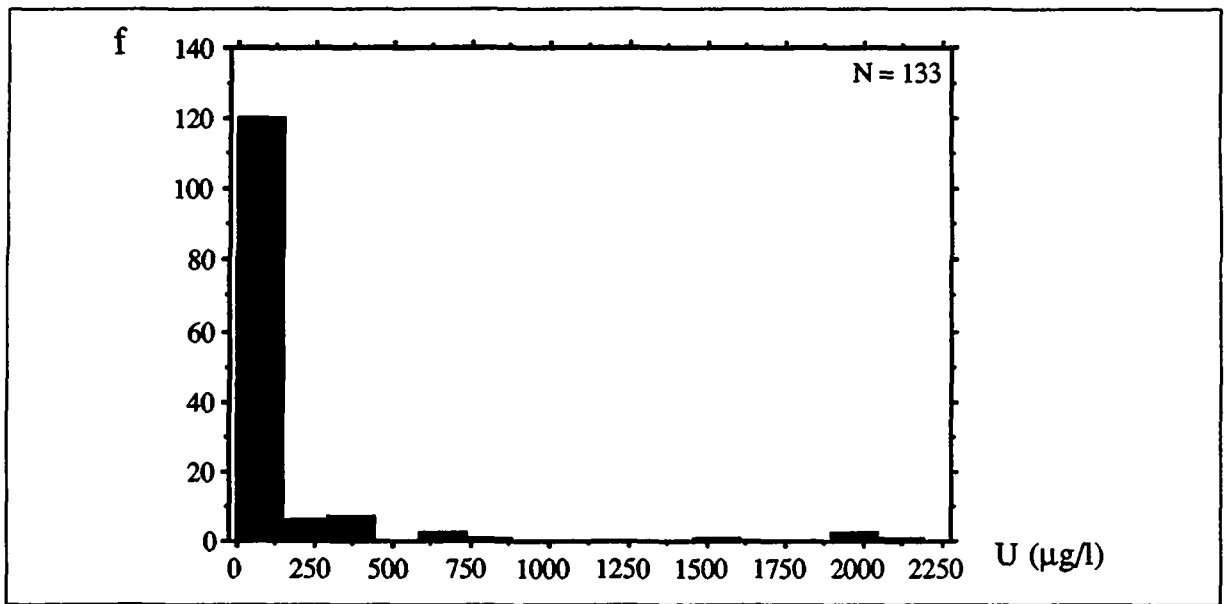


Figure 7.74 Histogramme des fréquences des concentrations en uranium.

La carte de répartition des concentrations à l'échelle du massif confirme la distribution privilégiée des fortes valeurs d'uranium dans les eaux souterraines des aquifères granitiques profonds (figure 7.75). Ceci est particulièrement visible pour les eaux souterraines échantillonnées dans le tunnel du Mont-Blanc et la galerie est d'Emosson, sous le massif du Trient.

Les mesures de radioactivité effectuées dans le Mont-Blanc (Labhart und Rybach, 1974) ont mis en évidence des activités élevées (150 et 300 $\mu\text{r/h}$), principalement dans les zones granitiques fortement tectonisées ("Scherzone") et en bordure de massif au contact avec l'encaissant gneissique. Les teneurs élevées en uranium (jusqu'à 25 ppm) des masses granitiques (Labhart & Rybach., 1974; Bussy, 1990; Dubois, annexe 5.2), expliquent que les eaux souterraines profondes du tunnel du Mont-Blanc et surtout de la galerie est d'Emosson présentent de fortes concentrations, qui peuvent atteindre 2000 $\mu\text{g/l}$ (figure 7.75, annexe 7.6, Dubois et Parriaux, 1990).

La figure 7.82, qui représente la relation entre l'uranium et la minéralisation totale, montre que les concentrations d'uranium les plus élevées correspondent à des eaux faiblement minéralisées (TSD environ 100 mg/l). Cette dernière figure illustre également la présence exclusive des fortes concentrations en uranium dans les aquifères granitiques du massif du Mont-Blanc.

Il apparaît que les fortes concentrations d'uranium s'observent dans les écoulements profonds à transit rapide et dont les températures, relativement basses, se situent entre approximativement 7 et 15 °C, alors que les eaux thermales ne présentent pas de concentrations élevées en uranium (figure 7.77).

Les mesures de pH indiquent que les fortes concentrations sont liées à des eaux relativement acides, typiques des eaux "jeunes" à renouvellement rapide (figure 7.78).

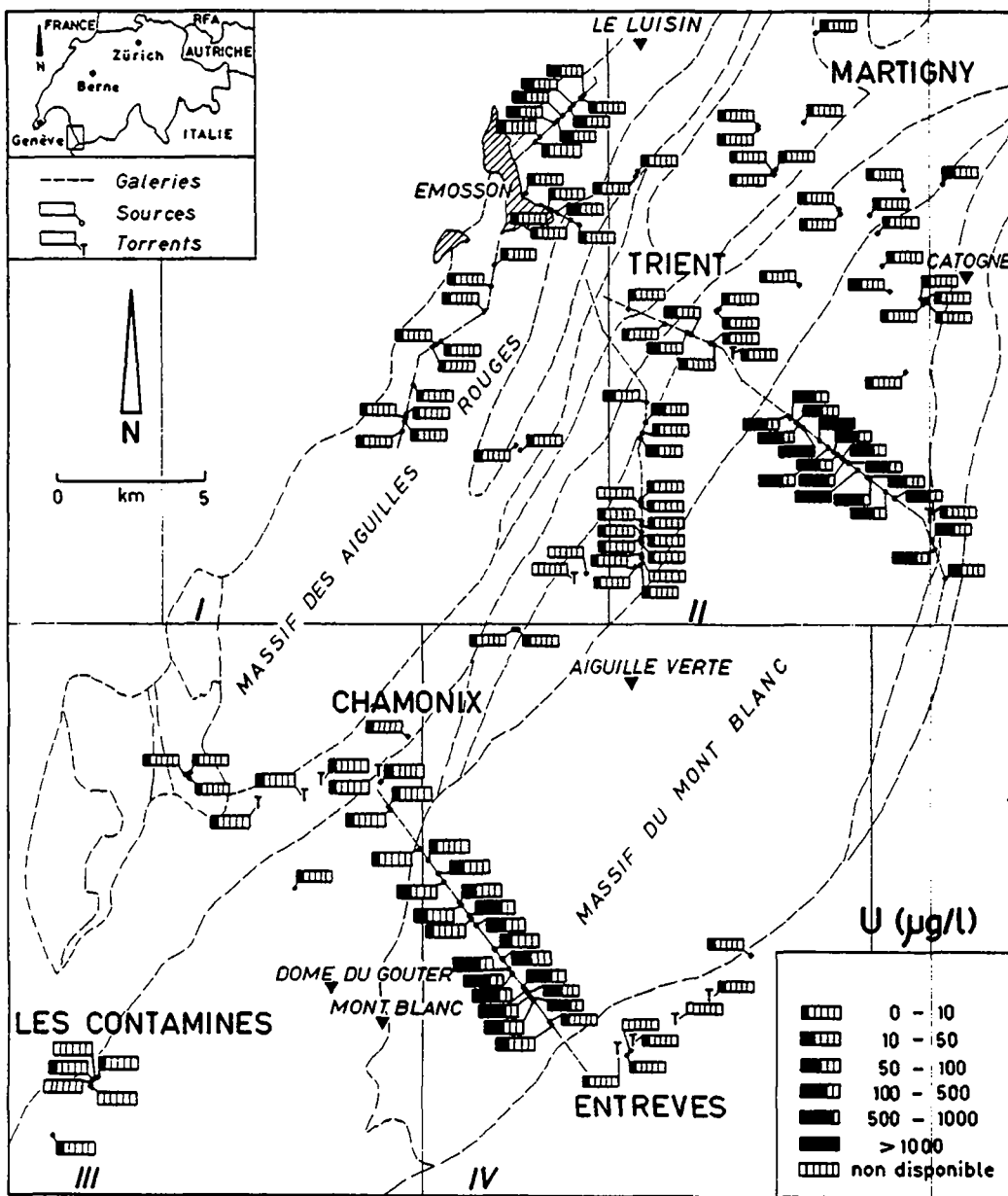


Figure 7.75 Carte de répartition spatiale de l'uranium dans les eaux souterraines à l'échelle des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

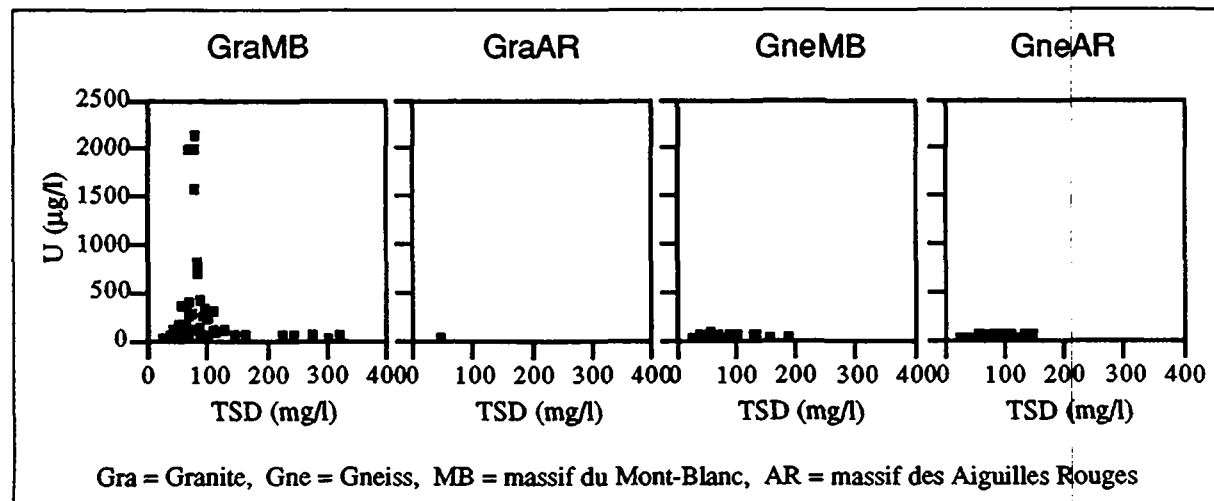


Figure 7.76 Relation entre les concentrations en uranium et la minéralisation totale.

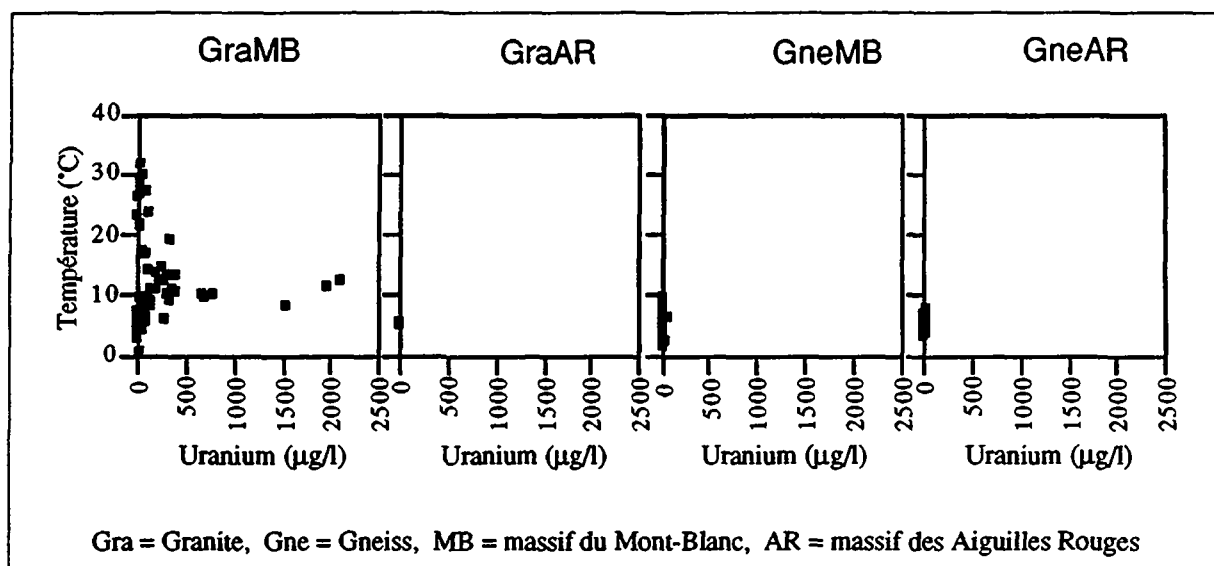


Figure 7.77 Relation entre la température et les concentrations en uranium.

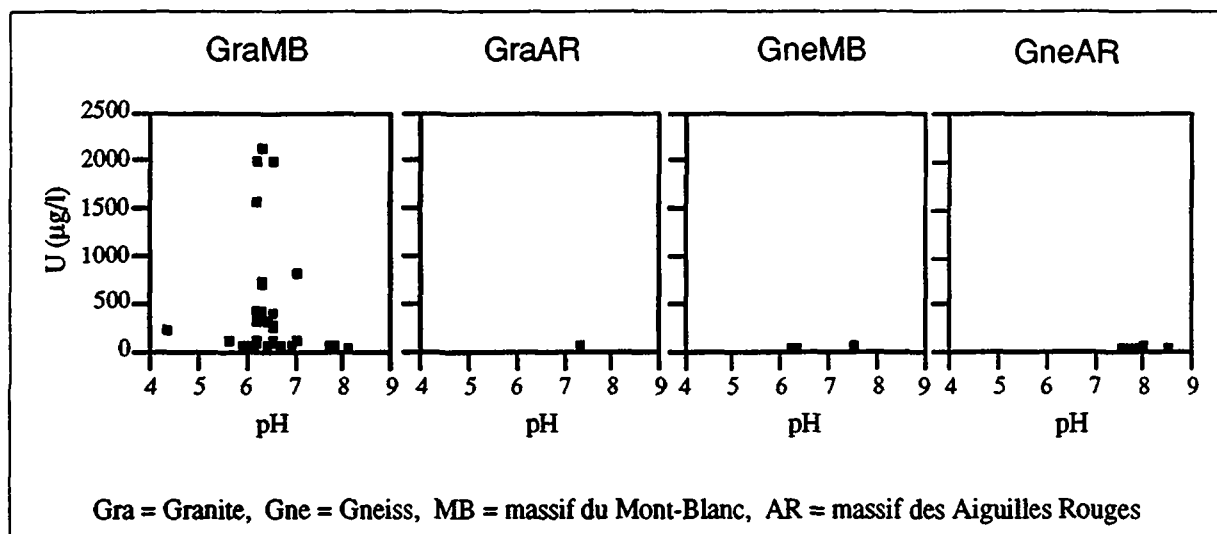


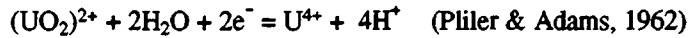
Figure 7.78 Relation entre les concentrations d'uranium dans les eaux souterraines des aquifères granitiques et le pH.

L'uranium dissous dans les eaux souterraines peut être considéré comme traceur privilégié des eaux subthermales à écoulements profonds, mais rapides. En effet, les eaux thermales ($> 20\text{ }^{\circ}\text{C}$), ne présentent pas de concentration élevée en uranium. Ce phénomène est lié aux conditions d'oxydoréduction des eaux thermales, qui ne permettent pas à l'uranium de se trouver sous forme soluble dans les eaux souterraines. Dans ce cas, l'uranium précipite et n'est plus présent qu'en quantité dérisoire.

Origine de l'uranium

L'uranium existe à l'état naturel sous trois formes isotopiques: ^{238}U , ^{235}U et ^{234}U . Toutefois l'uranium 238 représente plus de 99 % de l'uranium naturel. Le minéral le plus abondant est l'uraninite dont la formule varie de UO_2 à U_3O_8 , bien que les géologues utilisent couramment le terme synonyme de pechblende.

L'uranium présente deux états d'oxydation majeurs: 4^+ et 6^+ . A l'état tétravalent, dans les roches éruptives et les minéraux primaires (micas, hornblende, pyroxène, épidote, grenat, monazite, sphène, zircon, etc.) il est peu mobilisable. En milieu superficiel oxydant, il passe en solution à l'état hexavalent sous forme d'uranyle $(\text{UO}_2)^{2+}$.



En tenant compte de l'ensemble des informations rassemblées ci-dessus, l'origine de l'uranium dans les eaux souterraines du massif du Mont-Blanc peut être expliquée de la manière suivante:

1. Phase d'enrichissement de l'uranium lors de la mise en place des intrusions granitiques.

Des circulations hydrothermales, riches en uranium, auraient formé des filons uranifères dans des zones fortement tectonisées. Les conditions réductrices en milieu confiné auraient permis la formation de la pechblende et associé à cette dernière également d'autres minéralisations liées à des sulfures (ex: molybdénite, pyrite).

2. Phase de plissement de la chaîne alpine.

Les zones filoniennes, qui correspondent également à des discontinuités tectoniques, auraient été réactivées durant cette nouvelle phase, favorisant ainsi l'infiltration des eaux météoriques. En effet, la surrection de la chaîne (massifs centraux) a permis la mise en place de gradients hydrauliques qui ont induit d'importantes circulations d'eaux souterraines. Dans ces conditions, les circulations en milieu oxydant permettent alors le lessivage des zones filoniennes riches en uranium, qui sont à l'origine des fortes concentrations observées dans les eaux.

Plusieurs indices de minéralisation d'uranium sont signalés dans les granites des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges. Ces différents gisements sont présentés au chapitre 5, géologie.

Les analyses effectuées à partir des lixiviats ont montré que les poudres de roche ont réussi à libérer de l'uranium, mais en très faible proportion, puisque les concentrations obtenues sont nettement inférieures aux eaux souterraines (voir chapitre 5, figure 5.4). Il n'existe pas de contraste marquant entre les granites et les gneiss, mais l'on observe toutefois deux familles de roches: l'une qui présente des valeurs faibles et l'autre des valeurs élevées, proches des concentrations de la source du Brocard, et ceci aussi bien à partir de granites que de gneiss.

Ces résultats, qui ont déjà été rencontrés dans le cas du molybdène, sont très certainement liés aux minéralisations importantes qui se développent dans les discontinuités tectoniques (fissures, failles, zone de mylonitisation etc.), qui marquent de manière considérable les eaux souterraines, mais qui n'ont pas pu être analysées dans le cadre de cette étude.

8. TRAÇAGES ARTIFICIELS DES EAUX SOUTERRAINES

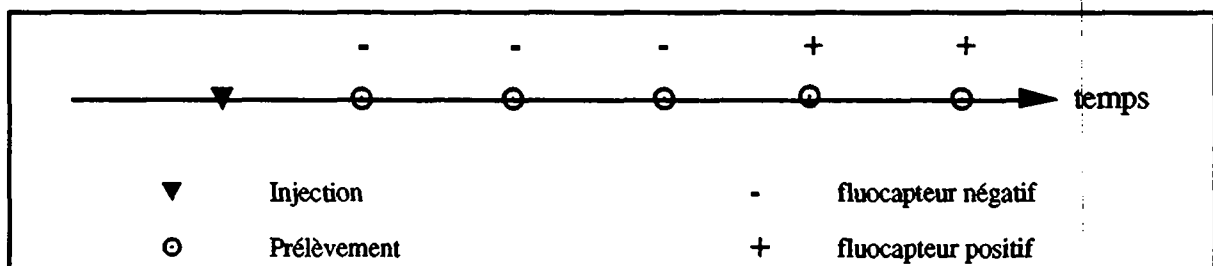
Trois sites ont été l'objet de traçages à l'échelle régionale, dans le but de vérifier la liaison entre les zones d'infiltration supposées et l'émergence des eaux souterraines, ainsi que de tenter de déterminer leurs vitesses de transit au sein des aquifères du cristallin fracturé. Les essais ont été effectués avec les principaux objectifs suivants:

1. Massif des Aiguilles Rouges: liaison hydrogéologique entre le barrage d'Emosson et les sources de Finhaut. Rôle des accidents tectoniques majeurs (essai Finhaut).
2. Massif du Mont-Blanc suisse: origine des eaux d'infiltration du grand bassin versant de la source du Brocard, Martigny (essai Bovine).
3. Massif du Mont-Blanc franco-italien, test d'infiltration en haute montagne et estimation des temps de transit des eaux profondes interceptées dans le tunnel sous le Mont-Blanc (essai Helbronner).

En raison des difficultés liées à la lourdeur des campagnes d'échantillonnage en montagne ainsi qu'aux accès aux galeries, les détections des traceurs ont été essentiellement effectuées par des fluocapteurs (charbon actif). Ces derniers, bien que protégés par des manchons de PVC et attachés avec des cordes, ont été arrachés dans les torrents dans plusieurs cas.

Il faut également signaler que les injections ont pratiquement toutes été effectuées dans des conditions difficiles, liées à l'absence d'accès routier. De ce fait, elles ont dû être réalisées sans apport d'eau complémentaire, normalement utilisé pour faciliter l'infiltration.

Tous les essais ont été précédés par la pose et le prélèvement de fluocapteurs afin de s'assurer de l'état du bruit de fond des différents traceurs (Parriaux et al, 1991). Cette précaution étant prise, ceux qui se sont révélés positifs intègrent un intervalle de temps dont la précision est naturellement fonction du rythme des campagnes de prélèvement. C'est pourquoi les temps de transit déterminés par cette méthode sont toujours donnés en termes de temps le plus long possible. Le schéma ci-dessous illustre la méthode de détermination des temps d'arrivée approximatifs du traceur.



Seules les sources du Brocard (Martigny) et des Fontaines (Finhaut) ont pu être l'objet d'échantillonnages d'eau journaliers.

Lors de chaque essai de traçage, un très grand nombre de sources (en galerie et en surface) et de torrents ont été observés afin de tenter de déterminer les directions et les vitesses de transit sur le plan régional.

8.1 Finhaut

Le captage des Fontaines à Finhaut, situé dans le massif des Aiguilles Rouges, rattaché au réseau principal d'observation (réseau I), a été l'objet de trois traçages simultanés. Ces derniers ont eu comme but principal d'évaluer les vitesses de transit dans des microgranites et des gneiss fissurés et de vérifier trois zones d'infiltrations possibles des eaux souterraines (figure 8.1):

1. Lac d'Emosson, rôle hydrogéologique d'une faille d'extension régionale.
2. Zone du col de Fenestral, bassin versant probable des eaux des Fontaines.
3. Zone de Comba Rossa, bassin versant probable des eaux des Fontaines.

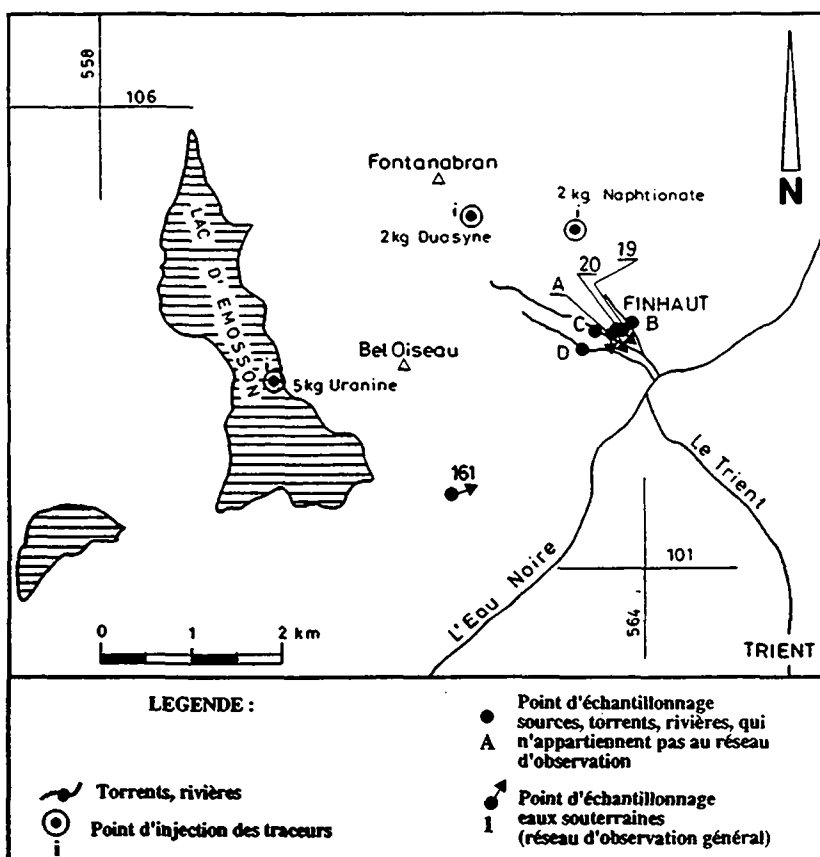


Figure 8.1 Carte de situation des points d'injection et de prélèvements des essais de traçage de Finhaut.

L'annexe 8.1 précise le type et la quantité des traceurs utilisés, ainsi que les dates et les lieux d'injection. Cette table donne la liste et les situations des différents points d'eaux échantillonnés. Elle fournit également les temps et les vitesses approximatives de transit des traceurs dans le milieu fracturé.

Les résultats montrent que seule l'injection de fluorescéine (uranine) réalisée dans le lac d'Emosson a été détectée. En effet, les deux autres traceurs (naphtionate et duasyne), injectés dans des pierriers et sans apport d'eau complémentaire pour favoriser l'infiltration, n'ont donné aucun signal.

L'uranine (5 kg) a été injectée dans le lac d'Emosson à partir d'un torrent qui se jette dans le plan d'eau à l'endroit précis où les gneiss, en contact avec le lac, sont marqués par une faille majeure qui se prolonge jusque dans la zone sourcière des Fontaines de Finhaut.

Ce point d'injection privilégié a été choisi pour tester la possible infiltration des eaux du lac, tout en évitant la dilution massive du traceur.

L'uranine a été détectée aux trois points d'émergence suivants:

1. la source des Fontaines (19).
2. la source dite "radioactive" (20).
3. la galerie du Château d'Eau (161).

Cet essai a toutefois montré une grande hétérogénéité des vitesses de transit, puisque ces dernières varient de plus de 17 m/jour pour les eaux de la galerie du Château d'Eau à environ 175 m/jour pour la source des Fontaines. Il faut cependant tenir compte que le gradient hydraulique de la source des Fontaines est sensiblement plus grand, car la différence d'altitude entre les deux lieux d'arrivée est de l'ordre de 570 m.

La figure 8.2 présente les concentrations de l'uranine contenue dans l'eau qui marque l'arrivée du traceur. Le graphique de la réponse de l'uranine indique une première arrivée rapide du traceur, caractérisée par des signaux discontinus au sein d'un bruit de fond de niveau faible. Une deuxième arrivée semble apparaître durant la deuxième partie du mois de décembre 1987, où les concentrations se stabilisent entre approximativement 5 et $10 \cdot 10^{-6}$ ppm. Ces deux groupes de signaux mettent probablement en évidence la nature complexe de la perméabilité du milieu fissuré. En effet, il est envisageable qu'une première arrivée se soit effectuée par le biais de circulations rapides liées à une discontinuité majeure (faille reliant le lac à la zone sourcière des Fontaines de Finhaut). La deuxième serait alors en relation avec le réseau de microfractures qui forme l'aquifère proprement dit et où les circulations sont plus lentes.

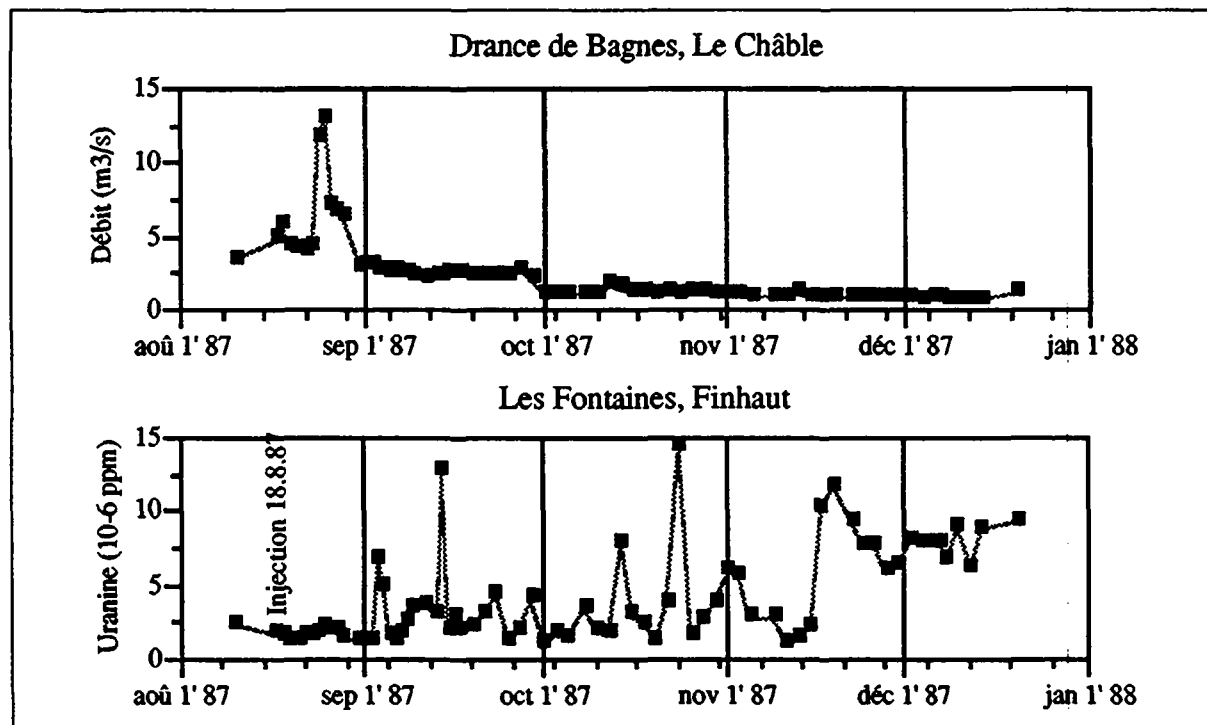


Figure 8.2 Les Fontaines, Finhaut: Concentration de l'uranine en fonction du temps en regard du débit de la Drance de Bagnes prise comme référence des conditions météorologiques.

Le débit de la Drance de Bagnes a été également représenté afin de préciser les conditions météorologiques qui ont accompagné la période des observations (annuaire hydrologique de la Suisse, 1987). Le régime hydrométrique de la rivière permet d'exclure que le deuxième signal de l'uranine soit dû à un événement météorologique exceptionnel.

8.2 Massif de Bovine

Le traçage est entrepris dans le bassin versant présumé de la source du Brocard située dans le massif du Mont-Blanc suisse. Cet essai a impliqué des mesures régulières d'eau à la source du Brocard et la pose de fluocapteurs sur plus de 23 points d'eau (sources et torrents) répartis sur le pourtour du massif de Bovine.

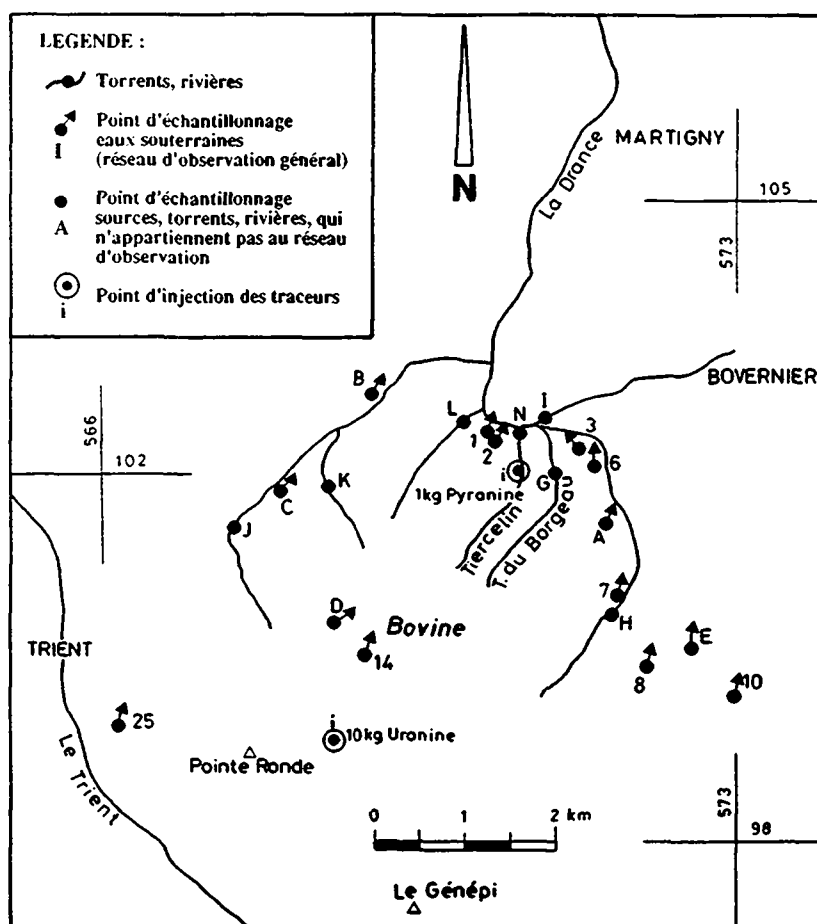


Figure 8.3 Carte de situation des points d'injection et de prélèvements des essais de traçage de Bovine.

Cet essai, qui a impliqué l'injection dans le lac de Bovine de 10 kg d'uranine, n'a occasionné des signaux positifs que dans deux émergences d'eau relativement superficielles, en marge du bassin dans le vallon de la Giète (annexe 8.2). Ces points d'eau sont en relation avec les placages morainiques aquifères.

Les sources en relation directe avec les aquifères cristallins n'ont présenté aucun signal positif. Plusieurs raisons peuvent expliquer ces résultats:

1. *Interprétations sûres ou très probables*: Le traceur ne s'est pas infiltré dans le milieu rocheux. Ceci démontre le caractère peu perméable des formations gneissiques de la zone d'injection. Dans ce cas, la plus grande partie de l'uranine se serait écoulée dans la couverture meuble, marquant ainsi les deux points d'eaux situés à l'ouest du lac de Bovine (annexe 8.2, figure 8.3).
2. *Interprétation qui ne peut être exclue*: Le traceur s'est infiltré, mais compte tenu du très grand volume de l'aquifère (extension probable en direction du massif du Trient) et des très forts débits mesurés à la source du Brocard (env. 2000 l/mn), l'uranine aurait été considérablement diluée et de ce fait n'aurait pas été détectée en laboratoire.
3. Le traceur serait arrivé après la fin des campagnes de prélèvement (environ deux ans).

En résumé cet essai, qui a demandé une infrastructure d'observation et de prélèvement très lourde, n'a apporté que des résultats modestes, soulignant ainsi la difficulté de réaliser des traçages en moyenne montagne et surtout dans le cadre d'écoulements souterrains en milieu cristallin.

8.3 Aiguille du Midi et Helbronner

Deux traçages en haute montagne ont été entrepris dans le but de tester les capacités d'infiltration des eaux en zone de pergélisol et tenter d'évaluer les vitesses de transit des eaux souterraines qui jaillissent dans le tunnel du Mont-Blanc.

Une première injection de 10 kg d'uranine a été réalisée à partir de l'Aiguille du Midi, France (altitude 3795 m), alors qu'une deuxième de 10 kg d'éosine a été effectuée à quelques centaines de mètres au nord de la pointe Helbronner, Italie (altitude 3470 m). Malheureusement, seul l'essai à l'éosine de la pointe Helbronner a pu être interprété. En effet, les échantillons d'eau et les fluocapteurs ont présenté des marques évidentes de contamination d'uranine, rendant aléatoire toute interprétation de l'essai. La contamination est très probablement en liaison avec des traces d'uranine fixées dans les sacs qui ont servi (par erreur!) aussi bien au transport du traceur qu'à celui des différents instruments de mesure.

La figure 8.4 et l'annexe 8.3 résument les situations des points de prélèvement et les résultats de l'essai effectué à partir de la pointe Helbronner.

L'éosine a été observée aussi bien sur les échantillons d'eau que sur les fluocapteurs, et ceci aux venues qui sont regroupées entre les km 8.130 et 8.330 dans des formations granitiques. Ces sources possèdent des débits élevés (60 à 600 l/mn) et des température relativement basses (8.1 à 13.6° C). Les temps de transit calculés sur la base de cet essai sont inférieurs à 108 jours, ce qui montre que les vitesses de circulation des eaux souterraines dans cette zone aquifère fortement tectonisée sont supérieures ou égales à 16.7 m/j.

Les sources thermales de la partie italienne du tunnel, ainsi que l'ensemble des venues sur le tronçon français et les différentes sources et torrents échantillonnés en surface n'ont pas montré de signal d'éosine, et ceci environ 3.5 mois après l'injection.

Cet essai a notamment montré que le pergélisol (roche gelée à ces altitudes sur des dizaines de mètres d'épaisseur, voire plus), qui conditionne l'infiltration des eaux en très haute montagne, présente dans le massif du Mont-Blanc

des discontinuités majeures. Des eaux de fonte de neige estivales, sensiblement supérieure à zéro °C, qui doivent former des nappes perchées au-dessus des formations cristallines gelées, parviennent à maintenir dans le pergélisol des zones non gelées en permanence, qui constituent des écoulements préférentiels au sein du massif cristallin gelé.

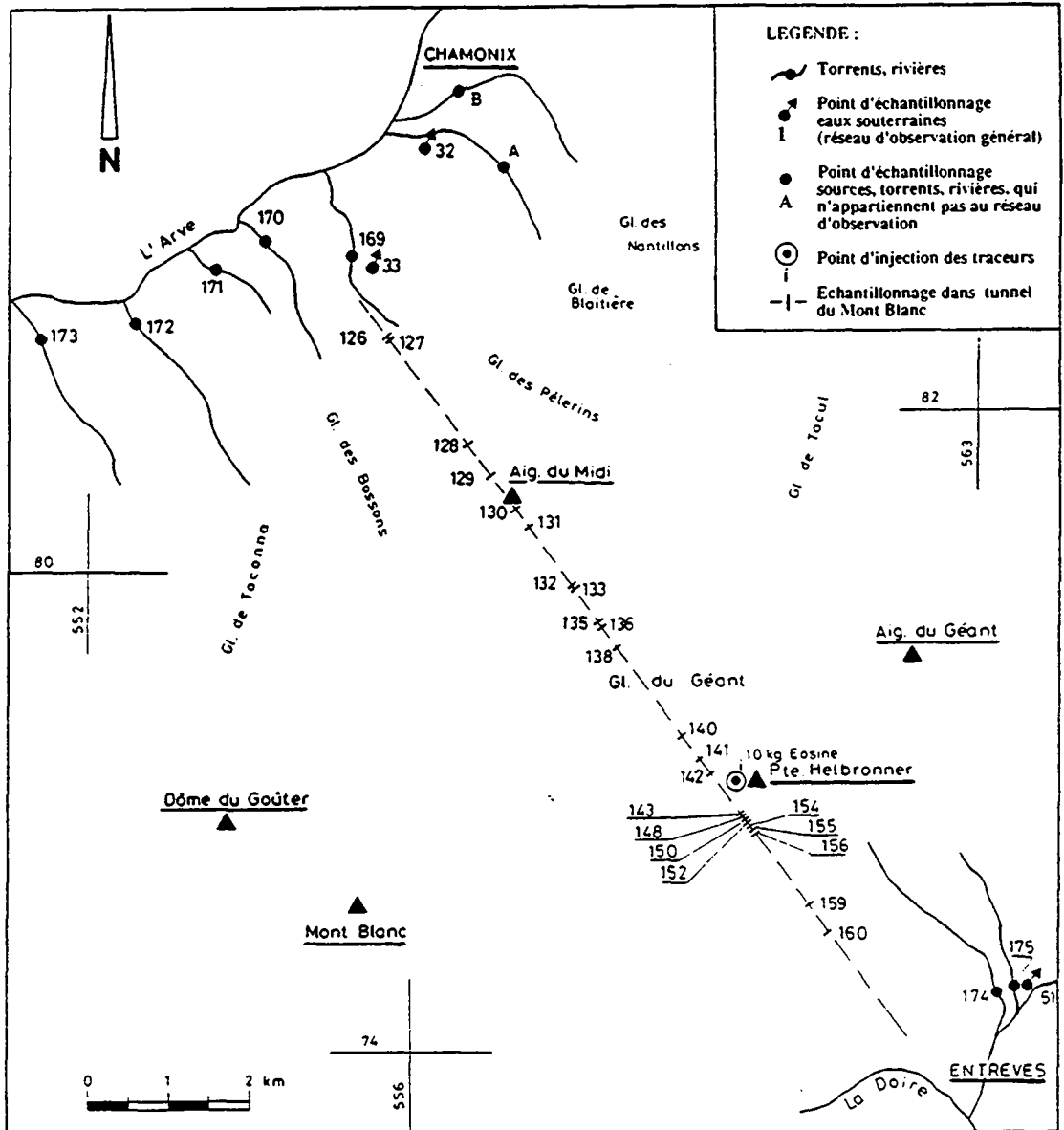


Figure 8.4 Carte de situation des points d'injection et de prélèvements des essais de traçage de la pointe Helbronner.

8.4 Bilan des essais de traçage

D'une manière générale, lorsque les traceurs ont pu être détectés, les résultats des essais ont dans tous les cas mis en évidence des circulations d'eaux souterraines froides, rapides, variant entre des vitesses de ≥ 17 et ≥ 175 mètres/jour. Ces essais ont notamment montré la plus grande capacité d'infiltration des aquifères granitiques (tunnel du Mont-Blanc italien) par rapport à ceux des formations gneissiques (massif de Bovine).

9. SYNTHÈSE TYPOLOGIQUE DES AQUIFÈRES

Ce chapitre de synthèse a pour but de rassembler les résultats des différentes investigations entreprises dans le massif du Mont-Blanc afin de proposer une typologie des principaux aquifères cristallins fracturés de cette région. Celle-ci a été élaborée en regroupant les caractéristiques hydrogéologiques des trois grands types d'aquifères au sens lithologique défini au chapitre 5 (géologie):

- Les **granites** du massif du **Mont-Blanc**
- Les **gneiss** du massif du **Mont-Blanc**
- Les **gneiss** du massif des **Aiguilles Rouges**.

Les définitions typologiques portent sur le comportement hydraulique du milieu fissuré ainsi que sur les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines en relation avec les différents ensembles lithologiques. Dans ce dernier cas, l'accent a été mis sur les différents marqueurs géochimiques naturels qui permettent de définir l'origine des eaux souterraines. Toutefois les aquifères granitiques à caractère local (granite du Montenvert et granite de Vallorcine) n'ont pas pu être traités de la même manière en raison du très faible nombre d'émergences échantillonnées. En effet, les données disponibles de ces aquifères sont trop hétérogènes pour prétendre déboucher sur une synthèse typologique géochimique de cette dernière unité géologique.

Cependant, dans le cadre de l'étude des systèmes d'écoulement, les **granites** du massif des **Aiguilles Rouges** (granite de Vallorcine) ont également été intégrés à cette définition typologique.

Cette approche typologique est abordée en définissant les deux grands domaines suivants:

- Typologie hydraulique
- Typologie géochimique

9.1 Typologie hydraulique des écoulements souterrains

Les observations du comportement physico-chimique dans le temps des sources du réseau I de référence (voir paragraphe 7.2) ont permis de définir deux types particuliers de distribution de la perméabilité et par conséquent de conditions d'écoulement. Le tableau 9.1 résume les comportements hydrauliques des aquifères gneissiques par rapport aux aquifères granitiques.

Les mesures de débit des eaux souterraines ont montré que les aquifères granitiques possédaient des perméabilités dans l'ensemble supérieures à celles des formations gneissiques. Ces contrastes sont particulièrement évidents lorsque l'on observe la répartition des émergences dans les galeries et les tunnels (voir débit spécifique par kilomètre en galerie, paragraphe 7.3: variations spatiales et origine de la minéralisation des eaux souterraines). Il est également apparu que dans le massif du Mont-Blanc, l'ensemble des émergences subthermales et thermales étaient directement en relation avec les aquifères granitiques. Les sources issues des gneiss n'ont pas présenté des températures supérieures à 9 °C (figure 7.12).

Tableau 9.1 Typologie hydraulique des écoulements souterrains.

Variations temporelles		Variations spatiales		Type d'écoulement	Aquifères*	
Débit variable	Température stable	TSD stable	Débits faibles	Température entre 0.2 et 9 °C	Écoulement homogène, perméabilité simple	GneMB GneAR
		TSD variable	Débits élevés	Température entre 0.5 et 36 °C	Écoulement mixte, double perméabilité	GraMB

**Gra* = Granite, *Gne* = Gneiss, *MB* = massif du Mont-Blanc, *AR* = massif des Aiguilles Rouges

D'une manière générale, l'observation de l'ensemble des sources du réseau I a mis en évidence l'existence d'aquifères de grande capacité à circulations peu profondes, caractérisés par des renouvellements rapides et dont les zones de recharge principales sont éloignées des émergences. Cependant le degré de généralité est peu élevé, car ces conclusions ont été tirées de l'acquisition des données physico-chimiques de quatre sources équipées d'enregistrements limnigraphiques.

9.2 Typologie géochimique

Pour faire apparaître les caractéristiques chimiques typiques des différentes unités aquifères (granites et gneiss) des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, les paramètres géochimiques disponibles de l'ensemble des sources échantillonnées en surface et en galerie, ont été regroupés en fonction de l'aquifère dont elles sont issues. Les résultats de chaque émergence ont été classés en séries ordonnées, ce qui permet de mettre en évidence les caractéristiques géochimiques des aquifères définis au sens lithologique dans le terrain d'étude et de donner une bonne visualisation du domaine de concentration des différents éléments (figures 9.1 et 9.2). Cette typologie géochimique débouche sur la mise en évidence de plusieurs marqueurs caractéristiques des eaux souterraines des aquifères cristallins fissurés. Compte tenu du faible nombre d'émergences observées dans les formations granitiques du massif des Aiguilles Rouge, ce dernier sous-type d'aquifère n'a pas été pris en considération dans le cadre de cette synthèse géochimique.

Pour mettre en évidence les caractéristiques géochimiques spécifiques des différents aquifères, on considère chaque paramètre et l'on observe si ce dernier discrimine beaucoup, un peu ou pas du tout les différentes unités hydrogéologiques.

Afin d'illustrer la méthode de sélection des marqueurs qui permet de définir le pouvoir discriminant des différents paramètres, la figure 9.3 représente le cas du molybdène. Dans cet exemple, on peut considérer que l'ensemble des émergences qui atteignent des concentrations supérieures à C1 sont typiques des aquifères granitiques du massif du Mont-Blanc. L'intervalle des concentrations compris entre C1 et C2 indique que les sources qui constituent cet ensemble présentent des caractéristiques géochimiques communes à la fois aux aquifères granitiques et gneissiques du massif du Mont-Blanc, mais sont étrangères aux aquifères gneissiques du massif des Aiguilles Rouges. Enfin, les valeurs inférieures à C2 peuvent être liées à l'ensemble des aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges. Ce dernier ensemble ne permet aucune discrimination possible de l'origine des eaux souterraines.

Il faut toutefois, à ce stade, émettre une remarque générale. En effet, les limites proposées ici ont de bonnes présomptions de représenter les différents aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges. Cependant elles sont tirées de notre réseau d'observation comprenant environ 160 émergences, et pourraient naturellement être précisées lors de travaux ultérieurs.

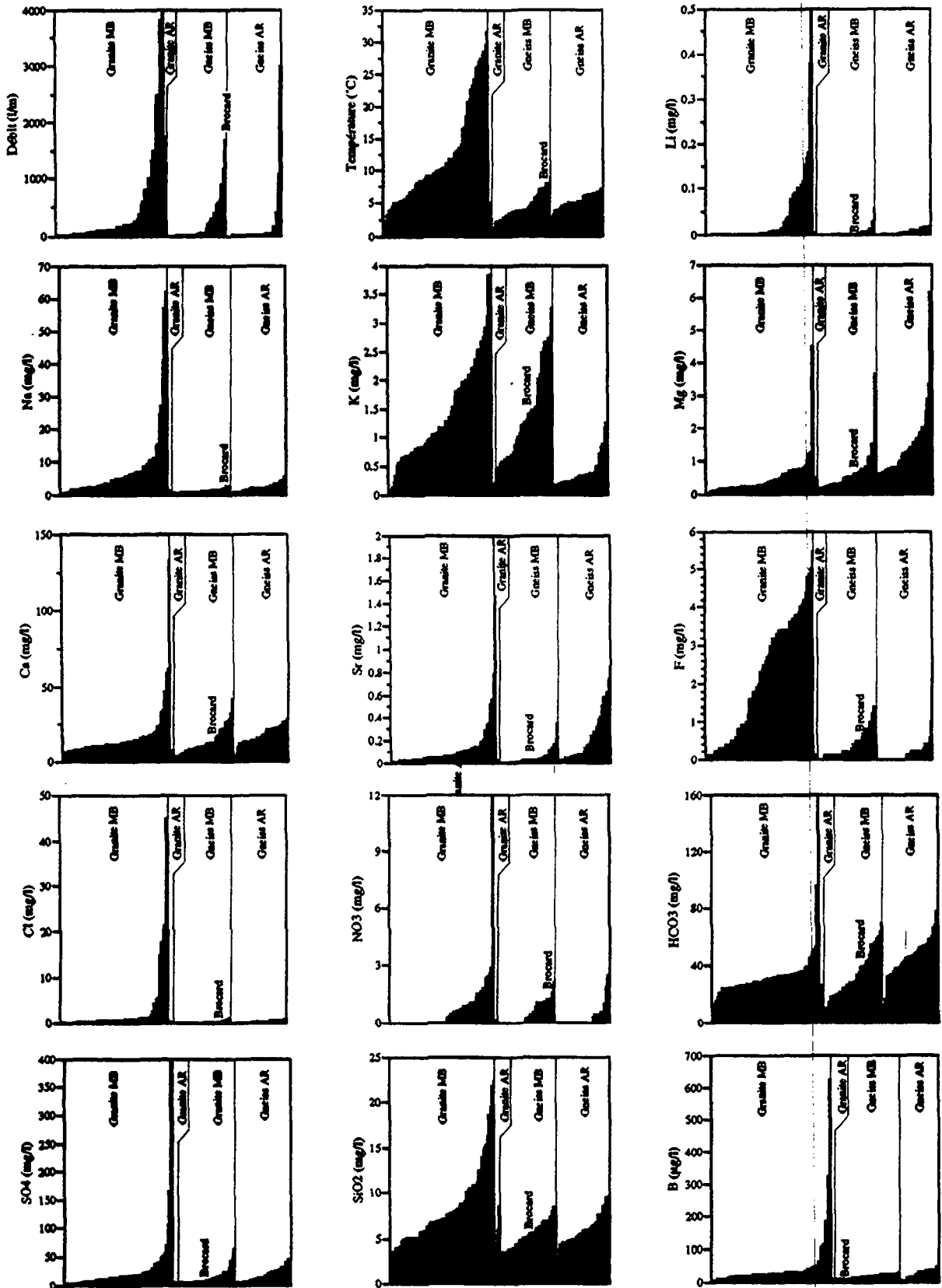


Figure 9.1 Représentation en série ordonnée des débits, de la température et des domaines de concentration des composés chimiques majeurs des eaux souterraines associées aux différents aquifères cristallins dont elles sont issues.

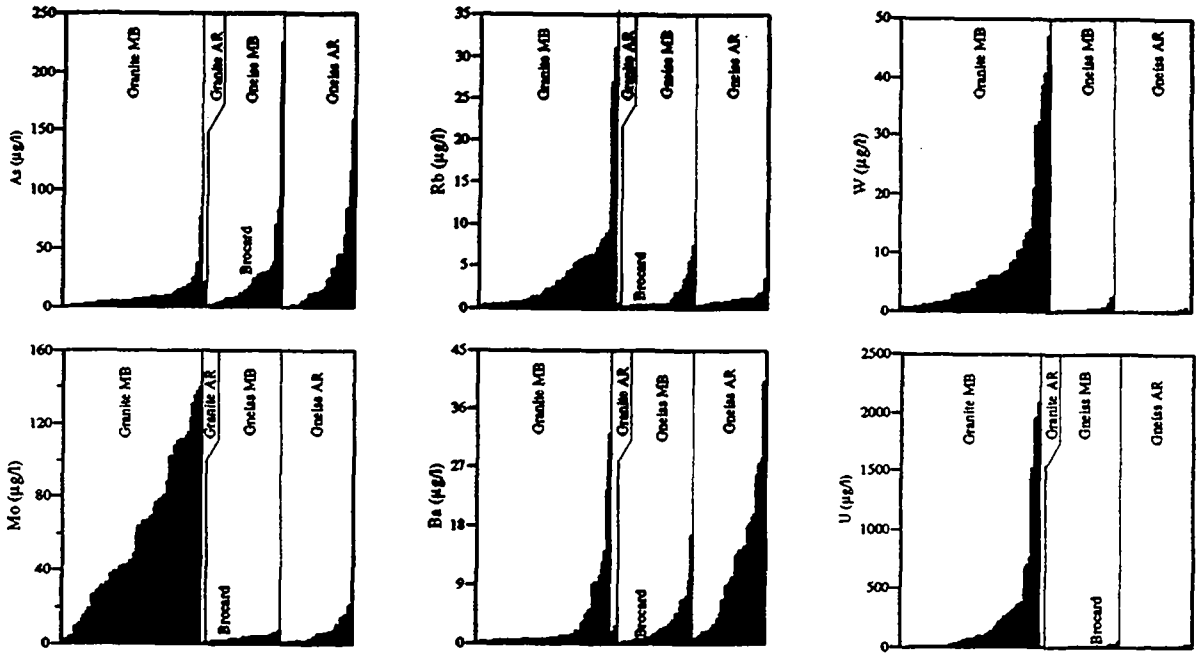


Figure 9.2 Représentation en série ordonnée des domaines de concentration des éléments en traces des eaux souterraines associées aux différents aquifères cristallins dont elles sont issues.

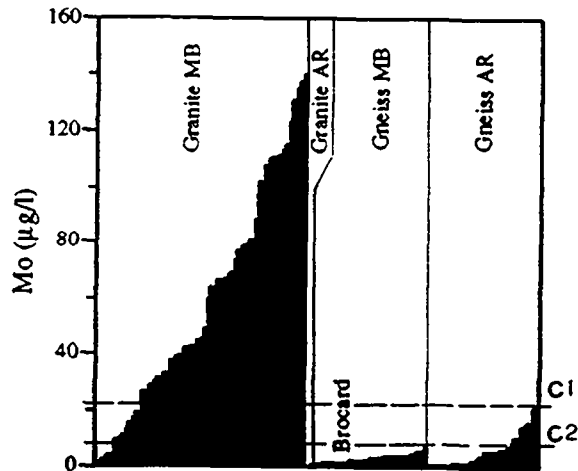


Figure 9.3 Exemple de définition des différentes limites de discrimination d'un élément marqueur. Cas du molybdène.

Les domaines de concentration des paramètres marqueurs ont également été exprimés en pour cent, pour les différents niveaux de discrimination (tableaux 9.2, 9.3 et 9.4). Cette statistique simple a permis de proposer un classement hiérarchique des différents marqueurs (tableau 9.5). Il faut toutefois souligner que ce sont essentiellement les aquifères granitiques qui possèdent le plus grand nombre d'éléments marqueurs. Ils sont également les plus significatifs dans leurs concentrations et leurs contrastes avec les aquifères de type gneissique.

Tableau 9.2 Répartition des éléments majeurs des eaux souterraines en relation avec les différents aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

Paramètres	Domaines de concentration	Aquifères*	% sur somme des sources échant. dans tout le massif
Li (mg/l)	0.058 < Li < 0.5	GraMB (19.5 %)	9.0
	0.058 > Li > 0.019	GraMB + GneMB	5.0
Na (mg/l)	0 < Li < 0.019	GraMB + GneMB + GneAR	86.0
	5.4 < Na < 62	GraMB (39.5 %)	18.5
	5.4 > Na > 2.85	GraMB + GneAr	18.5
K (mg/l)	0.47 < Na < 2.85	GraMB + GneAr + GneMB	63.0
	3.25 < K < 3.86	GraMB (3.0 %)	1.5
	3.25 > K > 1.25	GraMB + GneMB	33.5
	0 < K < 1.25	GraMB + GneMB + GneAR	65.0
Mg (mg/l)	4.5 < Mg < 6.13	GneAR (3.0 %)	1.0
	4.5 > Mg > 3.65	GneAR + GraMB	1.0
Ca (mg/l)	0.03 < Mg < 3.65	GneAR + GraMB + GneMB	98.0
	42 < Ca < 133	GraMB (5.0 %)	2.5
	42 > Ca > 29	GraMB + GneMB	4.5
Sr (mg/l)	2.9 < Ca < 29	GraMB + GneMB + GneAR	93.0
	0.85 < Sr < 1.9	GraMB (1.5 %)	1.0
	0.85 > Sr > 0.35	GraMB + GneAR	10.0
	0.35 < Sr < 0.006	GraMB + GneAR + GneMB	89.0

*GraMB: Granite du massif du Mont-Blanc, GneMB: Gneiss du massif du Mont-Blanc, GneAR: Gneiss des Aiguilles Rouges. (%) = Pourcentage de représentabilité du marqueur au sein de l'aquifère considéré.

Tableau 9.3 Répartition des éléments majeurs des eaux souterraines en relation avec les différents aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

Paramètres	Domaines de concentration	Aquifères*	% sur somme des sources échant. dans tout le massif
F (mg/l)	1.5 < F < 5.5	GraMB (59.9 %)	28.0
	1.5 > F > 0.8	GraMB + GneMB	10.0
	0 < F < 0.8	GraMB + GneMB + GneAR	62.0
Cl (mg/l)	1.2 < Cl < 45	GraMB (16.5 %)	8.0
	1.2 > Cl > 0.8	GraMB + GneMB	14.0
	0 < Cl < 0.8	GraMB + GneMB + GneAR	78
SO ₄ (mg/l)	65 < SO ₄ < 396	GraMB (4.5 %)	2.0
	65 > SO ₄ > 46	GraMB + GneMB	6.0
	2.8 < SO ₄ < 46	GraMB + GneMB + GneAR	92.0
SiO ₂ (mg/l)	8.9 < SiO ₂ < 225	GraMB (29.5 %)	14.0
	8.9 > SiO ₂ > 8.4	GraMB + GneAR	9.0
	3.4 < SiO ₂ < 8.4	GraMB + GneAR + GneMB	77.0
B (µg/l)	47 < B < 665	GneMB (14.0 %)	7.5
	47 > B > 29	GneMB + GneAR	22.0
	4 < B < 29	GneMB + GneAR + GraMB	70.5

*GraMB: Granite du massif du Mont-Blanc, GneMB: Gneiss du massif du Mont-Blanc, GneAR: Gneiss des Aiguilles Rouges. (%) = Pourcentage de représentabilité du marqueur au sein de l'aquifère considéré.

Tableau 9.4 Répartition des éléments en traces des eaux souterraines en relation avec les différents aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

Paramètres	Domaines de concentration		Aquifères*	% sur somme des sources échant. dans tout le massif
As (µg/l)	159	< As < 225	GneMB (0.5 %)	1.0
	159	> As > 76.5	GneMB + GneAR	4.5
Rb (µg/l)	0	< As < 76.5	GneMB + GneAR + GraMB	94.5
	7.6	< Rb < 31	GraMB (10.0 %)	4.5
W (µg/l)	7.6	> Rb > 3.5	GraMB + GneMB	18.0
	0.08	< Rb < 3.5	GraMB + GneMB	77.5
Mo (µg/l)	2.5	< W < 47	GraMB (64.5 %)	33.5
	2.5	> W > 0.7	GraMB + GneMB	16.5
Ba (µg/l)	0.2	< W < 0.7	GraMB + GneMB + GnAR	50.0
	21.6	< Mo < 140	GraMB (75.5 %)	35.5
U (µg/l)	21.6	> Mo > 6.6	GraMB + GneAR	14.5
	0.22	< Mo < 6.6	GraMB + GneAR + GneMB	50.0
As (µg/l)	32	< Ba < 40	GneAR (3.0 %)	1.0
	32	> Ba > 16.5	GneAR + GraMB	6.5
U (µg/l)	0.7	< Ba < 16.5	GneAR + GraMB + GneMB	92.5
	50.5	< U < 2093	GraMB (56.0 %)	26.5
U (µg/l)	50.5	> U > 19.5	GraMB + GneMB	6.5
	0	< U < 19.5	GraMB + GneMB + GneAR	67.0

* *GraMB*: Granite du massif du Mont-Blanc, *GneMB*: Gneiss du massif du Mont-Blanc, *GneAR*: Gneiss des Aiguilles Rouges. (%) = Pourcentage de représentabilité du marqueur au sein de l'aquifère considéré.

Aquifères granitiques du massif du Mont-Blanc (*GraMB*)

Il apparaît clairement que le molybdène est le principal marqueur des aquifères granitiques du Mont-Blanc, suivi du tungstène, du fluor, de l'uranium, du sodium, de la silice, du lithium et des chlorures. Il faut cependant noter que ces éléments caractérisent essentiellement des écoulements souterrains profonds et qu'ils sont principalement en relation avec des émergences observées en galeries et tunnel. Compte tenu de l'abondance des marqueurs spécifiques des aquifères granitiques, les derniers éléments sélectionnés (rubidium, calcium et strontium) peuvent être négligés dans le cas du massif du Mont-Blanc, (tableau 9.5).

Aquifères gneissiques du massif du Mont-Blanc (*GneMB*)

L'arsenic peut caractériser les aquifères gneissiques, cependant cet élément ne représente qu'un faible pouvoir discriminant de ces derniers. En effet, il ne concerne que le 0,5 % des émergences des gneiss, alors que 94,5 % des sources observées sur les massifs possèdent des concentrations qui peuvent appartenir à l'ensemble des aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges (tableau 9.4).

Aquifères gneissiques du massif des Aiguilles Rouges (*GneAR*)

Le baryum est le seul marqueur des aquifères gneissiques du massif des Aiguilles Rouges. Il permet de discriminer 3 % des venues liées aux gneiss. Toutefois il ne représente qu'un outil modeste, puisque qu'il ne représente que le 1 % de l'ensemble des émergences observées.

Tableau 9.5 Classification hiérarchique des éléments marqueurs des aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

Aquifères	Paramètres marqueurs	Représentativité au sein des aquifères considérés (%)	Représentativité pour l'ensemble des sources observées (%)
Granite du Mont-Blanc	Molybdène (Mo)	75.5	35.5
	Tungstène (W)	64.5	33.5
	Fluor (F)	59.0	28.0
	Uranium (U)	56.0	26.5
	Sodium (Na)	39.5	18.5
	Silice (SiO ₂)	29.5	14.0
	Lithium (Li)	19.5	9.0
	Chlorures (Cl)	16.5	8.0
	Bore (B)	14.0	7.5
	Rubidium (Rb)	10.0	4.5
	Calcium (Ca)	5.0	2.5
	Potassium (K)	3.0	1.5
	Strontium (Sr)	1.5	1.0
	Gneiss du Mont-Blanc	Arsenic (As)	0.5
Gneiss des Aiguilles Rouges	Baryum (Ba)	3.0	1.0
	Magnésium (Mg)	3.0	1.0

9.2.1 Analyses en composantes principales des paramètres chimiques des eaux souterraines

Deux analyses en composantes principales ont été réalisées dans le but de vérifier les interprétations géochimiques effectuées au chapitre précédent et notamment la définition des différents éléments marqueurs des sous-types d'aquifères du cristallin. Afin de faciliter les représentations graphiques, les éléments majeurs et en traces ont été l'objet de traitements séparés. Les calculs ont été réalisés à partir d'une base de données représentant uniquement la variabilité spatiale des paramètres (une valeur par point d'eau souterraine, voir chapitre 7) et à l'aide du programme STATGRAPHICS (voir chapitre 4).

9.2.1.1 Analyse des éléments majeurs

La figure 9.4, qui présente les résultats sous forme graphique, montre que les sources liées aux gneiss ou aux granites forment deux "nuages" de points bien différenciés. Les principaux éléments majeurs marqueurs des granites du Mont-Blanc (F, Na, Si), définis précédemment, se répartissent dans l'ensemble formé par les eaux de ce sous-type d'aquifère. Le Mg, qui s'est révélé être un marqueur des eaux des gneiss des Aiguilles Rouges, se situe géométriquement dans la direction du "nuage" de points formés par les eaux des gneiss.

9.2.1.2 Analyse des éléments en traces

La figure 9.5, qui présente les résultats sous forme graphique, montre que les sources liées aux gneiss ou aux granites forment deux "nuages" de points également bien différenciés. Les principaux éléments en traces

marqueurs des granites du Mont-Blanc (Mo, W, U, B), définis précédemment, se répartissent dans l'ensemble formé par les eaux de ce sous-type d'aquifère. Le baryum, qui s'est révélé être un marqueur des eaux des gneiss des Aiguilles Rouges, et l'arsenic, qui a montré une liaison significative avec les gneiss du massif du Mont-Blanc, se situent géométriquement dans la direction du "nuage" de points formés par les eaux des gneiss.

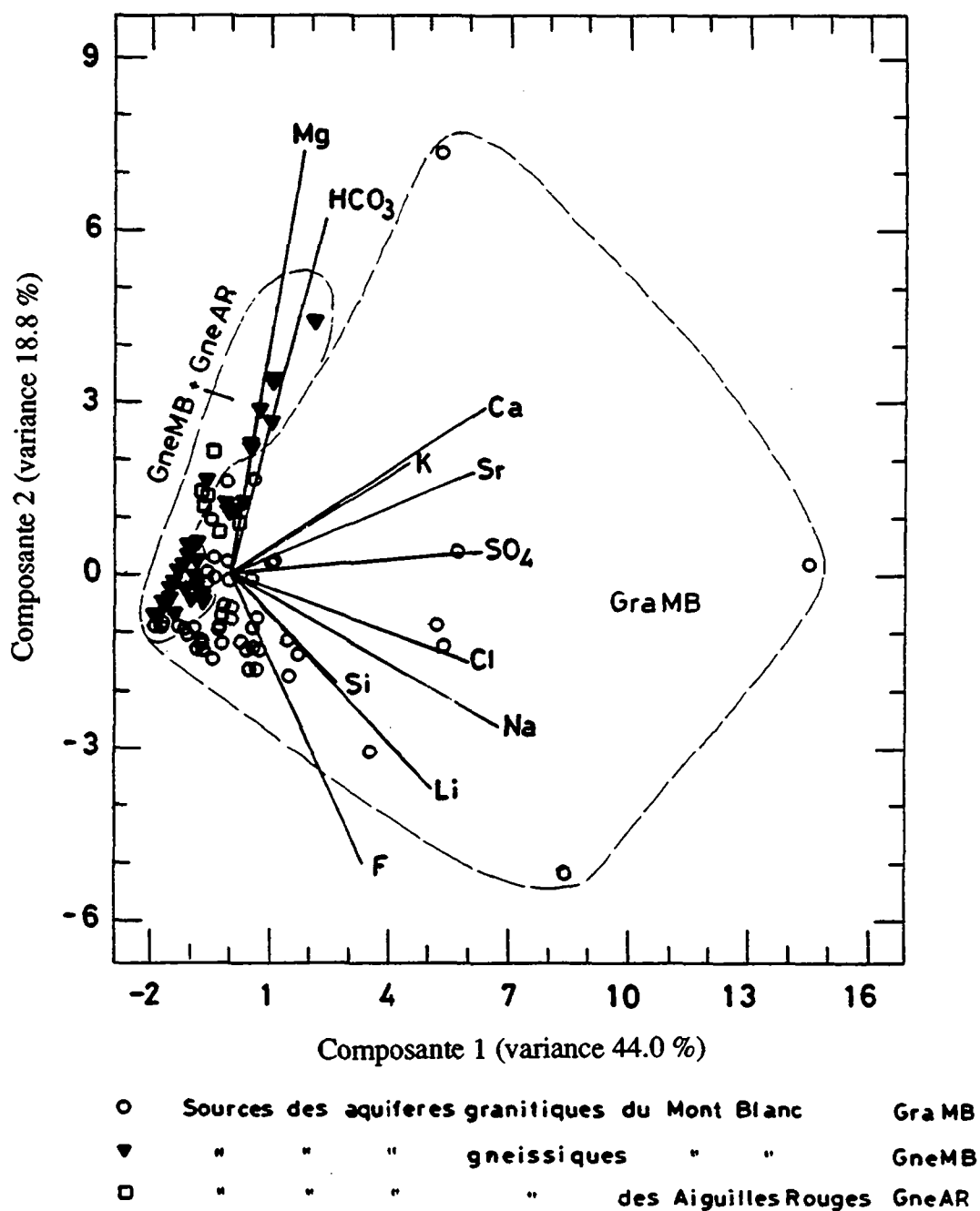


Figure 9.4 Représentation graphique de l'analyse en composantes principales des éléments majeurs.

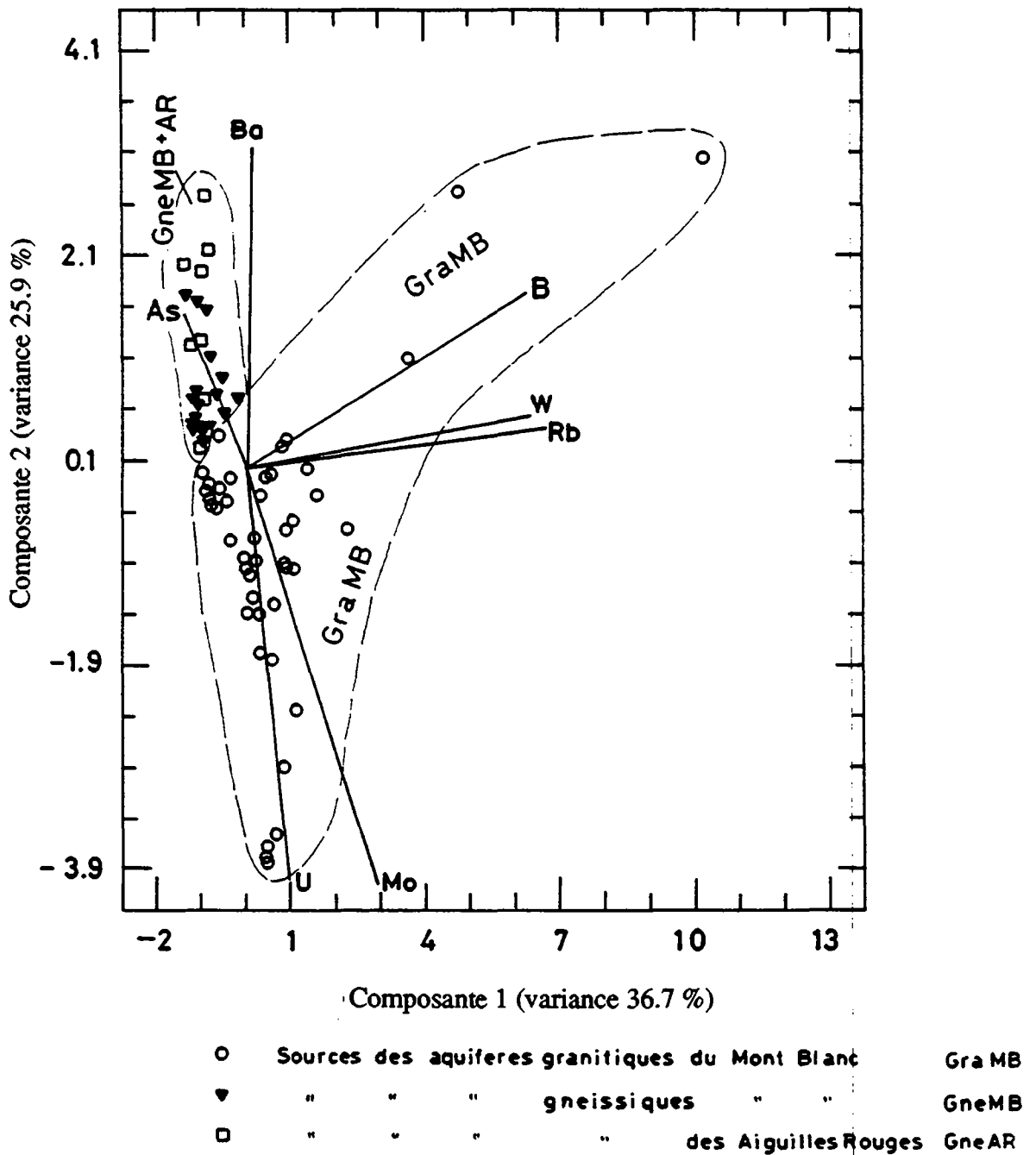


Figure 9.5 Représentation graphique de l'analyse en composantes principales des éléments en traces.

En conclusion, la définition des principaux marqueurs des différents sous-types d'aquifères, basée essentiellement sur l'utilisation de méthodes graphiques simples, a été globalement confirmée par le traitement statistique complexe en composantes principales.

9.3 Test de la représentabilité de la station Brocard du réseau AQUITYP

Les résultats de cette étude typologique des aquifères du cristallin fracturé des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges doivent être maintenant comparés à la station pilote du Brocard, Martigny, qui correspond au point typique "a priori" d'observation des aquifères cristallins du réseau de base du projet AQUITYP (Parriaux et al, 1990). Une des questions qui était posée au début de cette recherche était de savoir si les caractéristiques hydrogéologiques de cette émergence étaient effectivement typiques et représentatives de celles des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges. Au terme de ce travail, il est possible de déboucher sur les conclusions suivantes:

9.3.1 Représentabilité par rapport au régime hydraulique

Les observations des variations temporelles des principaux paramètres ont montré que la source du Brocard avait le même comportement que les émergences situées à l'exutoire d'aquifères de type gneissique (voir chapitre 7). En effet, contrairement aux circulations en milieu granitique, la minéralisation totale et la température des eaux restent très stables, malgré d'importantes fluctuations du débit. Ces caractéristiques s'expliquent par des circulations au sein d'aquifères constitués de réseaux complexes de microfissures, permettant le tamponnage des principaux paramètres physico-chimiques. L'absence de macrodiscontinuités aquifères, propre aux granites, ne favorise pas les circulations profondes et par conséquent l'émergence de sources subthermales ou thermales. La source du Brocard est, du point de vue hydraulique, représentative des circulations d'eaux froides à écoulement peu profond, typiques des formations gneissiques du massif du Mont-Blanc (GneMB) et dans une certaine mesure des aquifères mixtes (granite et gneiss) du massif des Aiguilles Rouges .

9.3.2 Représentabilité par rapport à la classification géochimique

Selon la classification de Schmassmann, basée sur la présence des ions majeurs contenus dans l'eau, la source du Brocard appartient au groupe bicarbonaté calcique et sulfaté ($\text{Ca-HCO}_3 > \text{SO}_4$). Ce groupe représente plus de 60 % des sources étudiées, qui appartiennent aussi bien aux eaux souterraines des aquifères granitiques que gneissiques. En ce sens, la géochimie des composés chimiques majeurs de la source du Brocard est typique des eaux souterraines froides des massifs cristallins du Mont-Blanc (GraMB + GneMB) et des Aiguilles Rouges (GraAR + GneAR).

9.3.3 Représentabilité par rapport à l'étendue des paramètres géochimiques

Afin de situer les caractéristiques de la source du Brocard par rapport à l'ensemble des sources observées, celle-ci a été située sur les graphiques (paragraphe 9.2, figures 9.1 et 9.2). La lecture de ce type de représentation indique clairement que la source du Brocard présente des affinités très significatives avec les eaux souterraines des aquifères gneissiques (GneMB + GneAR). Les caractéristiques de la source du Brocard pourraient être confondues avec les eaux à écoulement peu profond en milieu granitique. Elle ne peut toutefois être un exemple typologique de la grande majorité des aquifères granitiques des massifs de la région étudiée. Elle est notamment atypique des

aquifères granitiques à écoulements profonds. Le tableau 9.6 présente les degrés d'affinité des différents paramètres de la source du Brocard avec ceux de l'ensemble des eaux souterraines observées dans le massif. Il indique que les paramètres qui présentent es liens de parenté les plus élevés correspondent, dans l'ensemble, aux composés chimiques les moins représentatifs des aquifères granitiques profonds.

Tableau 9.6 Comparaison des concentrations des composés chimiques de la source du Brocard avec les moyennes paramétriques de l'ensemble des sources observées dans le massif.

Paramètres	Concentration Brocard (sept. 1989)	Concentration moyenne des sources	Concentration Brocard / Moyenne des sources	Classement des paramètres*
Li (mg/l)	0.0016	0.02	0.08	12
Na (mg/l)	1.8	4.3	0.42	6
K (mg/l)	1.3	1.1	1.18	1
Mg (mg/l)	0.6	0.8	0.75	4
Ca (mg/l)	13.0	16.6	0.78	3
Sr (mg/l)	0.025	0.14	0.18	10
F (mg/l)	0.5	1.2	0.42	6
Cl (mg/l)	0.4	1.4	0.29	8
SO ₄ (mg/l)	7.5	37.4	0.20	9
SiO ₂ (mg/l)	8.6	7.5	1.15	2
B (µg/l)	11.0	36.2	0.30	7
As (µg/l)	11.4	16.9	0.67	5
Rb (µg/l)	0.2	2.4	0.08	12
Mo (µg/l)	1.6	28.9	0.06	14
Ba (µg/l)	0.5	4.8	0.10	11
U (µg/l)	7.9	117	0.07	13

* Classement des paramètres du Brocard les plus représentatif de l'ensemble des sources des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

En conclusion, la station pilote du Brocard est représentative, aussi bien du point de vue de son comportement hydraulique que de ses caractéristiques géochimiques, des aquifères gneissiques des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges. Elle n'est toutefois, pour ces mêmes raisons, pas représentative des aquifères granitiques du massif du Mont-Blanc et particulièrement des aquifères profonds.

10. COMPARAISON AVEC LES AQUIFERES D'AUTRES MASSIFS CRISTALLINS

10.1 Introduction

Arrivés au terme de la définition typologique des aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, il est nécessaire d'apprécier la représentabilité des données acquises avec d'autres massifs cristallins (tableau 10.1). Cette comparaison a été effectuée à partir d'un certain nombre d'aquifères de l'arc alpin occidental (situation générale voir chapitre 3.1, figure 3). Les observations comparatives ont été effectuées à partir de la même classification géochimique des eaux souterraines et sur la base de la répartition des différents paramètres disponibles, sous réserve de certains paramètres mineurs non analysés dans les massifs qui ont servi de comparaison (figures 10.1 et 10.2). Nous avons présenté à l'annexe 10.1 une représentation de l'étendue approximative des paramètres chimiques des autres aquifères de comparaison. Ceci a été réalisé sur la base d'une compilation de nombreuses analyses disponibles dans la littérature correspondante. Cette base de données est donc forcément approximative, puisqu'il n'a pas été possible de pénétrer dans le détail de l'hydrochimie de ces régions.

Tableau 10.1 Choix des aquifères et des massifs cristallins utilisés pour effectuer l'étude de la représentabilité de la typologie des aquifères du Mont Blanc et des Aiguilles Rouges.

Aquifères	Massifs	Origine des données	Code
Granite	Mont Blanc et Aiguilles Rouges	Thèse Dubois (1991)	GraMBAR
Gneiss	"	"	GneMBAR
Granite	Belledonne	Thèse Cruchet, (1983)	GraBD
Gneiss	"	"	GneBD
Granite	Aar	Laboratoire du Grimsel (NAGRA, 1889)	GraA
Granite	Socle nord de la Suisse	Forage de Leuggern (NAGRA, 1986)	GraLG
Gneiss	"	"	GneLG
Granite	"	Forage de Böttstein (NAGRA, 1986)	GraBT

GraLG: Granite forage Leuggern (NAGRA), GneLG: Gneiss forage Leuggern (NAGRA), GraBT: Granite forage Böttstein (NAGRA), GraMBAR: Granite Mont Blanc et Aiguilles Rouges. GneMBAR: Gneiss Mont Blanc et Aiguilles Rouges, GraBD: Granite de Belledonne, GneBD: Gneiss de Belledonne, GraA: Granite du massif de l'Aar (laboratoire souterrain du Grimsel, NAGRA).

10.2 Comparaison de la typologie géochimique

Le tableau 10.2 présente la typologie géochimique des différents aquifères étudiés (classification selon Schmassmann, voir chapitre 7). Parmi les différentes classes géochimiques individualisées dans les granites et les gneiss du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, nous n'avons retenu pour la comparaison que celles qui discriminaient les granites des gneiss et inversement. Ceci permet de déterminer si la distinction géochimique entre les eaux des granites et des gneiss définie dans les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges se

retrouve dans d'autres massifs cristallins. Les formules géochimiques des aquifères choisis pour la comparaison ont été établies sur la base d'analyses représentatives des différentes eaux souterraines.

Tableau 10.2 Classification chimique comparative des différents aquifères cristallins.

Type géochimique	Aquifères granitiques		Aquifères gneissiques
$\text{Ca} > \text{Na-HCO}_3 > \text{SO}_4$	GraMBAR	+	GraBD
$\text{Ca} > \text{Na-HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{F}^*$	GraMBAR	+	GraA
$\text{Ca-SO}_4 > \text{HCO}_3$			GneMBAR
$\text{Na-Cl} > \text{SO}_4$			GraLG
$\text{Na-SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$			GraBT
$\text{Na-SO}_4 > \text{Cl} > \text{HCO}_3$			GneLG

GraLG: Granite forage Leuggern (NAGRA), GneLG: Gneiss forage Leuggern (NAGRA), GraBT: Granite forage Böttstein (NAGRA), GraMBAR: Granite Mont Blanc et Aiguilles Rouges. GneMBAR: Gneiss Mont Blanc et Aiguilles Rouges, GraBD: Granite de Belledonne, GneBD: Gneiss de Belledonne, GraA: Granite du massif de l'Aar (laboratoire souterrain du Grimsel, NAGRA).

*Pas d'analyse de fluorures disponible dans les eaux de GraBD et GneBD.

La classification comparative des eaux souterraines met en évidence les relations suivantes:

1. La distinction selon Schmassmann, établie dans le massif du Mont-Blanc entre les eaux des granites et des gneiss, n'est pas confirmée dans les autres massifs, puisque on y trouve également des formules communes à ces deux sous-types d'aquifères.
2. La distinction pourrait exister avec la formule $\text{Ca} > \text{Na-HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{F}$ pour les granites de l'Aar, mais sous réserve avec les granites de Belledonne, pour lesquels nous ne possédons pas d'analyse de fluorures.
3. Les eaux du socle du nord de la Suisse ne possèdent aucune caractéristique commune avec les autres aquifères considérés. Le type géochimique de ces eaux souterraines thermominérales est caractéristique des aquifères cristallins profonds à écoulement très lent (eau "ancienne").

Conclusion: La méthode de comparaison basée sur la classification chimique des éléments majeurs est trop grossière. Il faut alors aborder la comparaison systématique de l'étendue des différents paramètres.

10.3 Comparaison des différents aquifères cristallins au niveau des divers composés en solution.

Dans le but de dégager la représentativité des données, nous avons comparé les domaines couverts par les différents paramètres observés. Chaque paramètre possède sa propre étendue, comprise entre une valeur minimale et maximale observée. Les figures 10.1 et 10.2 présentent pour les différents aquifères l'étendue des valeurs de chaque paramètre hydrogéologique disponible. L'annexe 10.2 présente les liens de parenté entre les eaux des différents aquifères sur la base des valeurs maximales atteintes par chaque paramètre.

La comparaison systématique des domaines paramétriques et surtout des valeurs maximales de ces derniers permet de tirer un certain nombre de constatations générales:

1. Les concentrations des ions majeurs: Na, K, SO₄, F, SiO₂ et de l'uranium des eaux souterraines des granites et des gneiss des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges possèdent des concentrations comparables aux autres aquifères ci-dessous:

Paramètres	Aquifères MB et AR		Autres aquifères
Na	Gneiss Mont-Blanc*	=	Gneiss Belledonne
K	Granite Mont-Blanc*	=	Granite Aar (Grimsel)
Ca	Gneiss Mont-Blanc*	=	Gneiss Belledonne
SO ₄	Granite Mont-Blanc*	=	Granite Leuggern
SO ₄	Gneiss Mont-Blanc*	=	Granite Belledonne
U	Granite Mont-Blanc*	=	Granite Belledonne
F	Granite Mont-Blanc*	=	Granite Aar (Grimsel)
SiO ₂	Granite Mont-Blanc*	=	Granite Belledonne = Granite Aar (Grimsel) = Granite Böttstein**

* Massif du Mont-Blanc au sens large (y.c. Aiguilles Rouges)

** forage

2. Les paramètres majeurs des eaux souterraines du socle du nord de la Suisse atteignent dans tous les cas des valeurs plus élevées que celles des eaux des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, à l'exception de la silice de Böttstein (forage, NAGRA).
3. Les éléments en traces disponibles ont montré que les concentrations les plus élevées ont été atteintes dans les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, alors que les valeurs les plus basses sont paradoxalement représentées par les eaux thermominérales du socle du nord de la Suisse. Le tableau ci-dessous donne en résumé la position hiérarchique des éléments en traces des différents aquifères:

Paramètres	Aquifères MB et AR		Autres aquifères		
Ba	Granite Mont-Blanc*	>	Granite Aar	>	Granite Leuggern > Granite Böttstein
	Gneiss Mont-Blanc*	>	Gneiss Leuggern	>	Granite Böttstein
Rb	Granite Mont-Blanc*	>	Granite Leuggern		
	Gneiss Mont-Blanc*	>	Gneiss Leuggern		
U	Granite Mont-Blanc*	=	Granite Belledonne > Granite Aar (Grimsel) > Granite Böttstein		

* Massif du Mont-Blanc au sens large (y.c. Aiguilles Rouges)

4. **Pour les eaux des aquifères granitiques:** Dans le massif du Mont-Blanc elles atteignent des concentrations en Li, Na, Ca, Sr, Cl, HCO₃, SO₄ systématiquement supérieures à celles des autres aquifères granitiques rassemblés pour les massifs de Belledonne et de l'Aar (Laboratoire souterrain du Grimsel, NAGRA).

Pour les eaux des gneiss: Les chlorures des eaux des gneiss des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges présentent des concentrations très inférieures à celles des gneiss de Belledonne et du Grimsel.

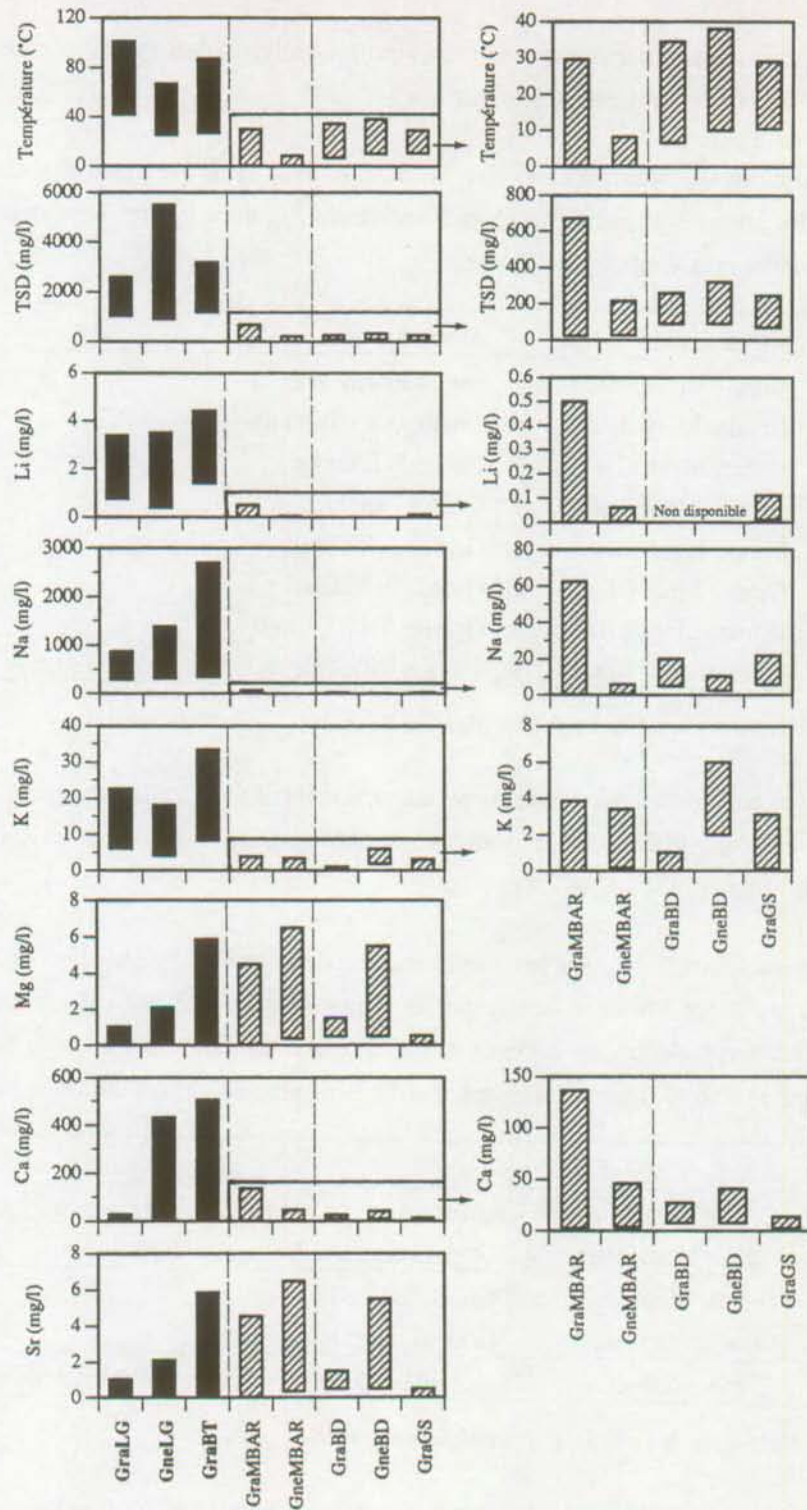


Figure 10.1 Représentation comparative des variabilités des paramètres de quelques aquifères cristallins alpins. Les graphiques situés sur la droite sont des agrandissements partiels des valeurs faiblement exprimées dans les graphiques de représentation d'ensemble (1).

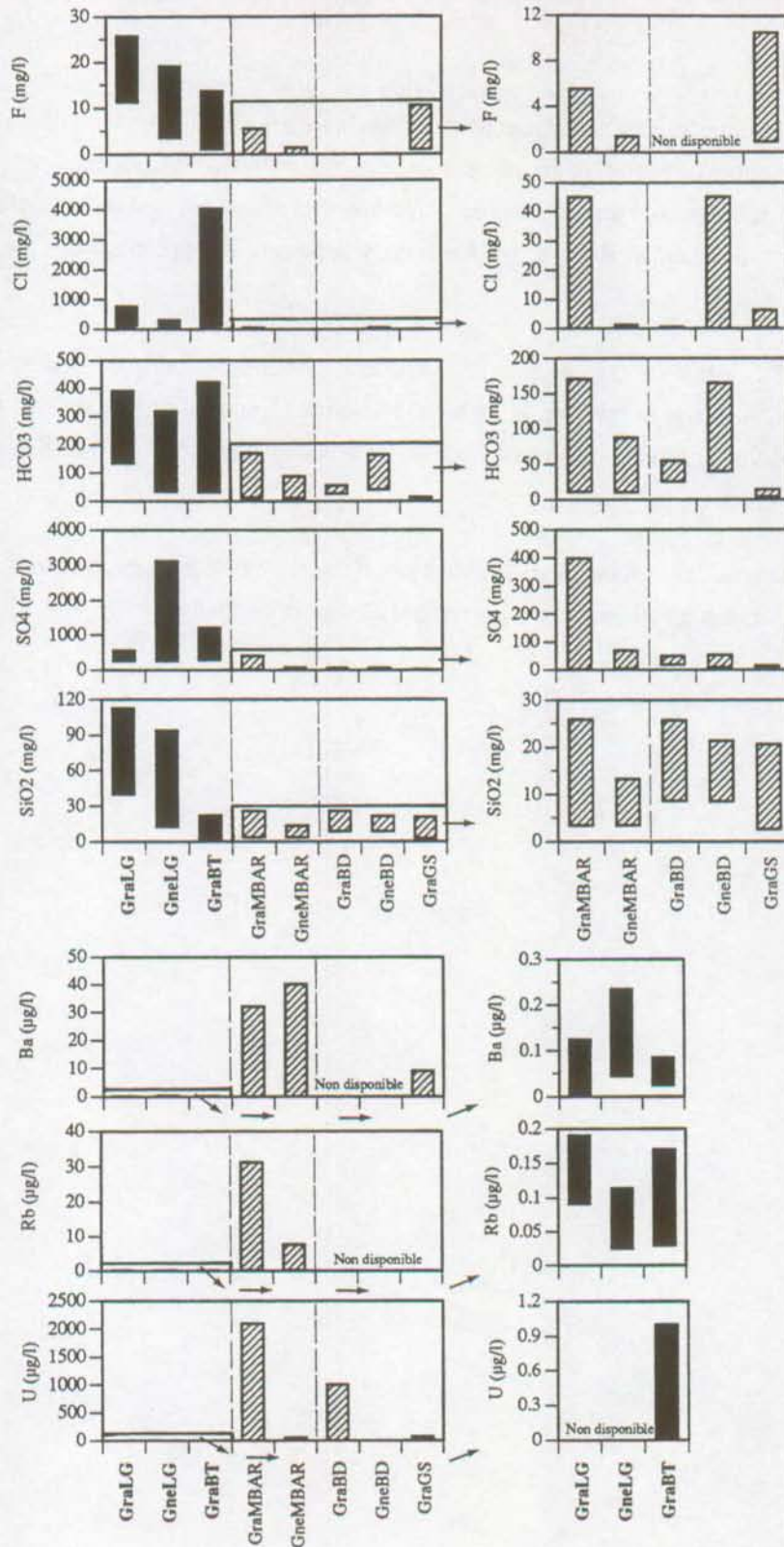


Figure 10.2 Représentation comparative des variabilités des paramètres de quelques aquifères cristallins alpins. Les graphiques situés sur la droite sont des agrandissements partiels des valeurs faiblement exprimées dans les graphiques de représentation d'ensemble (2).

Synthèse des parentés:

D'une manière générale, les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges ne possèdent que très peu de caractères communs avec les eaux des aquifères profonds du socle du nord de la Suisse, qui sont le siège de circulations très lentes, par opposition aux aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, de l'Aar et de Belledonne qui sont caractérisés par des renouvellements rapides.

Il existe toutefois dans ce dernier groupe d'aquifères plusieurs similitudes entre certains paramètres caractéristiques. En effet, le **sodium**, le **fluor** et l'**uranium**, qui se sont révélés être parmi les marqueurs typiques des granites, ont été également observés au-delà des aquifères du Mont-Blanc, dans le massif de Belledonne et de l'Aar.

L'arsenic et le baryum, qui sont dans le massif du Mont-Blanc des éléments marqueurs modestes des gneiss, n'ont pas pu être vérifiés dans les autres massifs par manque d'analyses disponibles.

11. COMPARAISON AVEC LES AUTRES AQUIFERES DU RESEAU AQUITYP

11.1 Introduction

Les données acquises dans les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges ont été également comparées à une tournée de mesures des eaux souterraines du réseau AQUITYP effectuée en période d'étiage, avec les mêmes méthodes d'analyses que celles utilisées dans ce travail (Parriaux, 1990). Cette démarche a été effectuée dans le but de situer les résultats hors du contexte de la présente étude et de dégager les caractéristiques hydrochimiques spécifiques des aquifères du cristallin face à des aquifères lithologiquement très variés.

Les figures 11.1 et l'annexe 11.1 donnent la situation géographique et géologique des 17 sources qui constituent le réseau AQUITYP.

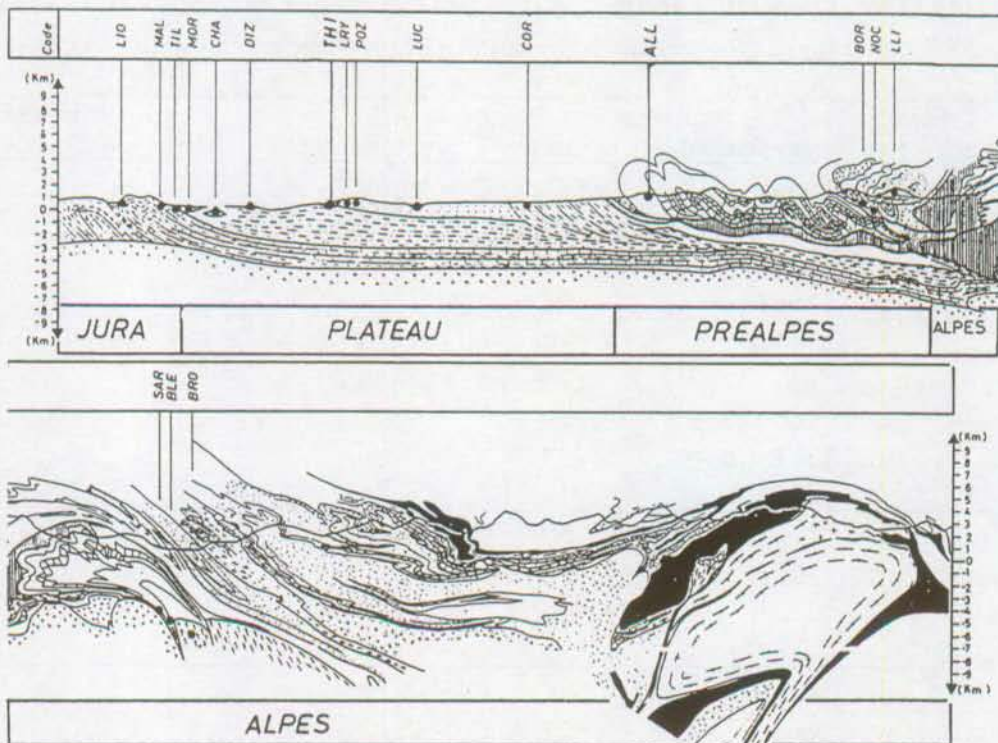


Figure 11.1 Coupe géologique du Jura aux Alpes avec situation des sources et des aquifères du réseau d'observation AQUITYP (Parriaux, 1990, coupe géologique d'après Escher et al, 1987)

Le groupe 5, qui correspond aux aquifères du cristallin des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, est encore divisé en quatre sous-types:

1. Aquifères granitiques du massif du Mont-Blanc (GraMB)
2. Aquifères gneissiques du massif du Mont-Blanc (GneMB)
3. Aquifères granitiques du massif des Aiguilles Rouges (GraAR)
4. Aquifères gneissiques du massif des Aiguilles Rouges (GneAR)

11.2 Comparaison de la typologie géochimique selon les classes de majeurs

Une typologie géochimique a été définie pour chaque source du réseau AQUITYP (classification selon Schmassmann, voir paragraphe 7.1). Elle fait apparaître que seule une émergence possède une formule géochimique commune à une partie des sources observées dans les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges. En effet, le type géochimique Ca-HCO₃ de la source de Tilenet (aquifère type des calcaires du Crétacé jurassien, groupe 3) est également observé pour un faible pourcentage d'eaux souterraines des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges. Ces dernières sont issues aussi bien des gneiss que des granites. Cette parenté liée aux faibles concentrations en magnésium de la source de Tilenet est naturellement fortuite, puisqu'elle ne tient pas compte des concentrations absolues des paramètres chimiques. En effet, la minéralisation totale de la source de Tilenet est environ 8 fois supérieure à celle des eaux du cristallin de la source du Brocard. Pour cette raison, la comparaison des données sera abordée au paragraphe suivant sur la base des concentrations absolues des différents paramètres.

Tableau 11.1 Comparaison des types géochimiques entre les eaux souterraines du réseau AQUITYP et celles des aquifères cristallins des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

Groupe d'aquifère type	Point d'eau		Type géochimique	Aquifères cristallins ayant un type géochimique semblable
	Identification	Code		
1	Lucens	LUC	Ca > Mg-HCO ₃	
	Chanivaz	CHA	"	
	Dizy	DIZ	"	
	Thierrens	THI	"	
2	Cornalle	COR	Ca > Mg-HCO ₃	
	Lutry	LRY	Ca > Mg-HCO ₃	
	Pierre-Ozaire	POZ	"	
	Lac Liozon	LLI	"	
	Alliaz	ALL	"	
3	Tilenet	TIL	Ca-HCO ₃	GraMB, GneMB et GneAR*
	Lionne	LIO	"	
	Bornels	BOR	Ca > Mg-HCO ₃	
	Sarve	SAR	Ca > Mg-HCO ₃ > SO ₄	
4	Noches	NOC	Ca > Mg-HCO ₃	
	Bains de Leytron	BLE	Ca > Mg-SO ₄ > HCO ₃	
5	Brocard	BRO	Ca-HCO ₃ > SO ₄	Voir par. 9.3 Représentivité de la station du Brocard

** Gra = Granite, Gne = Gneiss, MB = Mont-Blanc, AR = Aiguilles Rouges.

En résumé, il apparaît que la classification géochimique des eaux souterraines souligne le fort contraste qui existe entre les aquifères du cristallin et l'ensemble des aquifères du réseau de référence. Le tableau 11.1 donne pour toutes les sources du réseau AQUITYP leur formule géochimique correspondante ainsi que leur appartenance aux différents groupe d'aquifères type (1, 2, 3, 4 et 5).

11.3 Comparaison de l'étendue des paramètres des différents aquifères cristallins

Pour réaliser cette comparaison systématique, l'étendue des concentrations de chaque paramètre des trois unités géologiques principales (sous-types: granites du Mont-Blanc: GraMB, gneiss du Mont-Blanc: GneMB, et gneiss des Aiguilles Rouges: GneAR) a été comparée à celles des analyses du réseau AQUITYP (groupes d'aquifères types 1, 2, 3, 4). La comparaison avec les aquifères des granites des Aiguilles Rouges n'a pas été abordée, compte tenu du trop faible nombre de sources observées, rendant illusoire toute tentative de généralisation des résultats.

Sur les annexes 11.2 et 11.3 nous avons représenté graphiquement l'ensemble des données hydrochimiques des eaux souterraines des sources des massifs cristallins, ainsi que les analyses effectuées sur les sources du réseau AQUITYP. Les paramètres sont présentés sous forme de séries ordonnées, permettent de visualiser aisément les différents domaines de concentration des éléments chimiques mesurés.

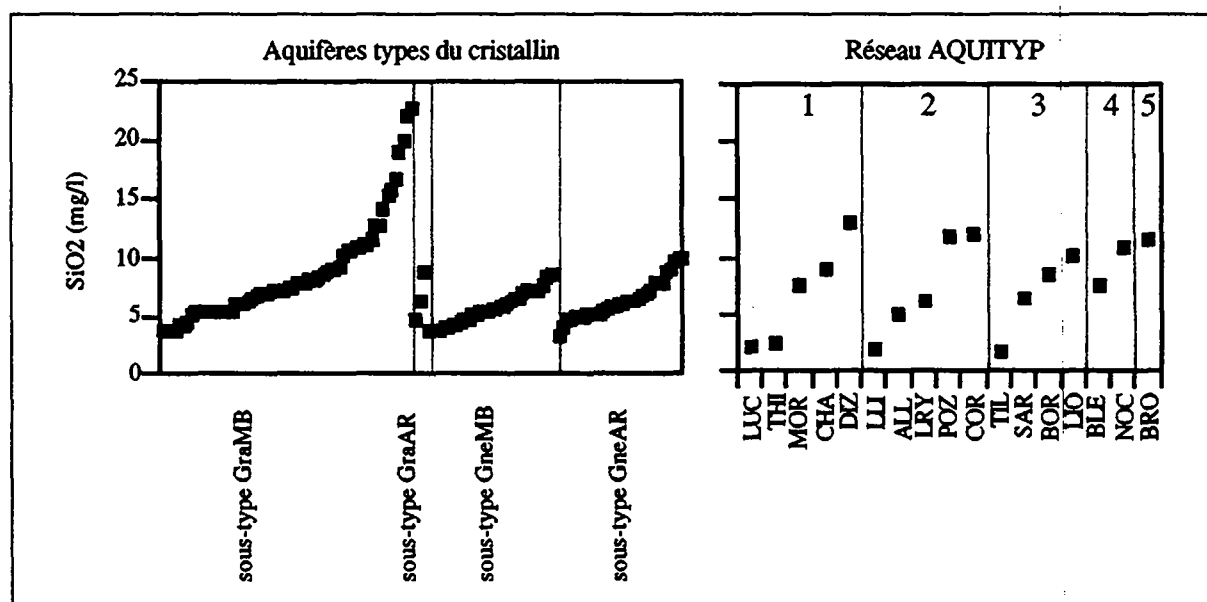


Figure 11.2 Représentation graphique comparative des concentrations en silice des eaux des sous-types aquifères des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges et de celles des sources des 5 groupes aquifères du réseau AQUITYP (les autres paramètres sont présentés en annexe 11.2).

Les eaux du cristallin étant globalement très faiblement minéralisées par rapport aux venues des autres aquifères du réseau, la discrimination aurait pu se faire uniquement par l'utilisation de la minéralisation totale (discrimination par le bas). Toutefois, dans le cas où les eaux du cristallin subissent des mélanges avec des eaux souterraines de type géochimique différent, ce moyen de discrimination devient inopérant et il est nécessaire de trouver des paramètres marqueurs spécifiques aux aquifères du cristallin. Pour cette raison, cette comparaison a été établie en dégageant les paramètres des trois principaux sous-types d'aquifères du cristallin qui atteignent des valeurs supérieures ou égales à celles observées au sein des quatre autres groupes d'aquifères formant le réseau AQUITYP.

Tableau 11.2 Paramètres marqueurs des eaux des aquifères granitiques du Mont-Blanc par rapport aux eaux souterraines du réseau AQUITYP.

Paramètres / aquifères AQUITYP		1	2	3	4
Lithium	≥	X	X	X	X
Sodium	≥	X		X	X
Potassium	≥	X	X	X	X
Strontium	≥	X		X	
Fluor	≥	X	X	X	X
Chlorures	≥	X	X	X	X
Sulfates	≥	X	X	X	
SiO₂	≥	X	X	X	X
Bore	≥	X	X	X	X
Arsenic	≥	X	X	X	X
Rubidium	≥	X	X	X	X
Tungstène	≥	X	X	X	X
Uranium	≥	X	X	X	X

Tableau 11.3 Paramètres marqueurs des eaux des aquifères gneissiques du Mont-Blanc par rapport aux eaux souterraines du réseau AQUITYP.

Paramètres / aquifères AQUITYP		1	2	3	4
Lithium	≥	X		X	
Potassium	≥	X	X		
Fluor	≥	X	X	X	
Sulfates	≥	X	X		
SiO₂	≥			X	
Arsenic	≥	X	X	X	X
Rubidium	≥	X	X	X	X
Tungstène	≥	X	X	X	X
Uranium	≥	X	X	X	X

Tableau 11.4 Paramètres marqueurs des eaux des aquifères gneissiques des Aiguilles Rouges par rapport aux eaux souterraines du réseau AQUITYP.

Paramètres / aquifères AQUITYP		1	2	3	4
Lithium	≥	X		X	
Potassium	≥	X	X	X	X
Fluor	≥	X	X	X	X
Sulfates	≥	X	X		
Bore	≥	X	X	X	X
Arsenic	≥	X	X	X	X
Rubidium	≥	X	X	X	X
Tungstène	≥	X	X	X	X
Uranium	≥	X	X	X	X

Cette démarche, qui implique une sélection des valeurs par le haut, permet de mettre en évidence les paramètres dominants (marqueurs), qui caractérisent paradoxalement les eaux très faiblement minéralisées du cristallin face à des eaux souterraines parfois considérablement plus riches en sel minéraux. La figure 11.2 illustre, en prenant comme exemple la silice, la méthode graphique de comparaison des données.

Les tableaux 11.2, 11.3 et 11.4 rassemblent en résumé les éléments chimiques analysés dans les eaux souterraines des granites et des gneiss du Mont-Blanc (GraMB et GneMB) ainsi que les gneiss des Aiguilles Rouges (GneAR). Le paramètre est noté X si sa concentration dans le sous-type cristallin est supérieure ou égale au domaine des concentrations mesurées dans un groupe d'aquifère de type 1, 2, 3 ou 4. Lorsqu'un paramètre est supérieur ou égal au domaine de variation des quatre groupes AQUITYP à la fois, il est écrit en caractère gras.

En dernière analyse ont été mis en évidence les paramètres chimiques des trois aquifères-types du cristallin (Mont-Blanc et Aiguilles Rouges) qui présentent chacun des concentrations \geq à celles observées pour les quatre groupes aquifères du réseau AQUITYP (tableau 11.5).

Les paramètres chimiques reportés en caractère gras, **arsenic, rubidium, tungstène et uranium**, correspondent aux marqueurs qui caractérisent de manière spécifique les eaux souterraines des trois sous-types d'aquifères des massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges par rapport à tous ceux du réseau de référence du projet AQUITYP.

Tableau 11.5 Paramètres marqueurs, à la fois des eaux des aquifères granitiques et gneissiques du massif du Mont-Blanc et gneissiques des Aiguilles Rouges, par rapport aux eaux souterraines du réseau AQUITYP (ayant des concentrations supérieures ou égales aux groupe d'aquifères 1, 2, 3 et 4).

Autres groupes d'aquifères AQUITYP			
1	2	3	4
Li		Li	
F	F	F	
B		B	
	SO ₄		
As	As	As	As
Rb	Rb	Rb	Rb
W	W	W	W
U	U	U	U

12. CONCLUSION

Les travaux de recherche hydrogéologiques menés dans les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges ont atteint les objectifs qui avaient été fixés.

La mise en place d'un vaste réseau d'observation, aussi bien en surface que dans l'ensemble des galeries existantes dans le massif, a abouti à une meilleure connaissance des caractéristiques hydrauliques et hydrochimiques des aquifères profonds et de subsurface du milieu cristallin fracturé.

L'interprétation des données a notamment débouché sur la détermination des variabilités temporelles et spatiales d'un grand nombre de paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.

Les essais de traçage artificiel effectués en haute montagne ont entre autres démontré le caractère discontinu du pergélisol. Ils ont également débouché sur des estimations approximatives des vitesses de transit à l'échelle d'un massif cristallin fissuré.

Les analyses des éléments présents en traces ont été effectuées pour la première fois systématiquement dans cette région de haute montagne. Elles ont largement contribué à la mise en évidence de marqueurs caractéristiques des différents sous-types d'aquifères du cristallin des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

Les mesures et analyses effectuées sur les eaux de surface (torrents, pluies, neiges, eau de percolation des sols) qui participent à la recharge des aquifères ont permis de préciser leur influence géochimique sur les eaux souterraines.

Les tests de mise en solution de roche, en laboratoire, ont précisé l'origine des éléments majeurs et en traces observés dans les eaux souterraines.

Les résultats acquis pour des structures aquifères simples pourront faciliter l'approche et la compréhension de circulations complexes qui impliquent souvent des phénomènes de mélange entre des eaux provenant d'aquifères de nature lithologique différente.

Cette recherche a également contribué à renforcer le concept du projet AQUITYP.

BIBLIOGRAPHIE

- Argand, E. (1916):** Sur l'arc des Alpes occidentales. *Ecl. geol. Helv.*, vol. 14, pp. 145-192.
- Atteia, O., Védý, J.C., Parriaux, A. & Dambrine, E. (1990):** Influence du sol dans l'évolution physico-chimique des eaux de recharge des nappes souterraines: Projet AQUISOL. *Memoires of the XXIIInd Congress of IAH, EPFL, Lausanne, Part. 1*, 525-531.
- Ayrton, S. (1980):** La géologie de la zone de Martigny-Chamonix (versant suisse) et origine de la nappe de Morcles (exemple de subduction continentale). *Ecl. geol. Helv.*, 73/1, p. 137-172.
- Ayrton, S., Barféty, J.C., Bellière, J., Gubler, Y. & Jemelin, L. (1987):** Notice explicative de la feuille Chamonix. Edition du BRGM, Orléans.
- Baggio, D. (1963):** Contributo alla conoscenza geologica del versante italiano del Monte Bianco. *Extr. Atti dell'Inst. Veneto di sc. lett. ed.63*.
- Baggio, P. (1958):** Il granito del Monte Bianco, e le sue mineralizzazioni uranifere. Studi e ricerche della Divisione geomineraria, Comitato Nazionale per le Ricerche Nucleari, vol I, parte II, Roma, p 527-652, ill., 1 carte h.-t. 1:20000.
- Baggio, P. & Malaroda, R. (1961):** Il traforo del Monte Bianco; prime osservazione geologiche sul tratto dalla progressiva 1300 alla progressiva 2500 (parte italiana). *Rend. Acc. Naz. Lincei* 30, 6, 908.
- Blanc, P. (1976):** Géologie du massif de l'Arpille. Thèse Univ. Lausanne, 147 p.
- Burri, M. & Jemelin, L. (1983):** Notice explicative de l' Atlas géologique de la Suisse au 1:25000. Feuille 1325 Sembrancher. Commission géologique suisse.
- Bussy, F. (1990):** Pétrogenèse des enclaves microgrenues associées aux granitoïdes calco-alcalins: Exemple des massifs varisques du Mont-Blanc (Alpes occidentales) et miocène du Monte Cappane (Ile d'Elbe, Italie), thèse de doctorat no 486, Université de Lausanne.
- Canet, J. (1960):** Etude bibliographique sur les gîtes et gisements des départements de Haute-Savoie et Isère. *Rapp. BRGM*.
- Carme, F. (1970):** Caractères fondamentaux de l'architecture dans l'ensemble Belledonne-Aiguilles Rouges (Massifs cristallins externes, Alpes Françaises). *C.R. Acad. Sc.*, T. 273, D, 1771-1774.
- Castagny, G. (1963):** *Traité pratique des eux souterraines*. Dunod, Paris. 657 p.
- Corbin, P. & Oulianoff, N. (1924):** Relation entre les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges. *Extr. C.R. Acad Sc.* 178.
- Corbin, P. & Oulianoff, N. (1925):** Deux systèmes de filons dans le Mont-Blanc. *C.R. Somm. Soc. Géol. Fr.* 14, 202-203.
- Corbin, P. & Oulianoff, N. (1959):** Note explicative de la carte géologique du Massif du Mont-Blanc. Feuille pliage.

- Cruchet, M. (1983):** Relations entre l'hydrogéologie, le thermalisme et les circulations d'eaux uranifères dans les roches fissurées. Thèse de doctorat de spécialité. Université scientifique et médicale de Grenoble. 235 p.
- Dambrine, E. (1985):** Contribution à l'étude de la répartition et du fonctionnement des sols de haute montagne, massifs des Aiguilles Rouges et du Mont-Blanc. Thèse de doctorat, Université de Paris VII.
- Date, A.R. & Gray, A.L. (1989):** Inductively coupled plasma mass spectrometry. Blackie, USA: Chapman and Hall, New York.
- de Saussure, H.B. (1779):** Voyages dans les Alpes, t. I, t. II. Neuchâtel, Samuel Fauché éd. et librairie du roi.
- Dray, M., Parriaux, A. & Dubois, J.D. (1990):** Image synchrone de la composition isotopique de la couverture neigeuse des Alpes de Suisse occidentale. Hydrology in mountainous regions. I - Hydrological measurements; Water cycle. IAHS Publ. 193, 447-454.
- Dubois, J.D. & Parriaux, A. (1990):** Hydrogeological characteristics of crystalline aquifers. Example of the Mont-Blanc and Aiguilles rouges Massifs (France, Italy and Switzerland): First results. Memoires of the XXIIInd Congress of IAH, EPFL, Lausanne, Part 1, 504-513.
- Dumont, D. (1988):** Campagne géochimique dans la Combe d'Orny et l'étude à grande échelle d'un secteur molybdénifère. Dipl. Univ. Lausanne. 185 p.
- Ellis, A.J. & Mahon, W.A.J. (1977):** Chemistry and Geothermal Systems. Academic Press Inc., New York. 392 p.
- Favre, A. (1861):** Explication de la carte géologique des parties de la Savoie, du Piémont et de la Suisse voisines du Mont-Blanc. Genève.
- Fontes, J.C., Bortolami, G.C. & Zuppi & G.M. (1978):** Hydrologie isotopique du massif du Mont-Blanc. Procced. Symp. IAEA.
- Fouillac, C. & Michard, G. (1981):** Sodium/lithium ratio in water applied to geothermal reservoirs. Geothermics. Vol. 10 N° 1, pp. 55-70, 1981.
- Franceschetti, G. (1960):** Manifestazioni metallifere nel granito del Monte Bianco e negli scisti incassanti (versante italiano). Studi e ricerche della Divisione Geomineraria, Comitato Nazionale per le Ricerche Nucleari, vol. III, Roma, pp. 105-136, ill., 1 carte h.-t- à 1/50'000.
- Garrels, R.M. & Christ, C.L. (1967):** Equilibre des minéraux et de leurs solutions aqueuses. Gauthier-Villars, Paris. 323 p.
- Gourdand, B. (1983):** Hydrogéologie des roches fissurées, étude du massif cristallin du Rissiou et de sa couverture sédimentaire. Thèse de doctorat. Université scientifique et médicale de Grenoble. 238 p.
- Gubler, Y. (1982):** La zone de Chamonix, livret guide de Genève à Chamonix. Société géologique suisse, centenaire 1982. Département de géologie de l'Université de Genève.

- Gudfin, H. (1967):** Observations sur les venues d'eau au cours du percement du tunnel du Mont-Blanc. Bull. B.R.G.M. 4, 96-107.
- Heier, K., & Adams, J.A.S. (1964):** The geochemistry of the alkali metals. Phys. Chem. Earth. 5, 253-318.
- Högl, O. (1980):** Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz. Haupt, Bern und Stuttgart. 302 p.
- Hunziker, J.C., Martimotti, G., Marini, L., & Principe, C. (1990):** The waters of the Simplon Tunnel (Swiss Italian Alps) and Ressources Concil Transactions, Vol. 14, Part II.
- Jacquemin, C. & Bellière, J. (1984):** Origine magmatique des enclaves du granite du Mont-Blanc. Schw. Min. Petr. Mitt., 64, pp. 373-388.
- Jamier, D. (1975):** Etude de la fissuration, de l'hydrogéologie et de la géochimie des eaux profondes des massifs de l'Arpille et du Mont-Blanc. Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel, 153 p.
- Kanishschev, A. D. & Menaker, G.I. (1974):** Mean content of 15 ore elements in the earth's crust in Transbaikalia. Geochem. Intern. 11, 137.
- Kissling, E., Labhart, T. P. & Rybach, L. (1978):** Radiometrische Untersuchungen am Rondogranit. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt., vol. 58, pp. 357-388.
- Kostetskaya, Y.V. & Mordavinova, V.I. (1968):** Distribution of fluorine in the minerals of granitoids of the Dzhida complex, West Transbaykalia. Geochem. Intern. 5, 519.
- Labhart, T.P. et Rybach, L. (1972):** Der Vallorcine Granit und seine radiometrische Anomalien. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt., vol 52, pp. 357-388.
- Labhart, T.P. et Rybach, L. (1974):** Granite und Uranverzungen in der Schweizer Alpen. Geologische Rundschau, Bd. 63, Nr. 1.
- Lahermo, P.W. (1989):** Radiogenic properties of Finnish groundwaters. Water-rock interaction. Miles (ED), Balkema, Rotterdam, 4012-404.
- Lale Demoz, D. (1979):** Studio idrogeologico del massiccio del Monte Bianco. Tesi di Laurea, Torino, 140 p.
- Lebdioui, S. (1985):** Origine des composés du soufre et du carbone dans les eaux d'un massif cristallin fracturé: Le Mont-Blanc. Thèse de doctorat de l'Université de Paris-sud, centre d'Orsay, 166 p.
- Lebdioui, S., Michelot J.L., Fontes J. C., Dray, M. & Zuppi, G.M. (1990):** Origine de la minéralisation des eaux du tunnel sous le Mont-Blanc. Proceed. & Rep. IAS Conf. Lausanne.
- Leelandandam, C. (1953):** Electron microprobe analysis of chlorine in hornblendes and biotites from the charnockitic rocks of Kondapalli, India. Mineral. mag. 37, 362.
- Lugeon, M. (1912):** Sur la tectonique de la Nappe de Morcles et ses conséquences. CR. Ac. Sc. Paris, t. 156, p. 623.

- Lutz, Th. & Parriaux, A. (1988):** The Identification of Uranine in Natural Water by High Performance Liquid Chromatography (HPLC). *Steyr. Beitr. zur. Hydrologie* 39, Seiten 141-147/Graz.
- Lutz, Th., Parriaux, A. & Tissières, P. (1987):** Traçage du Gouffre du Chevrier (Préalpes vaudoises) et méthode d'identification de l'uranine à faible concentration. *Bull. Centre hydrogéologique Univ. Neuchâtel*, No. 7.
- Marro, C. (1986):** Les granitoïdes du Mont-Blanc en Suisse. Thèse de doctorat no 909, Université de Fribourg, 145 p.
- Michelot, J. L. (1982):** Evolution temporelle des teneurs des isotopes stable et en tritium des eaux du tunnel du Mont-Blanc. Estimation des paramètres hydrauliques à l'échelle d'un massif cristallin. Thèse de doctorat 3ème cycle, de l'Université de Paris-sud, centre d'Orsay, 72 p.
- Miller, S.L. & Urey, H.C (1959):** Organic compound synthesis on the primitive earth. *Science* 130, 245.
- Mornod, I. (1970):** Carte hydrogéologique de la zone sourcière du Brocard, Martigny. Rapport technique pour la commune de Martigny, non publié.
- Mrazec, L. (1892):** La protogine du Mont-Blanc et les roches éruptives qui l'accompagnent. Thèse Univ. Genève.
- NAGRA (1986):** Probenahmen und chemische Analysen von Grundwassern aus den Sondierbohrungen. Sondierbohrungen Böttstein, Weiach, Riniken, Schafisheim, Kaisten, Leuggern. Nagra technischer Bericht NTB 85-49. Nagra Baden.
- NAGRA (1989):** Hydrochemische Analysen. Nagra technischer Bericht NTB 89-06, Nagra Baden.
- NAGRA (1991):** Uranium migration in crystalline rock: Capillary solution transport in the Grimsel test site, Switzerland. Nagra technical report NTB 90-15, Nagra Baden.
- Niggli, P, de Quervain, F., R.U., & Winterhalter (1930):** Chemismus schweizerischer Gesteine. Beiträge zur Geologie der Schweiz. Geotechnische Serie, XIV. Lieferung. Bern.
- Onishi, H. & Sandell, E.B. (1955):** Geochemistry of arsenic. *Geochim. Cosmochim. Acta* 7, 1.
- Osmond, J.K. & Cowart, J.B. (1976):** The theory and uses of natural uranium isotopic variations in hydrology. *Atomic Energy Review*, vol 14, pp. 621-679.
- Oulianoff, N. (1920):** Quelques résultats de recherches géologiques dans le massif de l'Arpille et de ses abords. *Ecl. Geol. Helv.*, XVI, 1.
- Oulianoff, N. (1965):** Contribution à l'histoire des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges. *Bull. des Lab. de Géol. Min. Géoph. et du Musée géol. de l'Université de Lausanne*.
- Parejase, E. (1922):** Géologie de la zone de Chamonix comprise entre le Mont-Blanc et les Aiguilles Rouges. *Mém. Soc. Phys. Sc. nat.*, 39, Genève, p. 373-442.
- Parkhurst, D.L., Thorstenson, D.C., & Plummer, L.N. (1980):** Preeq-a computer program for geochemical calculations, USAS Water Resources Investigations 80-96, 210 p.

- Parriaux, A., Dubois, J.D. & Dray, M. (1990 a):** Chemical composition of snow cover on the West Swiss Alps. Hydrology in mountainous regions. I - Hydrological measurements; water cycle. IAHS Publ. 193, 501-509.
- Parriaux, A., Dubois, J.D. et Mandia, Y. (1991):** Persistence des traceurs fluorescents dans les nappes d'eaux souterraines. Hydrogéologie, n° 3, pp. 183-194.
- Parriaux, A., Dubois, J.D., Mandia, Y., Basabe, P. & Bensimon, M. (1990 b) :** The AQUITYP project: towards an aquifer typology in the alpine orogen. Memoires of the XXIIInd Congress of IAH, EPFL, Lausanne, Part 1, 254-262. The AQUITYP project.
- Parriaux, A., Lizskay, M., Mueller, I., & Della Valle, G. (1988):** Guide pratique pour l'usage des traceurs artificiels en hydrogéologie. Publication du Groupe Suisse des Hydrogéologues. GEOLEP, EPFL, Lausanne.
- Pililer, R., and Adams, J.A.S. (1962):** The distribution of thorium, uranium, and potassium in Mancos shales. Geochim. Cosmochim. Acta 26, 1115.
- Raumer, J., Von, Galetti, G., Pfeifer, H.R. & Oberhänsli, R. (1990):** Amphibolites from Lake Emosson / Aiguilles Rouges, Switzerland: Tholeiitic basalts of a Paleozoic continental rift zone. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 70, 419-435.
- Raumer, J., Von (1984):** The External Massifs, relics of Variscan Basement in the Alps. Geol. Rundschau, t. 73/1.
- Raumer, J., Von (1987):** Les massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges: Témoins de la formation de croûte varisque dans les Alpes occidentales. Géologie alpine, 63.
- Ravagnani, D. (1974):** I giacimenti uraniferi italiani e i loro minerali. Gruppo mineralogico Lombardo, vol. Milano, 188 p., ill.
- Richardson, K.A. (1964):** Thorium, uranium and potassium in Conway granite, New Hampshire, USA. In J.A.S. Adams and W.M. Lowder (eds.), The natural radiation environment, p. 51. Chicago University Press.
- Rigault, G., Ferraris, G. (1962):** Ricerche sulla fluorite rosea del Monte Bianco. Atti. Accad. Sc. Torino, 96, 12 p.
- Roy, N.N. (1965):** The mineralogy of potassium-barium feldspaths series. The determination of optical properties of natural members. Mineral. Mag. 35, 508.
- Rybach, L., Von Raumer, J. & Adams, J.A.S. (1966):** A gamma spectrometric Study of Mont-Blanc granite samples. Beiträge zur Geologie der Schweiz, kleinere Mitteilungen, Nr. 37.
- Rybach, L. & Labhart, T.P. (1973):** Regelmässigkeiten der Radioaktivitätsverteilung in granitischen Gesteinskörpern. Beiträge zur Geologie der Schweiz. Kleinere Mitteilungen, Nr. 61.
- Sarrazin, G., Fouillac, C. & Michard, G. (1976):** Etude de l'acquisition d'éléments dissous par les eaux de lessivage des roches granitiques sous climat tempéré. Geochimica et Cosmochimica Acta. Vol. 40. pp. 1481-1486. Pergamon Press, Great Britain.

- Schmassmann, H. (1984):** Beschaffenheit der Tiefengrundwässer in der zentralen Nordschweiz und angrenzenden Gebieten. Nagra Technischer Bericht NTB 84-21, Nagra, Baden.
- Schoeller, M. (1962):** Les eaux souterraines. Ed. Masson, Paris.
- Service hydrologique et géologique national (1987):** Annuaire hydrologique de la Suisse.
- Service hydrologique et géologique national (1989):** Sondierbohrung Leuggern, Geologie. Nagra Technischer Bericht 86-05.
- Standard Method (1985):** Standard methods for the examination of water and wastewater. 14th ed., American Public and Health Association, Washington DC, 1193 p.
- Steck, A. (1966):** Petrographische und tektonische Untersuchungen am Zentralen Aargranit und seinen altkristallinen Hällgesteinen im westlichen Aarmassiv im Gebiet Belalp-Grisighorn. 99 p.
- Steck, A., und Hügi, T.H. (1970):** Das Auftreten des Molybdänglanzes im westlichen Aarmassiv und gleichen Region. Beitr. zur Geol. der Schweiz. N° 51, 257 - 276.
- Stripa project (1985):** Hydrogeological and hydrogeochemical Investigations in boreholes. Final report on the phase I geochemical Investigations of the Stripa groundwaters, Technical report 85-86. Swedish nuclear, fuel and waste management.
- Sydney, P., Clark, Fr. and Nibblett, E.R. (1956):** Terrestrial heat flow in the Swiss Alps. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. Geophysical supplement. Vol. 7, n° 4 p. 176-1
- Tardy, Y. (1969):** Géochimie des altérations, étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr., 31, 199 p., Strasbourg.
- Turekian, K.K., and Wedepohl, K.H. (1961):** Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. Bull. Geol. Soc. Am. 72, 175-192. UNESCO, Neuherberg, C.R.G., IAEA Vienna 1, 411-440.
- Vorontsov, A. and Lin, N.G. (1966):** Rubidium and lithium in the granitoid of Bugulmin complex (Eastern Sayans). *Geochem. Internat.* 3, 1108-1116.
- Vuataz, F.D., Goff, F. (1987):** Water Geochemistry and Hydrogeology of Shallow Aquifer at Roosevelt Hot Springs, Southern Utah. A Hot Dry Rock Prospect. Los Alamos National Laboratory. NM., USA.
- Vuataz, F.D. (1982):** Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limitrophes. *Mat. géol. de la Suisse, hydrol.* N° 29. Kümmerly et Frey, Berne.
- Woodtli, R., Jaffé, F. & von Raumer, J. (1987):** Prospection minière en Valais: Le projet Uromine. Matériaux pour la carte géologique de la Suisse, série géot. Commission Géotechnique Suisse. Kümmerly & Frey SA, Berne. 179 p.

Annexes

Annexe 4.1

**Liste générale des sites de mesures et de prélèvements
(eaux souterraines, torrents, pluies, neiges et eaux de percolation des sols)**

N°	Nom de la source	Réseau	Commune, pays	Date*	N° carte 1. 25 000	Y	X	Altitude (m)	Aquifère	Type de captage
1	Brocard inférieur	I	Martigny, Suisse	17.02.87	1325	570.030	102.490	570	Granite MB	Galerie
2	Brocard supérieur	III	"	03.06.87	"	570.040	102.350	600	"	Tranchée
3	Borgeau	III	"	28.08.86	"	571.300	102.300	670	"	"
4	Bovernier gare	III	Bovernier, Suisse	04.02.88	"	572.500	103.010	615	"	Naturel
5	Bovernier thermique	III	"	01.11.87	"	573.650	103.350	640	"	Tranchée
6	Bonnette	I	Martigny, Suisse	11.11.88	"	571.600	101.700	1200	"	Forage
7	Chamois	II	"	11.11.88	"	571.600	100.500	1100	"	Tranchée
8	Plan de l'Au	III	"	03.06.87	"	572.050	099.950	1340	"	Naturel
9	Dumand	III	Champey, Suisse	23.08.89	1345	572.500	097.150	1720	"	"
10	Mariotti, réservoir	III	"	16.01.89	"	572.950	099.600	1314	"	"
11	Président	III	"	25.02.87	"	573.000	099.530	1320	"	"
12	Métral	III	"	25.02.87	"	573.000	099.530	1320	"	"
13	Méleze	III	"	25.02.87	"	573.000	099.530	1320	"	"
14	Giète	III	"	14.07.87	"	568.850	100.000	2080	Gneiss AR	"
15	Ravoire	III	"	04.02.88	"	570.000	106.000	1100	"	Galerie
16	Bienvenue	III	"	06.02.87	"	569.550	456.330	460	"	Forage
17	Cerniat inférieur	III	"	03.06.86	"	567.400	105.000	1500	"	Tranchée
18	Cerniat supérieur	III	"	03.06.86	"	567.470	104.950	1540	"	"
19	Fontaines	I	Finhaut, Suisse	04.02.88	1324	563.790	103.650	1360	Granite AR	Galerie
20	Source "radioactive"	III	"	17.12.87	"	563.750	103.700	920	"	Tranchée
21	Combasse 1	III	"	12.11.87	"	567.950	103.800	1430	"	"
22	Combasse 2	III	"	12.11.87	"	567.950	103.800	1430	"	"
23	Combasse 3	III	"	12.11.87	"	567.950	103.800	1430	"	"
24	Cheneau supérieur	III	"	03.06.86	"	566.173	099.313	1567	"	"
25	Cheneau inférieur	II	Trient, Suisse	21.08.87	"	556.125	099.296	1547	Gneiss MB	"
26	Restaurant, Emosson	III	Finhaut, Suisse	21.08.87	"	560.250	102.900	2000	"	Tranchée
27	Col des Montets	II	"	30.10.87	1325	559.825	094.800	1530	Granite AR	"
28	Eyrald	III	"	19.06.86	"	560.000	094.250	1440	"	"
29	Lognan	III	"	13.09.89	1344	561.900	091.020	1900	"	"
30	Chapeau inférieur	III	Chamonix, France	04.06.86	"	559.700	088.800	1680	"	"
31	Chapeau supérieur	II	"	14.12.88	"	559.725	088.800	1720	"	"
32	Betty	II	"	26.02.88	3660 E	950.070	211.195	1100	"	"
33	Nant Provent	I	"	26.02.88	3660 W	951.600	211.55	1200	"	"
34	Enchapeleuse	II	"	26.02.88	3531 E	094.805	210.595	2000	Gneiss MB	Tranchée
35	Flatière F1	III	Les Houches, France	21.01.88	"	944.120	2110.016	1418	Carbonifère	Forage 50 m
36	Flatière F2	III	"	21.01.88	"	944.087	2109.95	1400	"	Forage 73 m
37	Flatière F3	III	"	21.01.88	"	944.025	2110.05	1397	"	Forage 94 m
38	Flatière F4	III	"	21.01.88	"	943.995	2110.035	1394	"	Forage 78 m
39	Flatière F5	III	"	21.01.88	"	943.940	2110.07	1301	"	Forage 38 m
40	Flatière F6	III	"	21.01.88	"	943.945	2110.055	1302	"	Forage 55 m

*Echantillons utilisés pour les représentations spatiales de la variabilité des paramètres.

N°	Nom de la source	Dist. Réseau (m)	Commune, pays	Date*	N° carte I. 25 000	Y	X	Altitude (m)	Aquifère	Type de captage
42	Prélet 1		Les Contamines, France	25.11.86	3531 E	094.165	209.980	1400	Gneiss MB	Tranchée
43	Prélet 2A		"	25.11.86	"	094.165	209.980	1400	"	"
44	Prélet 2B		"	25.11.86	"	094.165	209.980	1400	"	"
45	Feugier 1		"	25.11.86	"	094.160	200.075	1500	"	"
46	Feugier 2		"	25.11.86	"	094.160	200.075	1500	"	"
47	Feugier 3		"	25.11.86	"	094.160	200.075	1500	"	"
48	Feugier 4		"	25.11.86	"	094.160	200.075	1500	"	"
49	Gracenièr		"	25.11.86	"	094.030	209.790	1200	"	"
50	Meyens inférieur		Courmayeur, Italie	27.10.86	282	563.500	074.700	1210	Helvétique	Tranchée
51	Meyens supérieur		"	29.10.87	"	567.600	074.650	1470	"	"
52	Frebouze		"	29.10.87	"	567.600	078.010	1660	Granite MB	"
53	Galerie nord, Emosson	870	Finhaut, Suisse	06.04.90	"	560.250	102.900	2000	Gneiss AR	Galerie
54	"	960	"	06.04.90	1324	561.650	105.850	2000	"	"
55	"	1340	"	06.04.90	"	561.400	105.580	2000	"	"
56	"	1480	"	06.04.90	"	561.300	105.500	2000	"	"
57	"	1853	"	06.04.90	"	560.995	105.150	2000	"	"
58	"	2160	"	06.04.90	"	560.800	105.050	2000	"	"
59	"	2180	"	06.04.90	"	560.800	105.000	2000	"	"
60	"	2895	"	06.04.90	"	560.300	104.500	2000	"	"
61	"	3092	"	06.04.90	"	560.150	104.350	2000	"	"
62	Galerie ouest, Emosson	604	Argentière, France	14.04.87	1344	556.000	095.500	1959	Gneiss AR	Galerie
63	"	1050	"	14.04.87	"	556.050	095.940	1958	"	"
64	"	1077	"	14.04.87	"	556.060	095.975	1958	"	"
65	"	1170	"	14.04.87	"	556.060	095.975	1958	"	"
66	"	2012	"	14.04.87	"	556.200	096.900	1956	"	"
67	"	3708	"	14.04.87	1324	557.100	098.175	1953	"	"
68	"	3804	"	14.04.87	"	557.200	098.200	1953	"	"
69	"	3980	"	14.04.87	"	557.360	098.320	1953	"	"
70	"	5708	"	14.04.87	"	558.750	099.240	1950	"	"
71	"	6555	"	14.04.87	"	558.900	100.000	1948	"	"
72	"	7300	"	14.04.87	"	559.025	100.725	1947	"	"
73	Galerie est, Emosson	697	Trient, Suisse	17.03.88	"	563.260	099.270	1517	Mésozoïque	"
74	"	1970	"	17.03.88	"	564.420	098.750	1520	"	"
75	"	2795	"	17.03.88	"	565.160	098.435	1523	Gneiss MB	"
76	"	2813	"	17.03.88	"	565.200	098.420	1523	"	"
77	"	3613	"	17.03.88	"	565.970	098.180	1526	"	"
78	"	3618	"	17.03.88	"	565.940	098.170	1526	"	"
79	"	3622	"	17.03.88	"	565.955	098.170	1526	"	"
80	"	3629	"	17.03.88	"	565.960	098.165	1526	"	"
81	"	7090	"	17.03.88	1345	568.400	095.880	1541	Granite MB	Galerie

*Echantillons utilisés pour les représentations spatiales de la variabilité des paramètres.

N°	Nom de la source	Dist. (m)	Réseau	Commune, pays	Date *	N° carte 1: 25 000	Y	X	Altitude (m)	Aquifère	Type de captage
82	Galerie est, Emosson	7130	III	Trient, Suisse	17.03.88	1345	568.450	095.860	1541	Granite MB	Galerie
83	"	7425	III	"	17.03.88	"	568.680	095.680	1542	"	"
84	"	7530	III	"	17.03.88	"	568.770	095.620	1543	"	"
85	"	7565	III	"	17.03.88	"	568.800	095.600	1543	"	"
86	"	7625	III	"	17.03.88	"	568.850	095.550	1543	"	"
87	"	7640	III	"	17.03.88	"	568.860	095.410	1543	"	"
88	"	7880	III	"	17.03.88	"	569.030	095.410	1544	"	"
101	"	10555	III	"	17.03.88	"	571.270	093.710	1551	"	"
102	"	10556	III	"	17.03.88	"	571.280	093.705	1551	"	"
103	"	11035	III	"	17.03.88	"	571.300	093.000	1552	"	"
114	"	1614	III	"	11.02.88	"	563.750	091.860	2048	"	"
115	"	1630	III	"	11.02.88	"	563.750	091.875	2042	"	"
116	"	1800	III	"	11.02.88	"	563.750	092.045	2046	"	"
117	"	2100	III	"	11.02.88	"	563.750	092.350	2044	"	"
118	"	2200	III	"	11.02.88	"	563.750	092.450	2043	"	"
119	"	2700	III	"	11.02.88	"	573.750	092.800	2043	"	"
120	"	2762	III	"	16.12.86	"	563.750	093.020	2039	"	"
121	"	2806	III	"	11.02.88	"	563.730	093.050	2039	"	"
122	"	4890	III	"	11.02.88	"	563.760	095.100	2023	"	"
123	"	5080	III	"	11.02.88	"	563.825	095.290	2023	"	"
124	"	5455	III	"	11.02.88	"	563.900	095.675	2019	"	"
125	"	6080	III	"	16.12.86	"	563.900	096.280	2014	Granite MB	Galerie
126	Tunnel du Mont Blanc	630	III	Chamonix, France	29.09.88	3630W	951.179	2108.497	1300	Gneiss MB	"
127	"	660	III	"	29.09.88	"	951.197	2108.473	1300	"	"
128	"	2300	III	"	29.09.88	"	952.184	2107.163	1300	Granite MB	"
129	"	2810	III	"	29.09.88	"	952.491	2106.756	1300	"	"
130	"	3300	III	"	29.09.88	"	952.786	2106.365	1300	"	"
131	"	3580	III	"	29.09.88	"	952.954	2106.141	1300	"	"
132	"	4500	III	"	29.09.88	"	953.508	2105.406	1300	"	"
133	"	4501	III	"	29.09.88	"	953.509	2105.406	1300	"	"
134	"	4956	III	"	29.09.87	"	953.783	2105.042	1300	"	"
135	"	5030	III	"	29.09.88	"	953.827	2104.983	1300	"	"
136	"	5100	III	"	29.09.88	"	953.869	2104.927	1300	"	"
137	"	5407	III	"	29.09.88	"	954.054	2104.682	1300	"	"
138	"	5759	III	"	29.09.87	"	954.266	2104.401	1300	"	"
139	"	6780	III	Courmayeur, Italie	03.10.88	"	954.880	2103.585	1300	"	"
140	"	7140	III	"	03.10.88	"	955.097	2103.298	1300	"	"
141	"	7380	III	"	03.10.88	"	955.241	2103.106	1300	"	"
142	"	8020	III	"	03.10.88	"	955.627	2102.595	1300	"	"
143	"	8035	III	"	05.06.88	"	955.636	2102.583	1300	"	"
144	"	8089	III	"	05.10.87	"	955.668	2102.540	1300	"	"
145	"	8098	III	"	05.10.87	"	955.673	2102.533	1300	"	"

*Echantillons utilisés pour les représentations spatiales de la variabilité des paramètres.

N°	Nom de la source	Dist. (m)	Réseau	Commune, pays	Date *	N° carte 1: 25 000	Y	X	Altitude (m)	Aquifère	Type de captage
146	Tunnel du Mont Blanc	8139	III	Courmayeur, Italie	05.10.87	3630W	955.698	2102.500	1300	Granite MB	Galerie
147	"	8130	III	"	03.10.88	"	955.693	2102.507	1300	"	"
148	"	8150	III	"	03.10.88	"	955.705	2102.491	1300	"	"
149	"	8211	III	"	05.10.87	"	955.741	2102.443	1300	"	"
150	"	8230	III	"	03.10.88	"	955.753	2102.428	1300	"	"
151	"	8240	III	"	05.10.87	"	955.759	2102.42	1300	"	"
152	"	8250	III	"	03.10.88	"	955.765	2102.412	1300	"	"
153	"	8290	III	"	03.10.88	"	955.789	2102.380	1300	"	"
154	"	8330	III	"	03.10.88	"	955.813	2102.348	1300	"	"
155	"	8285	III	"	05.10.87	"	955.786	2102.384	1300	"	"
156	"	8836	III	"	05.10.87	"	956.118	2101.944	1300	"	"
157	"	8924	III	"	05.10.87	"	956.171	2101.873	1300	"	"
158	"	9385	III	"	05.10.87	"	956.448	2101.505	1300	"	"
159	"	9420	III	"	03.10.88	"	956.469	2101.477	1300	"	"
160	"	9885	III	"	05.10.87	"	956.749	2101.106	1300	"	"
161	Château d'Eau	0	II	Finhaut, Suisse	11.11.88	1324	561.850	101.850	1930	Gneiss AR	Galerie
162	"	268	III	"	05.12.86	"	567.600	101.950	1930	"	"
163	"	810	III	"	05.12.86	"	561.010	102.195	1930	"	"
164	"	1000	III	"	05.12.86	"	560.700	102.350	1930	"	"
165	"	1055	III	"	05.12.86	"	560.650	102.380	1930	"	"

* Echantillons utilisés pour les représentations spatiales de la variabilité des paramètres.

N°	Torrents	Réseau	Commune, pays	Date *	N° carte 1: 50 000	Y	X	Altitude (m)
166	Trient	IV	Trient, Suisse	23.08.89	282	565.800	99.000	
167	Saleina	IV	Orsières, Suisse	23.08.89	"	573.400	92.700	
169	Dard	IV	Chamonix, France	08.09.88	"	554.300	83.700	
170	Creuset	IV	Chamonix, France	08.09.88	"	155.200	84.150	
171	Bossons	IV	"	08.09.88	"	533.800	83.700	
172	Taconnaz	IV	"	08.09.88	"	552.800	83.000	
173	Bourgeat	IV	"	08.09.88	"	551.300	82.900	
174	Praz Moulin	IV	Courmayeur, Italie	15.05.88	"	563.400	74.700	
175	Meyens	IV	"	19.05.88	"	563.600	74.800	
176	Tronchet	IV	"	19.05.88	"	566.900	77.000	
Neiges								
178	Bel Oiseau	V	Finhaut, Suisse	15.03.88	282	561.010	103.470	2500
177	Château d'Eau	V	Finhaut, Suisse	15.03.88	"	561.870	101.780	1830
179	Giète	V	Martigny, Suisse	15.03.88	"	568.430	100.700	1853
180	Lac du Dru	V	Trient, Suisse	15.03.88	"	569.030	092.960	2865
181	Col d'Orny	V	Trient, Suisse	15.03.88	"	569.230	092.960	3250
Pluies, sols								
182	Lognan	VI	Argentière, France			561.400	090.850	1920

* Echantillons utilisés pour les représentations spatiales de la variabilité des paramètres.

Annexe 5.1

Composition modale de quelques roches représentatives
des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges

Aiguilles Rouges	Auteurs	Situation	Coord. X	Coord. Y	Quartz %	Feldspath %	Plagioclase %	Mica %	Chlorite %	Amphibole %	Grenat %
Granite central*	Marro, 1986	Nord du massif			31.0	24.6	37.2	5.9		0.05	
Granite de bordure*	"	"			34.1	22.9	36.6	41.8		0.08	
Rhyolite*	"	"			31.6	22.3	38.1	6.2		0	
Mont-Blanc	Auteurs	Situation	Coord. X	Coord. Y	Quartz %	Feldspath %	Plagioclase %	Mica %	Chlorite %	Amphibole %	Grenat %
Gneiss ocellé	Niggli, 1930	Col Fenestral	562.260	105.100	33.7	2.6	44.2	19.5			
Granitogneiss	"	Emosson	560.900	102.000	26	10.7	55.7	7.6			
SchiferGneiss	"	Emosson	560.320	102.250	40		20	40			
Gneiss	"	Barberine	559.870	102.800	30	32	28	10			
Gneiss à 2 micas	Laurent, 1968	Brévent			25		34.5	22.2	12.7		1.7
Amphibolite	Von Raumer, 1990	Emosson			3		32	0			6
Granite Vallorcine	Niggli, 1930	Le Chatelard			25	35	30	9		57	

* Valeurs moyennes.

Annexe 5.2

**Composition chimique de quelques échantillons de roches représentatives
des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges,
exprimées en pour cent poids et en ppm**

Mont Blanc	Auteurs	Lieux	Coord x	Coord y	Na(%)	K (%)	Mg(%)	Ca (%)	Si (%)	Ti (%)	Al (%)	Mn (%)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	Ba (ppm)	U (pp)
Granite central	Marro	Orny	096.630	570.880	1.26	1.83	0.31	0.99	34.38	0.180	3.50	0.046	257	21	465	<
Granite central	Marro	Catogne	101.690	572.110	1.35	1.96	0.34	0.71	34.50	0.174	3.63	0.046	295	77	459	8
Granite central	Marro	Tour	094.780	567.220	1.32	1.95	0.25	0.99	33.93	0.168	3.63	0.046	288	90	466	<8
Granite central	Marro	Ecandies	095.655	569.195	1.32	1.99	0.29	1.03	34.31	0.174	3.62	0.039	250	118	601	<8
Granite central	Marro	Argentière	088.840	566.960	1.38	1.77	0.58	1.29	33.37	0.210	3.76	0.046	216	144	641	
Granite central	Dubois	Ecandies	094.940	569.620	1.68	1.76	0.17	0.91	34.13	0.108	3.70	0.031	188	94	412	4
Granite bordure	Marro	Breya	094.815	572.165	1.35	1.74	0.37	0.99	34.74	0.162	3.48	0.046	252	125	450	<8
Granite bordure	Marro	Orny	096.630	570.880	1.35	1.74	0.29	0.96	35.02	0.126	3.44	0.046	214	112	465	<8
Granite bordure	Marro	Argentière	089.310	567.550	1.38	1.90	0.26	0.76	34.98	0.187	4.42	0.031	170	73	459	<8
Leucogranite	Marro	Orny	95.735	571.035	1.47	2.1	0.10	0.11	36.19	0.012	3.30	0.031	440	10	39	<8
Rhyolite	Marro	Breya	096.600	573.740	1.48	1.79	0.23	0.59	35.25	0.084	3.59	0.039	169	110	803	<8
Granite mylonitique	Dubois	Bonnette	101.700	571.600	1.10	2.10	0.23	1.28	34.39	0.126	3.37	0.031	325	93	368	6
Gneiss leucocrate	Parriaux	Bovine	100.700	568.800	1.00	2.02	0.12	0.18	35.77	0.066	3.35	0.015	280	37	68	0
Gneiss	Parriaux	Bovine	100.800	569.200	0.85	0.17	0.71	0.62	33.32	0.138	3.99	0.031	151	105	1221	0
Gneiss à muscovite	Parriaux	Bovine	100.600	569.600	1.55	1.89	0.11	0.32	34.62	0.048	3.88	0.023	301	40	121	2
Gneiss ocellé	Parriaux	Bovine	100.420	569.017	1.14	1.22	2.91	3.24	26.83	0.660	4.31	0.085	103	273	898	0
Quartz	Parriaux	Bovine	100.400	569.018	0.14	0.10	0.10	0.18	45.11	0.018	0.30	0.008	6	48	75	0
Paragneiss	Parriaux	Bovine	100.395	569.018	1.77	1.16	0.55	0.92	32.64	0.126	4.25	0.039	102	171	774	0
Gneiss	Parriaux	Bovine	099.180	568.500	1.49	1.12	0.85	0.53	33.26	0.228	3.95	0.031	90	139	546	0
Gneiss	Parriaux	Bovine	099.950	569.000	0.97	1.47	1.52	1.07	30.20	0.498	4.15	0.046	134	237	889	2
Amphibolite	Niggli	Chamonix			0.54	1.27	3.57	6.11	23.17		4.93					
Aiguilles Rouges																
Granite	Dubois	Finhaut	101.500	571.580	1.32	2.27	0.21	0.39	34.23	0.114	3.72	0.015	243	105	367	0
Orthogneiss	V. Raumer	Emosson	108.635	572.900	1.84	0.05	0.31	2.13	34.84	0.132	3.72	0.023	178	77	467	
Ultramylonite	Favre	Emosson	102.870	560.130	1.11	1.85	0.63	0.84	32.45	0.306	3.99	0.039	159	101	841	
Ultramylonite	Favre	Emosson	102.880	559.090	1.18	1.75	0.59	1.09	32.59				146	149	897	
Ultramylonite	Favre	Emosson	104.604	560.830	0.98	1.63	0.87	1.11	32.06				124	178	1132	
Ultramylonite	Favre	Emosson	103.000	560.040	1.05	1.56	0.81	1.41	31.73				133	200	1160	
Ultramylonite	Favre	Emosson	102.980	560.050	1.12	1.56	0.88	1.16	31.62				122	193	1056	
Micaschist	Favre	Emosson	101.670	558.770	1.18	1.51	0.70	1.75	32.09				121	164	1091	
Gneiss	Favre	Emosson	101.670	560.300	1.01	1.89	0.91	0.91	32.50	0.336	3.25	0.054	167	186	801	
Amphibolite	V. Raumer	Emosson			0.64	0.08	3.59	6.17	23.77		3.61	0.216	3	123	110	

Annexe 5.3

Données analytiques des lixiviats de poudre de roche

N°	Roches	Coord y	Coord x	Li (µg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	Sr (mg/l)	F (mg/l)	Cl (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	Rb (µg/l)	Mo (µg/l)	Ba (µg/l)	U (µg/l)
1	Granite Vallorcine.	562.600	102.800	8	8.7	13.7	1.9	2.5	0.019	0.3	18.4	78	5.9	12.6	70	8	8	0.2
2	Granite Saleina	572.500	092.800	18	9.0	22.6	3.3	14.7	0.047	0.3	21.2	135	7.7	16.5	88	5	14	0.5
3	Granite Aiguille du Midi	553.500	2107.600	39	14.2	19.8	2.7	18.7	0.057	8.4	25.3	86	10.6	22.7	97	15	23	6.9
4	Gneiss migmatitique	563.010	090.800	3	13.5	11.2	1.7	26.2	0.807	0.1	12.7	191	6.3	13.5	17	10	26	0.3
5	Gneiss à muscovite	560.010	102.800	2	8.7	14.6	8.0	6.6	0.066	0.2	22.2	92	16.9	36.2	15	8	21	0.2
6	Gneiss migmatitique	566.200	099.300	9	11.6	17.7	8.1	38.5	0.119	0.2	18.0	212	8.3	17.8	47	8	24	0.5
7	Gneiss leucocrate	100.700	568.800	9	28.4	52.2	1.1	3.0	0.010	1.0	11.6	159	5.6	12.0	171	6	1	2.5
8	Gneiss	569.200	100.700	9	11.4	44.1	4.0	3.8	0.038	0.3	15.5	133	6.7	14.4	65	6	43	1.1
9	Gneiss à muscovite	569.600	100.600	7	1.6	28.1	0.8	4.1	0.036	1.3	14.2	94	5.6	12.0	127	5	3	6.2
10	Microgneiss ocellé	569.162	100.420	2	13.3	29.7	12.9	11.1	0.039	0.2	18.3	152	8.0	17.1	26	5	33	0.3
11	Quartz filonien	569.170	100.400	30	7.9	6.2	2.4	4.7	0.112	0.2	32.4	25	11.5	24.6	6	7	16	0.1
12	Paragneiss	569.280	099.820	10	13.6	28.2	4.4	118	0.236	0.2	17.3	340	6.9	14.8	47	5	50	1.7
13	Gneiss follié et fissuré	568.500	099.180	3.	16.5	25.1	5.9	6.4	0.020	0.2	20.5	128	7.3	15.6	45	6	21	0.5
14	Gneiss	568.980	099.930	2	9.5	23.2	6.0	4.6	0.049	0.2	23.9	72	20.7	44.4	22	6	27	0.3
15	Amphibolite	560.000	108.750	6	5.3	9.2	11.4	34.0	0.084	0.1	21.0	192	7.7	16.5	20	8	7	0.4
	Eau Brocard 10.2.88	570.300	102.490	1.6	1.8	1.3	0.6	13.0	0.025	0.5	0.7	40	9.0	19.3	0.2	1.6	0.5	7.9

Annexe 7.1

**Tables des données physico-chimiques des eaux souterraines
et des torrents**

Identification Brocard inf, Martigny

N°	1									
Jour	22	17	6	21	20	10	16	30	15	31
Mois	10	2	4	7	10	2	5	6	8	10
Année	86	87	87	87	87	88	88	88	88	88
Débit (l/m)	1675	1700	2000							
Température (°C)	7.5	7.2	7.0	7.5	7.3	7.3	7.2	7.1	7.5	
pH	7.7	7.5	7.7	7.4	7.5		6.4	6.7	7.0	
RH (mv)		+289	+240	+240	+350	+128	+244	+152		+230
Conductivité (µS/cm)	71	71	74	73	70	70		77	72	
Dureté totale (°F)	3.6	3.5	3.2	3.6	3.6		3.5	3.5	3.6	3.5
Li (mg/l)	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Na	1.79	1.80	1.76	1.69	1.66	1.71	1.70	1.69	1.72	1.83
K	1.36	1.34	1.34	1.38	1.28	1.31	1.33	1.30	1.36	1.38
Mg	0.60	0.60	0.60	0.60	0.50	0.70	0.60	0.60	0.40	0.50
Ca	13.30	13.00	14.20	13.20	13.40	13.40	13.50	13.00	13.40	13.30
Sr	0.02	0.03	0.56	0.11	0.10	0.01	0.01	0.01	0.18	0.05
F	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4
Cl	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.8	0.6	0.8	0.7	0.6
NO ₃	1.30	1.20	1.70	1.80	1.90	1.50	2.30	1.70	1.40	1.50
HCO ₃	40.3	39.7	42.7	41.5	42.7	40.3	42.5	40.0	43.3	43.7
SO ₄	6.90	7.50	7.20	6.70	7.50	9.00	8.40	7.90	7.80	7.70
Cations (meq/l)	0.82	0.81	0.88	0.82	0.82	0.84	0.83	0.81	0.82	0.82
Anions	0.86	0.86	0.91	0.89	0.92	0.92	0.95	0.89	0.94	0.94
TiD (meq/l)	1.69	1.67	1.80	1.70	1.74	1.76	1.78	1.70	1.76	1.76
SiO ₂ (mg/l)	8.56	8.56	8.62	8.98	8.73	8.49	8.56	8.45	9.63	8.98
B (µg/l)										
TSD (mg/l)	75	75	80	77	79	78	80	76	80	80
As (µg/l)		38.3								
Rb		0.2								
Mo		1.6								
Ba		0.5								
W										
U		7.9								

Identification Brocard inf, Martigny Bro sup

N°	1			2
Jour	14	8	7	3
Mois	12	5	11	6
Année	88	89	89	87
Débit (l/m)	2000			150
Température (°C)	7.0	7.3	7.3	7.4
pH	7.7	6.3	6.0	
RH (mv)	+240	+215	+183	
Conductivité (µS/cm)	74	73		78
Dureté totale (°F)	3.2	3.5	3.7	3.7
Li (mg/l)	0.002	0.002	0.002	0.003
Na	1.76	1.76	1.71	1.76
K	1.34	1.34	1.31	1.49
Mg	0.70	0.70	0.60	0.70
Ca	14.20	13.20	12.80	13.14
Sr	0.01	0.08	0.02	0.03
F	0.5	0.4	0.5	0.4
Cl	0.4	0.3	0.4	0.4
NO ₃	0.00	1.00	1.40	0.90
HCO ₃	42.7	39.0	40.3	39.7
SO ₄	7.20	7.30	6.80	6.60
Cations (meq/l)	0.87	0.83	0.80	0.83
Anions	0.89	0.84	0.86	0.83
TiD (meq/l)	1.76	1.66	1.66	1.66
SiO ₂ (mg/l)	8.35	8.55	8.60	8.34
B (µg/l)				10
TSD (mg/l)		74	74	73
As (µg/l)				30.9
Rb				0.1
Mo				1.7
Ba				0.7
W				
U				9.2

Identification Borgeau		
N°		3
Jour		28
Mois		8
Année		86
Débit	(l/m)	
Température	(°C)	7.9
pH		
RH	(mv)	
Conductivité	(μ S/cm)	139
Dureté totale	(°F)	7.3
Li	(mg/l)	0.003
Na	"	1.60
K	"	2.71
Mg	"	1.10
Ca	"	27.20
Sr	"	0.12
F	"	0.1
Cl	"	0.8
NO ₃	"	1.30
HCO ₃	"	69.6
SO ₄	"	23.60
Cations	(meq/l)	1.59
Anions	"	1.68
TID	(meq/l)	3.27
SiO ₂	(mg/l)	6.70
B	(μ g/l)	4
TSD	(mg/l)	135
As	(μ g/l)	7.8
Rb	"	0.1
Mo	"	5.4
Ba	"	2.9
W	"	
U	"	4.9

Identification Bovernier						
N°		4	4	4	4	5
Jour		24	6	12	4	12
Mois		10	2	11	2	11
Année		86	87	87	88	87
Débit	(l/m)			350	100	120
Température	(°C)	12.1	8.6	11.5	9.1	20.8
pH						7.7
RH	(mv)					
Conductivité	(μ S/cm)	321	341	310	346	294
Dureté totale	(°F)	15.5	16.8	16.0	17.3	9.3
Li	(mg/l)	0.035	0.035	0.034	0.036	0.152
Na	"	10.35	10.65	10.49	11.10	41.00
K	"	3.91	3.85	3.78	3.86	2.75
Mg	"	4.30	4.50	4.30	4.50	1.20
Ca	"	55.00	59.90	57.00	62.00	35.00
Sr	"	0.38	0.50	0.40	0.36	0.34
F	"	0.8	0.8	0.9	0.8	3.8
Cl	"	12.4	15.5	13.0	17.8	15.1
NO ₃	"	5.10	6.70	6.30	11.80	1.80
HCO ₃	"	148.8	152.5	152.5	159.8	95.2
SO ₄	"	37.20	39.70	35.70	40.80	57.00
Cations	(meq/l)	3.66	3.94	3.76	4.06	3.73
Anions	"	3.69	3.91	3.76	4.20	3.40
TID	(meq/l)	7.35	7.85	7.52	8.26	7.13
SiO ₂	(mg/l)	11.02	10.59	10.59	10.59	22.46
B	(μ g/l)	38	34	33	32	108
TSD	(mg/l)	289	305	295	324	276
As	(μ g/l)				3.2	4.5
Rb	"				5.7	31
Mo	"				9.9	18.9
Ba	"				32	23.5
W	"					
U	"				9.9	15.5

Identification Chamois, Martigny

Identification		Chamois, Martigny						
N°		7						
Jour		2	28	11	25	12	30	11
Mois		5	8	11	5	11	6	11
Année		86	86	86	87	87	88	88
Débit	(l/m)	200	120	15.0	600	110	630	22.0
Température	(°C)	7.0	7.1	6.7	7.0	6.7	6.7	7.3
pH							5.8	5.9
RH	(mv)						+170	+222
Conductivité	(µS/cm)	44	56	66	47	65	54	68
Dureté totale	(°F)	2.4	2.6	2.8	2.3	3.0	2.6	3.2
Li	(mg/l)	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.001
Na	"	1.95	2.04	2.17	1.99	2.07	1.67	2.90
K	"	1.07	1.08	1.11	1.05	1.11	1.03	1.09
Mg	"	0.60	0.70	0.70	0.60	0.70	0.60	0.70
Ca	"	8.40	9.30	10.00	8.20	10.70	9.40	8.53
Sr	"	0.05	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.04
F	"	0.8	1.0	1.6	0.0	1.5	1.2	0.1
Cl	"	1.0	0.7	0.8	0.9	0.7	0.4	0.8
NO ₃	"	1.90	0.30	1.60	0.00	0.20	0.00	0.00
HCO ₃	"	19.5	25.6	29.0	22.0	30.5	26.4	29.9
SO ₄	"	7.10	6.80	7.00	7.00	7.40	6.20	8.30
Cations	(meq/l)	0.58	0.64	0.68	0.57	0.71	0.62	0.64
Anions	"	0.57	0.64	0.75	0.53	0.75	0.64	0.69
TID	(meq/l)	1.15	1.27	1.43	1.11	1.46	1.25	1.33
SiO ₂	(mg/l)	8.45	8.10	7.54	6.60	8.07	6.62	8.73
B	(µg/l)							
TSD	(mg/l)	51	56	62	48	63	54	61
As	(µg/l)			0.3				
Rb	"			0.5				
Mo	"			4.0				
Ba	"			1.1				
W	"							
U	"			4.3				

Identification Plan Au

Identification		Plan Au	
N°		8	
Jour		3	
Mois		6	
Année		87	
Débit	(l/m)	200	
Température	(°C)	4.5	
pH			
RH	(mv)		
Conductivité	(µS/cm)	47	
Dureté totale	(°F)	2.5	
Li	(mg/l)	0.001	
Na	"	1.21	
K	"	0.67	
Mg	"	0.30	
Ca	"	9.20	
Sr	"	0.05	
F	"	0.9	
Cl	"	0.3	
NO ₃	"	1.00	
HCO ₃	"	24.4	
SO ₄	"	6.80	
Cations	(meq/l)	0.56	
Anions	"	0.61	
TID	(meq/l)	1.17	
SiO ₂	(mg/l)	5.93	
B	(µg/l)		
TSD	(mg/l)		
As	(µg/l)	1.3	
Rb	"	0.5	
Mo	"	31.0	
Ba	"	10.4	
W	"		
U	"	12.1	

Identification Durnand

Identification		Durnand	
N°		9	
Jour		23	
Mois		8	
Année		89	
Débit	(l/m)	2500	
Température	(°C)	2.4	
pH		6.0	
RH	(mv)		
Conductivité	(µS/cm)	20	
Dureté totale	(°F)	0.9	
Li	(mg/l)	0.000	
Na	"	0.58	
K	"	0.63	
Mg	"	0.20	
Ca	"	2.94	
Sr	"	0.01	
F	"	0.3	
Cl	"	0.0	
NO ₃	"	1.50	
HCO ₃	"	11.4	
SO ₄	"	2.80	
Cations	(meq/l)	0.20	
Anions	"	0.28	
TID	(meq/l)	0.48	
SiO ₂	(mg/l)	3.52	
B	(µg/l)		
TSD	(mg/l)	24	
As	(µg/l)	0.0	
Rb	"	0.3	
Mo	"	2.0	
Ba	"	0.3	
W	"		
U	"	0.7	

Identification Mariotti, Martigny

Identification		Mariotti, Martigny			
N°		10	11	12	13
Jour		16	25	25	25
Mois		1	2	2	2
Année		89	87	87	87
Débit	(l/m)				
Température	(°C)	5.2	5.0	5.7	5.1
pH		7.20			
RH	(mv)	158.00			
Conductivité	(µS/cm)	65	56	60	74
Dureté totale	(°F)	3.2			
Li	(mg/l)	0.004	0.004	0.004	0.007
Na	"	1.72	1.62	1.97	2.01
K	"	0.82	0.84	0.95	0.96
Mg	"	0.80	0.60	0.60	0.80
Ca	"	11.60	7.88	8.63	10.72
Sr	"	0.04	0.02	0.03	0.04
F	"	0.3	0.3	0.5	0.4
Cl	"	1.0	2.5	1.3	1.1
NO ₃	"	1.30	2.60	2.40	2.90
HCO ₃	"	35.9	20.5	2.5	20.5
SO ₄	"	7.50	6.40	8.20	7.50
Cations	(meq/l)	0.74	0.54	0.59	0.72
Anions	"	0.81	0.60	0.31	0.59
TID	(meq/l)	1.55	1.13	0.90	1.31
SiO ₂	(mg/l)	7.91			
B	(µg/l)				
TSD	(mg/l)	69			
As	(µg/l)	1.5	0.1	0.2	2.3
Rb	"	1.3	1.1	0.9	1.3
Mo	"	11.3	15.2	17.2	13.8
Ba	"	4.5	1.1	1.8	12.5
W	"				
U	"	8.2	6.5	8.1	8.5

Identification Giète, Martigny

N°	14	
Jour		14
Mois		7
Année		87
Débit	(l/m)	650
Température	(°C)	8.0
pH		
RH	(mv)	
Conductivité	(μ S/cm)	55
Dureté totale	(°F)	2.5
Li	(mg/l)	0.003
Na	"	0.78
K	"	1.54
Mg	"	0.30
Ca	"	9.30
Sr	"	0.02
F	"	0.1
Cl	"	0.1
NO ₃	"	0.20
HCO ₃	"	28.0
SO ₄	"	5.90
Cations	(meq/l)	0.57
Anions	"	0.59
TID	(meq/l)	1.16
SiO ₂	(mg/l)	3.54
B	(μ g/l)	
TSD	(mg/l)	
As	(μ g/l)	7.5
Rb	"	0.2
Mo	"	0.8
Ba	"	2.2
W	"	
U	"	0.0

Identification Galerie Ravoire, Martigny

N°	15				
Jour	20	27	30	4	
Mois	8	11	10	2	
Année	86	86	87	88	
Débit	(l/m)	3600	3500	3300	
Température	(°C)	6.1	5.1	5.5	5.2
pH					
RH	(mv)				
Conductivité	(μ S/cm)	72	81	83	79
Dureté totale	(°F)	3.7	4.5	4.1	4.1
Li	(mg/l)	0.002	0.002	0.005	0.005
Na	"	1.39	1.33	1.25	1.09
K	"	0.64	0.51	1.31	1.26
Mg	"	1.40	1.30	1.30	1.30
Ca	"	12.98	15.70	14.20	14.10
Sr	"	0.08	0.09	0.09	0.07
F	"	0.2	0.2	0.2	0.2
Cl	"	0.4	0.5	0.6	0.4
NO ₃	"	0.00	0.00	0.00	0.30
HCO ₃	"	39.4	47.0	45.8	50.6
SO ₄	"	8.30	8.70	7.00	7.20
Cations	(meq/l)	0.84	0.96	0.91	0.89
Anions	"	0.84	0.98	0.92	1.01
TID	(meq/l)	1.68	1.94	1.83	1.89
SiO ₂	(mg/l)	4.20	4.28	5.22	4.53
B	(μ g/l)			7	
TSD	(mg/l)	69	80	77	81
As	(μ g/l)				0.6
Rb	"				1.3
Mo	"				0.5
Ba	"				2.0
W	"				
U	"				2.7

Identification Bienvenue

N°	16	
Jour		6
Mois		2
Année		87
Débit	(l/m)	
Température	(°C)	5.0
pH		
RH	(mv)	
Conductivité	(μ S/cm)	71
Dureté totale	(°F)	
Li	(mg/l)	0.003
Na	"	1.76
K	"	1.04
Mg	"	0.70
Ca	"	11.31
Sr	"	0.04
F	"	0.4
Cl	"	0.6
NO ₃	"	0.30
HCO ₃	"	33.0
SO ₄	"	7.70
Cations	(meq/l)	0.73
Anions	"	0.74
TID	(meq/l)	1.47
SiO ₂	(mg/l)	6.50
B	(μ g/l)	
TSD	(mg/l)	63
As	(μ g/l)	24.4
Rb	"	1.2
Mo	"	12.3
Ba	"	4.4
W	"	
U	"	0.0

Identification Cerniat, Martigny

N°	17	17	18	18	
Jour	3	20	3	20	
Mois	6	8	6	8	
Année	86	86	86	86	
Débit	(l/m)	4.0	35.0	35.0	15.0
Température	(°C)	6.6	2.6	3.0	4.0
pH					
RH	(mv)				
Conductivité	(μ S/cm)	65	43	60	86
Dureté totale	(°F)	1.7	2.4	3.4	2.3
Li	(mg/l)	0.003	0.004	0.004	0.004
Na	"	1.07	0.82	1.06	1.33
K	"	0.39	0.29	0.33	0.42
Mg	"	0.90	0.60	0.80	1.20
Ca	"	6.50	8.60	12.10	17.43
Sr	"	0.04	0.05	0.08	0.09
F	"	0.4	0.3	0.2	0.3
Cl	"	0.8	0.8	0.6	0.6
NO ₃	"	0.00	0.10	0.00	0.40
HCO ₃	"	17.1	24.4	36.0	25.6
SO ₄	"	5.70	8.60	5.70	8.10
Cations	(meq/l)	0.46	0.53	0.72	1.04
Anions	"	0.44	0.62	0.74	0.63
TID	(meq/l)	0.90	1.15	1.46	1.67
SiO ₂	(mg/l)	6.70	5.09	5.60	44.92
B	(μ g/l)	4		18	21
TSD	(mg/l)	40		63	100
As	(μ g/l)	4.4		0.0	
Rb	"	0.5		0.9	
Mo	"	0.7		10.4	
Ba	"	1.0		0.7	
W	"			0.0	
U	"	0.2		5.8	

Identification Les Fontaines, Finhaut

N°	19					
Jour	17	4	5	10	11	
Mois	12	2	5	6	11	
Année	87	88	88	88	88	
Débit	(l/m)	1750	1733	1971	1972	1835
Température	(°C)	5.2	4.8	5.1	5.3	5.1
pH						8.40
RH	(mv)					+202
Conductivité	(µS/cm)	45	46	42	40	41
Dureté totale	(°F)	2.2	2.3	2.1	2.1	2.1
Li	(mg/l)	0.004	0.004	0.004	0.004	0.003
Na	"	1.15	1.13	1.16	1.13	1.15
K	"	0.18	0.19	0.19	0.19	0.17
Mg	"	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Ca	"	8.63	8.65	8.50	8.53	8.40
Sr	"	0.02	0.02	0.08	0.08	0.08
F	"	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cl	"	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
NO ₃	"	0.00	0.00	0.00	0.40	1.20
HCO ₃	"	25.6	26.8	24.4	26.5	24.4
SO ₄	"	5.40	5.60	5.60	5.30	5.40
Cations	(meq/l)	0.52	0.52	0.51	0.51	0.51
Anions	"	0.55	0.57	0.53	0.57	0.55
TID	(meq/l)	1.06	1.09	1.05	1.08	1.05
SiO ₂	(mg/l)			6.19	5.24	
B	(µg/l)					
TSD	(mg/l)			47	48	
As	(µg/l)		20.0			
Rb	"		0.4			
Mo	"		0.0			
Ba	"		2.6			
W	"					
U	"		3.8			

Identification Source "radioactive"

N°	20	
Jour	25	17
Mois	9	12
Année	87	87
Débit	(l/m)	
Température	(°C)	5.4
pH		5.1
RH	(mv)	
Conductivité	(µS/cm)	45
Dureté totale	(°F)	2.1
Li	(mg/l)	0.004
Na	"	1.11
K	"	0.17
Mg	"	0.50
Ca	"	7.70
Sr	"	0.02
F	"	0.1
Cl	"	0.1
NO ₃	"	1.20
HCO ₃	"	23.8
SO ₄	"	5.70
Cations	(meq/l)	0.47
Anions	"	0.54
TID	(meq/l)	1.01
SiO ₂	(mg/l)	5.75
B	(µg/l)	
TSD	(mg/l)	46
As	(µg/l)	20.6
Rb	"	0.4
Mo	"	0.0
Ba	"	1.7
W	"	
U	"	2.1

Identification Combasse, Martigny

N°	21					
Jour	20	12	12	20	23	
Mois	8	11	11	8	11	
Année	86	87	87	86	87	
Débit	(l/m)	500	150	20.0	10.0	400
Température	(°C)	6.2	5.2	5.1	5.8	5.1
pH						
RH	(mv)					
Conductivité	(µS/cm)	86	85	83	80	85
Dureté totale	(°F)	2.1	4.2	4.3	2.0	4.3
Li	(mg/l)	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
Na	"	2.03	2.12	1.94	2.10	1.97
K	"	0.73	0.84	0.88	0.94	1.17
Mg	"	1.60	1.80	1.60	1.80	1.60
Ca	"	6.20	13.80	14.60	6.00	14.30
Sr	"	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05
F	"	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Cl	"	0.7	0.8	0.7	0.6	0.6
NO ₃	"	0.80	0.40	0.00	0.70	1.00
HCO ₃	"	23.2	43.3	45.2	22.0	47.0
SO ₄	"	9.30	9.70	7.90	10.70	10.70
Cations	(meq/l)	0.55	0.95	0.97	0.56	0.96
Anions	"	0.62	0.95	0.93	0.62	1.03
TID	(meq/l)	1.17	1.90	1.90	1.18	2.00
SiO ₂	(mg/l)	7.17	9.80	8.56	9.56	9.56
B	(µg/l)	16	13	6	12	12
TSD	(mg/l)	52	83	81	54	88
As	(µg/l)		0.6	5.9		1.2
Rb	"		0.9	1.2		1.0
Mo	"		1.5	1.2		1.4
Ba	"		0.8	1.7		1.8
W	"					
U	"		0.5	0.7		0.8

Identification Cheneau inf. et sup., Trient

N°	24	24	25	25	25	25
Jour	3	3	3	1	3	21
Mois	11	6	6	9	6	8
Année	86	86	86	86	87	87
Débit (l/m)	300	400	20.0	300	350	60.0
Température (°C)	5.1	4.1	4.2	5.0	4.5	5.0
pH						
RH (mv)						
Conductivité (µS/cm)	77	60	64	84	60	92
Dureté totale (°F)	3.9	3.4	2.4	4.3	3.1	4.4
Li (mg/l)	0.007	0.007	0.004	0.005	0.004	0.008
Na "	1.47	1.24	1.23	1.46	1.11	1.56
K "	2.02	1.41	1.43	1.85	1.42	2.10
Mg "	0.80	0.60	0.60	0.80	0.60	0.80
Ca "	14.30	12.40	8.60	15.90	11.30	16.00
Sr "	0.03	0.03	0.05	0.05	0.04	0.03
F "	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2
Cl "	0.3	0.3	0.4	0.3	0.5	0.0
NO ₃ "	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO ₃ "	39.0	36.0	24.4	42.1	30.7	43.9
SO ₄ "	11.60	11.20	9.90	9.00	8.60	8.50
Cations (meq/l)	0.89	0.76	0.57	0.97	0.70	0.99
Anions "	0.90	0.84	0.63	0.89	0.70	0.91
TID (meq/l)	1.79	1.60	1.20	1.86	1.40	1.90
SiO ₂ (mg/l)	7.81	7.38	5.02	7.66	6.74	8.34
B (µg/l)		8		7	9	9
TSD (mg/l)	77	71	52	79	61	81
As (µg/l)		0.0				19.7
Rb "		0.4				0.5
Mo "		1.7				2.0
Ba "		2.4				2.2
W "		0.0				
U "		1.2				1.2

Identification Rest.Emosson

N°	26
Jour	21
Mois	8
Année	87
Débit (l/m)	4.5
Température (°C)	
pH	
RH (mv)	28
Conductivité (µS/cm)	1.2
Dureté totale (°F)	0.003
Li (mg/l)	0.89
Na "	0.18
K "	0.60
Mg "	3.80
Ca "	0.02
Sr "	0.0
F "	0.0
Cl "	0.00
NO ₃ "	12.2
HCO ₃ "	5.10
SO ₄ "	0.28
Cations (meq/l)	0.31
Anions "	0.59
TID (meq/l)	4.35
SiO ₂ (mg/l)	
B (µg/l)	27
TSD (mg/l)	0.5
As (µg/l)	0.2
Rb "	0.0
Mo "	1.2
Ba "	
W "	0.0
U "	

Identification Col des Montets, Argentière

Identification	27	19	12	17	16	30	17
Jour		6	9	11	7	10	12
Mois		86	86	86	87	87	87
Année							
Débit (l/m)		350	250	200	250	300	180
Température (°C)		7.3	5.2	5.2	5.8	5.8	5.3
pH							
RH (mv)							
Conductivité (µS/cm)		43	43	40	40	41	40
Dureté totale (°F)			2.1		2.2	2.0	2.2
Li (mg/l)		0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001
Na "		0.86	0.10	0.90	0.87	0.87	0.90
K "		0.12	0.19	0.12	0.11	0.16	0.13
Mg "		0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Ca "		7.20	7.10	7.00	7.20	6.64	7.00
Sr "		0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
F "		0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cl "		0.3	0.3	0.3	0.1	0.3	0.2
NO ₃ "		0.00	0.30	0.70	0.70	1.20	0.90
HCO ₃ "		23.2	23.2	22.0	23.8	22.0	22.0
SO ₄ "		5.10	4.10	4.70	4.70	5.10	4.80
Cations (meq/l)		0.42	0.39	0.42	0.43	0.40	0.42
Anions "		0.51	0.48	0.48	0.51	0.50	0.49
TID (meq/l)		0.93	0.87	0.90	0.93	0.90	0.90
SiO ₂ (mg/l)		4.33	4.30	4.23	4.28	4.38	4.30
B (µg/l)							
TSD (mg/l)		42	40	40	42	41	41
As (µg/l)						11.4	
Rb "						0.5	
Mo "						1.2	
Ba "						0.4	
W "							
U "						1.4	

Identification		Nant Provent, Chamonix									
N°	33										
Jour		21	29	19	17	21	26	5	10	8	14
Mois		8	10	11	12	1	2	5	6	9	12
Année		87	87	87	87	88	88	88	88	88	88
Débit	(l/m)	1473	947	603	709	663	584	1105	861	990	855
Température	(°C)	6.5	6.1	6.4	6.2	6.2	6.0	6.4	6.5	6.3	6.1
pH									7.2	6.6	7.5
RH	(mv)										+275
Conductivité	(µS/cm)	178	176	167	167	169	168	163	171	173	167
Dureté totale	(°F)	9.2	8.8	9.0	9.0	8.9	8.8	9.0	8.6	8.8	8.5
Li	(mg/l)	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.005	0.006
Na	"	1.96	2.28	1.98	1.97	2.01	1.97	1.96	1.95	1.88	1.91
K	"	3.27	3.35	3.31	3.34	3.41	3.27	3.32	3.31	3.12	3.17
Mg	"	1.20	1.30	1.30	1.30	1.40	1.50	1.40	1.30	1.10	1.20
Ca	"	34.80	33.00	33.70	33.60	33.20	33.00	33.60	32.00	33.20	32.00
Sr	"	0.13	0.15	0.15	0.16	0.13	0.11	0.10	0.12	0.14	0.16
F	"	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Cl	"	1.0	0.9	0.9	1.0	0.6	0.9	0.9	0.5	0.9	1.4
NO ₃	"	0.30	0.50	0.80	0.60	1.00	0.30	1.10	0.50	0.20	0.20
HCO ₃	"	67.1	72.6	72.0	72.6	70.2	64.7	72.0	73.8	74.9	74.9
SO ₄	"	46.60	42.60	40.20	38.70	42.10	44.20	44.00	36.70	38.60	35.00
Cations	(meq/l)	2.01	1.94	1.96	1.96	1.95	1.94	1.96	1.88	1.92	1.86
Anions	"	2.11	2.12	2.07	2.04	2.07	2.02	2.15	2.01	2.07	2.01
TID	(meq/l)	4.12	4.06	4.03	4.00	4.02	3.96	4.11	3.88	3.99	3.87
SiO ₂	(mg/l)	5.41	2.80	6.75	6.77	6.57	6.87	6.39	6.11	6.60	6.32
B	(µg/l)										
TSD	(mg/l)	162	160	161	160	161	157	165	156	161	156
As	(µg/l)						4.0				
Rb	"						0.2				
Mo	"						3.6				
Ba	"						6.8				
W	"										
U	"						1.1				

Identification		Enchapeleuse, les Houches			
N°	34				
Jour		9	14	29	26
Mois		12	12	10	2
Année		86	88	87	88
Débit	(l/m)	900	550	900	220
Température	(°C)	4.1	4.0	4.1	3.8
pH			7.2		
RH	(mv)		+304		
Conductivité	(µS/cm)	158	159	125	167
Dureté totale	(°F)	8.1	8.0	6.3	8.1
Li	(mg/l)	0.006	0.005	0.004	0.005
Na	"	1.45	1.47	1.15	1.54
K	"	2.38	2.32	2.01	2.46
Mg	"	1.50	1.40	1.10	1.50
Ca	"	29.80	29.50	23.20	27.61
Sr	"	0.06	0.05	0.05	0.06
F	"	0.1	0.2	0.1	0.1
Cl	"	0.3	0.2	0.3	0.2
NO ₃	"	0.30	0.00	0.50	0.00
HCO ₃	"	40.9	42.2	36.0	44.4
SO ₄	"	49.10	49.90	34.70	50.30
Cations	(meq/l)	1.74	1.71	1.35	1.63
Anions	"	1.71	1.75	1.33	1.78
TID	(meq/l)	3.45	3.46	2.68	3.42
SiO ₂	(mg/l)	4.60	4.60	4.17	4.86
B	(µg/l)	13	12	11	11
TSD	(mg/l)	130	132	103	133
As	(µg/l)				28.1
Rb	"				0.3
Mo	"				3.1
Ba	"				3.4
W	"				
U	"				7.9

Identification Forages, Flatière, Les Houches											
N°		35	35	36	36	37	37	38	38	39	39
Jour		21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Mois		8	1	8	1	8	1	8	1	8	1
Année		86	88	86	88	86	88	86	88	86	88
Débit	(l/m)										
Température	(°C)	7.4	7.7	7.9	8.1	7.6	8.1	8.4	7.7	8.3	6.9
pH											
RH	(mv)										
Conductivité	(µS/cm)	151	159	138	134	160	134	155	158	113	159
Dureté totale	(°F)	9.1	9.4	7.7	9.6	9.2	7.8	8.9	8.8	6.5	9.5
Li	(mg/l)	0.008	0.008	0.005	0.005	0.004	0.004	0.009	0.010	0.005	0.004
Na	"	2.18	1.96	1.64	2.23	1.80	1.54	1.70	2.62	1.47	1.87
K	"	1.01	0.92	0.68	0.99	0.85	0.59	0.67	0.72	0.44	0.65
Mg	"	4.80	5.40	6.00	6.70	5.00	4.70	5.00	6.60	3.80	5.60
Ca	"	28.30	28.70	20.80	25.00	28.60	23.50	27.40	26.00	19.70	28.60
Sr	"	0.00	0.35	0.28	0.38	0.15	0.22	0.20	1.31	0.31	0.33
F	"	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
Cl	"	0.6	0.6	0.8	1.0	0.6	1.1	0.6	1.5	0.5	1.3
NO ₃	"	0.20	0.30	0.00	1.20	0.00	0.60	0.00	0.70	0.00	1.10
HCO ₃	"	110.4	113.5	87.8	95.8	111.0	90.9	103.7	104.3	74.4	106.1
SO ₄	"	5.00	7.30	8.40	8.10	8.00	8.20	8.60	8.30	7.40	8.30
Cations	(meq/l)	1.93	2.00	1.63	1.93	1.94	1.65	1.87	2.00	1.38	1.99
Anions	"	1.93	2.03	1.64	1.79	2.00	1.70	1.90	1.94	1.39	1.97
TID	(meq/l)	3.86	4.03	3.27	3.72	3.94	3.35	3.77	3.94	2.77	3.96
SiO ₂	(mg/l)		8.84		8.49		7.52		8.65		7.47
B	(µg/l)		9		5		7		1		2
TSD	(mg/l)		168		150		139		161		161
As	(µg/l)		4.3		2.0		3.1		32.5		0.8
Rb	"		2.5		2.4		1.8		1.3		1.4
Mo	"		2.1		1.9		0.4		3.9		0.0
Ba	"		59.1		26.6		37.4		71.1		91.2
W	"										
U	"		0.0		0.7		0.0		3.3		0.4

Identification Flatière, Les Houches				Identification Prélet, Les Contamines				
N°		40	40	Jour		42	43	44
Jour		21	21	Mois		25	25	25
Mois		8	1	Année		11	11	11
Année		86	88	Année		86	86	86
Débit	(l/m)			Débit	(l/m)	570	300	300
Température	(°C)	7.6	6.9	Température	(°C)	4.4	4.2	4.3
pH				pH				
RH	(mv)			RH	(mv)			
Conductivité	(µS/cm)	127	159	Conductivité	(µS/cm)	30	29	34
Dureté totale	(°F)	7.4	11.3	Dureté totale	(°F)	2.0	1.5	1.8
Li	(mg/l)	0.004	0.004	Li	(mg/l)	0.000	0.000	0.000
Na	"	1.55	1.87	Na	"	0.63	0.60	0.76
K	"	0.56	0.65	K	"	0.47	0.43	0.48
Mg	"	4.30	5.60	Mg	"	0.20	0.20	0.20
Ca	"	22.50	36.00	Ca	"	7.50	5.80	7.00
Sr	"	0.08	0.70	Sr	"	0.01	0.01	0.01
F	"	0.0	0.0	F	"	0.1	0.1	0.1
Cl	"	0.6	1.3	Cl	"	0.1	0.1	0.1
NO ₃	"	0.00	1.10	NO ₃	"	0.00	0.00	0.00
HCO ₃	"	84.1	129.3	HCO ₃	"	18.3	15.3	18.3
SO ₄	"	7.80	8.30	SO ₄	"	6.40	5.30	6.10
Cations	(meq/l)	1.56	2.37	Cations	(meq/l)	0.43	0.34	0.41
Anions	"	1.56	2.35	Anions	"	0.44	0.37	0.44
TID	(meq/l)	3.12	4.72	TID	(meq/l)	0.87	0.71	0.85
SiO ₂	(mg/l)		7.20	SiO ₂	(mg/l)	3.76	3.76	4.41
B	(µg/l)		5	B	(µg/l)	10	8	7
TSD	(mg/l)		192	TSD	(mg/l)	37	32	37
As	(µg/l)		6.4	As	(µg/l)	3.2		
Rb	"		1.6	Rb	"	0.4		
Mo	"		0.6	Mo	"	0.7		
Ba	"		68.4	Ba	"	5.8		
W	"			W	"			
U	"		3.9	U	"	0.3		

Identification Feugier, Les Contamines

		45	46	47	48
Jour		25	25	25	25
Mois		11	11	11	11
Année		86	86	86	86
Débit	(l/m)	60.0	500	500	220
Température	(°C)	4.6	4.6	4.4	4.1
pH					
RH	(mv)				
Conductivité	(µS/cm)	46	49	48	39
Dureté totale	(°F)	2.3	2.3	2.5	2.1
Li	(mg/l)	0.001	0.002	0.002	0.001
Na	"	0.99	1.06	1.04	0.73
K	"	0.58	0.58	0.60	0.56
Mg	"	0.20	0.20	0.20	0.20
Ca	"	8.95	8.64	9.60	7.70
Sr	"	0.02	0.02	0.01	0.01
F	"	0.1	0.1	0.1	0.1
Cl	"	0.1	0.1	0.1	0.2
NO ₃	"	0.00	0.80	1.00	0.50
HCO ₃	"	25.0	27.5	27.5	22.0
SO ₄	"	6.30	7.20	6.90	6.60
Cations	(meq/l)	0.52	0.51	0.56	0.45
Anions	"	0.55	0.62	0.62	0.51
TID	(meq/l)	1.07	1.13	1.18	0.96
SiO ₂	(mg/l)	5.45	5.82	5.56	3.94
B	(µg/l)	11	10	21	11
TSD	(mg/l)	48	52	53	42
As	(µg/l)	7.4			
Rb	"	0.3			
Mo	"	1.3			
Ba	"	16.5			
W	"				
U	"	0.9			

Identification Gracenièrè

		49	
Jour			25
Mois			11
Année			86
Débit	(l/m)		900
Température	(°C)		5.0
pH			
RH	(mv)		
Conductivité	(µS/cm)		54
Dureté totale	(°F)		2.7
Li	(mg/l)		0.000
Na	"		1.10
K	"		0.57
Mg	"		0.30
Ca	"		10.45
Sr	"		0.02
F	"		0.8
Cl	"		0.1
NO ₃	"		0.20
HCO ₃	"		29.3
SO ₄	"		7.90
Cations	(meq/l)		0.61
Anions	"		0.69
TID	(meq/l)		1.30
SiO ₂	(mg/l)		6.03
B	(µg/l)		12
TSD	(mg/l)		57
As	(µg/l)		11.4
Rb	"		0.1
Mo	"		0.7
Ba	"		3.5
W	"		
U	"		1.8

Identification Meyens, Courmayeur

N°		50	51	51	51
Jour		27	27	29	19
Mois		10	10	10	5
Année		86	86	87	88
Débit	(l/m)			500	1200
Température	(°C)	5.9	5.8	5.5	5.1
pH					7.7
RH	(mv)				+248
Conductivité	(µS/cm)	119	124	125	192
Dureté totale	(°F)	6.7	7.0	7.0	11.1
Li	(mg/l)	0.003	0.003	0.007	0.005
Na	"	0.64	0.67	0.77	0.68
K	"	1.14	1.12	5.37	5.33
Mg	"	2.30	2.30	3.10	2.20
Ca	"	21.04	22.19	22.70	40.50
Sr	"	0.15	0.15	0.14	0.15
F	"	0.2	0.2	0.1	0.2
Cl	"	0.3	0.4	0.2	0.0
NO ₃	"	0.70	0.60	0.00	0.90
HCO ₃	"	72.6	73.8	73.2	121.3
SO ₄	"	10.30	11.00	10.80	10.50
Cations	(meq/l)	1.30	1.36	1.56	2.37
Anions	"	1.43	1.47	1.44	2.23
TID	(meq/l)	2.74	2.83	3.00	4.60
SiO ₂	(mg/l)	2.65			2.88
B	(µg/l)				
TSD	(mg/l)	112			185
As	(µg/l)	0.0			
Rb	"	3.0			
Mo	"	2.3			
Ba	"	3.3			
W	"	0.0			
U	"	5.6			

Identification Frebouze

N°		52	
Jour			27
Mois			10
Année			86
Débit	(l/m)		6000
Température	(°C)		4.2
pH			
RH	(mv)		
Conductivité	(µS/cm)		64
Dureté totale	(°F)		3.5
Li	(mg/l)		0.003
Na	"		0.63
K	"		0.74
Mg	"		0.70
Ca	"		11.45
Sr	"		0.10
F	"		0.2
Cl	"		0.3
NO ₃	"		0.50
HCO ₃	"		34.8
SO ₄	"		7.90
Cations	(meq/l)		0.68
Anions	"		0.76
TID	(meq/l)		1.44
SiO ₂	(mg/l)		2.40
B	(µg/l)		
TSD	(mg/l)		60
As	(µg/l)		0.3
Rb	"		1.8
Mo	"		4.1
Ba	"		1.9
W	"		
U	"		3.1

Identification Galerie nord (Emaney) du réseau hydroélectrique d'Emosson										
N°		53	54	55	56	57	58	59	60	61
Distance	(m)	870	960	1340	1480	1853	2160	2180	2895	3092
Jour		6	6	6	6	6	6	6	6	6
Mois		4	4	4	4	4	4	4	4	4
Année		90	90	90	90	90	90	90	90	90
Débit	(l/m)	0.8	12.0	10.9	8.0	5.0	11.0	27.3	17.0	10.0
Température	(°C)	4.4	4.6	3.5	6.5	6.5	6.7	6.9	6.2	5.2
pH										
RH	(mv)									
Conductivité	(µS/cm)	132	82	125	156	118	129	126	77	89
Dureté totale	(°F)	6.3	4.1	6.1	8.3	6.2	6.5	6.4	3.5	4.3
Li	(mg/l)	0.017	0.010	0.018	0.019	0.016	0.015	0.015	0.010	0.010
Na	"	2.05	1.11	3.25	2.22	3.28	2.02	1.96	2.38	2.64
K	"	0.36	0.23	0.34	0.33	0.24	0.36	0.37	0.19	0.22
Mg	"	2.00	1.20	1.70	2.50	1.40	1.30	1.20	1.00	1.30
Ca	"	22.10	14.20	21.80	28.90	22.60	23.50	23.40	12.30	15.00
Sr	"	0.58	0.39	0.53	0.74	0.26	0.25	0.24	0.17	0.16
F	"	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cl	"	0.3	0.0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
NO ₃	"	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO ₃	"	54.0	37.7	54.1	66.7	49.6	52.7	58.6	33.2	45.7
SO ₄	"	20.90	13.00	23.90	28.40	26.30	24.50	23.90	13.10	13.10
Cations	(meq/l)	1.38	0.87	1.39	1.77	1.40	1.38	1.37	0.81	0.98
Anions	"	1.33	0.89	1.39	1.69	1.37	1.38	1.46	0.82	1.02
TID	(meq/l)	2.71	1.76	2.78	3.47	2.77	2.76	2.83	1.63	2.00
SiO ₂	(mg/l)	6.14	4.88	5.91	6.01	4.96	4.57	4.75	4.57	4.86
B	(µg/l)									
TSD	(mg/l)	108	73	112	136	109	109	114	67	83
As	(µg/l)	45.1	44.7	83.9	32.7	12.0	11.0	13.3	17.4	12.2
Rb	"	2.0	0.9	1.2	1.2	1.2	1.7	1.7	0.7	0.7
Mo	"	14.5	8.4	21.6	15.3	9.9	6.0	5.4	5.4	5.6
Ba	"	40.1	17.9	14.3	13.7	19.2	27.5	15.0	7.0	9.5
W	"	0.5	0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
U	"	10.1	6.8	13.0	19.3	11.9	13.3	12.2	10.0	5.8

Identification Galerie ouest du réseau hydroélectrique d'Emosson												
N°		62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Distance	(m)	604	1050	1077	1170	2012	3708	3804	3980	5708	6555	7300
Jour		14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Mois		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Année		87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87
Débit	(l/m)	8.0	0.1	5.0	6.0	3.0	5.0	3.2	30.0	0.2	3.0	3.4
Température	(°C)	5.1	6.4	6.3	6.4	7.3	6.1	6.2	3.8	4.0	4.7	4.8
pH		7.5	7.6	7.6	7.5	8.0	7.8	8.0	7.6	7.7	7.6	7.8
RH	(mv)											
Conductivité	(µS/cm)	118	153	109	84	163	140	152	116	84	69	152
Dureté totale	(°F)	6.1	7.2	5.0	4.3	8.7	6.6	7.9	5.9	3.9	3.7	7.6
Li	(mg/l)	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002
Na	"	1.87	4.41	4.52	1.68	3.53	5.41	2.84	1.80	3.14	1.95	4.24
K	"	0.22	0.31	0.37	0.23	0.51	0.73	0.49	0.34	0.29	0.23	0.38
Mg	"	1.90	0.80	0.80	0.60	6.10	3.40	2.90	1.40	0.70	0.60	2.00
Ca	"	21.40	27.30	18.50	16.20	24.70	20.90	26.70	21.30	14.40	13.60	26.90
Sr	"	0.09	0.32	0.28	0.19	0.85	0.63	0.41	0.13	0.07	0.08	0.59
F	"	0.3	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	1.0	0.6	0.1	0.1	0.1
Cl	"	0.3	0.6	0.6	0.3	0.0	0.7	0.2	0.2	0.3	0.3	0.0
NO ₃	"	0.00	0.40	0.00	0.40	0.00	2.50	0.40	0.00	0.50	1.90	0.00
HCO ₃	"	61.0	42.1	40.3	34.2	77.5	53.1	54.9	38.4	32.3	34.2	45.8
SO ₄	"	18.00	46.00	24.90	16.30	31.20	32.70	40.00	32.70	17.20	11.40	45.10
Cations	(meq/l)	1.31	1.64	1.20	0.94	1.92	1.59	1.72	1.27	0.92	0.82	1.72
Anions	"	1.40	1.69	1.22	0.93	1.93	1.62	1.80	1.35	0.91	0.84	1.69
TID	(meq/l)	2.71	3.33	2.42	1.87	3.85	3.21	3.51	2.62	1.83	1.66	3.41
SiO ₂	(mg/l)	6.01	5.50	5.22	3.79	6.31	9.69	7.55	5.39	6.84	6.52	8.75
B	(µg/l)	14	33	38	35	30	47	32	24	31	37	38
TSD	(mg/l)	111	128	96	74	151	130	137	102	76	71	134
As	(µg/l)	2.2	24.6	12.2	14.2	6.6	24.0	45.0	10.6	116.0	158.9	61.7
Rb	"	0.4	0.7	0.7	0.1	0.7	1.1	0.3	3.5	1.1	0.5	0.7
Mo	"	0.4	1.4	1.8	1.5	15.7	6.6	6.4	5.2	5.5	3.1	20.9
Ba	"	4.6	18.4	14.7	10.3	25.9	19.8	14.3	6.7	2.8	9.0	28.4
W	"	0.0	0.2	0.3	0.0	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.7	0.0
U	"	1.1	1.2	1.1	0.6	18.9	1.1	1.7	2.1	1.9	6.6	1.0

Identification Galerie est du réseau hydroélectrique d'Emosson											
N°		73	73	74	74	75	75	76	76	77	77
Distance	(m)	697	697	1970	1970	2795	2795	2813	2813	3613	3613
Jour		8	17	8	17	8	17	8	17	8	17
Mois		4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
Année		86	88	86	88	86	88	86	88	86	88
Débit	(l/m)	22.2	30.0	54.5	68.2	26.0	32.6	28.5	44.1	12.0	12.9
Température	(°C)	7.8	7.3	5.0	4.6	4.5	4.0	4.2	3.7	3.9	3.6
pH											
RH	(mv)										
Conductivité	(µS/cm)	141	146	185	187	116	113	114	109	49	53
Dureté totale	(°F)	8.4	8.8	11.5	11.4	6.6	5.8	6.6	5.5	3.0	2.8
Li	(mg/l)		0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.027	0.058	0.028	0.028
Na	"	2.60	2.44	1.07	1.08	0.74	0.71	0.65	0.67	0.67	0.82
K	"	0.31	0.31	0.68	0.68	2.57	2.65	2.52	2.66	2.00	1.45
Mg	"	2.10	1.80	4.60	4.20	0.70	0.80	0.60	0.50	0.20	0.20
Ca	"	30.20	32.10	38.20	38.60	25.20	22.00	25.20	21.30	11.70	10.80
Sr	"	0.18	0.23	0.14	0.16	0.04	0.07	0.03	0.06	0.00	0.03
F	"	0.3	0.1	0.4	0.5	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1
Cl	"	0.1	0.6	0.5	0.8	0.2	0.3	0.5	0.4	0.2	0.4
NO ₃	"	0.00	1.10	0.00	1.00	0.00	0.40	0.00	1.00	0.00	0.40
HCO ₃	"	93.9	110.2	113.5	116.1	54.9	56.4	54.3	55.1	26.8	28.3
SO ₄	"	8.60	4.40	18.00	10.70	20.60	16.30	20.80	18.40	8.70	6.10
Cations	(meq/l)	1.80	1.87	2.35	2.34	1.41	1.26	1.40	1.21	0.68	0.63
Anions	"	1.74	1.94	2.27	2.19	1.35	1.29	1.34	1.32	0.63	0.61
TID	(meq/l)	3.54	3.81	4.62	4.53	2.76	2.55	2.75	2.54	1.32	1.25
SiO ₂	(mg/l)		9.84		3.85		3.89		3.74		3.51
B	(µg/l)		30		28		14		25		23
TSD	(mg/l)		163		178		104		104		52
As	(µg/l)		7.2		1.2		2.9		8.1		6.9
Rb	"		0.7		1.5		1.8		1.3		0.2
Mo	"		5.8		4.7		5.7		4.8		3.1
Ba	"		12.2		4.6		7.3		10.0		1.0
W	"		0.2		0.2		0.1		0.0		0.1
U	"		8.2		7.0		18.4		20.3		10.0

Identification Galerie est du réseau hydroélectrique d'Emosson											
N°		78	78	79	79	80	80	81	81	82	82
Distance	(m)	3618	3618	3622	3622	3629	3629	7090	7090	7130	7130
Jour		8	17	8	17	8	17	8	17	8	17
Mois		4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
Année		86	88	86	88	86	88	86	88	86	88
Débit	(l/m)	45.0	46.7	24.0	25.9	18.2	20.5	85.7	88.2	28.5	31.3
Température	(°C)	3.8	3.4	3.9	3.5	3.8	3.5	9.2	8.8	10.2	9.8
pH											
RH	(mv)										
Conductivité	(µS/cm)	49	52	49	52	48	52	66	69	73	75
Dureté totale	(°F)	3.1	2.5	3.1	2.9	3.1	2.5	3.5	2.6	3.4	2.7
Li	(mg/l)	0.000	0.000	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001
Na	"	0.69	0.68	0.68	0.68	0.67	0.69	4.40	4.48	5.09	5.57
K	"	1.21	1.25	1.21	1.24	1.20	1.27	0.63	0.69	0.70	0.79
Mg	"	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.20	0.30	0.20
Ca	"	11.70	9.50	12.00	11.40	11.90	9.70	13.40	10.00	13.00	10.50
Sr	"	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.03	0.01	0.03	0.00	0.04
F	"	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	2.7	4.2	3.0	5.0
Cl	"	0.2	0.2	0.1	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3
NO ₃	"	0.70	1.00	0.20	1.00	0.30	0.00	0.00	0.80	0.00	0.30
HCO ₃	"	26.8	26.2	26.2	27.6	26.8	24.3	27.5	28.8	31.1	31.1
SO ₄	"	7.00	6.70	9.80	6.20	9.00	5.80	12.00	3.00	10.00	3.00
Cations	(meq/l)	0.66	0.55	0.68	0.65	0.67	0.56	0.90	0.73	0.91	0.81
Anions	"	0.61	0.60	0.64	0.61	0.64	0.53	0.85	0.78	0.88	0.85
TID	(meq/l)	1.27	1.15	1.32	1.26	1.31	1.09	1.75	1.51	1.79	1.66
SiO ₂	(mg/l)		3.55	2.65			3.44		6.37		6.99
B	(µg/l)		29				19		22		22
TSD	(mg/l)		49	53			46		59	64	86
As	(µg/l)		7.1				7.8		10.2		10.6
Rb	"		0.2				0.2		3.5		4.6
Mo	"		2.5				2.6		135		110
Ba	"		0.3				0.5		0.4		0.3
W	"		0.2				0.1		1.3		1.5
U	"		6.4				6.2		337		315

Identification Galerie est du réseau hydroélectrique d'Emosson											
N°		83	83	84	84	85	85	86	86	87	87
Distance	(m)	7425	7425	7530	7530	7565	7565	7625	7625	7640	7640
Jour		8	17	7	17	7	17	7	17	7	17
Mois		4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
Année		86	88	86	88	86	88	86	88	86	88
Débit	(l/m)	1000	1000	120	536	200	188	150.	214	300	188
Température	(°C)	5.8	5.4	4.4	4.0	5.4	5.0	8.8	8.5	8.8	8.4
pH					6.20		6.20		6.50		6.20
RH	(mv)										
Conductivité	(µS/cm)	56	58	41	45	47	51	60	62	61	63
Dureté totale	(°F)	2.9	2.7	2.5	2.0	2.5	2.0	2.9	2.3	3.0	2.7
Li	(mg/l)	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Na	"	2.95	2.92	1.75	1.82	2.50	2.47	3.40	3.40	3.46	3.40
K	"	0.62	0.80	0.55	0.57	0.69	0.74	0.83	0.83	0.78	0.83
Mg	"	0.30	0.30	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Ca	"	11.00	10.50	9.50	7.70	9.60	7.80	11.30	9.00	11.60	10.30
Sr	"	0.01	0.02	0.00	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03
F	"	1.7	2.7	1.1	1.8	1.6	2.3	2.1	3.4	2.1	3.4
Cl	"	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	1.2	0.8	0.8	0.9
NO ₃	"	0.00	0.70	0.00	0.80	0.00	0.60	0.00	0.60	0.00	0.20
HCO ₃	"	26.2	26.7	22.0	21.5	23.2	23.8	24.4	24.5	24.4	27.0
SO ₄	"	7.40	6.10	4.80	3.00	6.00	3.00	8.80	3.00	8.60	4.00
Cations	(meq/l)	0.72	0.69	0.58	0.49	0.62	0.53	0.75	0.63	0.77	0.70
Anions	"	0.68	0.72	0.52	0.53	0.60	0.59	0.73	0.68	0.71	0.73
TID	(meq/l)	1.40	1.42	1.10	1.02	1.22	1.13	1.48	1.31	1.48	1.43
SiO ₂	(mg/l)		5.75		5.01		5.13		6.87		6.76
B	(µg/l)		26		8		27		21		20
TSD	(mg/l)		57		43		46		53		57
As	(µg/l)		4.1		3.3		3.4		5.2		6.1
Rb	"		0.1		0.3		0.2		0.3		0.4
Mo	"		43.3		26.2		33.6		40.6		39.3
Ba	"		0.5		0.6		0.3		0.3		0.4
W	"		0.7		0.6		0.7		1.3		1.2
U	"		70.9		37.6		63.7		40.6		38.6

Identification Galerie est du réseau hydroélectrique d'Emosson											
N°		88	88	89	89	90	90	91	91	92	92
Distance	(m)	7880	7880	8580	8580	8948	8948	8950	8950	9122	9122
Jour		7	17	7	17	7	17	7	17	7	17
Mois		4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
Année		86	88	86	88	86	88	86	88	86	88
Débit	(l/m)	75.0	100	120	115	300	375	50.0	65.2	85.7	100
Température	(°C)	6.7	6.2	10.9	10.5	11.8	11.2	11.7	11.1	12.2	11.9
pH			6.50		6.50		6.50		6.20		6.30
RH	(mv)										
Conductivité	(µS/cm)	51	54	79	82	88	90	88	90	93	95
Dureté totale	(°F)	2.6	2.1	3.2	3.0	3.9	3.3	3.9	3.8	4.5	4.0
Li	(mg/l)	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Na	"	2.99	3.02	5.35	6.12	4.73	4.80	4.67	4.74	4.21	4.34
K	"	0.64	0.88	0.99	1.17	1.35	1.53	1.30	1.45	1.21	1.35
Mg	"	0.10	0.10	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.60	0.60
Ca	"	10.00	8.30	12.40	11.70	15.10	12.70	15.20	14.90	16.80	14.80
Sr	"	0.01	0.04	0.03	0.06	0.00	0.05	0.02	0.05	0.03	0.05
F	"	1.6	2.4	2.7	4.1	2.5	3.4	2.5	3.4	2.7	3.6
Cl	"	0.4	0.3	0.2	0.7	0.7	0.5	0.2	0.4	0.2	0.2
NO ₃	"	9.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO ₃	"	23.2	24.2	27.5	28.7	28.7	30.4	29.9	31.2	33.6	32.8
SO ₄	"	3.50	3.00	14.80	11.00	18.50	12.30	18.40	18.50	19.10	17.50
Cations	(meq/l)	0.66	0.58	0.90	0.90	1.02	0.91	1.02	1.01	1.10	1.01
Anions	"	0.69	0.61	0.91	0.93	1.01	0.95	1.01	1.09	1.10	1.10
TID	(meq/l)	1.35	1.19	1.80	1.84	2.03	1.85	2.03	2.10	2.20	2.11
SiO ₂	(mg/l)		5.69		7.96		6.89		6.89		7.14
B	(µg/l)		17		23		44		31		42
TSD	(mg/l)		49		72		73		82		82
As	(µg/l)		4.7		7.2		14.3		16.3		13.3
Rb	"		0.7		4.3		0.6		0.7		2.4
Mo	"		33.2		137		122		131		102
Ba	"		0.7		0.1		0.6		0.6		0.6
W	"		0.7		3.7		5.3		5.2		5.4
U	"		70.7		358		1958		1956		2093

Identification Galerie est du réseau hydroélectrique d'Emosson											
N°		93	93	94	94	95	95	96	96	97	97
Distance	(m)	9322	9322	9495	9495	9605	9605	9650	9650	9643	9643
Jour		7	17	7	17	7	17	7	17	7	17
Mois		4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
Année		86	88	86	88	86	88	86	88	86	88
Débit	(l/m)	35.3	25.0	20.0	28.8	46.2	75.0	150	107	85.7	100
Température	(°C)	12.2	11.8	11.8	11.8	13.1	12.8	13.2	13.0	10.4	9.9
pH			6.50		6.40		6.30		6.30		6.30
RH	(mv)										
Conductivité	(µS/cm)	97	100	118	121	99	102	91	93	89	89
Dureté totale	(°F)	4.3	4.4	5.4	5.2	4.1	3.6	3.7	3.6	3.8	3.7
Li	(mg/l)	0.090	0.092	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Na	"	5.62	6.68	4.97	5.29	5.63	9.32	6.03	7.14	4.88	5.50
K	"	0.45	0.52	1.95	2.21	1.72	2.35	1.60	1.85	1.55	2.00
Mg	"	0.40	0.40	0.80	0.70	0.40	0.40	0.30	0.30	0.40	0.40
Ca	"	16.30	16.80	20.20	19.40	15.50	13.80	14.10	13.70	14.30	14.00
Sr	"	0.07	0.10	0.05	0.06	0.02	0.05	0.02	0.04	0.02	0.04
F	"	3.0	4.8	2.3	3.4	3.0	4.4	3.2	4.8	2.7	3.8
Cl	"	0.3	0.6	0.4	0.5	0.7	0.9	0.8	1.0	0.5	0.5
NO ₃	"	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO ₃	"	32.9	33.1	39.0	39.7	31.1	32.6	31.1	33.1	31.7	31.8
SO ₄	"	18.00	19.90	26.70	29.10	19.80	22.10	14.90	16.10	16.00	16.60
Cations	(meq/l)	1.12	1.19	1.34	1.32	1.10	1.19	1.03	1.07	1.00	1.02
Anions	"	1.08	1.23	1.33	1.45	1.10	1.25	1.01	1.16	1.01	1.08
TID	(meq/l)	2.20	2.41	2.67	2.77	2.20	2.44	2.04	2.23	2.01	2.10
SiO ₂	(mg/l)		11.23		10.05		10.37		10.48		8.24
B	(µg/l)		41		24		28		47		32
TSD	(mg/l)		94		110		96		89		83
As	(µg/l)		3.6		4.9		6.6		4.3		6.8
Rb	"		4.3		5.3		1.5		2.2		3.2
Mo	"		80.7		110		78.6		66.6		69.4
Ba	"		0.5		0.5		0.4		0.9		1.1
W	"		7.0		5.1		5.9		6.0		3.3
U	"		220		267		293		379		676

Identification Galerie est du réseau hydroélectrique d'Emosson											
N°		98	98	99	99	100	100	101	101	102	102
Distance	(m)	9655	9655	9665	9665	10155	10155	10555	10555	10556	10556
Jour		7	17	7	17	7	17	7	17	7	17
Mois		4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
Année		86	88	86	88	86	88	86	88	86	88
Débit	(l/m)	54.5	62.5	200.0	188.0	2000.0	1500.0	60.0	75.0	33.0	35.7
Température	(°C)	9.9	9.1	10.3	10.1	8.6	8.0	16.9	16.5	17.5	16.9
pH			6.30		6.20		6.20		7.00		6.50
RH	(mv)										
Conductivité	(µS/cm)	89	91	95	98	95	80	78	80	77	79
Dureté totale	(°F)	4.0	4.5	4.3	4.0	3.8	3.6	2.5	3.3	3.1	3.3
Li	(mg/l)	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002
Na	"	4.71	4.99	4.61	5.01	3.80	3.83	5.89	6.92	5.81	7.07
K	"	1.57	1.79	1.51	1.79	0.88	1.04	0.55	0.68	0.58	0.68
Mg	"	0.50	0.50	0.60	0.60	0.70	0.80	0.20	0.20	0.20	0.20
Ca	"	15.00	17.20	16.00	15.00	13.80	13.30	9.50	13.00	11.90	12.70
Sr	"	0.03	0.04	0.03	0.05	0.03	0.05	0.04	0.11	0.06	0.11
F	"	2.5	3.4	2.1	3.2	1.3	1.8	2.1	2.8	2.1	3.0
Cl	"	0.3	0.4	0.3	0.6	0.5	0.5	0.5	0.8	0.5	0.8
NO ₃	"	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO ₃	"	31.1	31.7	32.3	32.9	32.9	35.3	29.9	32.1	28.7	32.5
SO ₄	"	17.10	17.30	19.90	19.70	13.50	14.70	9.50	12.70	12.30	12.30
Cations	(meq/l)	1.03	1.16	1.09	1.06	0.94	0.92	0.76	0.99	0.88	0.98
Anions	"	1.01	1.07	1.06	1.13	0.90	0.99	0.81	0.96	0.85	0.97
TID	(meq/l)	2.04	2.23	2.15	2.19	1.84	1.92	1.57	1.95	1.73	1.94
SiO ₂	(mg/l)		7.79		85.56		6.76		10.91		10.91
B	(µg/l)		31		29		33		28		31
TSD	(mg/l)		85		164		78		80		80
As	(µg/l)		7.9		5.5		25.0		17.5		20.1
Rb	"		2.4		3.1		5.8		6.4		6.6
Mo	"		76.5		73.6		110		107		112
Ba	"		1.2		0.7		0.3		0.3		0.2
W	"		2.9		3.2		2.8		6.7		6.6
U	"		703		384		1534		75		63

Identification Galerie est du réseau hydroélectrique d'Emosson											
N°		103	103	104	104	105	105	106	106	107	107
Distance	(m)	11035	11035	11315	11315	11655	11655	13535	13535	13860	13860
Jour		7	17	7	17	7	17	7	17	7	17
Mois		4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
Année		86	88	86	88	86	88	86	88	86	88
Débit	(l/m)	60.0	150.0	100.0	150.0	15.0	10.7	440.0	30.0	150.0	150.0
Température	(°C)	10.2	9.5	15.3	14.2	10.8	10.5	7.7	7.1	5.4	5.6
pH			7.00		6.50		6.50		6.50		6.20
RH	(mv)										
Conductivité	(µS/cm)	93	94	92	87	75	75	116	120	124	124
Dureté totale	(°F)	4.8	4.5	3.2	2.8	3.1	3.0	6.5	6.4	6.9	6.6
Li	(mg/l)	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001
Na	"	3.30	3.22	6.80	6.86	5.38	5.90	2.18	2.23	2.85	1.79
K	"	1.02	1.20	0.94	1.28	0.74	0.84	0.10	0.13	0.25	0.23
Mg	"	0.40	0.50	0.10	0.10	0.20	0.20	1.10	1.00	0.80	0.90
Ca	"	18.30	17.20	12.40	11.10	12.10	11.50	23.90	23.60	26.10	25.00
Sr	"	0.09	0.14	0.09	0.15	0.08	0.12	0.38	0.52	0.38	0.29
F	"	0.8	1.0	2.0	2.0	1.0	1.2	0.5	0.8	0.3	0.5
Cl	"	0.2	0.2	1.0	0.9	0.4	0.5	0.1	0.1	0.4	0.4
NO ₃	"	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO ₃	"	37.8	38.3	29.9	30.7	32.3	33.6	49.4	50.9	54.9	53.3
SO ₄	"	18.50	17.50	18.90	15.50	12.50	12.50	23.30	23.90	24.20	23.70
Cations	(meq/l)	1.12	1.07	0.95	0.90	0.87	0.87	1.39	1.37	1.51	1.41
Anions	"	1.05	1.05	1.02	0.96	0.87	0.89	1.32	1.38	1.43	1.40
TID	(meq/l)	2.17	2.12	1.97	1.86	1.74	1.76	2.71	2.75	2.94	2.82
SiO ₂	(mg/l)		6.55		8.81		7.12		8.17		6.72
B	(µg/l)		23		32		25		21		32
TSD	(mg/l)		86		77		73		111		113
As	(µg/l)		8.7		8.9		6.0		28.4		15.9
Rb	"		7.2		6.3		3.7		2.3		3.2
Mo	"		140.4		63.5		37.8		68.9		114
Ba	"		0.7		0.9		0.4		5.2		9.5
W	"		3.3		13.4		10.5		1.0		1.2
U	"		774		242		202		69		272

Identification Galerie est			
N°		108	108
Distance	(m)	14930	14930
Jour		4	17
Mois		4	3
Année		86	88
Débit	(l/m)	1500	1500
Température	(°C)	0.2	0.2
pH			5.90
RH	(mv)		
Conductivité	(µS/cm)	36	45
Dureté totale	(°F)	2.5	2.1
Li	(mg/l)	0.000	0.000
Na	"	0.73	0.83
K	"	0.32	0.34
Mg	"	0.20	0.20
Ca	"	9.50	8.00
Sr	"	0.02	0.02
F	"	0.1	0.1
Cl	"	0.2	0.2
NO ₃	"	0.00	0.00
HCO ₃	"	17.1	20.5
SO ₄	"	7.10	7.40
Cations	(meq/l)	0.53	0.46
Anions	"	0.44	0.50
TID	(meq/l)	0.97	0.96
SiO ₂	(mg/l)		3.40
B	(µg/l)		20
TSD	(mg/l)		41
As	(µg/l)		0.1
Rb	"		2.3
Mo	"		19.1
Ba	"		3.2
W	"		0.2
U	"		13.7

Identification Galerie sud du réseau hydroélectrique d'Emosson

N°		109	110	110	111	112	112	113	113	114	114
Distance	(m)	505	750	750	950	1023	1023	1530	1530	1614	1614
Jour		16	16	11	16	16	11	16	11	16	11
Mois		12	12	2	12	12	2	12	2	12	2
Année		86	86	88	86	86	88	86	88	86	88
Débit	(l/m)	0.2	1.0	1.0	5.0	2.0	2.0	10.0	3.5	30.0	19.0
Température	(°C)	1.4	2.7	2.5	3.2	2.6	2.5	4.0	3.9	6.3	6.3
pH											
RH	(mv)										
Conductivité	(µS/cm)	73	65	65	34	28	32	36	36	54	63
Dureté totale	(°F)	3.5	3.4	3.0	1.5	1.4	1.8	1.9	1.9	2.8	3.0
Li	(mg/l)	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001
Na	"	2.86	1.74	1.90	1.48	1.20	1.29	1.16	1.12	2.31	2.64
K	"	1.74	1.14	1.22	1.11	0.58	0.66	0.78	0.76	0.93	1.01
Mg	"	0.30	0.80	0.80	0.50	0.40	0.50	0.20	0.20	0.50	0.50
Ca	"	13.50	12.30	10.60	5.10	4.90	6.40	7.30	7.10	10.20	11.10
Sr	"	0.14	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
F	"	1.0	1.1	1.2	0.8	0.6	0.5	0.7	0.7	1.1	1.4
Cl	"	0.2	0.3	0.5	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.1
NO ₃	"	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.60	0.00	0.00
HCO ₃	"	14.0	22.0	21.4	12.2	12.2	18.3	20.7	18.9	20.7	20.7
SO ₄	"	24.50	17.80	16.50	8.50	6.10	7.00	5.10	5.10	12.30	14.80
Cations	(meq/l)	0.87	0.78	0.71	0.39	0.35	0.43	0.45	0.44	0.67	0.74
Anions	"	0.80	0.80	0.77	0.42	0.36	0.48	0.48	0.48	0.65	0.72
TID	(meq/l)	1.67	1.58	1.48	0.81	0.71	0.91	0.93	0.92	1.33	1.46
SiO ₂	(mg/l)	6.17		6.84	7.97	6.84			5.63		6.27
B	(µg/l)			25			20		20		21
TSD	(mg/l)			61					41		59
As	(µg/l)	17.8		14.2			13.2		29.6		82.9
Rb	"	7.6		4.2			1.0		0.5		0.5
Mo	"	5.6		3.6			2.2		1.8		3.6
Ba	"	1.4		1.4			0.9		0.4		0.2
W	"	0.4					0.3		0.4		2.5
U	"	5.3		5.2			1.8		8.6		50.5

Identification Galerie sud du réseau hydroélectrique d'Emosson

N°		115	115	116	116	117	117	118	118	119	120
Distance	(m)	1630	1630	1800	1800	2100	2100	2200	2200	2700	2762
Jour		16	11	16	11	16	11	16	11	11	16
Mois		12	2	12	2	12	2	12	2	2	12
Année		86	88	86	88	86	88	86	88	88	86
Débit	(l/m)	10.0	11.0	20.0	4.7	2.0	0.5	200.0	250.0	5.0	2.0
Température	(°C)	3.0	3.2	3.4	2.8	4.9	3.9	4.6	3.8	2.8	4.3
pH											
RH	(mv)										
Conductivité	(µS/cm)	18	21	19	22	64	69	48	55	190	26
Dureté totale	(°F)	0.8	1.1	0.9	1.1	3.1	3.4	2.4	2.9	4.9	1.1
Li	(mg/l)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000
Na	"	0.98	1.03	1.00	1.11	2.20	2.24	1.25	1.30	1.30	0.96
K	"	0.47	0.58	0.52	0.63	0.70	0.71	0.64	0.66	0.66	0.73
Mg	"	0.20	0.30	0.30	0.30	0.80	0.90	0.50	0.50	0.50	0.30
Ca	"	2.80	3.90	3.00	3.90	10.90	12.10	8.80	10.50	18.50	3.70
Sr	"	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.04	0.00
F	"	0.6	0.6	0.5	0.5	1.3	1.4	0.8	0.8	0.8	0.4
Cl	"	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.2	0.2	0.0
NO ₃	"	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO ₃	"	8.5	10.4	7.9	10.4	23.8	27.5	18.3	20.1	40.3	9.2
SO ₄	"	3.50	4.10	4.30	4.90	14.70	15.60	11.70	13.70	13.70	6.40
Cations	(meq/l)	0.21	0.28	0.23	0.28	0.73	0.79	0.55	0.64	1.04	0.27
Anions	"	0.24	0.31	0.25	0.30	0.76	0.85	0.59	0.66	0.99	0.31
TID	(meq/l)	0.46	0.59	0.47	0.59	1.49	1.65	1.14	1.30	2.03	0.58
SiO ₂	(mg/l)		5.07		5.09		7.02		5.82	0.00	
B	(µg/l)		26		25		25		25		
TSD	(mg/l)		27		27		68		54	76	
As	(µg/l)		28.2		34.3		225.2		70.5	27.6	
Rb	"		0.2		0.5		2.2		0.5	5.7	
Mo	"		1.1		1.1		6.6		3.6	2.0	
Ba	"				0.2		0.2			1.9	
W	"		0.6		0.4		1.5		0.2	0.2	
U	"		2.1		1.0		8.9		4.8	1.9	

Galerie sud du réseau hydroélectrique d'Emosson

N°		121	122	122	123	123	124	124	125
Distance	(m)	2806	4890	4890	5080	5080	5455	5455	6080
Jour		11	16	11	16	11	16	11	16
Mois		2	12	2	12	2	12	2	12
Année		88	86	88	86	88	86	88	86
Débit	(l/m)	10.0	10.0	7.0	30.0	3.0	3.0	1.0	5.0
Température	(°C)	2.3	5.0	2.3	5.3	2.2	7.7	3.6	8.0
pH									
RH	(mv)								
Conductivité	(µS/cm)	33	78	87	44	54	51	55	49
Dureté totale	(°F)	1.4	4.6	4.9	2.7	2.8	3.0	3.2	2.9
Li	(mg/l)	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001
Na	"	1.05	1.01	1.04	0.74	0.82	0.95	0.93	0.78
K	"	0.87	1.42	1.47	0.97	0.96	1.07	1.09	1.38
Mg	"	0.50	1.10	1.10	0.30	0.30	0.30	0.40	0.20
Ca	"	4.80	16.60	17.80	10.10	10.70	11.30	12.00	11.10
Sr	"	0.01	0.00	0.05	0.00	0.02	0.00	0.03	0.02
F	"	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
Cl	"	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.0	0.2	0.2
NO ₃	"	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.10	0.00
HCO ₃	"	10.4	53.7	56.1	30.5	30.5	34.2	33.6	34.8
SO ₄	"	8.70	7.30	7.10	5.10	5.40	5.80	5.50	5.50
Cations	(meq/l)	0.35	1.00	1.07	0.58	0.62	0.66	0.70	0.64
Anions	"	0.38	1.04	1.08	0.61	0.62	0.69	0.71	0.69
TID	(meq/l)	0.72	2.04	2.15	1.20	1.24	1.35	1.41	1.33
SiO ₂	(mg/l)	5.35		3.94		4.24		4.81	
B	(µg/l)	12		16		17		13	
TSD	(mg/l)	33		89		53		61	
As	(µg/l)	24.2		1.3		4.3		0.7	0.0
Rb	"	0.2		1.9		0.5		6.4	0.1
Mo	"	1.3		2.6		2.7		3.5	2.7
Ba	"	0.2		0.8		0.9		4.6	0.9
W	"	0.1		0.2		0.2		0.1	0.0
U	"	0.7		25.6		6.1		18.6	14.9

Identification Tunnel du Mont-Blanc											
N°		126	126	126	127	127	127	128	128	129	129
Distance	(m)	630	630	630	660	660	660	2300	2300	2810	2810
Jour		29	30	29	29	30	29	30	29	29	29
Mois		9	5	9	9	5	9	5	9	9	9
Année		87	88	88	87	88	88	88	88	87	88
Débit	(l/m)	22.2	19.7	22.2	30.0	23.4	23.0	6.9	6.8	7.1	8.3
Température	(°C)	7.4	7.2	7.3	8.1	8.7	9.1	24.0	24.2	26.1	26.1
pH			7.1	6.2		6.8	6.3	7.1	6.1		8.1
RH	(mv)			+77			+78		+55		
Conductivité	(µS/cm)	113	114	122	119	150	157		830	413	421
Dureté totale	(°F)	5.9			5.9					14.7	
Li	(mg/l)	0.008	0.007	0.007	0.009	0.011	0.012	0.170	0.180	0.074	0.100
Na	"	0.88	1.14	1.24	0.95	1.54	1.73	57.13	57.11	31.25	27.15
K	"	2.11	1.97	2.03	2.09	2.54	2.56	3.80	3.83	2.37	2.56
Mg	"	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60	0.70	0.70	0.70	0.20	0.10
Ca	"	22.50	22.00	22.50	22.80	27.60	28.90	135.00	133.40	58.50	59.50
Sr	"	0.00	0.12	0.17	0.00	0.15	0.22	0.92	1.90	0.00	0.57
F	"	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	4.2	3.6	3.5	3.7
Cl	"	0.4	0.6	0.6	0.2	0.5	0.3	20.2	21.5	6.7	5.6
NO ₃	"	0.60	1.10	1.10	0.10	0.70	0.50	0.30	0.00	0.90	0.00
HCO ₃	"	42.7	48.4	48.8	47.6	58.7	59.8	13.2	13.4	23.2	18.3
SO ₄	"	23.00	22.00	23.00	20.20	33.90	31.90	424.00	396.00	173.00	166.50
Cations	(meq/l)	1.26	1.24	1.27	1.27	1.57	1.64	9.42	9.36	4.36	4.25
Anions	"	1.22	1.30	1.33	1.23	1.71	1.68	9.83	9.25	4.37	4.12
TID	(meq/l)	2.48	2.54	2.60	2.50	3.28	3.32	19.25	18.62	8.73	8.37
SiO ₂	(mg/l)		4.41	4.45		5.01	5.07	15.29	15.08		19.68
B	(µg/l)		20	20		26	25	323	327		186
TSD	(mg/l)		103	105		132	132	675	647		804
As	(µg/l)			29.2			25.2		2.2		1.1
Rb	"			2.7			3.4		9.0		8.3
Mo	"			4.7			3.7		9.8		26.2
Ba	"			4.7			2.6		14.0		1.8
W	"			0.6			0.5		40.7		38.8
U	"			2.2			1.7		0.0		0.1

Identification Tunnel du Mont-Blanc											
N°		130	131	131	132	132	133	133	133	134	135
Distance	(m)	3300	3580	3580	4500	4500	4501	4501	4501	4956	5030
Jour		29	30	29	29	29	29	30	29	29	29
Mois		9	5	9	9	9	9	5	9	9	9
Année		88	88	88	87	88	87	88	88	87	87
Débit	(l/m)	3.0	75.0	120.0	10.0	8.0	10.0	12.7	10.0	35.3	200
Température	(°C)	27.5	26.5	26.2	28.3	28.6	29.9	29.5	29.6	29.7	18.7
pH		6.7	7.6	6.4		6.7	8.1	8.1			
RH	(mv)	47		+42		+37				+238	
Conductivité	(µS/cm)	239	125	125	109	107	139	142	153	85	138
Dureté totale	(°F)				3.5		4.5			3.2	5.3
Li	(mg/l)	0.089	0.071	0.079	0.040	0.100	0.049	0.078	0.170	0.019	0.027
Na	"	10.36	7.08	6.90	8.89	8.63	11.40	6.25	10.65	6.37	6.89
K	"	0.98	0.99	1.06	0.61	0.64	2.42	3.05	2.44	2.22	2.99
Mg	"	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.50	1.40	0.50	0.40	1.40
Ca	"	33.50	18.70	18.60	13.70	14.60	17.30	18.70	18.30	12.10	18.60
Sr	"	0.09	0.13	0.08	0.00	0.15	0.00	0.12	0.12	0.00	0.00
F	"	3.2	3.8	3.2	3.2	3.3	4.5	4.8	3.9	1.8	1.5
Cl	"	1.0	1.3	1.1	1.2	1.1	1.6	1.8	1.1	0.7	0.7
NO ₃	"	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	1.90
HCO ₃	"	34.4	30.1	28.1	29.3	29.3	34.8	35.4	35.0	30.5	26.2
SO ₄	"	70.00	30.50	30.80	20.50	21.10	29.90	30.50	26.50	18.00	40.30
Cations	(meq/l)	2.17	1.30	1.29	1.11	1.16	1.47	1.41	1.51	0.98	1.43
Anions	"	2.22	1.36	1.30	1.11	1.12	1.47	1.52	1.36	1.00	1.40
TID	(meq/l)	4.39	2.66	2.59	2.22	2.28	2.94	2.93	2.87	1.98	2.82
SiO ₂	(mg/l)	12.41	11.44	12.41		18.61	15.29	15.29	15.40		
B	(µg/l)	27	44	19		27	56	56	27		
TSD	(mg/l)	166	104	103		98	118	117	114		
As	(µg/l)	7.3		6.0		7.8			6.3		
Rb	"	5.9		5.4		6.3			6.1		
Mo	"	45.1		42.7		46.0			49.4		
Ba	"	0.4		0.2		3.5			5.3		
W	"	8.9		8.4		10.4			12.2		
U	"	11.1		10.3		13.4			37.2		

Identification Tunnel du Mont-Blanc											
N°		135	136	136	136	138	138	139	140	140	141
Distance	(m)	5030	5100	5100	5100	5407	5407	5759	6780	6780	7140
Jour		29	29	30	29	29	29	29	5	3	5
Mois		9	9	5	9	9	9	9	6	10	6
Année		88	87	88	88	87	88	87	88	88	88
Débit	(l/m)	250.0	20.0	18.3	17.4	120	150	15.8	46.9	37.5	15.6
Température	(°C)	13.3	34.0	31.6	31.5	26.5	27.0	31.9	27.3	28.0	22.6
pH				8.3	6.4		5.6		6.7		7.5
RH	(mv)	+47			+73		+86				
Conductivité	(µS/cm)	128	159	172	183	157	173	84	322	329	99
Dureté totale	(°F)		4.7			5.2		3.3			
Li	(mg/l)	0.110	0.048	0.210	0.380	0.045	0.043	0.017	0.095	0.093	0.038
Na	"	6.24	17.85	11.58	15.39	15.62	14.89	6.75	26.63	24.64	8.99
K	"	2.92	2.65	3.16	2.68	2.22	0.00	1.62	1.19	1.18	1.00
Mg	"	1.30	0.00	0.80	0.00	0.20	0.70	0.20	0.70	0.60	0.50
Ca	"	17.30	18.50	22.60	20.00	20.60	21.50	12.50	48.80	46.70	11.90
Sr	"	0.09	0.00	0.13	0.15	0.00	0.15	0.00	0.22	0.79	0.16
F	"	1.6	3.7	3.8	4.0	4.5	2.5	2.8	2.9	2.6	1.5
Cl	"	0.7	5.7	5.0	5.5	3.9	1.9	0.4	21.1	20.3	1.2
NO ₃	"	1.00	0.20	1.60	0.50	0.40	0.40	0.30	0.00	0.00	0.30
HCO ₃	"	27.5	23.2	24.9	26.2	30.5	28.7	27.5	26.2	26.2	39.5
SO ₄	"	37.00	52.00	50.00	52.20	50.00	50.30	22.00	117.8	108.2	16.60
Cations	(meq/l)	1.33	1.78	1.81	1.80	1.79	1.79	0.98	3.70	3.52	1.06
Anions	"	1.34	1.82	1.82	1.89	1.89	1.71	1.07	3.63	3.38	1.11
TID	(meq/l)	2.67	3.60	3.62	3.69	3.68	3.50	2.05	7.33	6.89	2.17
SiO ₂	(mg/l)	7.59		164.70	21.78		7.59			16.41	10.70
B	(µg/l)	21		77	63		49		117		57
TSD	(mg/l)	103		289	149		129				92
As	(µg/l)	5.0			9.1		4.3			19.0	
Rb	"	1.3			1.3		1.0			8.5	
Mo	"	80.6			79.4		113.3			66.5	
Ba	"	0.6			0.6		0.8			9.2	
W	"	6.0			31.6		20.9			3.0	
U	"	177			9.1		79.2			10.2	

Identification Tunnel du Mont-Blanc											
N°		141	142	142	142	143	143	143	145	145	146
Distance	(m)	7140	7380	7380	7380	8020	8020	8020	8035	8035	8089
Jour		3	5	5	3	5	5	3	5	5	5
Mois		10	10	6	10	10	6	10	10	6	10
Année		88	87	88	88	87	88	88	87	88	87
Débit	(l/m)	21.4	50.0	41.7	93.8	1500	1500	1000	1200	2000	50.0
Température	(°C)	23.3		18.1	18.5		7.9	8.7		8.4	
pH				7.1			7.1			6.9	
RH	(mv)										
Conductivité	(µS/cm)	99	81	84	80	68	79	63	77	80	105
Dureté totale	(°F)		2.9			2.3			2.9		3.9
Li	(mg/l)	0.037	0.026	0.027	0.027	0.013	0.014	0.012	0.011	0.014	0.018
Na	"	8.90	3.68	2.80	2.67	2.86	2.60	2.10	2.51	2.49	5.12
K	"	1.05	3.31	3.16	3.12	2.44	2.46	2.22	2.09	2.44	2.80
Mg	"	0.40	0.40	0.40	0.40	0.30	0.30	0.30	0.20	0.30	0.40
Ca	"	11.70	11.00	11.40	11.00	8.50	10.80	8.90	10.90	10.90	14.50
Sr	"	0.22	0.00	0.12	0.14	0.00	0.06	0.04	0.00	0.06	0.00
F	"	0.9	0.9	0.8	0.9	0.7	0.8	0.6	0.4	0.8	1.0
Cl	"	0.0	0.4	1.3	0.5	0.7	1.1	0.7	0.4	1.0	1.2
NO ₃	"	0.00	3.70	2.50	2.40	2.20	2.10	1.80	1.30	1.70	0.80
HCO ₃	"	39.1	33.6	31.7	31.1	26.2	28.9	23.8	26.8	26.7	30.5
SO ₄	"	15.30	9.10	13.00	10.70	8.80	8.00	8.50	12.90	12.00	23.00
Cations	(meq/l)	1.04	0.83	0.81	0.78	0.64	0.74	0.62	0.73	0.74	1.06
Anions	"	1.01	0.86	0.91	0.83	0.70	0.75	0.65	0.76	0.79	1.08
TID	(meq/l)	2.05	1.69	1.72	1.62	1.34	1.49	1.26	1.49	1.53	2.13
SiO ₂	(mg/l)	9.07		5.26	4.88		5.26	5.13		5.37	
B	(µg/l)	5		40	21		35	18		34	
TSD	(mg/l)	87		73	68		62	54		64	
As	(µg/l)	37.5			76.4			8.2			
Rb	"	7.7			6.1			0.6			
Mo	"	102			88.3			67.1			
Ba	"	0.6			0.4			0.0			
W	"	32.4			14.0			6.1			
U	"	95.4			329			139			

Identification Tunnel du Mont-Blanc

N°		147	148	150	150	149	151	152	152	153	154
Distance	(m)	8098	8139	8150	8150	8130	8211	8230	8230	8240	8250
Jour		5	5	5	3	3	5	5	3	5	5
Mois		10	10	6	10	10	10	6	10	10	6
Année		87	87	88	88	88	87	88	88	87	88
Débit	(l/m)	20.0	27.3	1000	600	107	50.0	57.7	93.8	200	250
Température	(°C)			7.4	8.2	8.1		8.4	9.1		8.5
pH				7.5				7.8			7.7
RH	(mv)										
Conductivité	(µS/cm)	97	96	74	72	81	70	68	68	69	67
Dureté totale	(°F)	3.7	3.6				2.8			2.7	
Li	(mg/l)	0.014	0.014	0.009	0.009	0.010	0.010	0.009	0.009	0.011	0.009
Na	"	3.79	4.14	1.87	1.85	2.20	2.23	2.40	2.36	2.29	2.28
K	"	2.70	2.60	1.95	1.96	2.11	2.05	1.87	1.89	2.12	1.97
Mg	"	0.30	0.40	0.20	0.20	0.30	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Ca	"	14.00	14.00	10.70	10.60	12.00	10.50	10.10	10.70	10.50	10.20
Sr	"	0.00	0.00	0.06	0.05	0.06	0.00	0.05	0.05	0.00	0.05
F	"	0.8	0.8	0.6	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2
Cl	"	1.1	1.5	0.6	0.5	0.6	0.4	0.8	0.5	0.4	0.6
NO ₃	"	1.20	0.00	1.00	0.90	1.10	1.80	1.00	0.00	1.70	1.50
HCO ₃	"	29.9	29.9	26.6	25.0	25.0	26.8	25.0	25.6	28.1	23.3
SO ₄	"	20.80	19.20	12.00	11.50	18.10	11.10	13.80	14.40	10.30	13.00
Cations	(meq/l)	0.96	0.98	0.69	0.68	0.77	0.69	0.68	0.71	0.70	0.68
Anions	"	1.02	0.97	0.75	0.70	0.85	0.73	0.75	0.75	0.73	0.70
TiD	(meq/l)	1.98	1.95	1.44	1.38	1.62	1.43	1.43	1.45	1.43	1.38
SiO ₂	(mg/l)			5.05	5.09	5.13		5.05	5.09		4.83
B	(µg/l)			33	9	24		24	12		23
TSD	(mg/l)			61	58	67		61	61		58
As	(µg/l)				4.0	3.4			2.6		
Rb	"				0.5	0.4			0.5		
Mo	"				39.1	43.0			31.7		
Ba	"					0.0			0.1		
W	"				3.7	1.9			1.6		
U	"				109	122			99.4		

Identification Tunnel du Mont-Blanc

N°		154	155	155	156	156	157	158	159	160	161
Distance	(m)	8250	8290	8290	8330	8330	8340	8285	8836	8924	9385
Jour		3	5	3	5	3	5	5	5	5	5
Mois		10	6	10	6	10	10	10	10	10	10
Année		88	88	88	88	88	87	87	87	87	87
Débit	(l/m)	250.0	46.9	62.5	75.0	200.0	120.0	54.5	6.7	150.0	8.0
Température	(°C)	9.2	9.9	10.5	12.9	13.6					
pH			7.6		7.5						
RH	(mv)										
Conductivité	(µS/cm)	67	69	68	79	76	37	69	159	133	103
Dureté totale	(°F)						2.9	2.9	3.3	3.0	3.1
Li	(mg/l)	0.009	0.100	0.010	0.100	0.015	0.016	0.012	0.210	0.180	0.130
Na	"	2.33	2.29	2.34	3.53	3.44	3.26	2.20	23.71	19.82	11.64
K	"	1.97	2.04	2.08	2.55	2.53	2.67	2.30	0.70	0.96	1.21
Mg	"	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.00	0.00	0.10
Ca	"	10.70	10.50	10.70	11.70	11.40	11.00	11.20	13.00	12.00	12.30
Sr	"	0.05	0.06	0.05	0.07	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F	"	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.3	3.5	2.6	1.9
Cl	"	0.5	0.8	0.3	1.0	0.7	0.9	0.0	17.1	12.6	5.5
NO ₃	"	0.50	2.00	0.00	1.30	0.00	1.00	0.00	0.30	0.20	0.30
HCO ₃	"	25.0	26.4	26.8	28.1	27.5	31.7	32.3	40.3	28.1	35.4
SO ₄	"	14.20	13.70	11.40	15.50	15.90	12.40	10.70	26.00	32.00	20.00
Cations	(meq/l)	0.71	0.71	0.71	0.83	0.80	0.77	0.73	1.73	1.51	1.18
Anions	"	0.74	0.78	0.70	0.85	0.82	0.84	0.77	1.87	1.62	1.26
TiD	(meq/l)	1.44	1.49	1.40	1.68	1.62	1.61	1.50	3.60	3.13	2.43
SiO ₂	(mg/l)	5.13	5.09	3.89	6.61	5.88	7.22	5.99	21.00	18.97	12.20
B	(µg/l)	9	22	11	102	10					
TSD	(mg/l)	61	63	58	71	68					
As	(µg/l)	2.6		1.6		5.0					
Rb	"	0.4		0.6		0.7					
Mo	"	28.9		30.8		42.0					
Ba	"	0.2		0.1		0.8					
W	"	1.2		1.1		1.0					
U	"	102		131		98.4					

Identification Tunnel du Mont-Blanc							
N°		159	159	159	160	160	160
Distance	(m)	9420	9420	9420	9885	9885	9885
Jour		5	5	3	5	5	3
Mois		10	6	10	10	6	10
Année		87	88	88	87	88	88
Débit	(l/m)	22.3	22.7	25.0	15.8	17.9	22.1
Température	(°C)		21.1	22.6		20.2	21.3
pH			7.2				
RH	(mv)						
Conductivité	(μ S/cm)	106	106	105	278	272	283
Dureté totale	(°F)	2.9			4.4		
Li	(mg/l)	0.130	0.120	0.120	0.720	0.500	0.500
Na	"	11.24	11.17	11.13	41.21	59.97	62.00
K	"	1.22	1.15	1.17	2.06	2.00	2.01
Mg	"	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20
Ca	"	11.30	11.80	11.60	17.00	11.20	11.40
Sr	"	0.00	0.15	0.18	0.00	0.16	0.19
F	"	1.9	2.2	1.9	4.7	6.0	5.5
Cl	"	5.3	6.3	4.5	46.3	46.8	45.0
NO ₃	"	0.30	0.30	0.00	0.00	0.30	0.00
HCO ₃	"	33.6	33.2	32.9	28.1	47.6	47.6
SO ₄	"	19.50	18.20	14.20	48.00	39.00	39.00
Cations	(meq/l)	1.11	1.13	1.12	2.81	3.31	3.41
Anions	"	1.21	1.22	1.06	3.01	3.23	3.15
TiD	(meq/l)	2.32	2.35	2.18	5.83	6.54	6.56
SiO ₂	(mg/l)	12.45	11.49	10.74		11.49	13.90
B	(μ g/l)		165	116		672	625
TSD	(mg/l)		96	89		226	228
As	(μ g/l)			9.0			12.4
Rb	"			9.3			27.0
Mo	"			63.8			60.0
Ba	"			0.4			9.3
W	"			1.6			47.1
U	"			6.4			12.7

Identification: Château d'Eau

N°	161											
Distance	(m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jour		5	3	6	8	16	14	25	30	15	10	11
Mois		12	2	4	5	7	8	9	10	3	6	11
Annee		86	87	87	87	87	87	87	87	88	88	88
Débit	(l/m)	300		156	410		642	625	615	246	615	1080
Température	(°C)	5.1	4.6	4.6	4.7	5.8	5.1	5.3	4.6	4.9	4.9	5.1
pH												8.5
RH	(mv)											+240
Conductivité	(µS/cm)	88	94	98	104	81	82	85	92	92	91	87
Dureté totale	(°F)	4.9	5.0	5.1	5.5	5.1	4.6	4.7	4.3	4.8	4.8	4.8
Li	(mg/l)	0.007	0.007	0.007	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008	0.005
Na	"	1.47	1.49	1.62	1.67	1.38	1.45	1.52	1.44	1.52	1.44	1.47
K	"	0.24	0.24	0.25	0.23	0.23	0.23	0.25	0.24	0.25	0.25	0.26
Mg	"	0.80	0.70	0.70	0.60	0.60	0.60	0.80	0.80	0.80	0.60	0.80
Ca	"	18.00	18.50	19.00	20.50	19.00	18.00	17.50	17.50	18.00	18.00	16.16
Sr	"	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.06
F	"	0.0	0.1	0.1	0.1	0.5	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2
Cl	"	0.4	0.7	0.5	0.4	0.5	0.4	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6
NO3	"	4.10	0.90	0.00	0.90	0.00	0.30	1.00	0.90	0.60	0.80	0.50
HCO3	"	52.5	54.9	54.9	56.1	57.3	55.5	56.0	56.0	54.9	56.1	46.4
SO4	"	4.80	8.30	11.00	10.10	7.70	8.80	8.00	8.50	9.90	8.40	9.70
Cations	(meq/l)	1.03	1.05	1.09	1.16	1.06	1.02	1.01	1.01	1.04	1.02	0.94
Anions	"	1.04	1.11	1.15	1.16	1.14	1.12	1.13	1.13	1.14	1.14	1.00
TID	(meq/l)	2.07	2.17	2.23	2.32	2.21	2.14	2.14	2.14	2.17	2.16	1.94
SiO2	(mg/l)	4.60	4.60	5.44	4.98	4.86	5.88	6.13	5.91	5.91	5.97	5.88
B	(µg/l)	16	16	16	13	15	7	21		12	17	
TSD	(mg/l)	87	91	94	96	92	91	92	92	93	93	82
As	(µg/l)											32.4
Rb	"											1.0
Mo	"											0.7
Ba	"											2.4
W	"											
U	"											7.8

Identification: Château d'Eau

N°		162	163	164	165
Distance	(m)	268	810	1000	1055
Jour		5	5	5	5
Mois		12	12	12	12
Annee		86	86	86	86
Débit	(l/m)	5.0	6.0	60.0	160
Température	(°C)	3.8	5.1		
pH					
RH	(mv)				
Conductivité	(µS/cm)	122	102		
Dureté totale	(°F)	6.8	5.4	4.4	3.5
Li	(mg/l)	0.004	0.005	0.003	0.003
Na	"	1.37	1.90	0.90	1.15
K	"	0.17	0.22	0.26	0.20
Mg	"	0.80	0.70	0.80	0.70
Ca	"	23.42	18.50	16.10	11.00
Sr	"	0.03	0.07	0.06	0.05
F	"	0.0	0.0	0.0	0.0
Cl	"	0.1	0.5	0.2	0.1
NO3	"	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO3	"	68.9	58.6	48.2	37.8
SO4	"	7.80	8.70	5.00	5.90
Cations	(meq/l)	1.30	1.07	0.92	0.66
Anions	"	1.30	1.16	0.90	0.75
TID	(meq/l)	2.60	2.22	1.81	1.41
SiO2	(mg/l)	7.64	7.69	4.92	3.00
B	(µg/l)				
TSD	(mg/l)	110	97	76	60
As	(µg/l)	0.0	35.0	0.0	0.0
Rb	"	1.2	0.9	0.8	0.4
Mo	"	0.8	2.4	3.7	0.6
Ba	"	10.2	2.9	3.7	1.8
W	"	32.4	0.0	0.0	0.0
U	"	9.9	19.0	3.2	4.8

Identification Torrents											
N°	166	167	169	169	170	170	171	171	172	172	
Jour	23	23	19	8	19	8	19	8	19	8	
Mois	8	8	5	9	5	9	5	9	5	9	
Année	89	89	88	88	88	88	88	88	88	88	
Débit	(l/m)										
Température	(°C)	10.4	2.5	6.8	8.6	3.0	5.5	1.8	3.0	2.9	6.4
pH		6.0	6.0	7.0		7.5		7.4		7.4	
RH	(mv)			+198		+140		+5		+15	
Conductivité	(µS/cm)	50	8	63	54	59	20	32	21	94	64
Dureté totale	(°F)	2.3	0.4	2.3		2.6		1.5		4.6	
Li	(mg/l)	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002	0.004	0.005	0.005	0.005	0.005
Na	"	0.84	0.23	2.63	2.10	0.15	0.34	0.16	0.06	0.67	0.43
K	"	1.83	0.32	1.22	1.02	1.93	1.22	1.21	0.72	2.74	2.13
Mg	"	0.30	0.00	0.30	0.20	0.50	0.30	0.20	0.10	0.60	0.40
Ca	"	8.90	1.50	8.57	7.21	9.60	4.50	5.60	3.64	17.50	9.80
Sr	"	0.02	0.00	0.08	0.07	0.03	0.02	0.05	0.03	0.09	0.06
F	"	0.3	0.2	0.6	0.6	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0
Cl	"	0.1	0.0	1.0	0.7	0.3	0.2	0.2	0.1	0.5	0.1
NO ₃	"	0.40	0.70	2.20	0.00	2.30	0.80	1.20	0.00	1.00	0.00
HCO ₃	"	25.8	4.8	17.9	16.5	19.5	8.5	16.4	14.6	37.8	28.1
SO ₄	"	0.60	0.20	15.80	12.20	11.90	6.20	4.00	3.10	18.00	10.80
Cations	(meq/l)	0.55	0.09	0.60	0.50	0.57	0.29	0.33	0.21	1.02	0.59
Anions	"	0.46	0.10	0.72	0.57	0.62	0.29	0.38	0.31	1.03	0.69
TID	(meq/l)	1.01	0.20	1.32	1.07	1.20	0.59	0.71	0.52	2.05	1.28
SiO ₂	(mg/l)	2.93	1.61	3.83	3.49	2.55	1.37	0.86	0.47	2.61	1.52
B	(µg/l)	24	24	16	10	10		6	8	5	
TSD	(mg/l)	42	10	54	44	49	24	30	23	82	53
As	(µg/l)	8.2			3.8		0.4		0.6		2.6
Rb	"	7.4	5.9		2.4		4.1		3.0		7.0
Mo	"	1.6	0.0		7.3		1.2		0.0		1.1
Ba	"	2.3	0.8		0.9		8.7		3.0		4.0
W	"										
U	"	1.5	0.0		5.1		0.2		0.0		0.2

Identification Torrents						
N°	173	173	174	175	176	
Jour	15	8	15	19	19	
Mois	5	9	5	5	5	
Année	88	88	88	88	88	
Débit	(l/m)					
Température	(°C)	5.8	13.6	6.4	5.5	5.9
pH		7.5		8.0	7.6	7.0
RH	(mv)	-50		-45	+135	+73
Conductivité	(µS/cm)	81	115	181	135	103
Dureté totale	(°F)	3.7		10.6	7.7	6.0
Li	(mg/l)	0.003	0.003	0.003	0.002	0.003
Na	"	0.61	0.80	0.72	0.05	0.63
K	"	1.23	2.05	1.32	1.31	0.69
Mg	"	0.40	0.60	3.20	2.10	1.50
Ca	"	18.40	18.34	37.00	27.50	17.09
Sr	"	0.15	0.13	0.23	0.11	0.20
F	"	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
Cl	"	0.7	0.2	0.4	0.1	0.3
NO ₃	"	1.90	0.00	1.00	1.40	1.40
HCO ₃	"	30.4	40.1	111.3	82.2	63.0
SO ₄	"	16.00	26.30	11.60	9.10	8.80
Cations	(meq/l)	1.01	1.06	2.18	1.59	1.03
Anions	"	0.88	1.21	2.10	1.56	1.25
TID	(meq/l)	1.89	2.27	4.28	3.15	2.28
SiO ₂	(mg/l)	3.74	3.74	3.79	3.79	3.68
B	(µg/l)	7	10	8	9	8
TSD	(mg/l)	74	92	171	128	97
As	(µg/l)		35.1	0.4	0.2	0.2
Rb	"		5.5	3.3	5.4	2.1
Mo	"		1.8	3.0	1.5	1.7
Ba	"		16.5	9.7	3.0	3.9
W	"					
U	"		2.4	4.9	6.1	1.9

Annexe 7.2

Classification chimique des eaux souterraines

Sources	Distance (m)	Date*	Débit (l/m)	Temp. (°C)	TSD (mg/l)	Type géochimique	Groupe	Aquifères
Chateau d'Eau	1000	5-déc-86	60		76	Ca-HCO ₃	1	GneAR
Chateau d'Eau	1055	5-déc-86	160		60	Ca-HCO ₃	1	GneAR
Chateau d'Eau	268	5-déc-86	5	3.8	110	Ca-HCO ₃	1	GneAR
Chateau d'Eau	810	5-déc-86	6	5.1	97	Ca-HCO ₃	1	GneAR
EMOE	2795	17-mar-88	32.6	4.0	100	Ca-HCO ₃	1	GraMB
EMOE	2813	17-mar-88	44.1	3.7	100	Ca-HCO ₃	1	GraMB
EMOE	7530	17-mar-88	536	4.0	38	Ca-HCO ₃	1	GraMB
EMOS	4890	11-fév-88	7	2.3	85	Ca-HCO ₃	1	GraMB
EMOS	5080	11-fév-88	3	2.2	49	Ca-HCO ₃	1	GneMB
EMOS	5455	11-fév-88	1	3.6	56	Ca-HCO ₃	1	GneMB
EMOS	6080	16-déc-86	5	8.0	54	Ca-HCO ₃	1	GneMB
Restaurant, Emosson		21-aoû-87		4.5	27	Ca-HCO ₃	1	GneAR
Bienvenue		6-fév-87		5.0	23	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
Bonnette		11-nov-88	800	6.8	89	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
Borgeau		28-aoû-86		7.9	135	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
Bovemier gare		4-fév-88	100	9.1	312	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
Bovemier thermale		12-nov-87	120	21	253	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
Brocard inférieur		17-déc-87	1700	7.2	75	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
Brocard supérieur		3-jui-87	150	7.4	73	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
Cerniat inférieur		3-jui-86	4	6.6	40	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
Cerniat supérieur		3-jui-86	35	3.0	62	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
Chamois		11-nov-86	15	6.7	62	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
Chapeau supérieur		14-déc-88	1340	3.3	45	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
Chateau d'Eau		11-nov-88	1080	5.1	82	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneGraAR
Cheneau inférieur		21-aoû-87	60	5.0	81	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
Cheneau supérieur		3-jui-86	400	4.1	71	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
Col des Montets		30-oct-87	300	5.8	36	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
Combasse 1		12-nov-87	150	5.2	83	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
Combasse 2		12-nov-87	20	5.1	81	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
Combasse 3		12-nov-87	400	5.1	88	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
Durmand		23-aoû-89	2500	2.4	20	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	3613	17-mar-88	12.9	3.6	49	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	3618	17-mar-88	46.7	3.4	46	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	3622	17-mar-88	25.9	3.5	49	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	3629	17-mar-88	20.5	3.5	42	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	7425	17-mar-88	1000	5.4	51	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	9122	17-mar-88	100	12	75	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	9495	17-mar-88	28.8	12	100	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	9655	17-mar-88	54.5	9.9	73	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	9655	17-mar-88	62.5	9.1	77	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	9665	17-mar-88	200	10	77	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	10155	17-mar-88	2000	8.6	68	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	10155	17-mar-88	1500	8.0	71	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	11035	17-mar-88	60	10	80	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	11035	17-mar-88	150	9.5	79	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	13535	17-mar-88	440	7.7	101	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	13535	17-mar-88	30	7.1	103	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	13860	17-mar-88	150	5.6	106	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	14930	17-mar-88	1500	0.2	38	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	RhyMB
EMON	870	6-avr-90	0.8	4.4	102	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
EMON	960	6-avr-90	12	4.6	67	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
EMON	1340	6-avr-90	10.9	3.5	105	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
EMON	1480	6-avr-90	8	6.5	129	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
EMON	1853	6-avr-90	5	6.5	104	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
EMON	2160	6-avr-90	11	6.7	105	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
EMON	2180	6-avr-90	27.3	6.9	109	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
EMON	2895	6-avr-90	17	6.2	62	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
EMON	3092	6-avr-90	10	5.2	78	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
EMOS	505	17-mar-88	0.2	1.4	58	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
EMOS	750	16-déc-86	1	2.5	54	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
EMOS	950	16-déc-86	5	3.2	30	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
EMOS	1023	11-fév-88	2	2.5	35	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
EMOS	1530	11-fév-88	3.5	3.9	36	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
EMOS	1614	11-fév-88	19	6.3	52	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
EMOS	1630	11-fév-88	11	3.2	22	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
EMOS	1800	11-fév-88	4.7	2.8	22	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
EMOS	2100	11-fév-88	0.5	3.9	61	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
EMOS	2200	11-fév-88	250	3.8	48	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB

* Echantillon utilisé pour définir le type géochimique.

Gra = Granite, Gne = Gneiss, MB = Mont-Blanc, AR = Aiguilles Rouges

Sources	Distance (m)	Date*	Débit (l/m)	Temp (°C)	TSD (mg/l)	Type géochimique	Groupe	Aquifères
EMOS	2700	11-fév-88	5	2.8	76	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
EMOS	2762	16-déc-86	2	4.3	22	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
EMOS	2806	11-fév-88	10	2.3	28	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
EMOW	604	14-avr-87	8	5.1	105	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
EMOW	1077	14-avr-87	5	6.3	90	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
EMOW	1170	14-avr-87	6	6.4	70	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
EMOW	2012	14-avr-87	3	7.3	144	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
EMOW	3708	14-avr-87	5	6.1	120	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
EMOW	3804	14-avr-87	3.2	6.2	129	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
EMOW	5708	14-avr-87	0.2	4	69	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
EMOW	6555	14-avr-87	3	4.7	64	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
Eyrald		19-jui-86	30	5.4	29	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
Feugier1		25-nov-86	60	4.6	42	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
Feugier 2		25-nov-86	500	4.6	46	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
Feugier3		25-nov-86	500	4.4	47	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
Feugier 4		25-nov-86	220	4.1	38	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
Flontaines		4-fév-88	1733	4.8		Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraAR
Frebouze		29-oct-87	4000	4.0	59	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
Giète		14-jui-87	650	8.0	50	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
Gracenièr		25-nov-86	900	5.0	50	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
Mariotti, réservoir		16-jan-89		5.2	61	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
Mélèze		25-fév-87		5.1	26	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
Métral		25-fév-87		5.7	24	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
Nant Provant		26-fév-88	584	6.0	157	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
Plan de l'Au		3-jui-87	200	4.5	51	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
Prélet 1		25-nov-86	570	4.4	34	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
Prélet 2A		25-nov-86	300	4.2	28	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
Prélet 2B		25-nov-86	300	4.3	33	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
Président		25-fév-87		5.0	23	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
Ravoir		4-fév-88		5.2	81	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
Source "radioactive"		17-déc-87		5.1	47	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneAR
TMB	630	29-sep-88	22.2	7.3	100	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
TMB	660	29-sep-88	23	9.1	127	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GneMB
TMB	7380	3-oct-88	93.8	19	63	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
TMB	8020	3-oct-88	1000	8.7	49	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
TMB	8035	5-oct-87	2000	8.4	58	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
TMB	8098	5-oct-87	20		74	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
TMB	8130	5-oct-87	107	8.1	62	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
TMB	8139	5-oct-87	27.3		72	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
TMB	8150	3-oct-88	600	8.2	53	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
TMB	8211	5-oct-87	50		55	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
TMB	8230	3-oct-88	93.8	9.1	56	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
TMB	8240	3-oct-88	200		56	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
TMB	8250	3-oct-88	250	9.2	56	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
TMB	8285	5-oct-87	54.5		59	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
TMB	8290	3-oct-88	62.5	11	54	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
TMB	8330	3-oct-88	200	14	62	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
TMB	8340	5-oct-87	120		63	Ca-HCO ₃ >SO ₄	2	GraMB
EMOE	8948	17-mar-88	375	11	66	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
EMOE	8950	17-mar-88	65.2	11	75	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
EMOE	9605	17-mar-88	75	13	86	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
EMOE	9643	17-mar-88	85.7	10	72	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
EMOE	9643	17-mar-88	100	9.9	75	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
EMOE	9665	17-mar-88	188	10	79	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
EMOE	10555	17-mar-88	60	17	58	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
EMOE	10555	17-mar-88	75	17	69	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
EMOE	10556	17-mar-88	33	18	62	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
EMOE	10556	17-mar-88	35.7	17	69	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
EMOE	11315	17-mar-88	100	15	72	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
EMOE	11315	17-mar-88	150	14	69	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
EMOE	11655	17-mar-88	15	11	65	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
EMOE	11655	17-mar-88	10.7	11	66	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
TMB	4500	29-sep-88	8	29	79	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
TMB	4501	29-sep-88	10	30	99	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
TMB	4956	29-sep-87	35.3	30	71	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
TMB	7140	3-oct-88	21.4	23	78	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
TMB	8089	5-oct-87	50		78	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
TMB	9385	5-oct-87	8		87	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB

* Echantillon utilisé pour définir le type géochimique.

Gra = Granite, Gne = Gneiss, MB = Mont-Blanc, AR = Aiguilles Rouges

Sources	Distance (m)	Date*	Débit (l/m)	Temp (°C)	TSD (mg/l)	Type géochimique	Groupe	Aquifères
TMB	9420	5-oct-87	25	23	78	Ca>Na-HCO ₃ >SO ₄	3	GraMB
EMOE	7090	17-mar-88	88.2	8.8	53	Ca>Na-HCO ₃ >F	4	GraMB
EMOE	7130	17-mar-88	31.3	9.8	57	Ca>Na-HCO ₃ >F	4	GraMB
EMOE	7565	17-mar-88	188	5	41	Ca>Na-HCO ₃ >F	4	GraMB
EMOE	7625	17-mar-88	214	8.5	46	Ca>Na-HCO ₃ >F	4	GraMB
EMOE	7640	17-mar-88	188	8.4	50	Ca>Na-HCO ₃ >F	4	GraMB
EMOE	7880	17-mar-88	100	6.2	43	Ca>Na-HCO ₃ >F	4	GraMB
EMOE	8580	17-mar-88	115	11	64	Ca>Na-HCO ₃ >F	4	GraMB
EMOE	9322	17-mar-88	25	12	83	Ca>Na-HCO ₃ >F	4	GraMB
EMOE	9650	17-mar-88	107	13	78	Ca>Na-HCO ₃ >F	4	GraMB
TMB	8836	5-oct-87	6.7		121	Na>Ca-HCO ₃ >Cl>SO ₄	5	GraMB
Betty		26-fév-88		7.1	188	Ca-SO ₄ >HCO ₃	6	GneMB
Chapeau inférieur		4-jui-86	800	3.5		Ca-SO ₄ >HCO ₃	6	GneMB
EMOW	1050	14-avr-87	0.1	6.4	122	Ca-SO ₄ >HCO ₃	6	GneAR
EMOW	3980	14-avr-87	30	3.8	97	Ca-SO ₄ >HCO ₃	6	GneAR
EMOW	7300	14-avr-87	3.4	4.8	125	Ca-SO ₄ >HCO ₃	6	GneAR
Enchapeleuse		26-fév-88	220	3.8	133	Ca-SO ₄ >HCO ₃	6	GneMB
TMB	2300	29-sep-88	6.82	24	630	Ca>Na-SO ₄	7	GraMB
TMB	2810	29-sep-88	8.33	26	284	Ca>Na-SO ₄	7	GraMB
TMB	3300	29-sep-88	3	28	154	Ca>Na-SO ₄ >HCO ₃	8	GraMB
TMB	3580	29-sep-88	120	26	90	Ca>Na-SO ₄ >HCO ₃	8	GraMB
TMB	5030	29-sep-88	250	13	96	Ca>Na-SO ₄ >HCO ₃	8	GraMB
TMB	5100	29-sep-88	17.4	32	127	Ca>Na-SO ₄ >HCO ₃	8	GraMB
TMB	5407	29-sep-88	150	27	121	Ca>Na-SO ₄ >HCO ₃	8	GraMB
TMB	5759	30-jan-04	15.8	32	71	Ca>Na-SO ₄ >HCO ₃	8	GraMB
TMB	6780	3-oct-88	37.5	28	230	Ca>Na-SO ₄ >HCO ₃	8	GraMB
TMB	8924	5-oct-87	150		106	Na>Ca-SO ₄ >HCO ₃ >Cl	9	GraMB
TMB	9885	3-oct-88	22.1	21	213	Na>Ca-Cl>SO ₄ >HCO ₃	10	GraMB

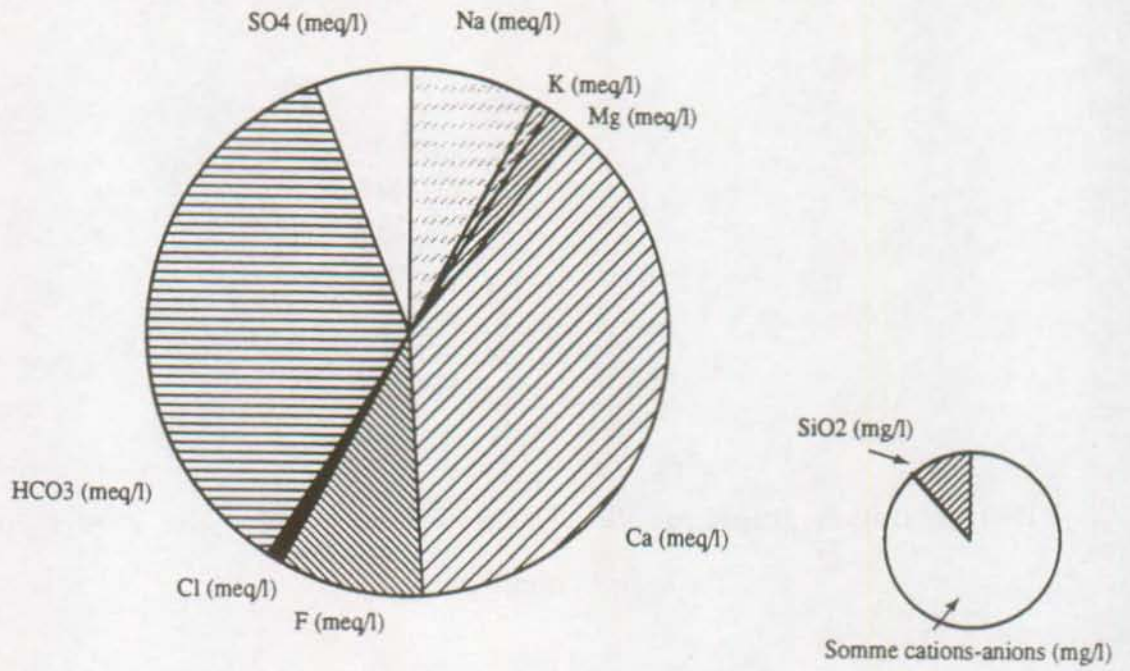
* Echantillon utilisé pour définir le type géochimique.

Gra = Granite, Gne = Gneiss, MB = Mont-Blanc, AR = Aiguilles Rouges

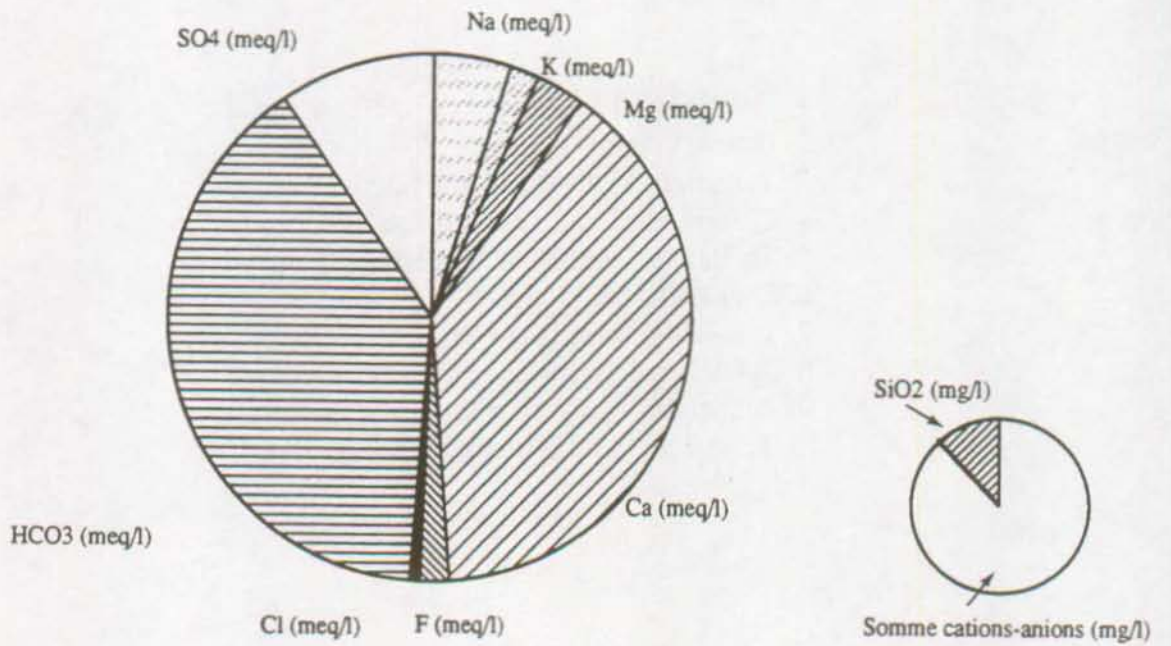
Annexe 7.3**Représentation graphique de la composition chimique des groupes d'eaux
souterraines**

1. Galerie est d'Emosson km 7.530, groupe 1
2. Brocard inférieur, groupe 2
3. Tunnel du Mont-Blanc km 4.500, groupe 3
4. Galerie est d'Emosson, groupe 4
5. Tunnel du Mont-Blanc km 8.836, groupe 5
6. Enchapeleuse, groupe 6
7. Tunnel du Mont-Blanc km 2.810, groupe 7
8. Tunnel du Mont-Blanc km 5.030, groupe 8
9. Tunnel du Mont-Blanc km 8.924, groupe 9
10. Tunnel du Mont-Blanc km 5.030 groupe 10

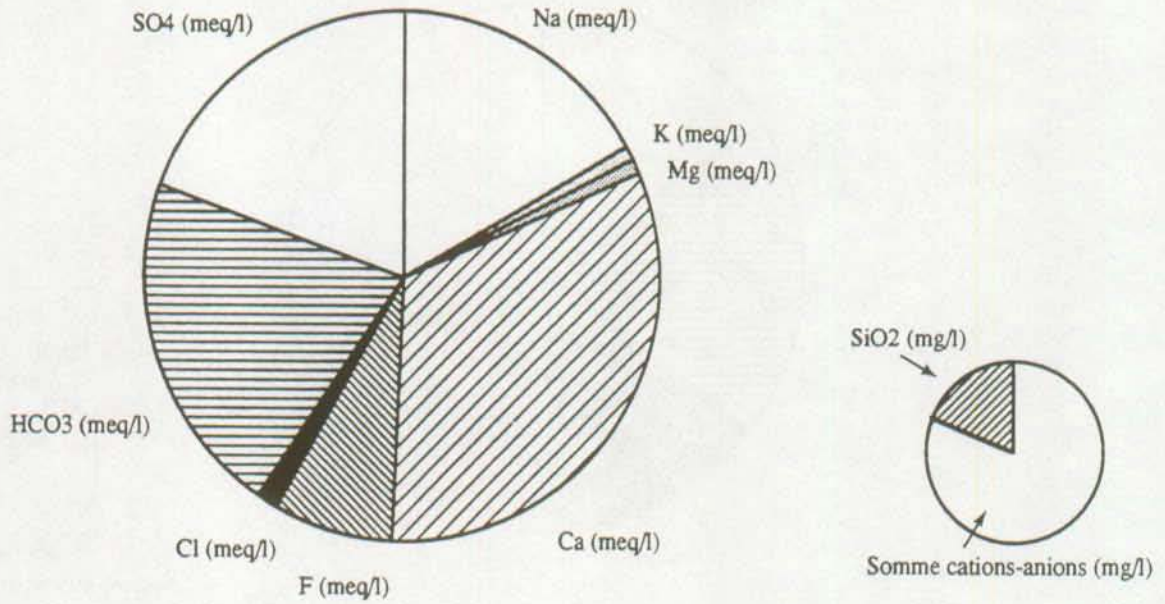
Galerie est Emosson km 7.530
Groupe 1



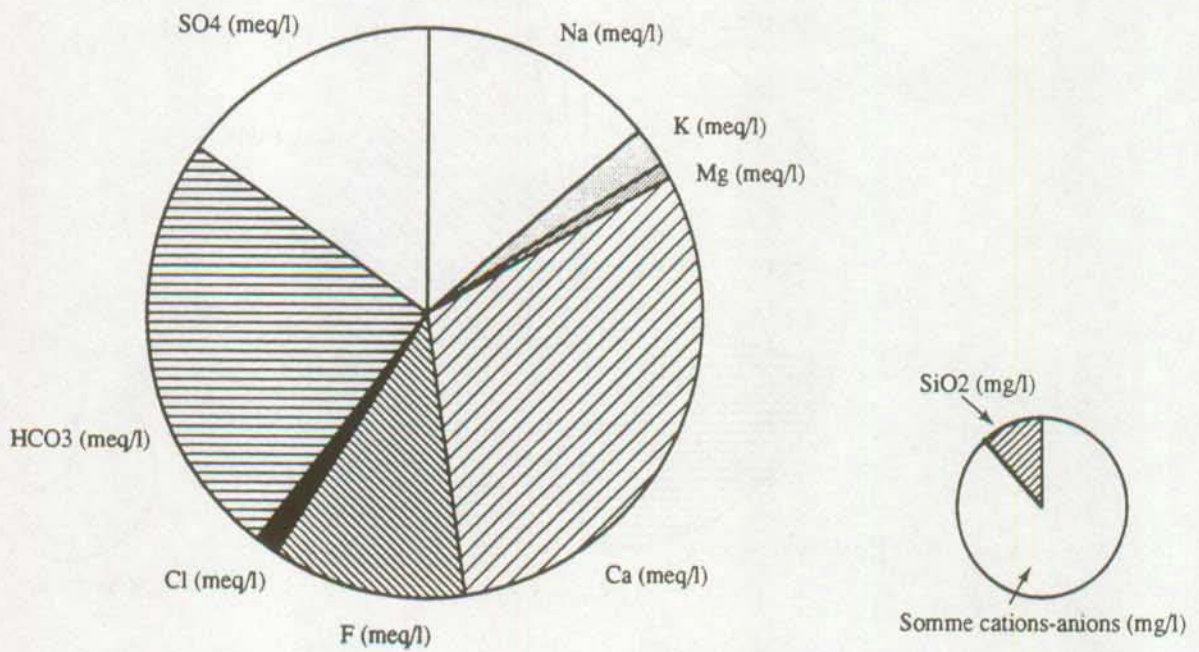
Brocard inférieur
Groupe 2



Tunnel du Mt Blanc Km 4.500
Groupe 3

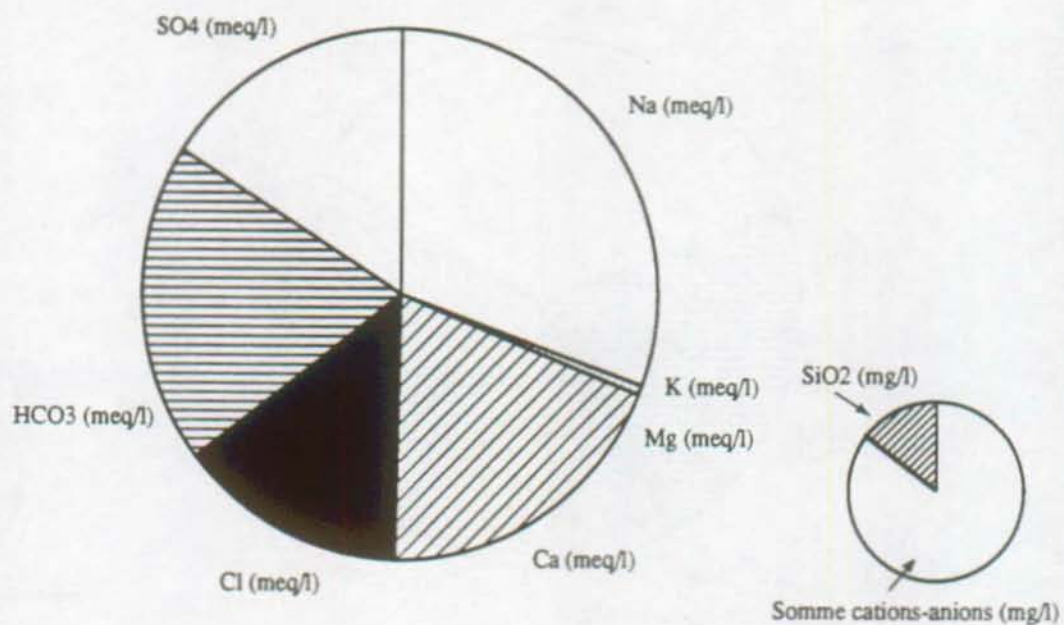


Galerie est Emosson km 9.650
Groupe 4



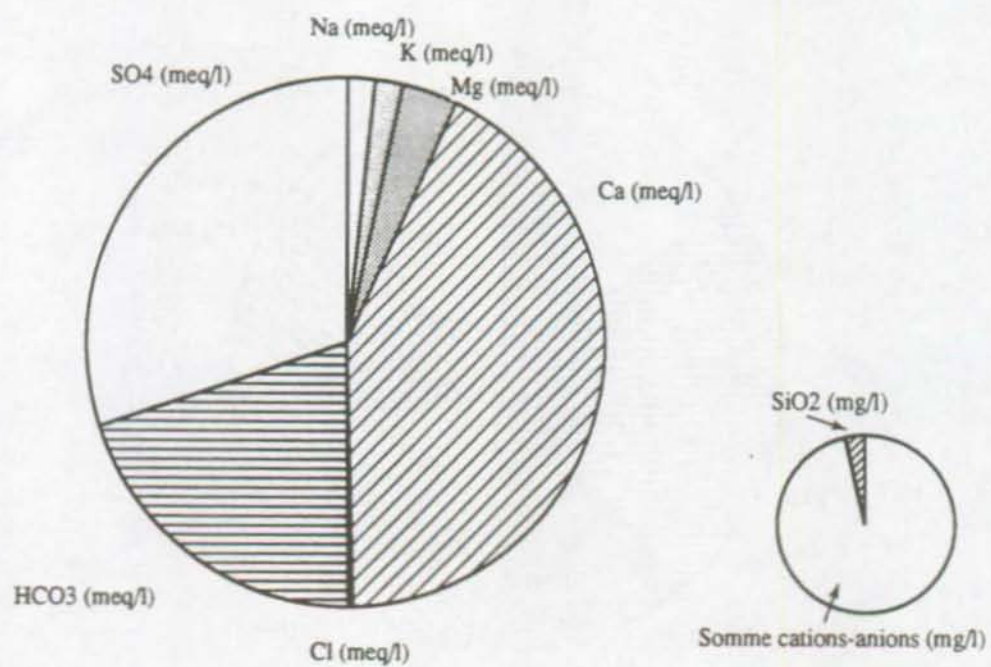
Tunnel du Mont-Blanc km 8.836

Groupe 5

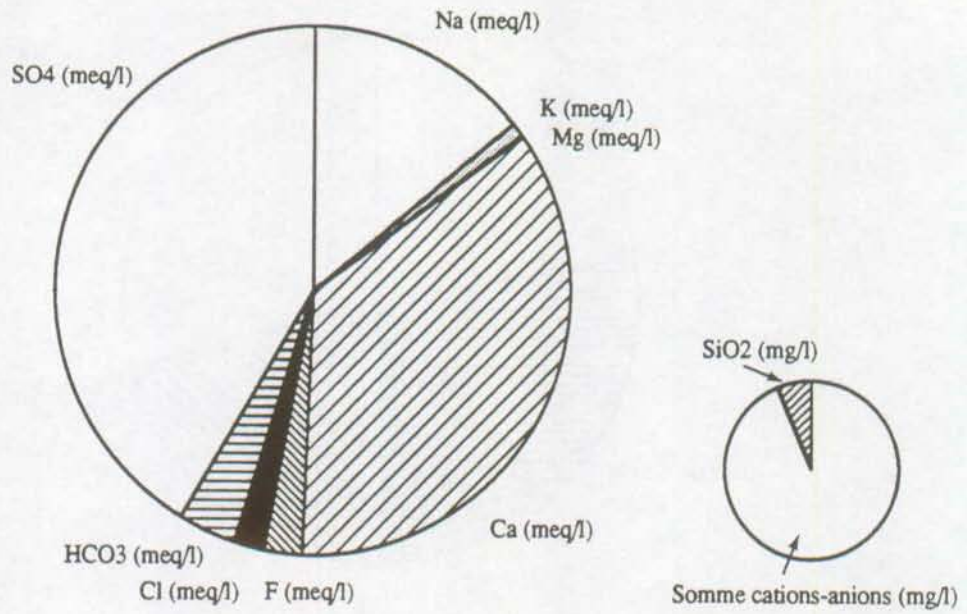


Enchapeleuse

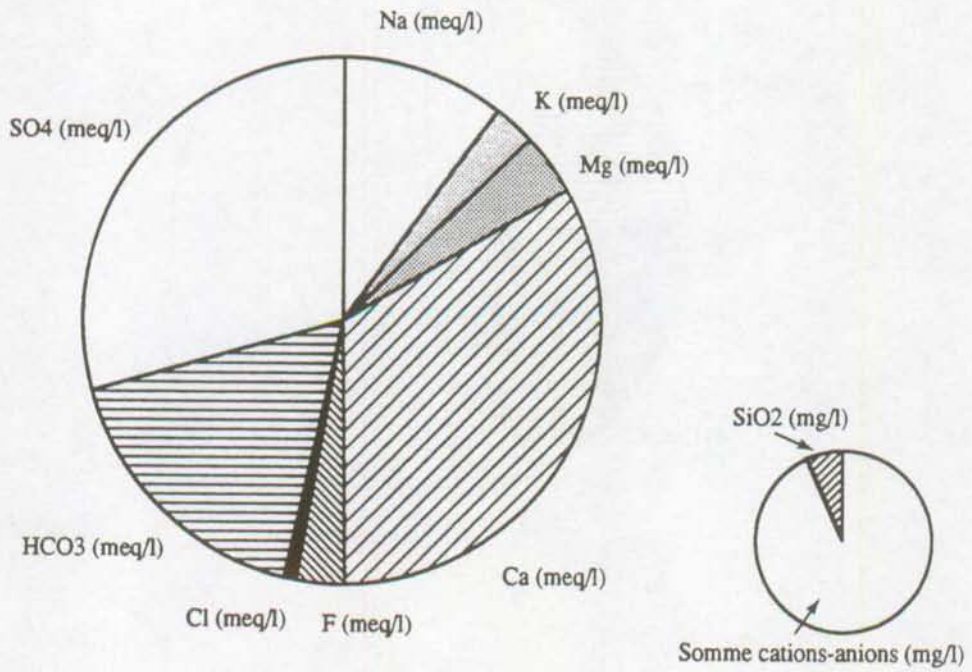
Groupe 6



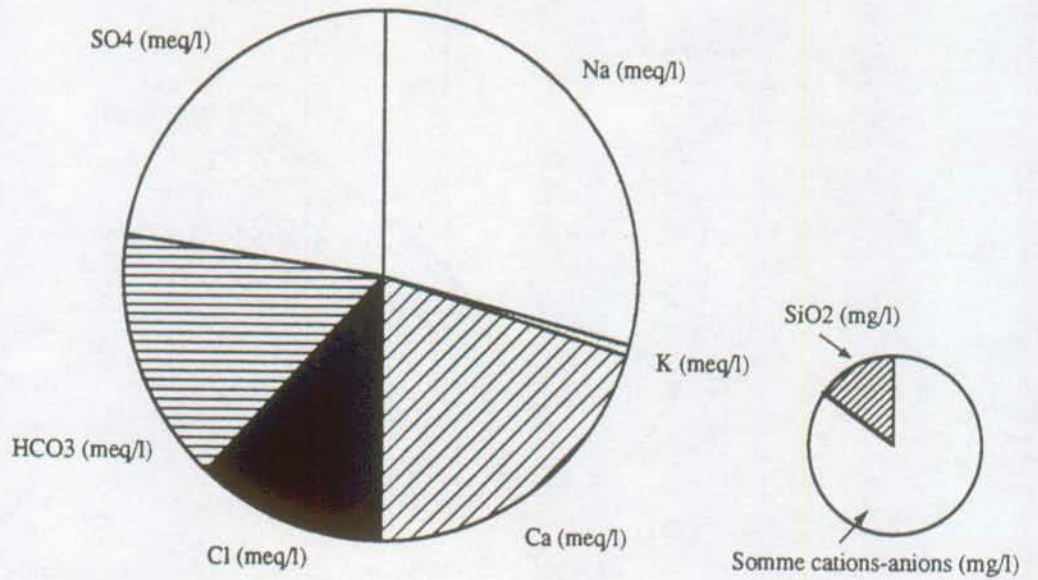
Tunnel du Mont Blanc km 2.810
Groupe 7



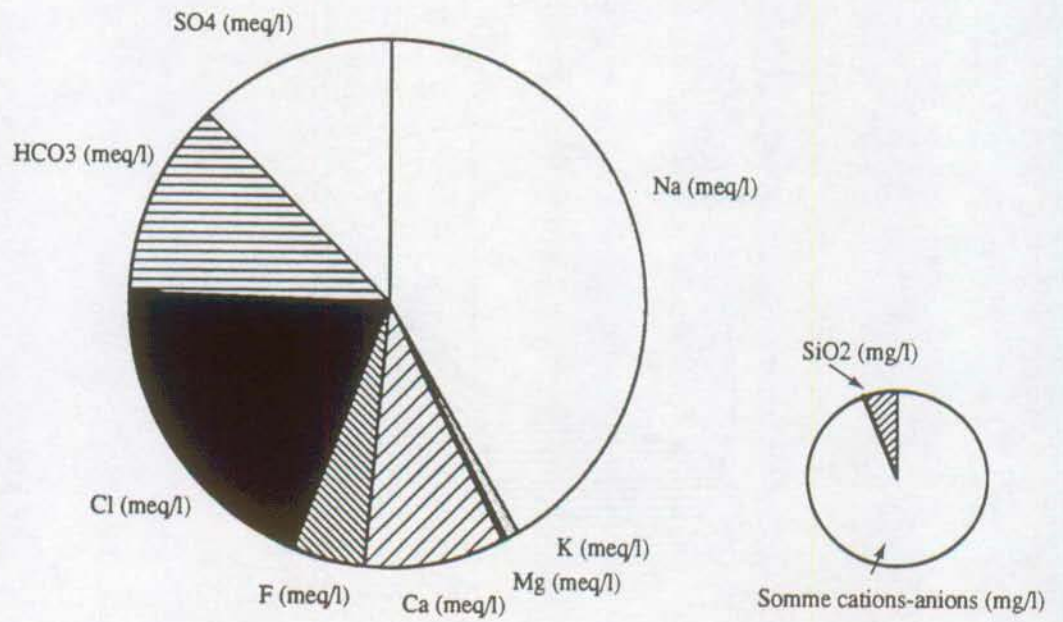
Tunnel du Mont Blanc km 5.030
Groupe 8



Tunnel du Mont Blanc km 8.924
Groupe 9



Tunnel du Mont Blanc Km 9.885
Groupe 10



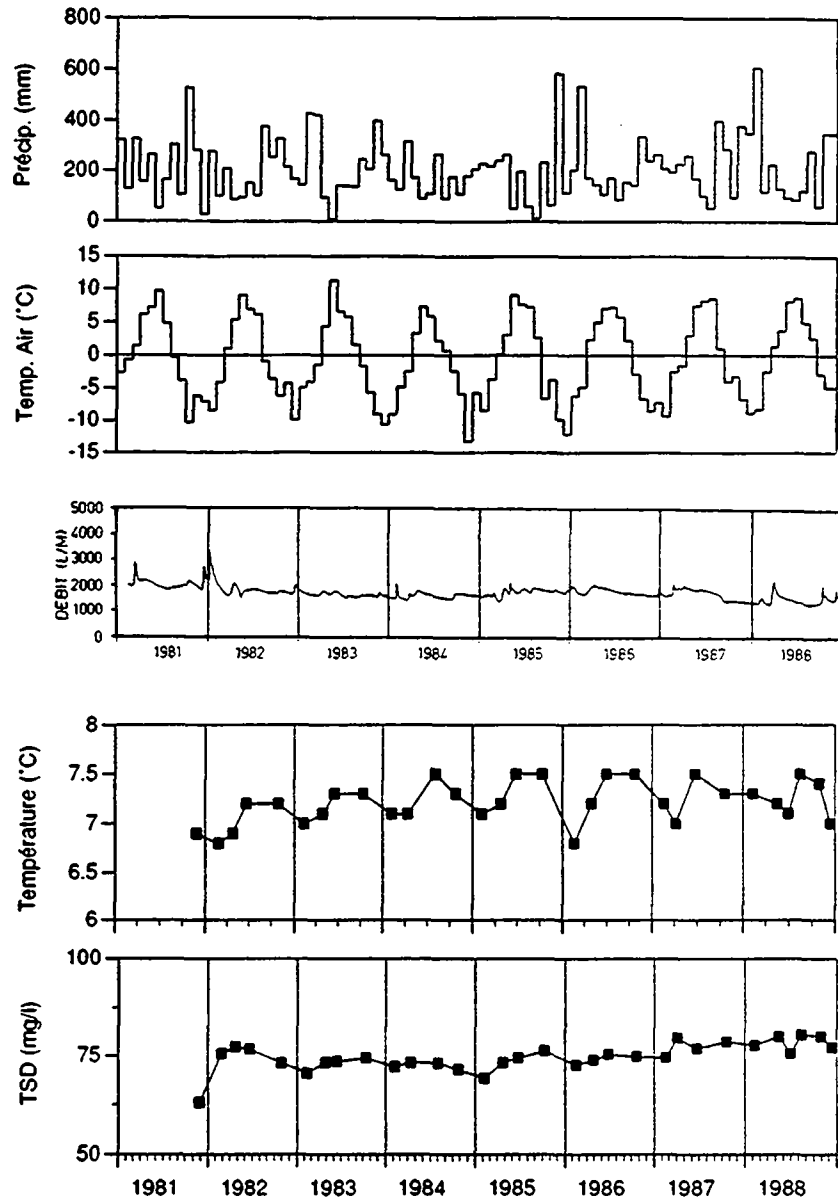
Annexe 7.4

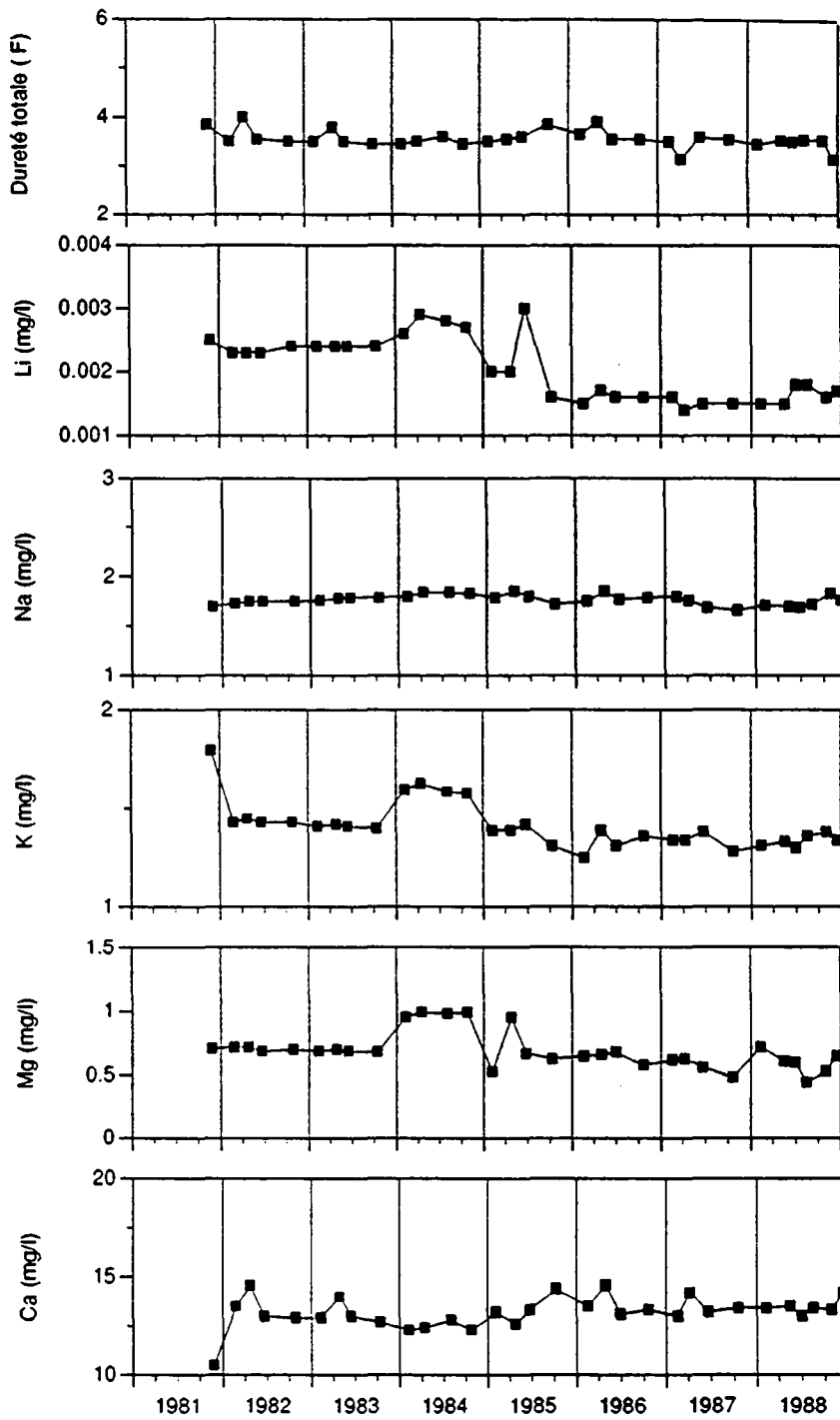
**Représentation graphique des variations temporelles des sources du
réseau I**

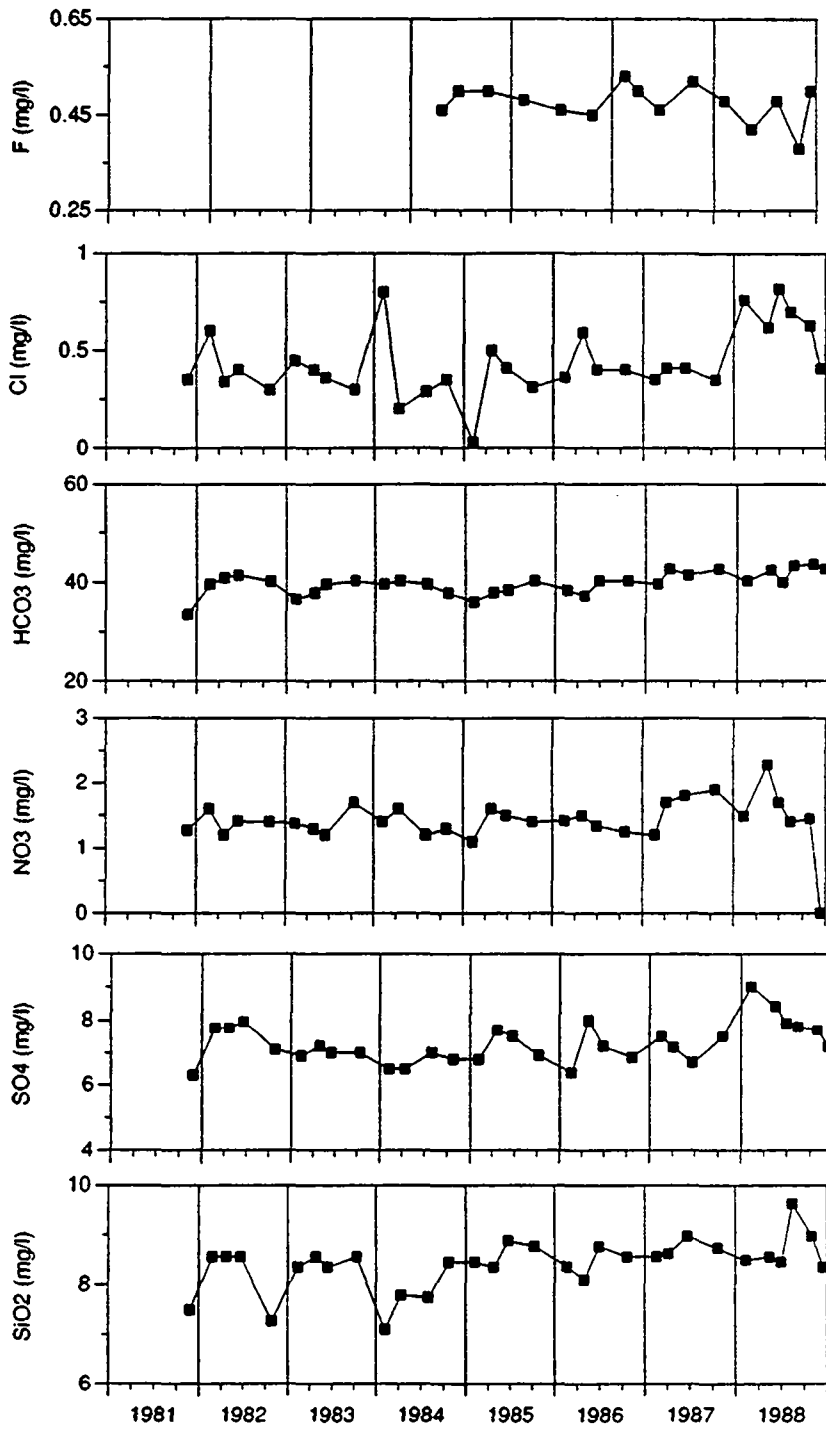
Liste des sources:

1. Brocard inférieur, Martigny (n° 1)
2. Chamois, Martigny (n°7)
3. Chapeau supérieur, Argentière (n° 31)
4. Château d'Eau, Finhaut (n°161)
5. Col des Montets, Argentière (n°27)
6. Fontaines, Finhaut (n°19)
7. Nant Provent, Chamonix (n°33)

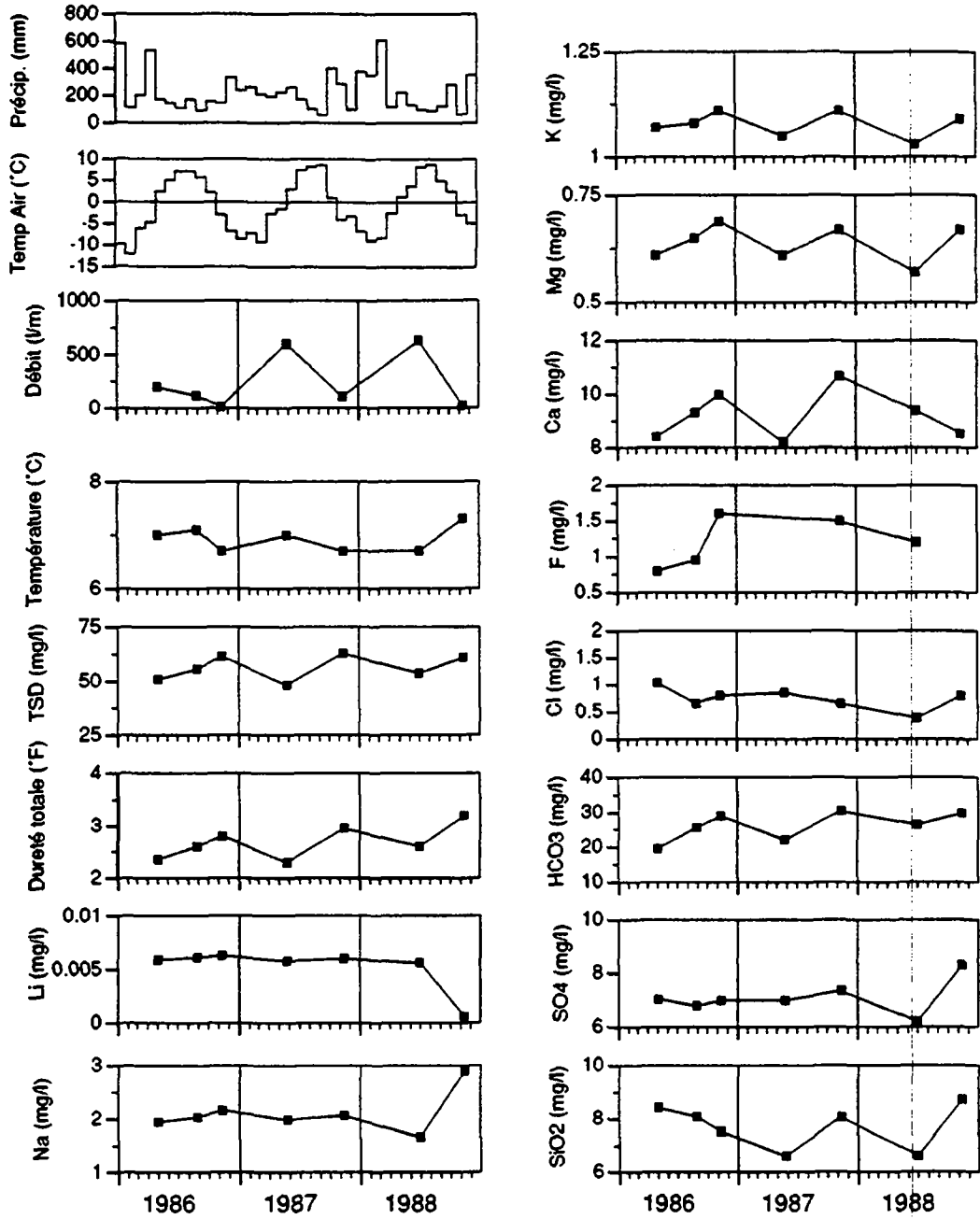
CAPTAGE DU BROCARD, MARTIGNY



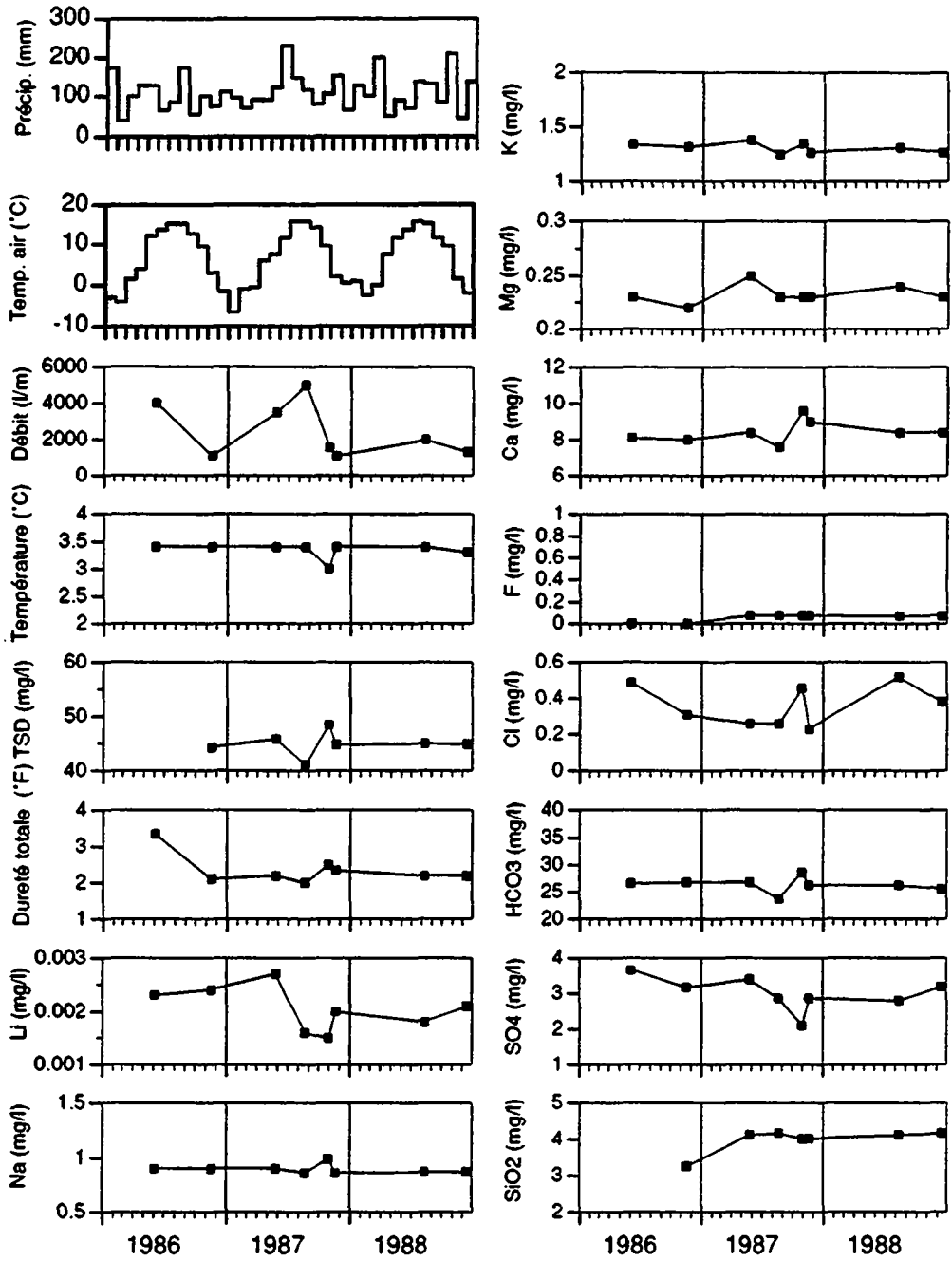




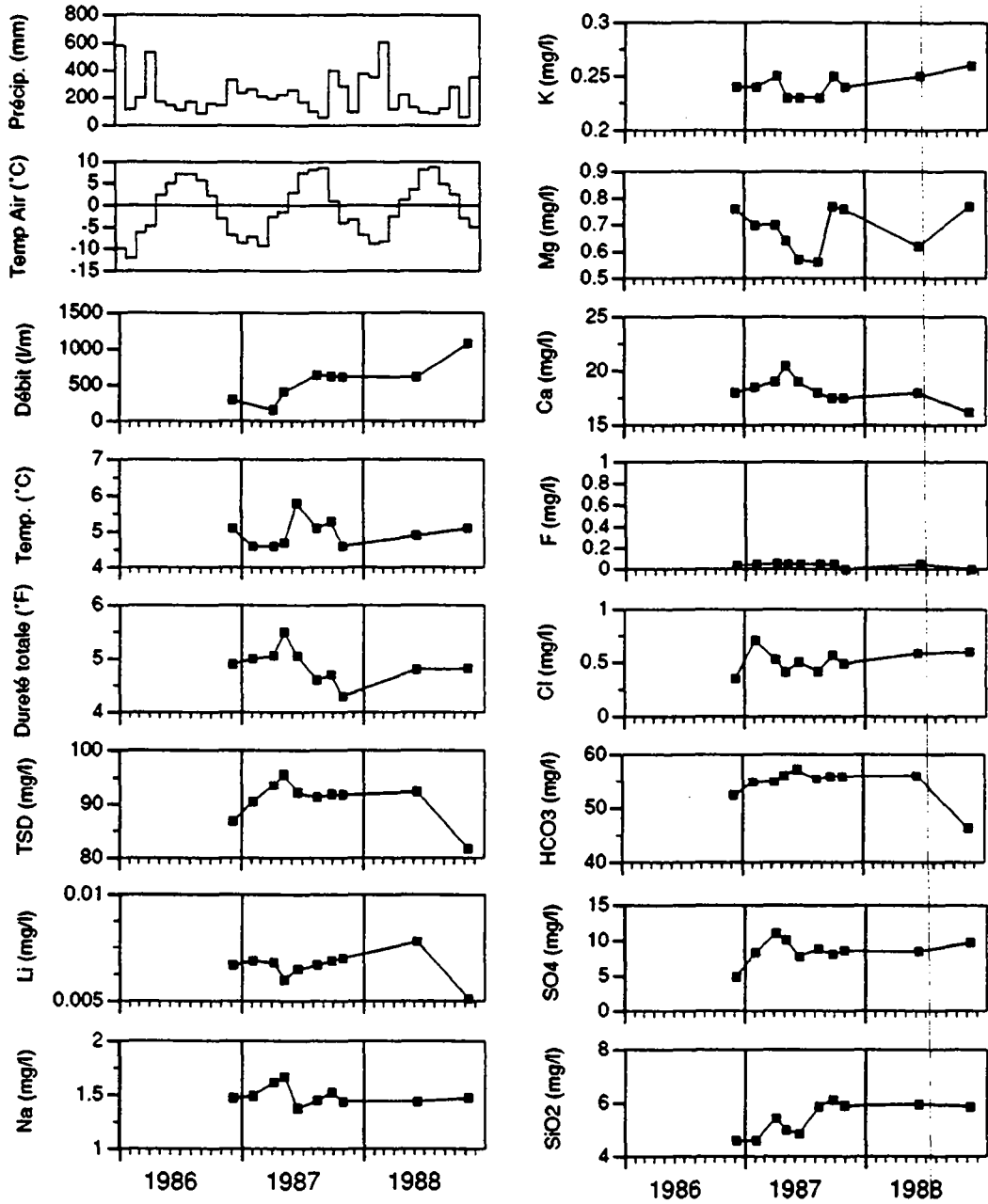
CAPTAGE DU CHAMOIS, MARTIGNY



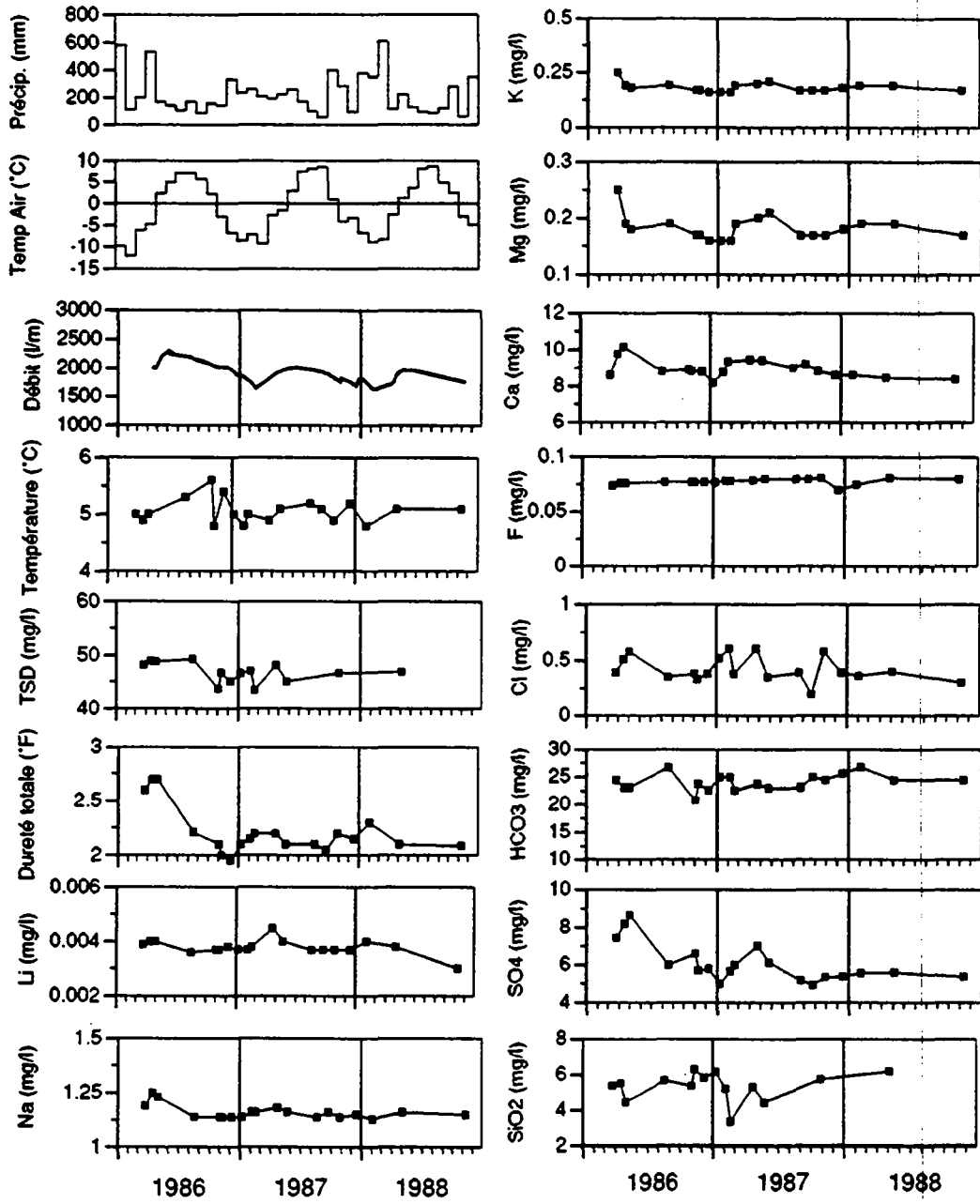
CAPTAGE DU CHAPEAU. ARGENTIERE



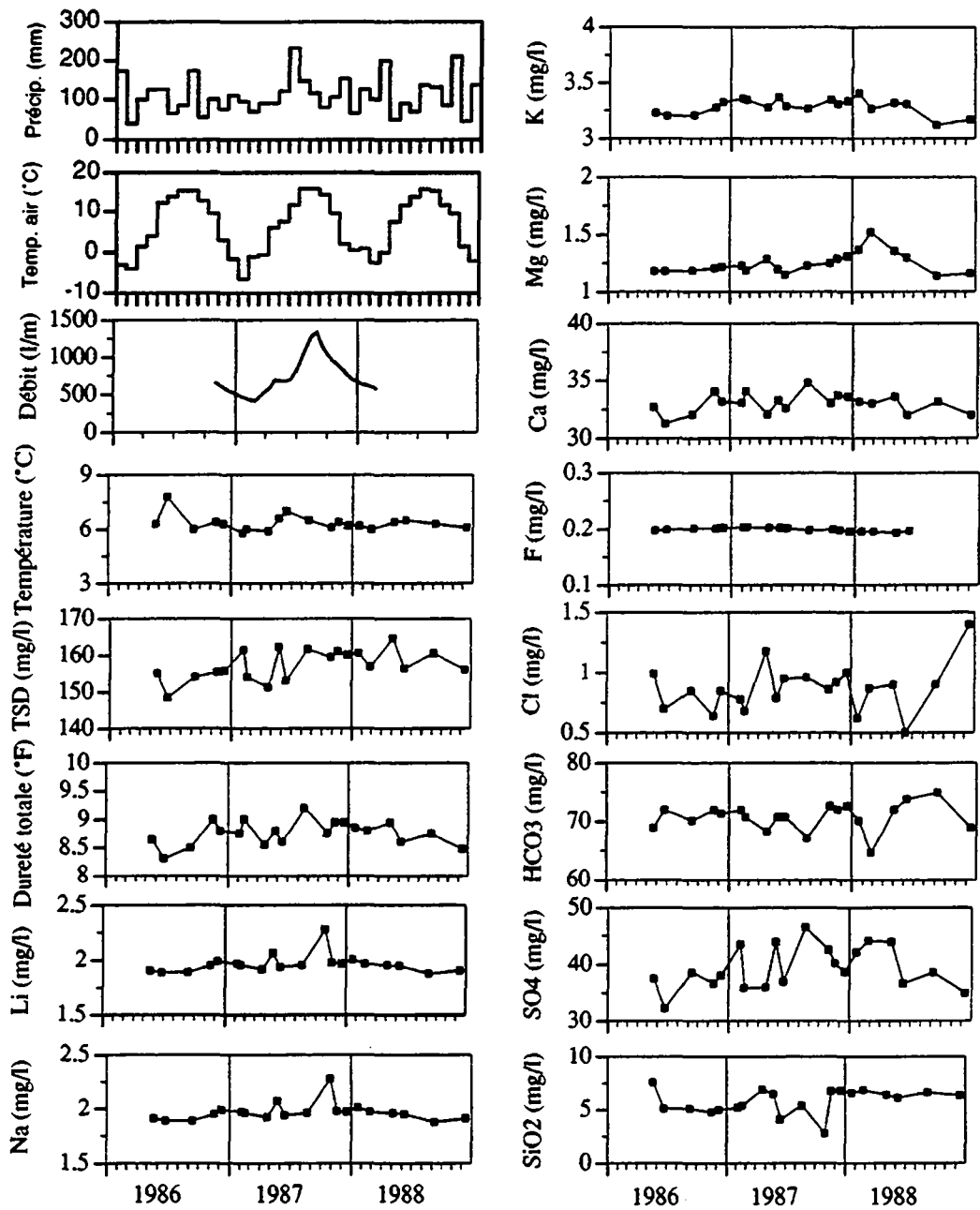
CHATEAU D'EAU, FINHAUT



CAPTAGE DES FONTAINES, FINHAUT



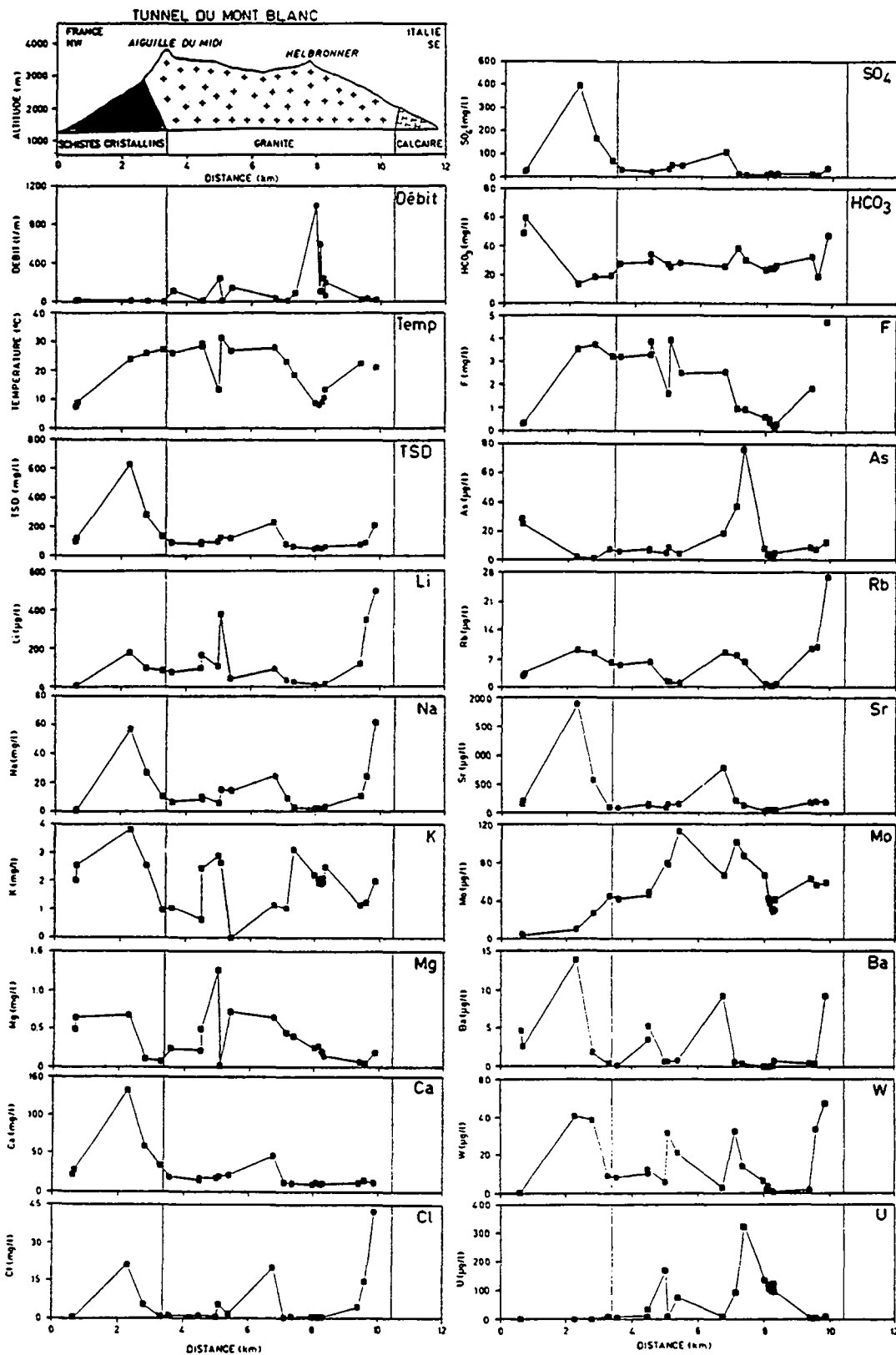
CAPTAGE DU NANT PROVENT, CHAMONIX



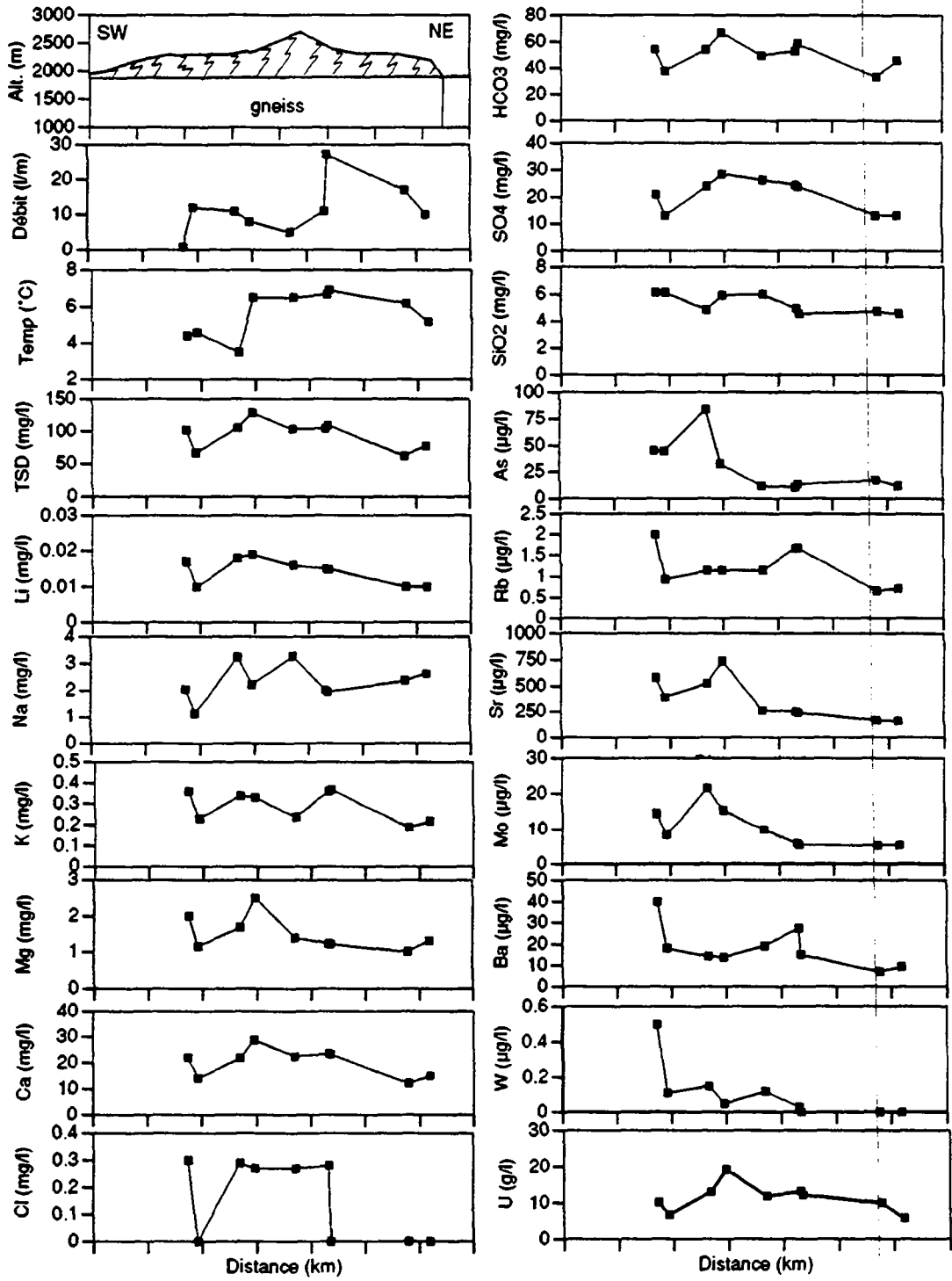
Annexe 7.5

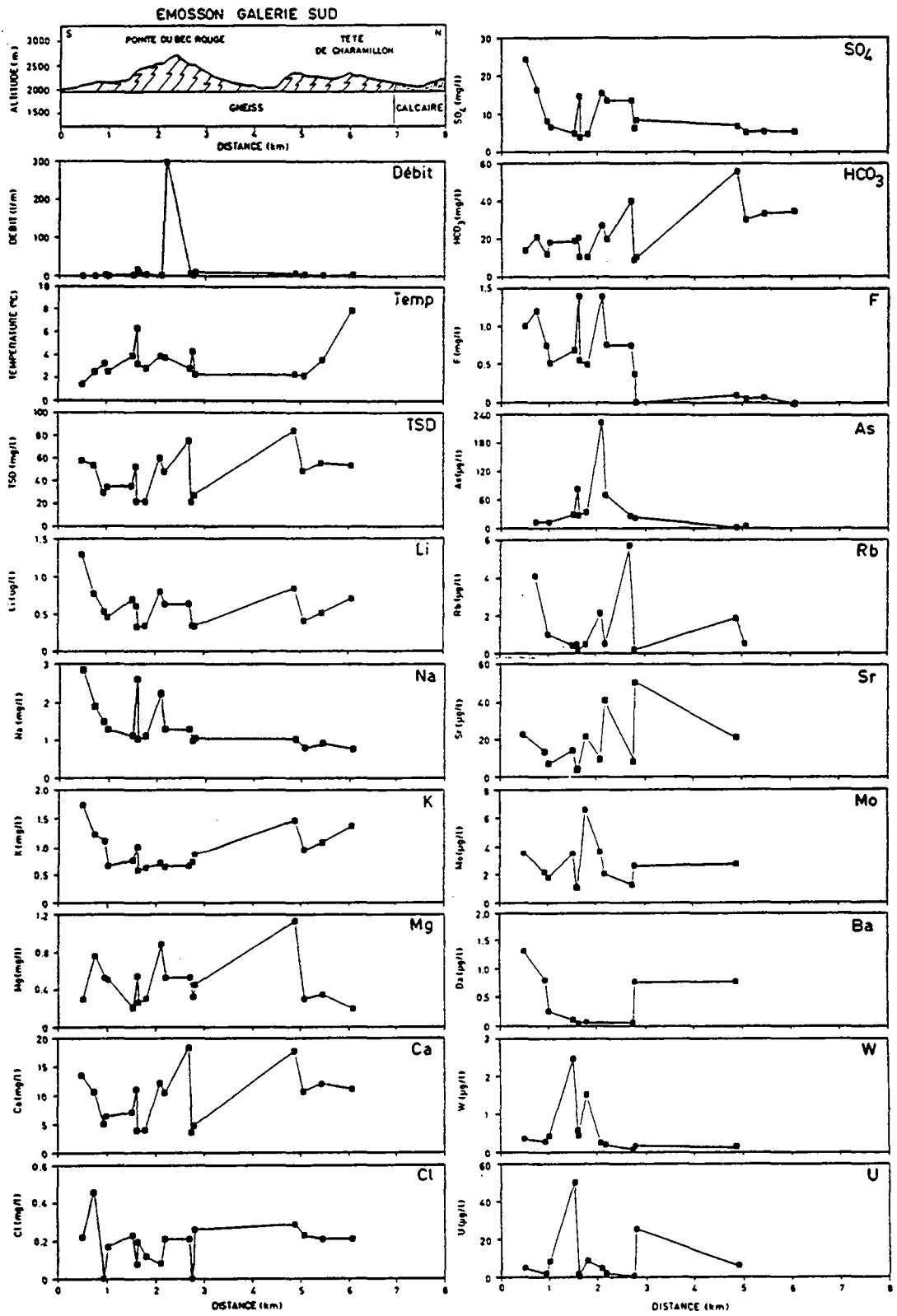
Représentation graphique de la variabilité spatiale des paramètres hydrogéologiques des venues d'eau interceptées en galeries

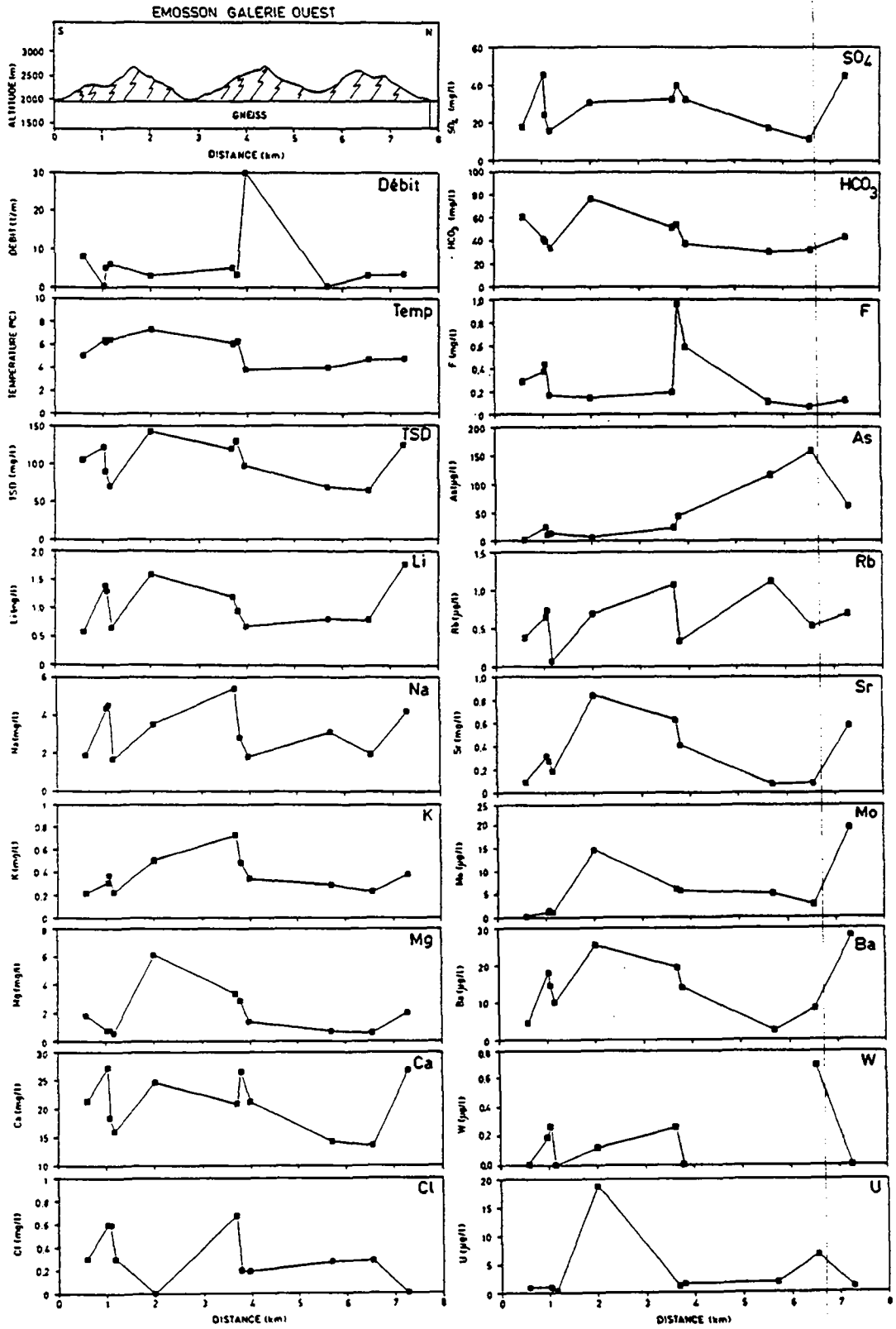
1. Tunnel du Mont-Blanc
2. Galerie nord (Emaney) du complexe hydroélectrique d'Emosson
3. Galerie sud du complexe hydroélectrique d'Emosson
4. Galerie ouest du complexe hydroélectrique d'Emosson



Emosson, galerie nord (Emaney)







Annexe 7.6






Représentation cartographique de la variation spatiale des paramètres hydrogéologiques des eaux souterraines des massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

La couverture cartographique a été réalisée à l'aide de 4 cartes de détail (I, II, III et IV)

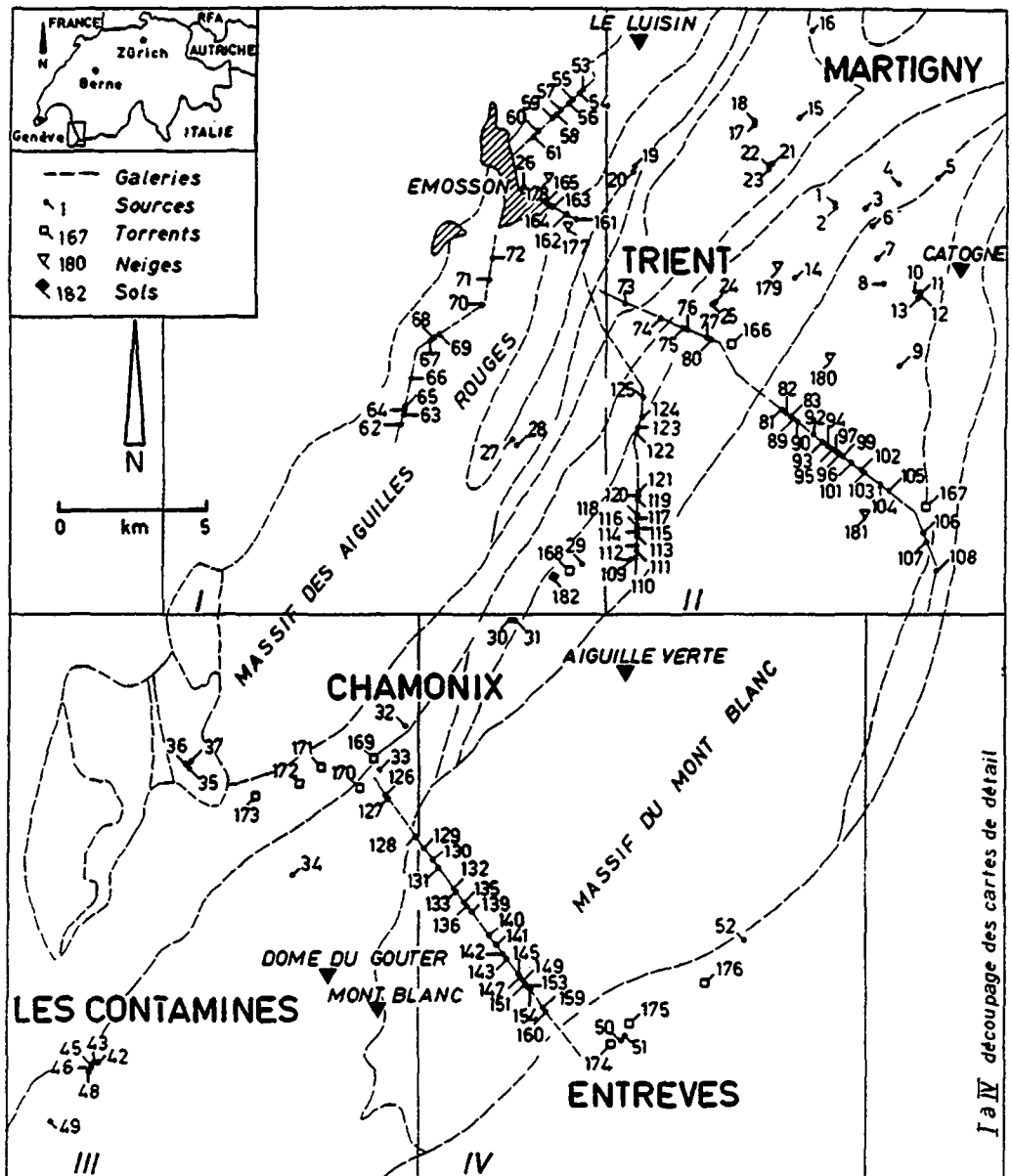
Paramètres:

1. Débit
2. Température
3. Minéralisation totale (TSD)
4. Lithium
5. Sodium
6. Potassium
7. Magnésium
8. Calcium
9. Strontium
10. Fluorures
11. Chlorures
12. Hydrogénocarbonates
13. Sulfates
14. Silice
15. Bore
16. Arsenic
17. Rubidium
18. Molybdène
19. Baryum
20. Tungstène
21. Uranium

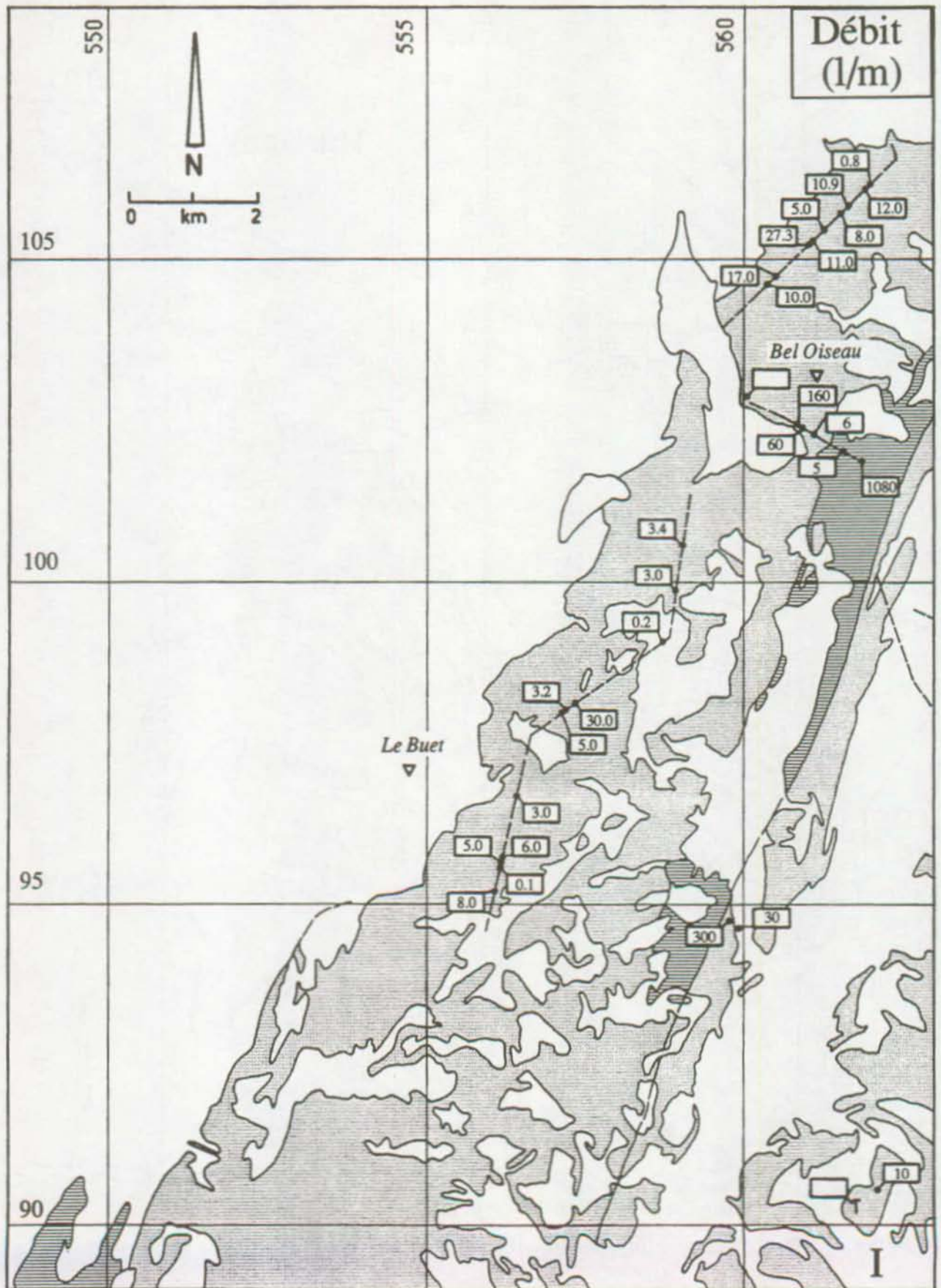
Légende:

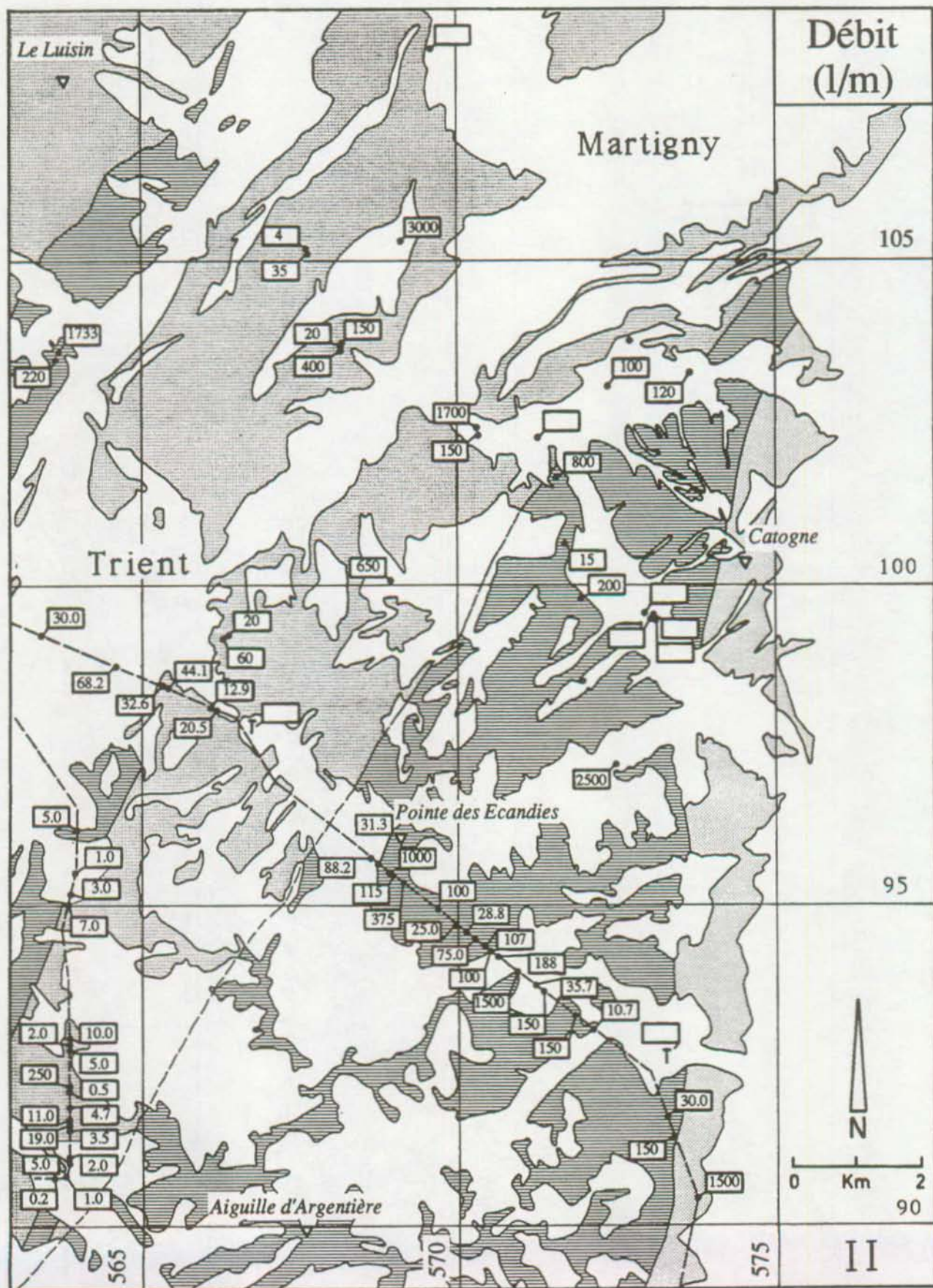
- | | |
|---|----------|
|  | Gneiss |
|  | Granite |
|  | Rhyolite |
|  | Sources |
|  | Torrents |

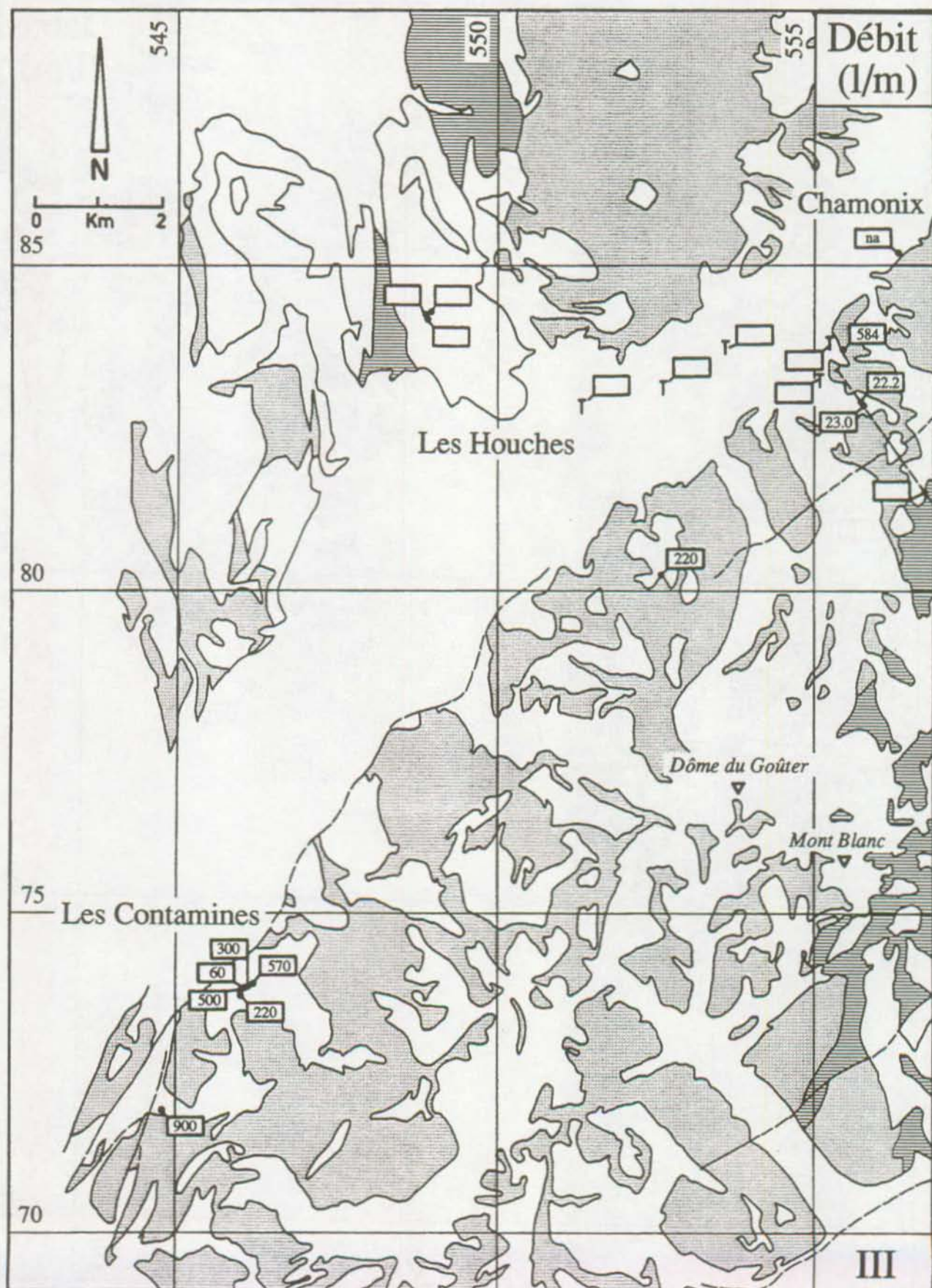
Annexe 7.6 suite

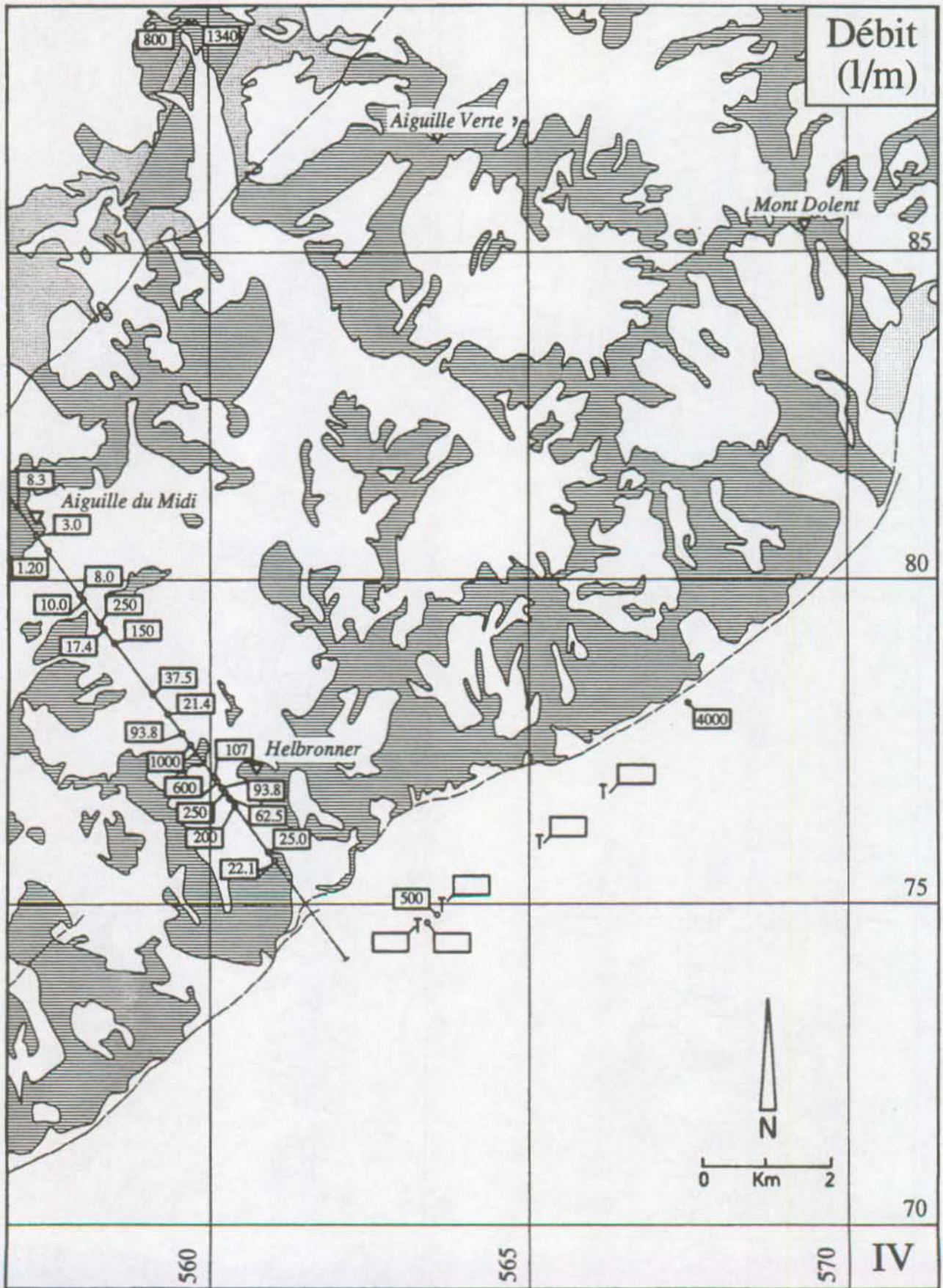


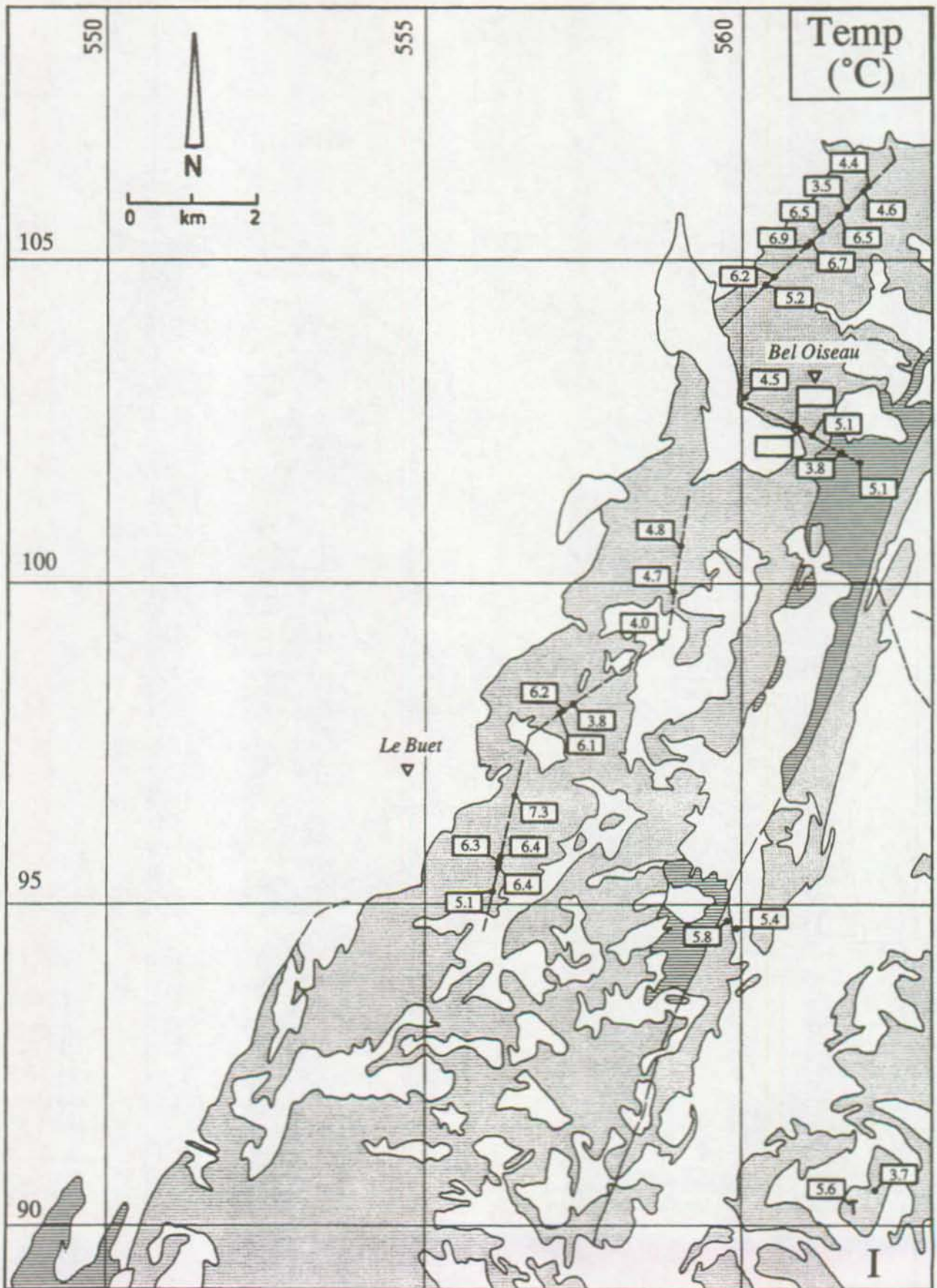
Carte de situation des points de prélèvements

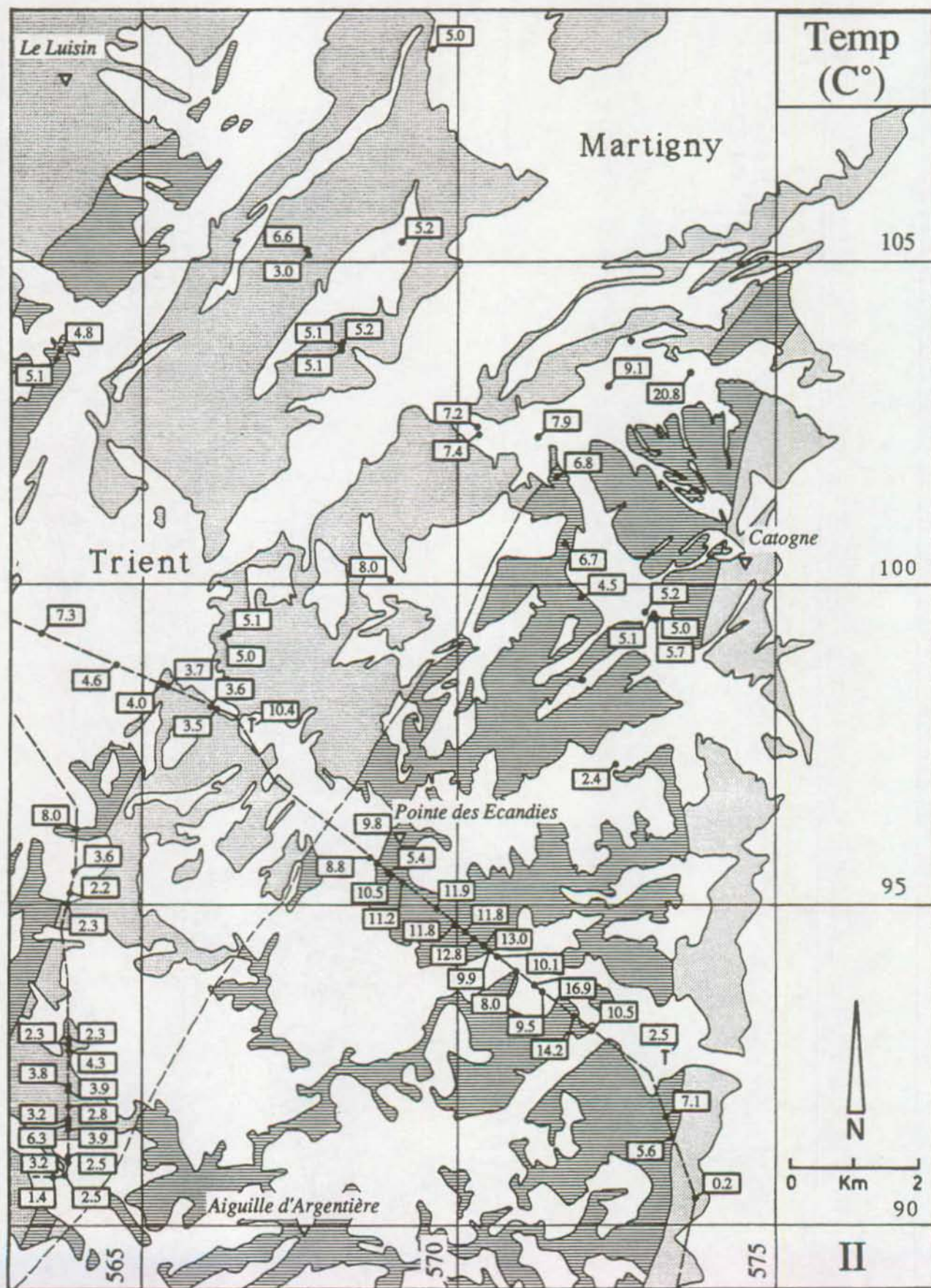


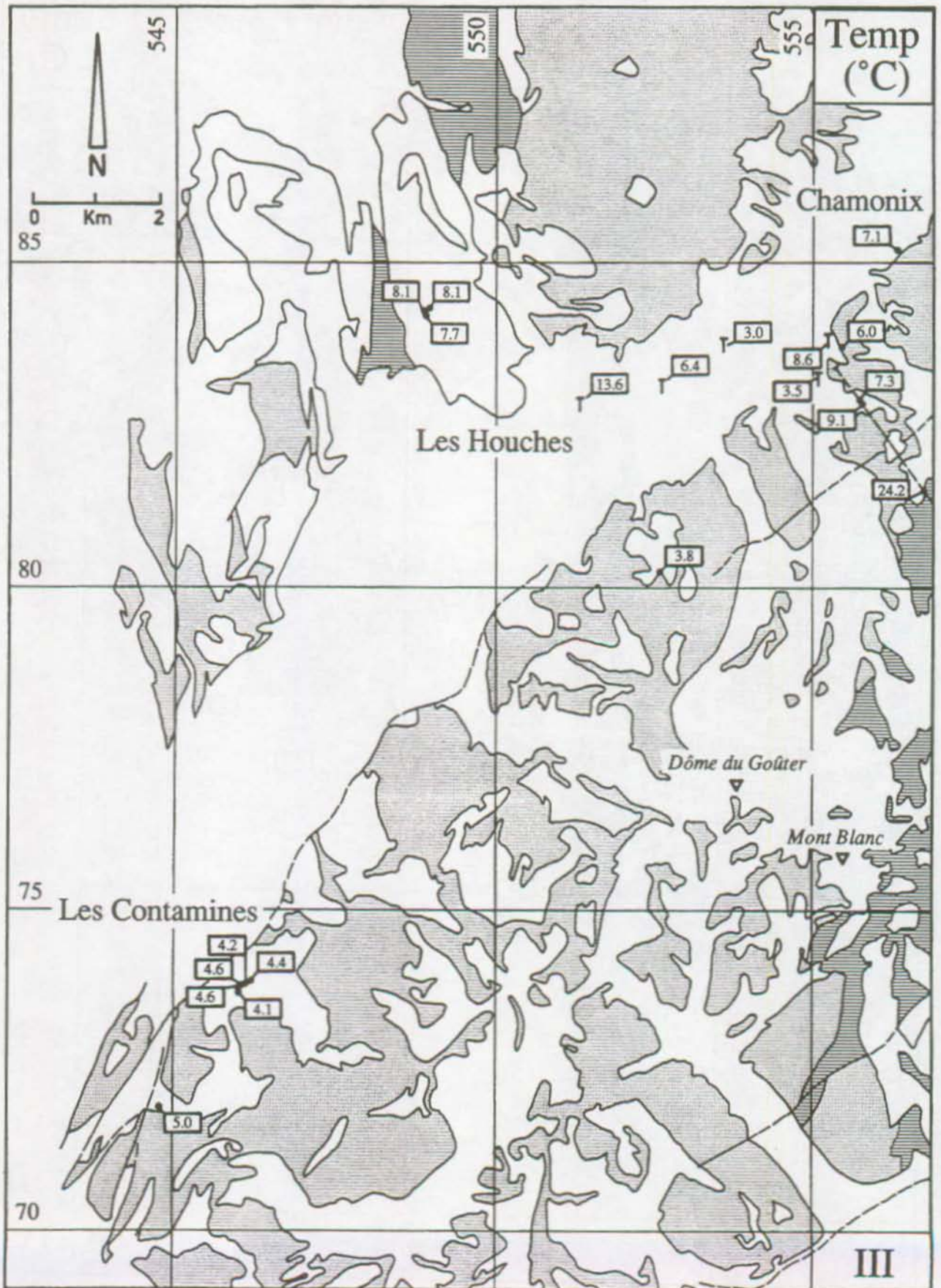


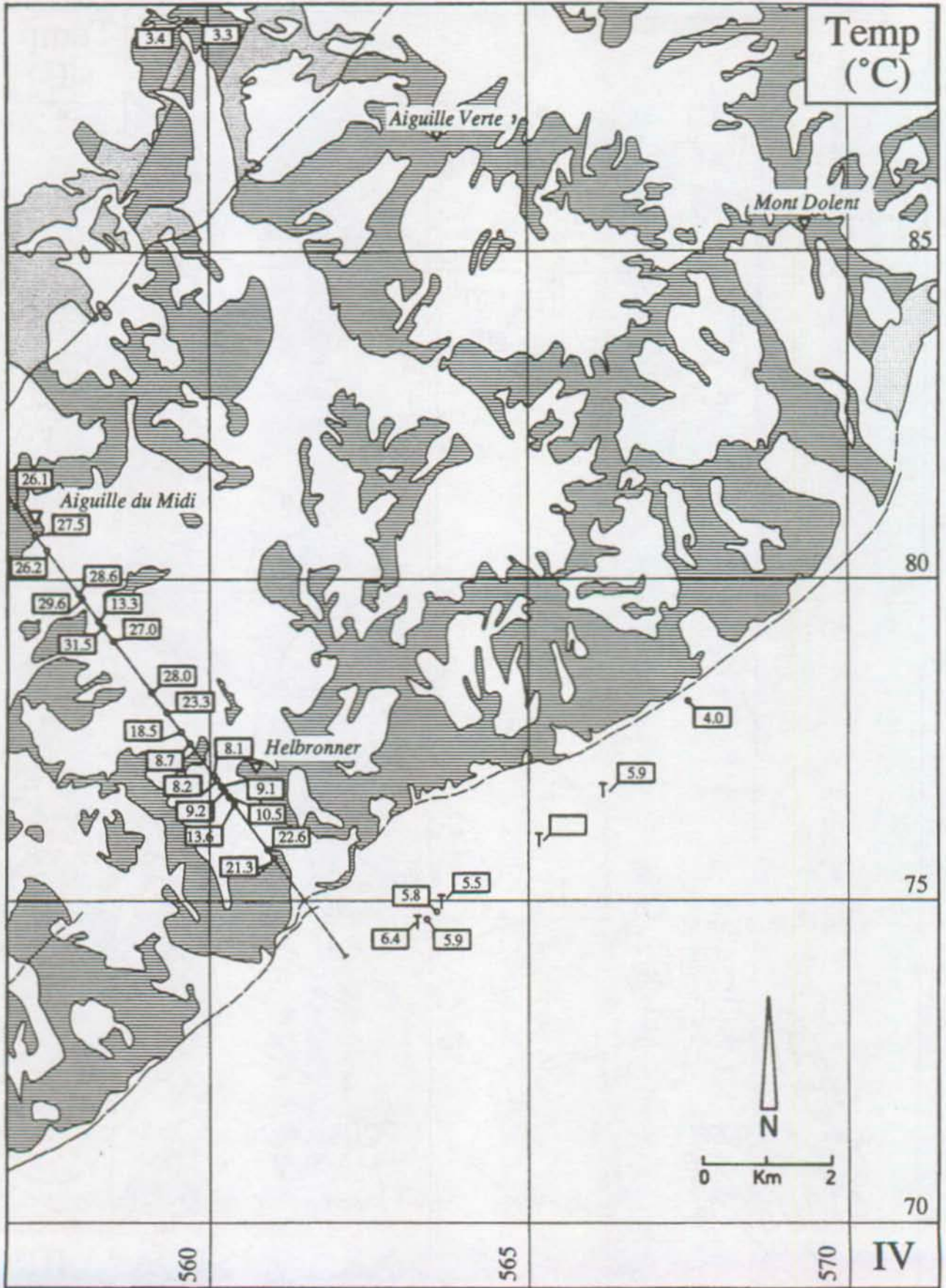


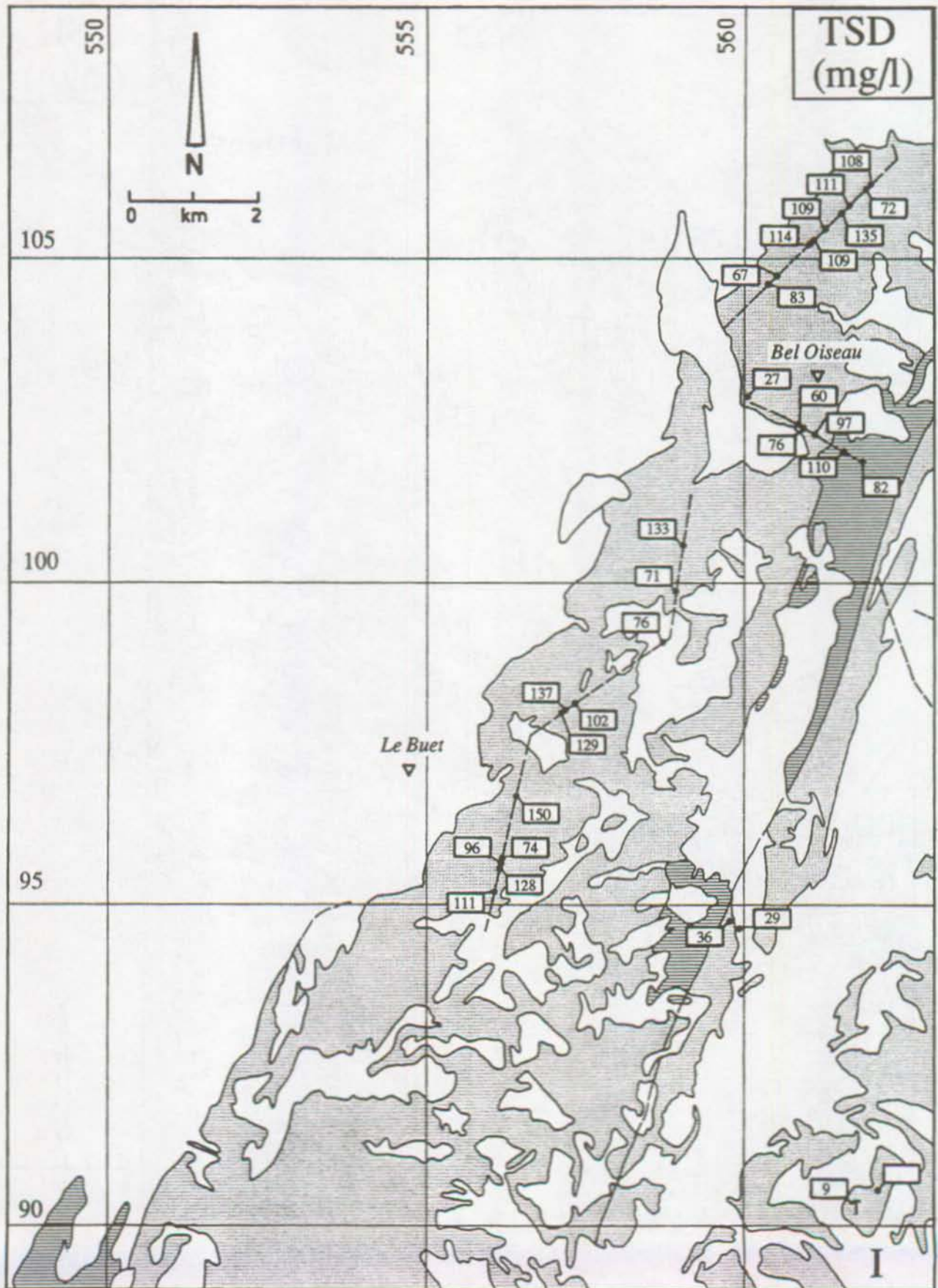


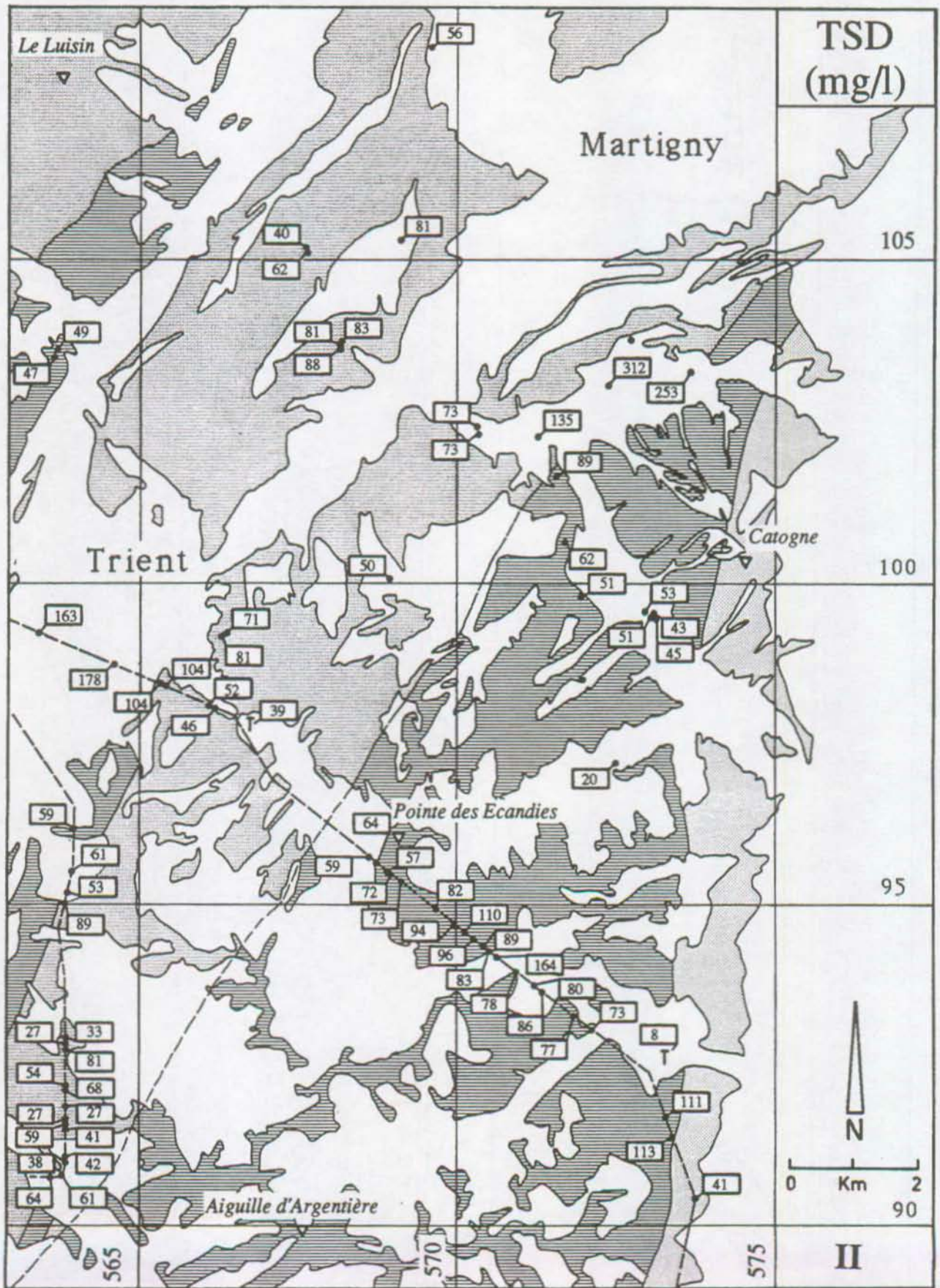


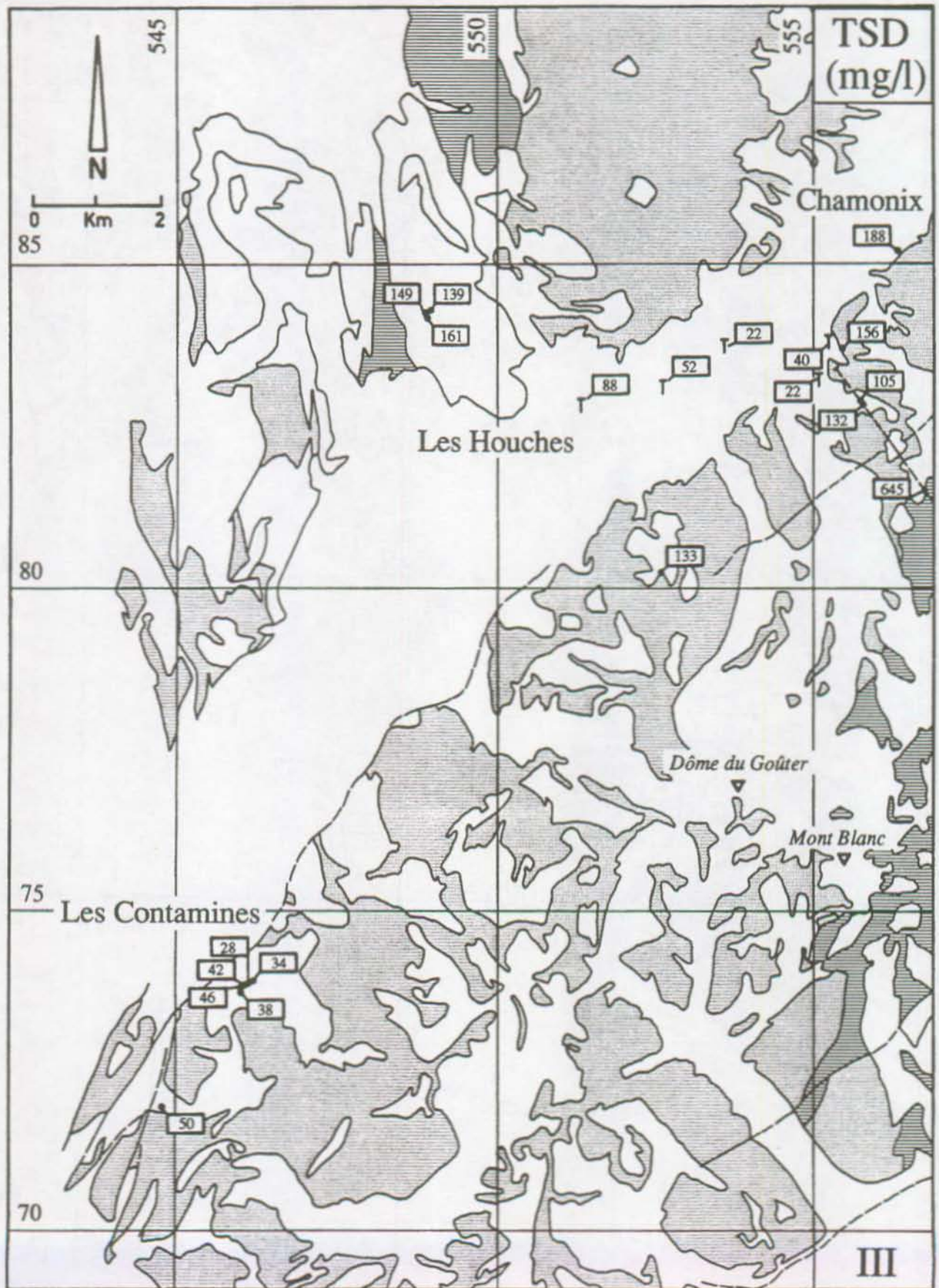


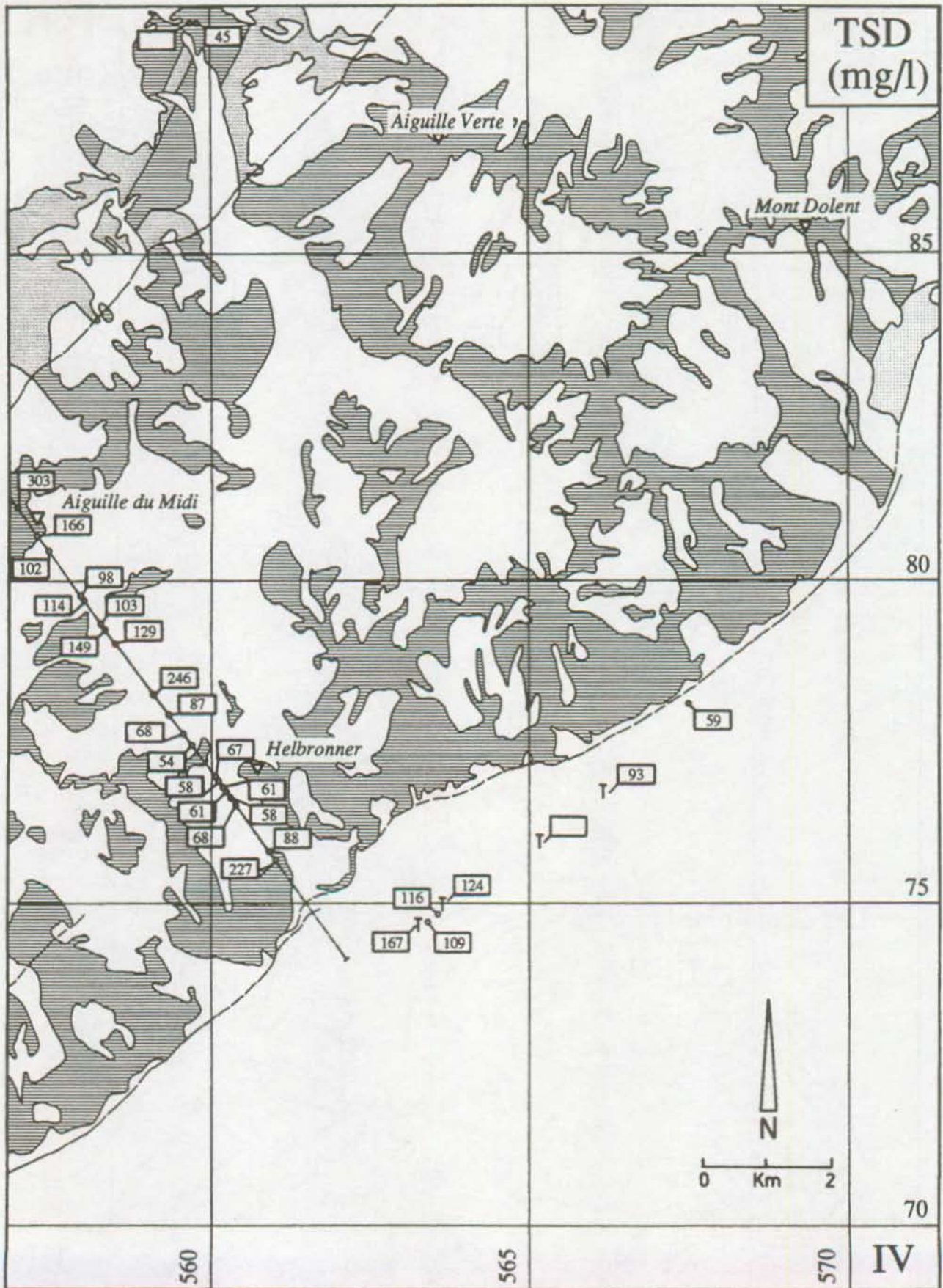


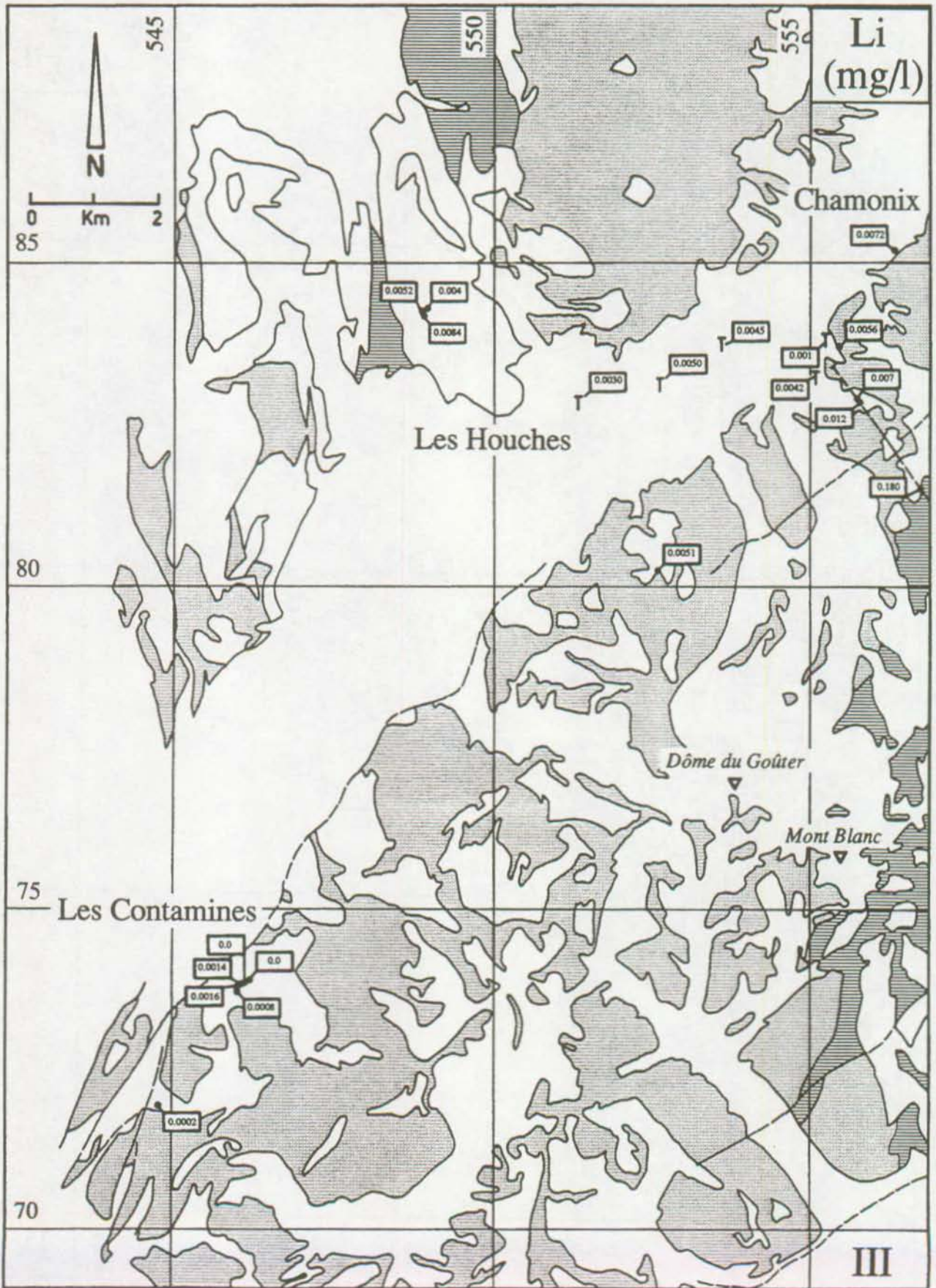


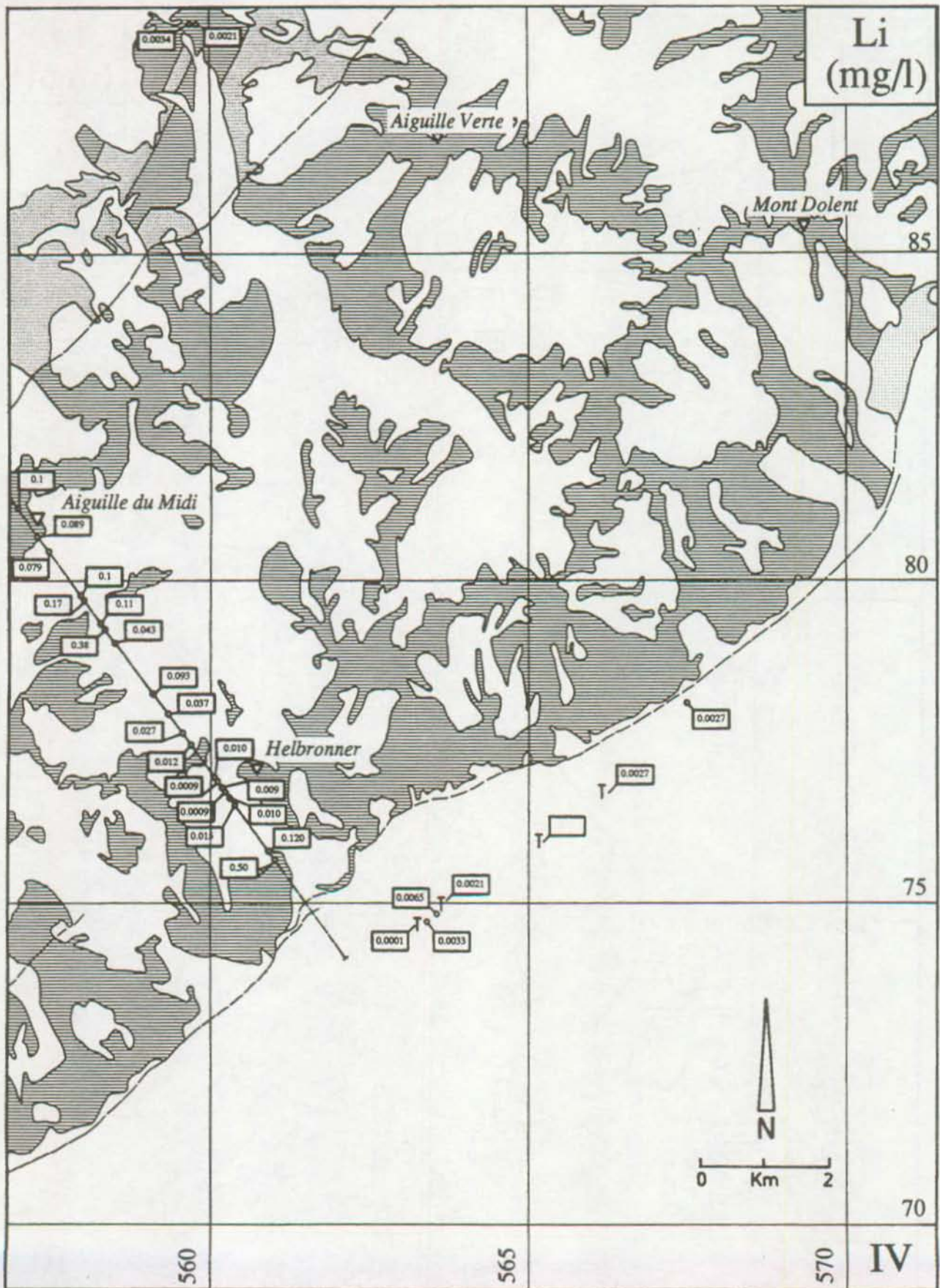


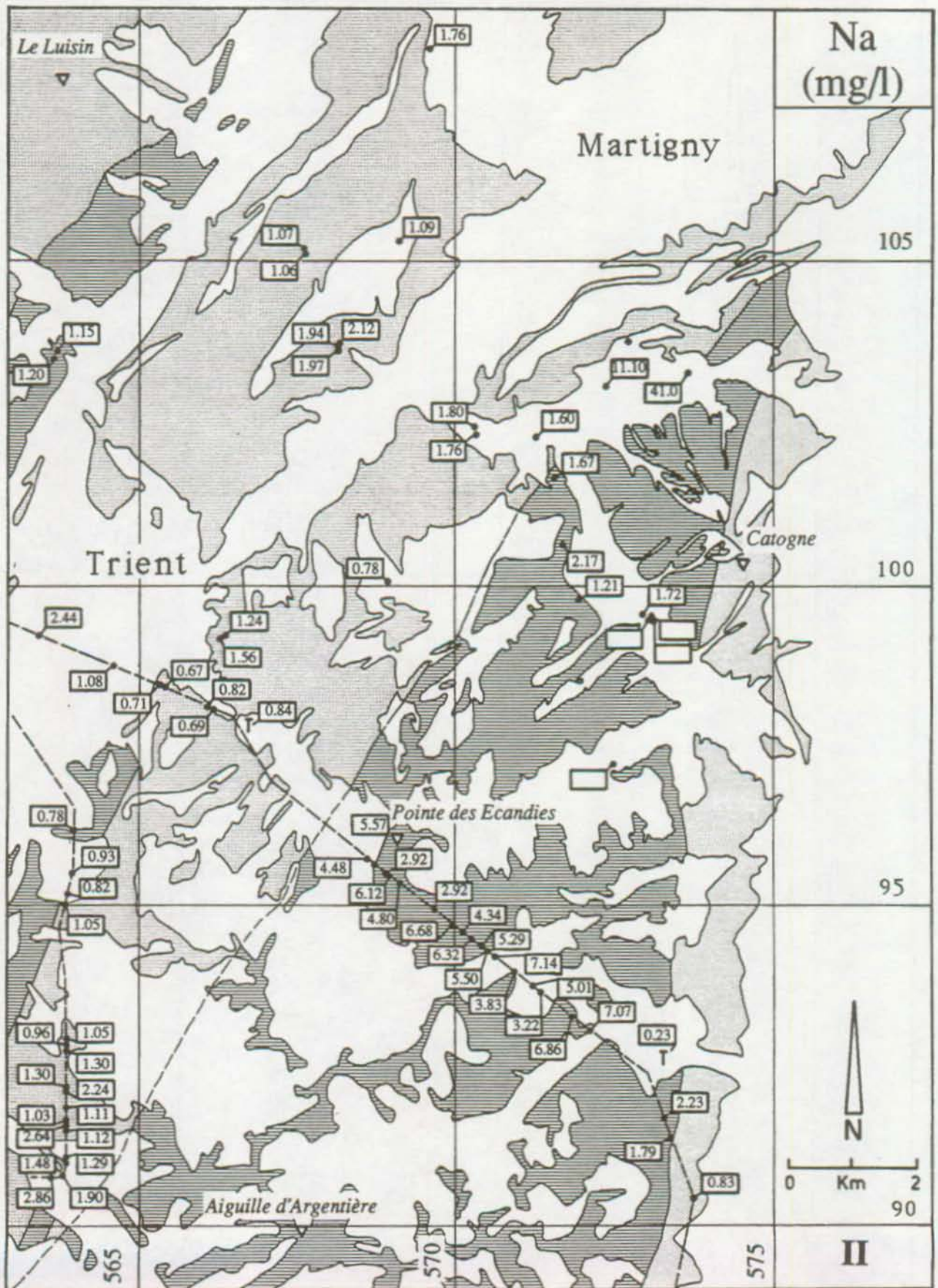


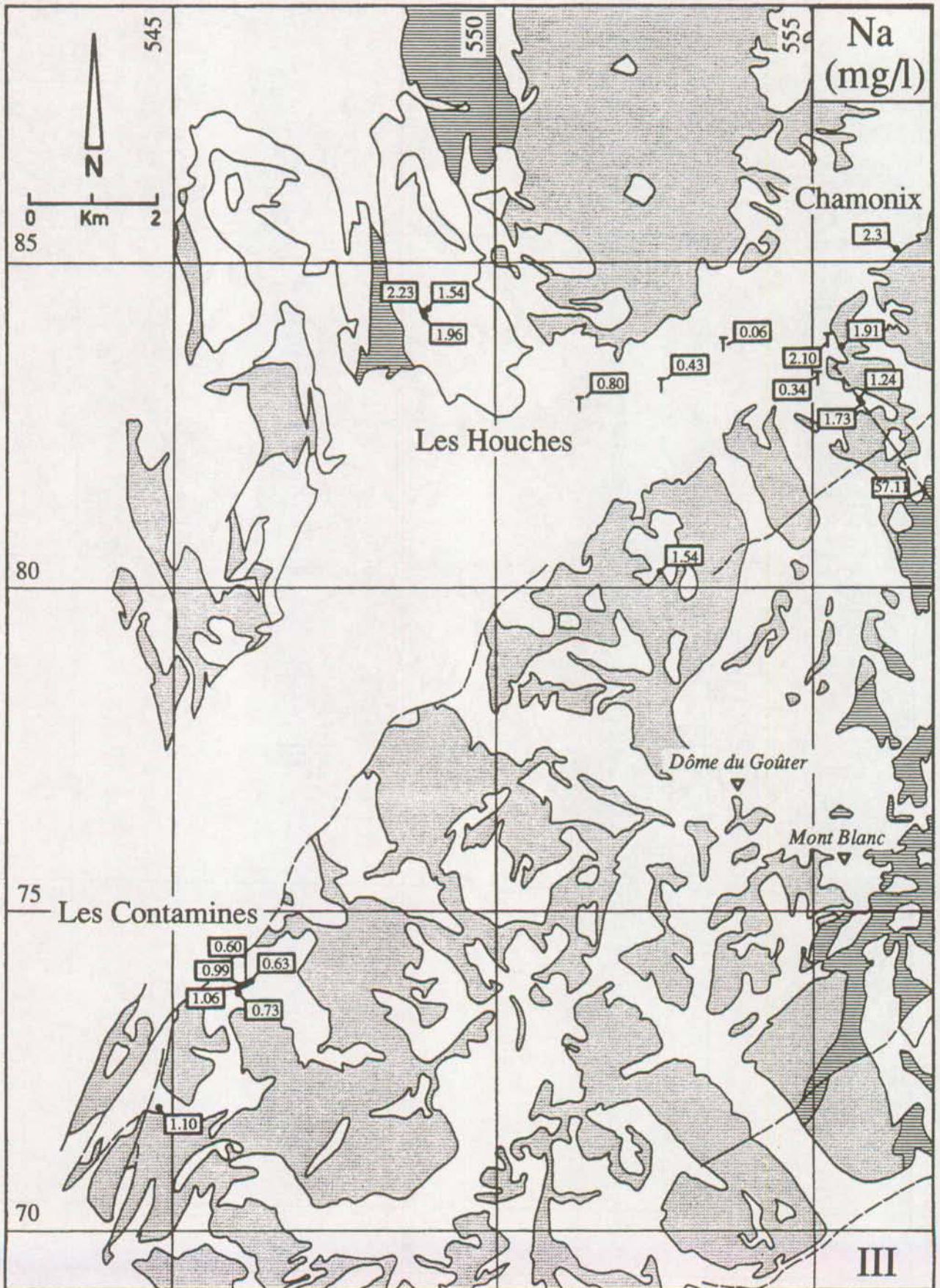


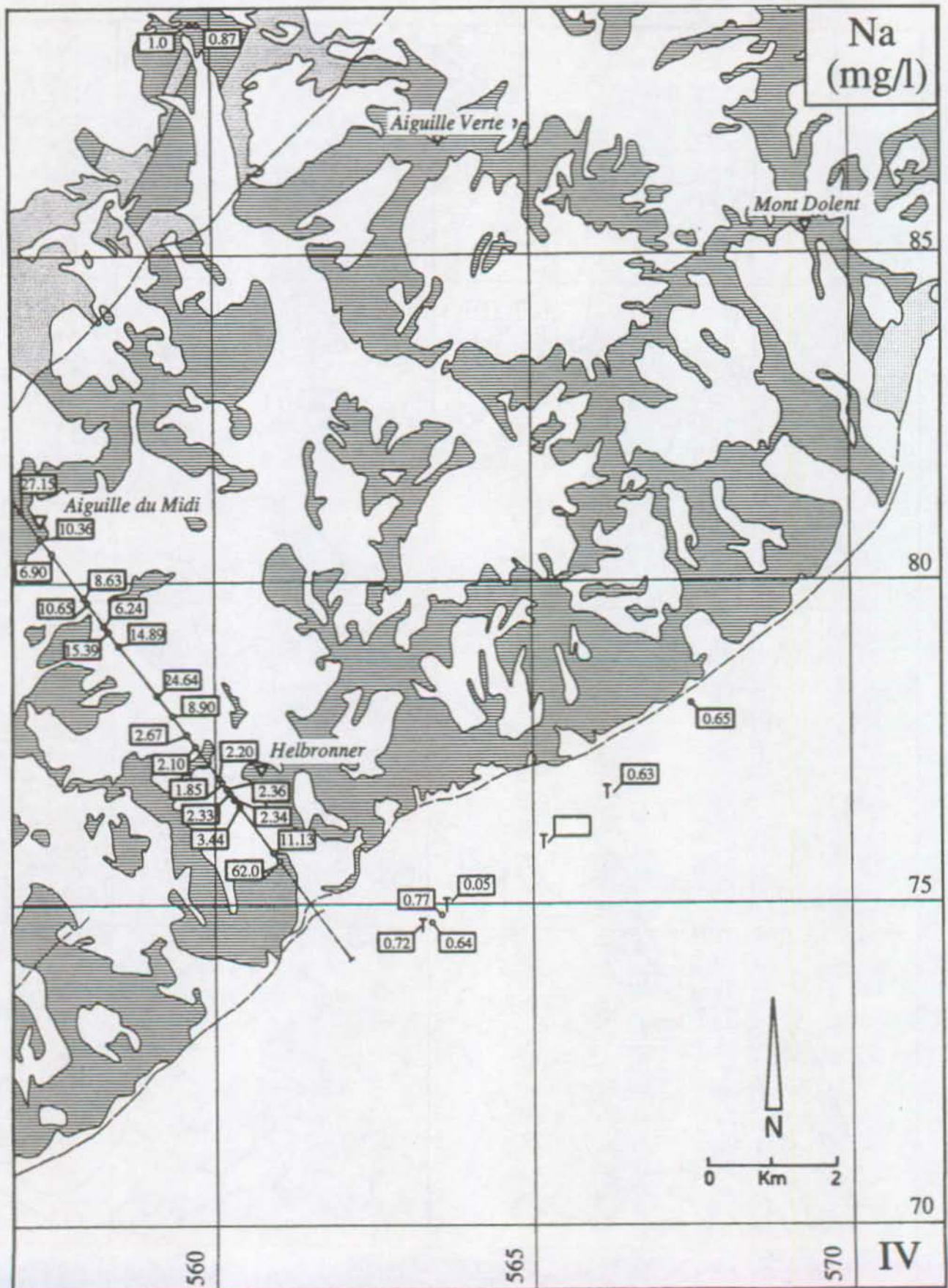


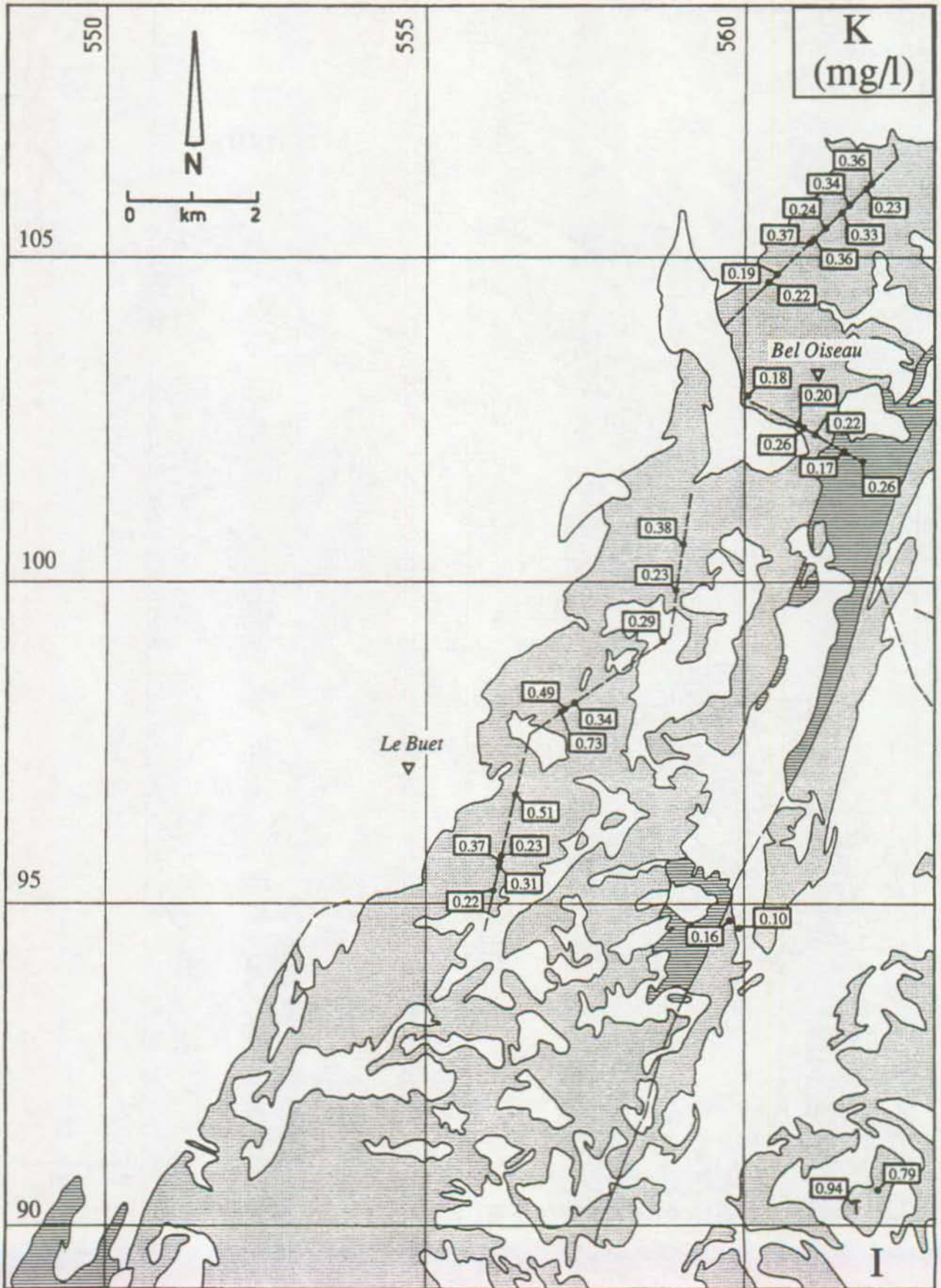


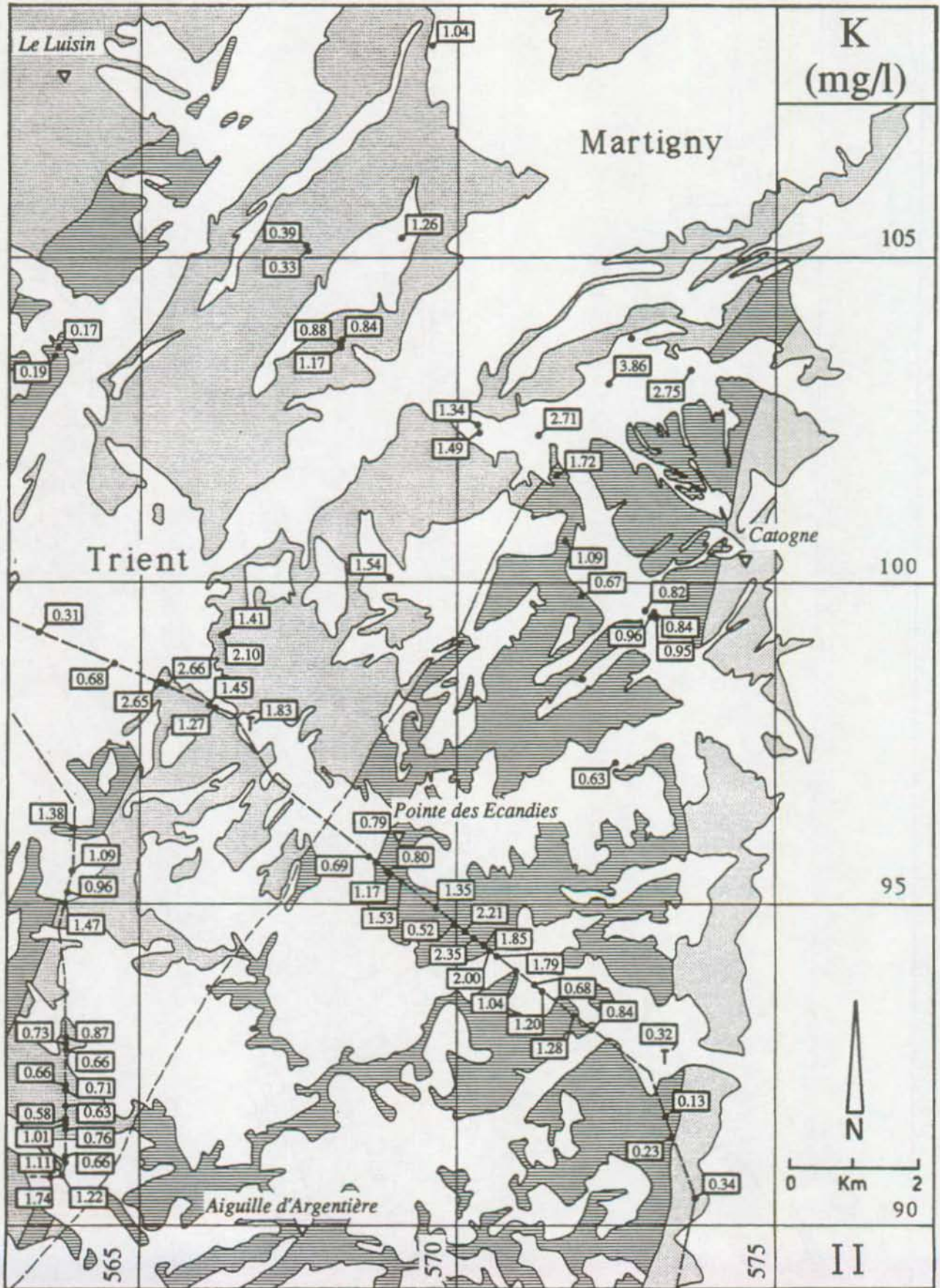


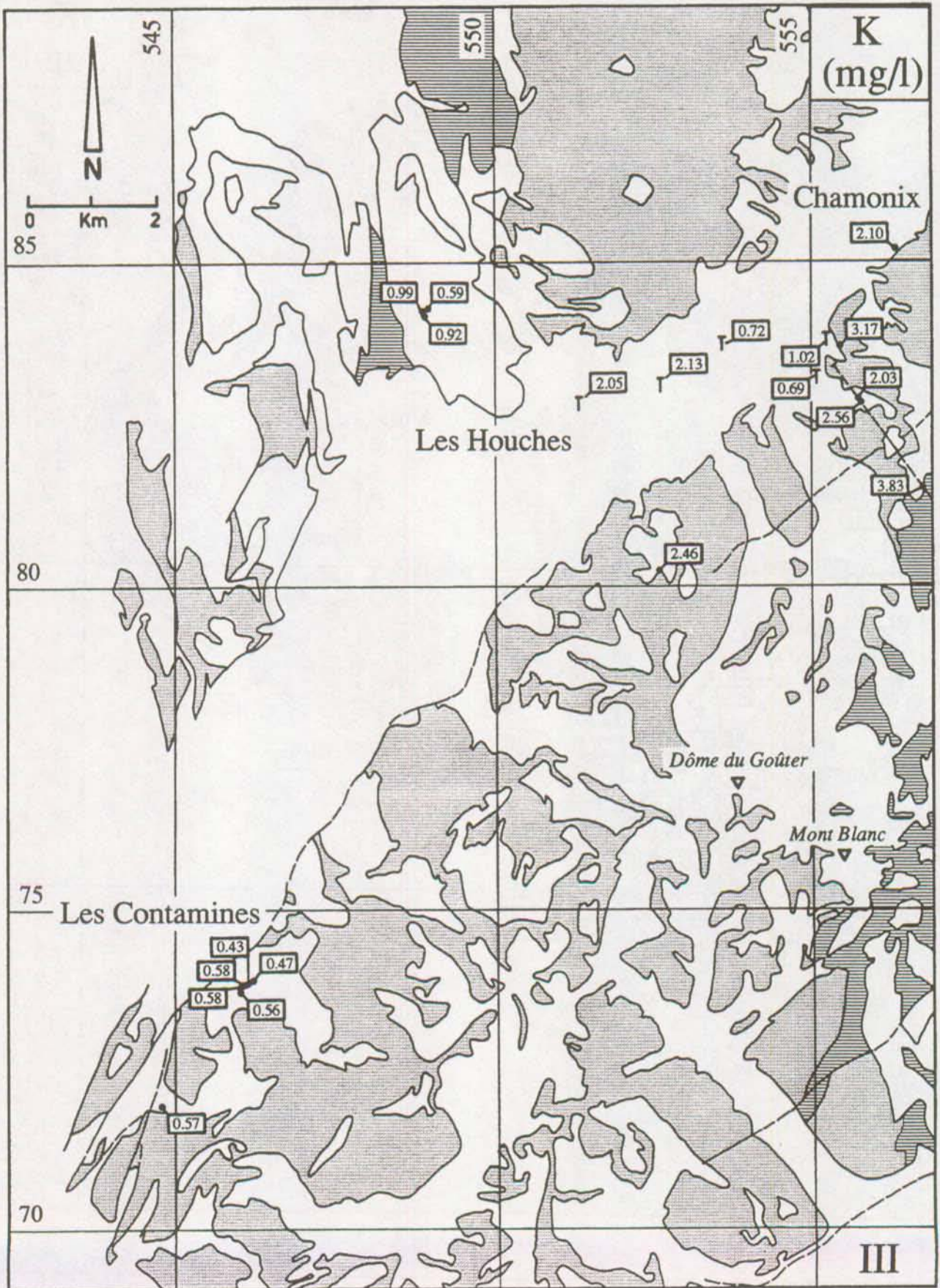


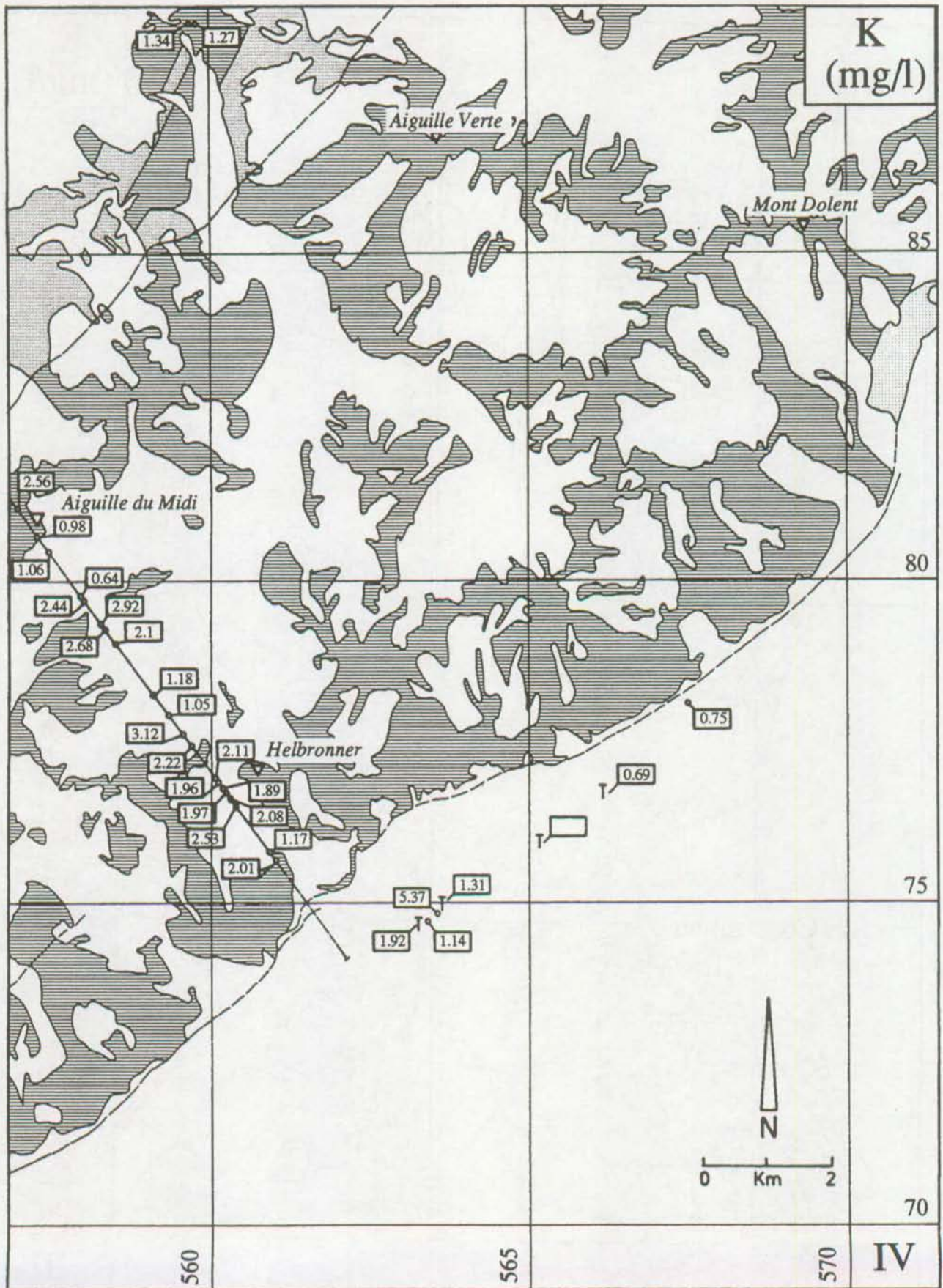


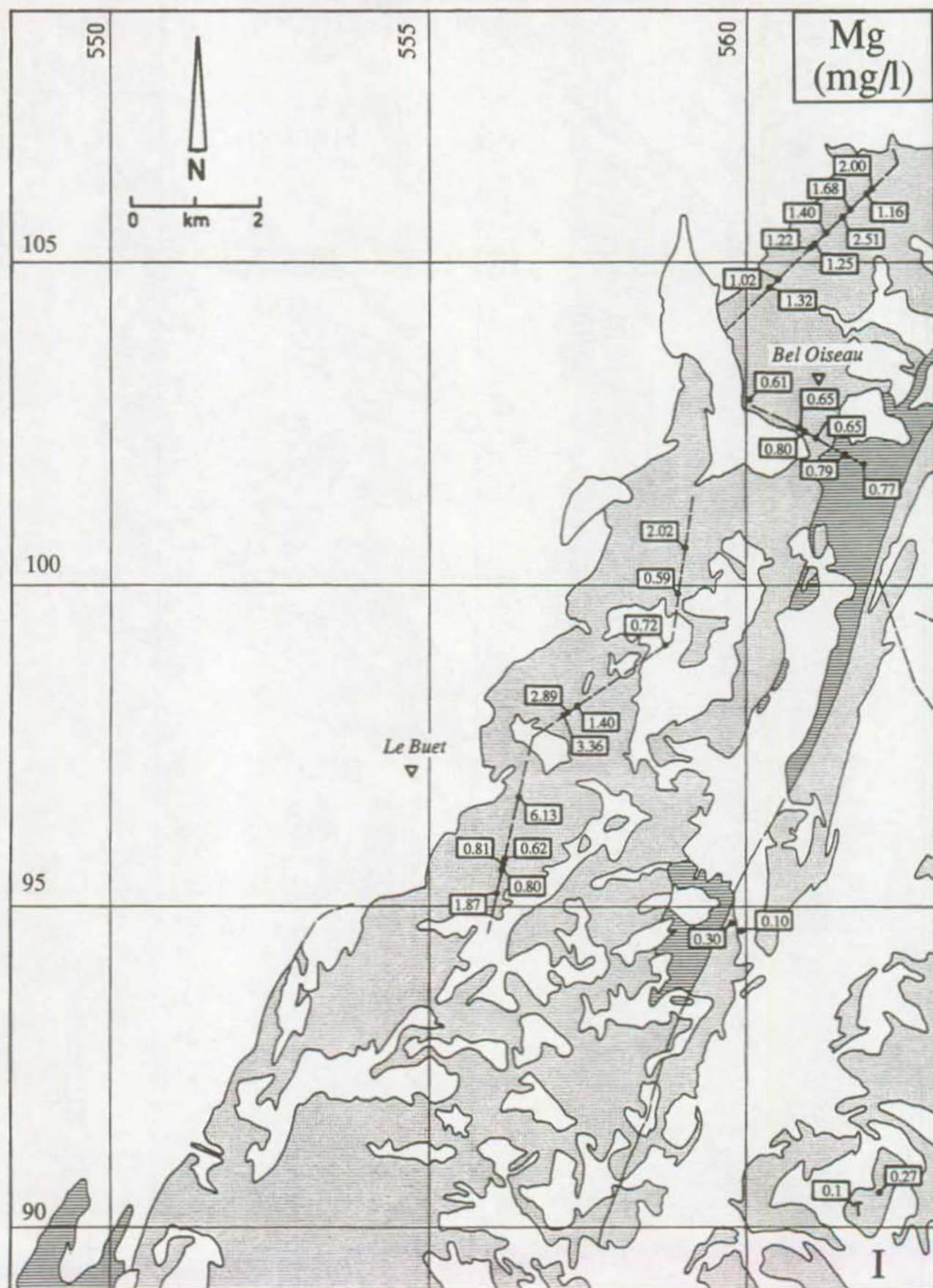


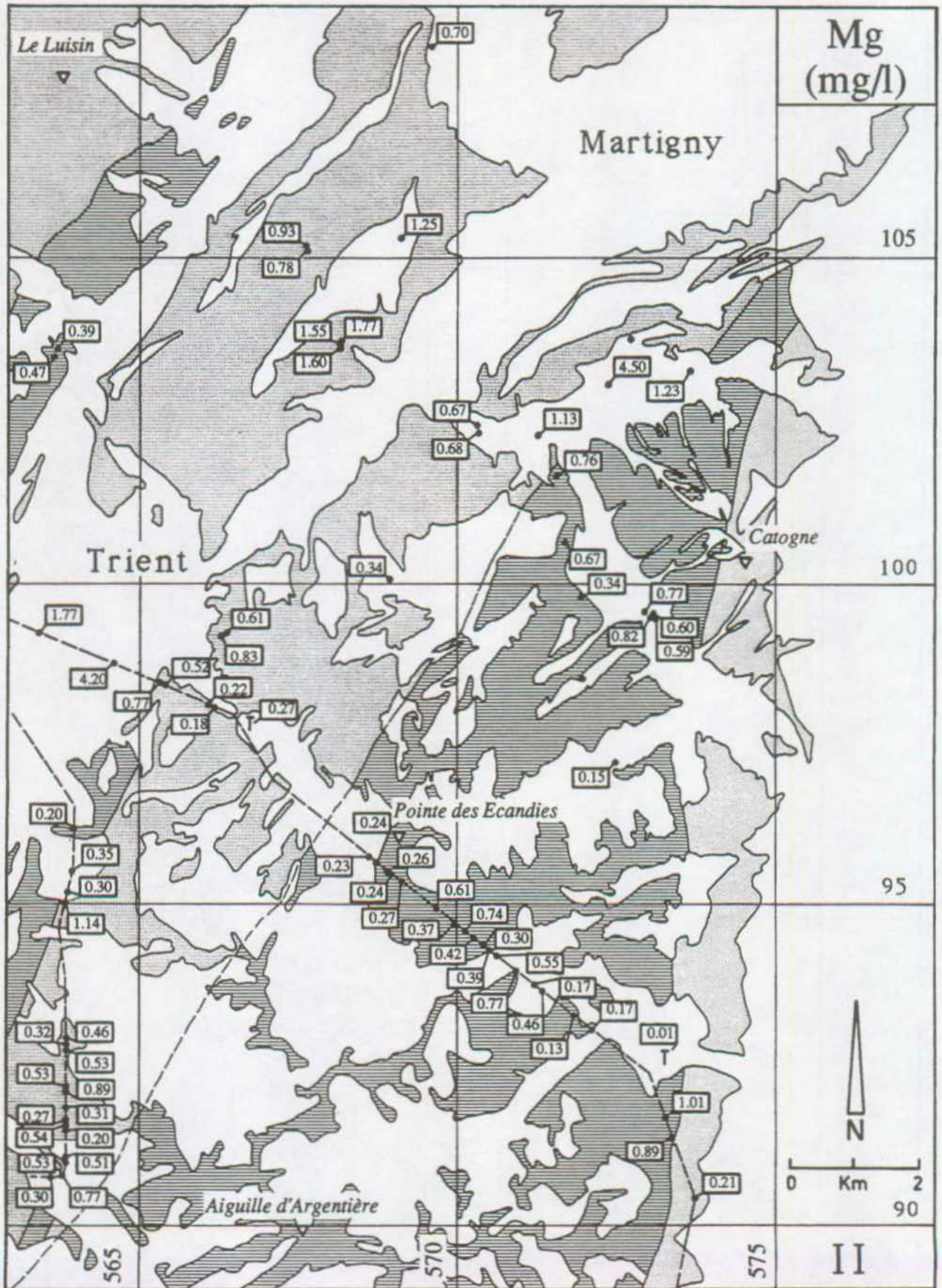


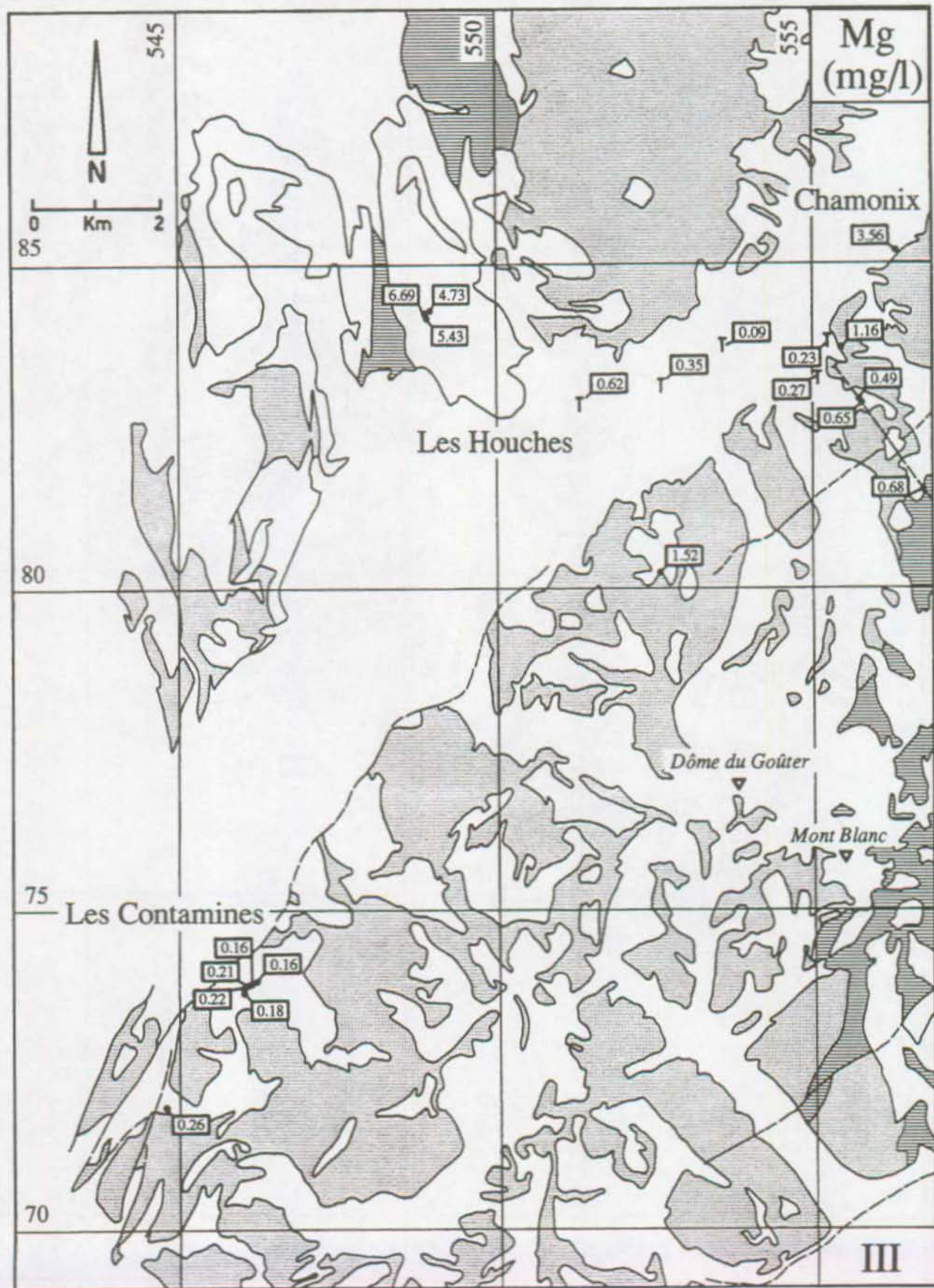


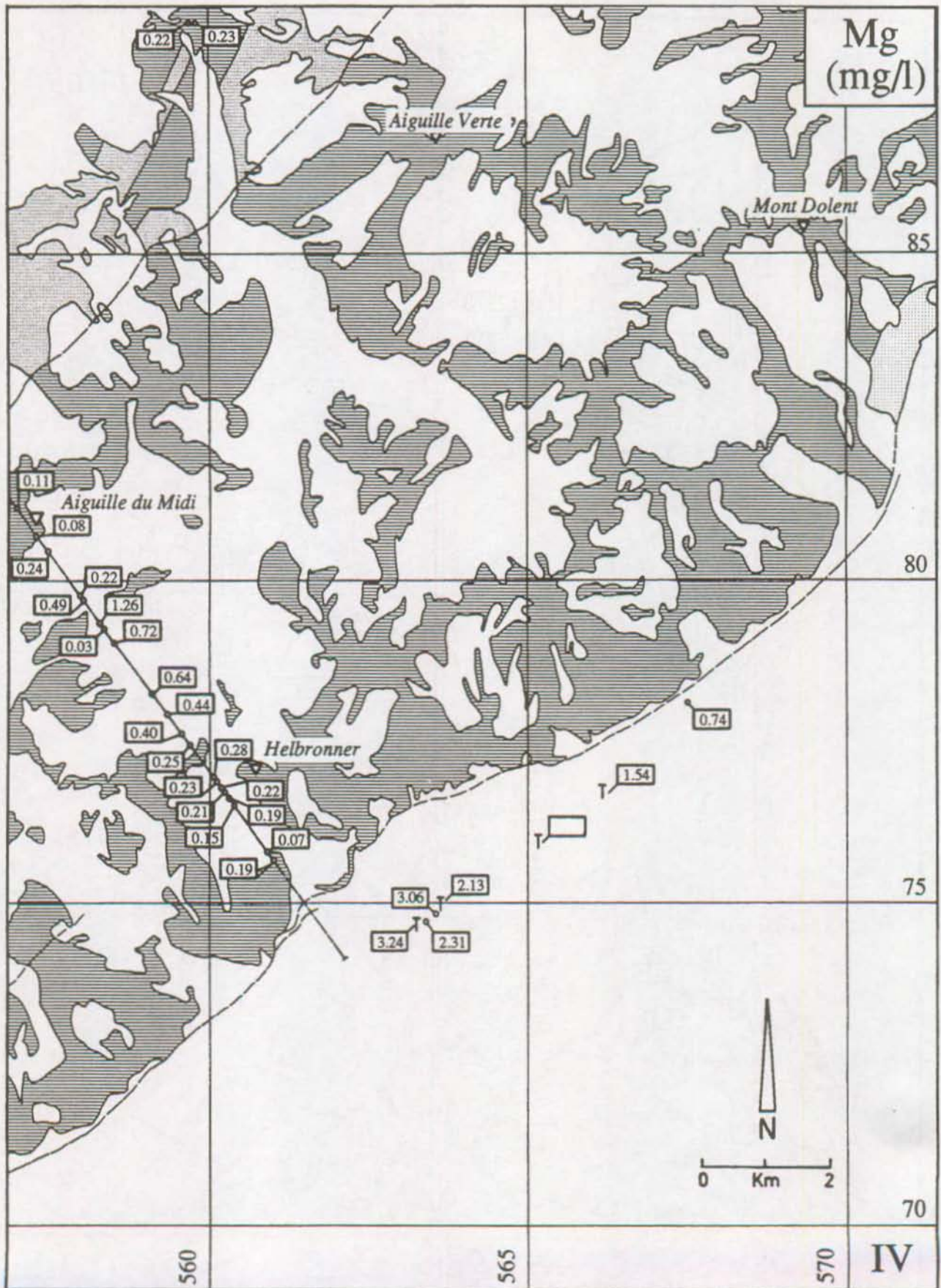


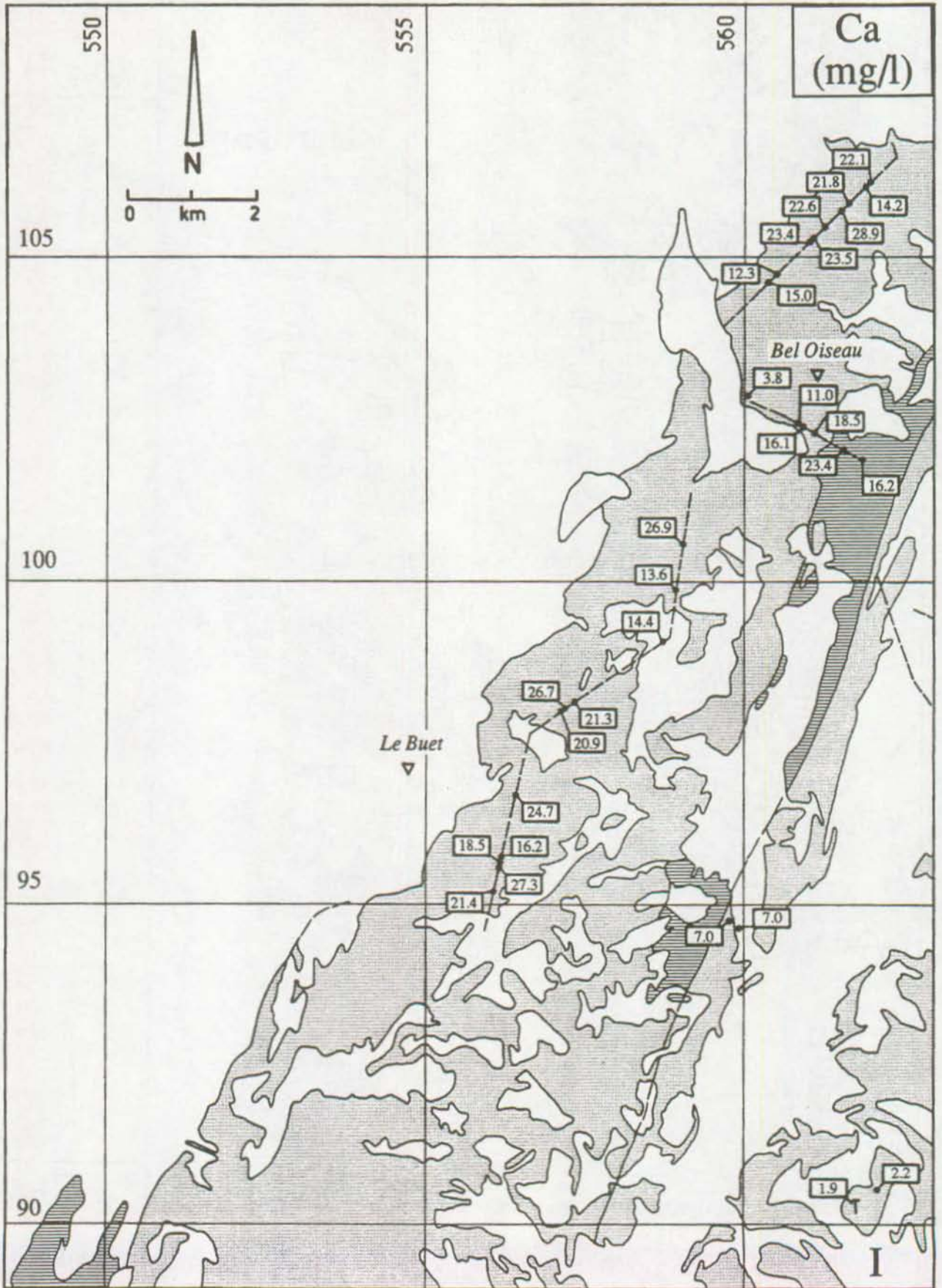


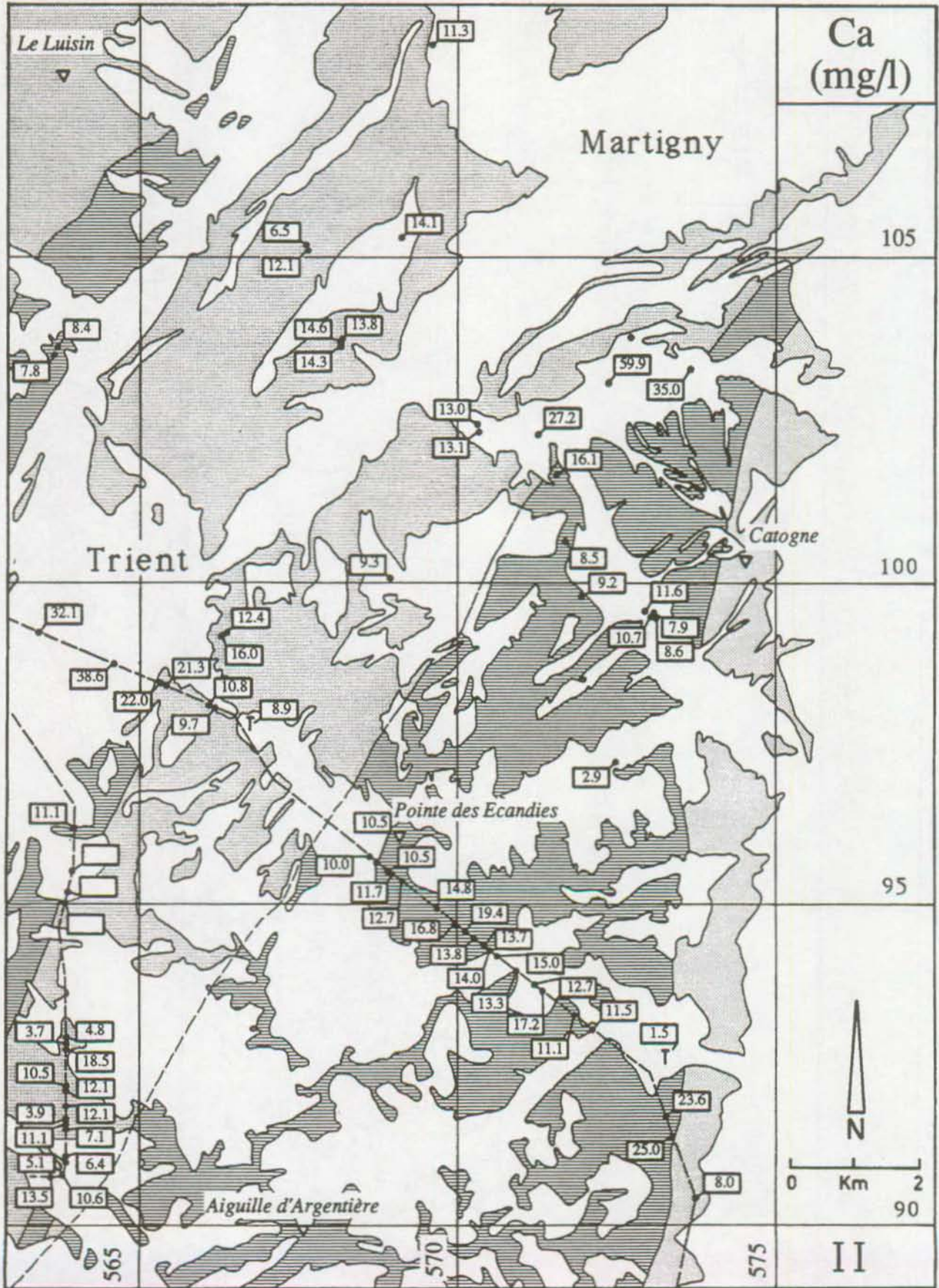


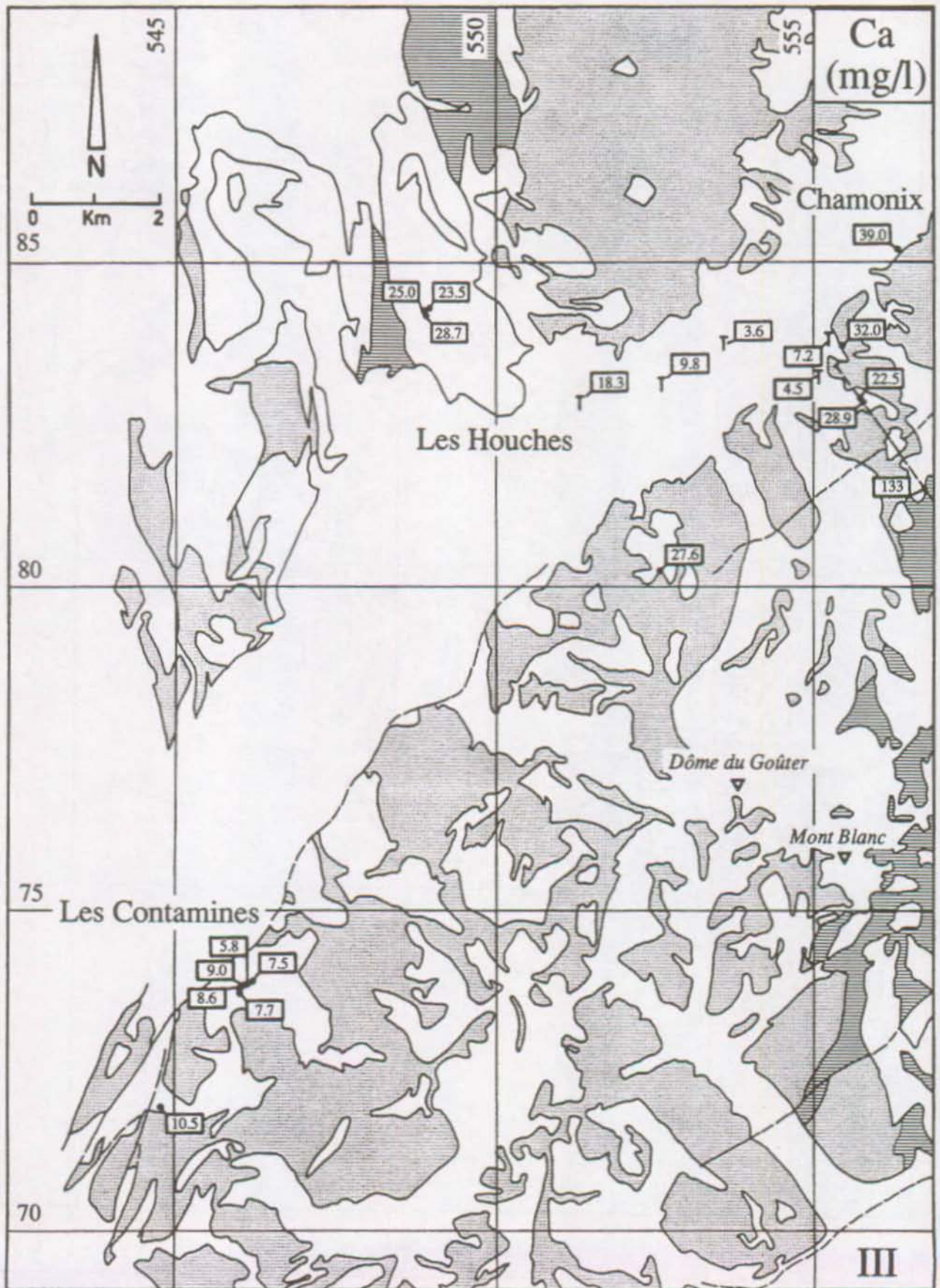




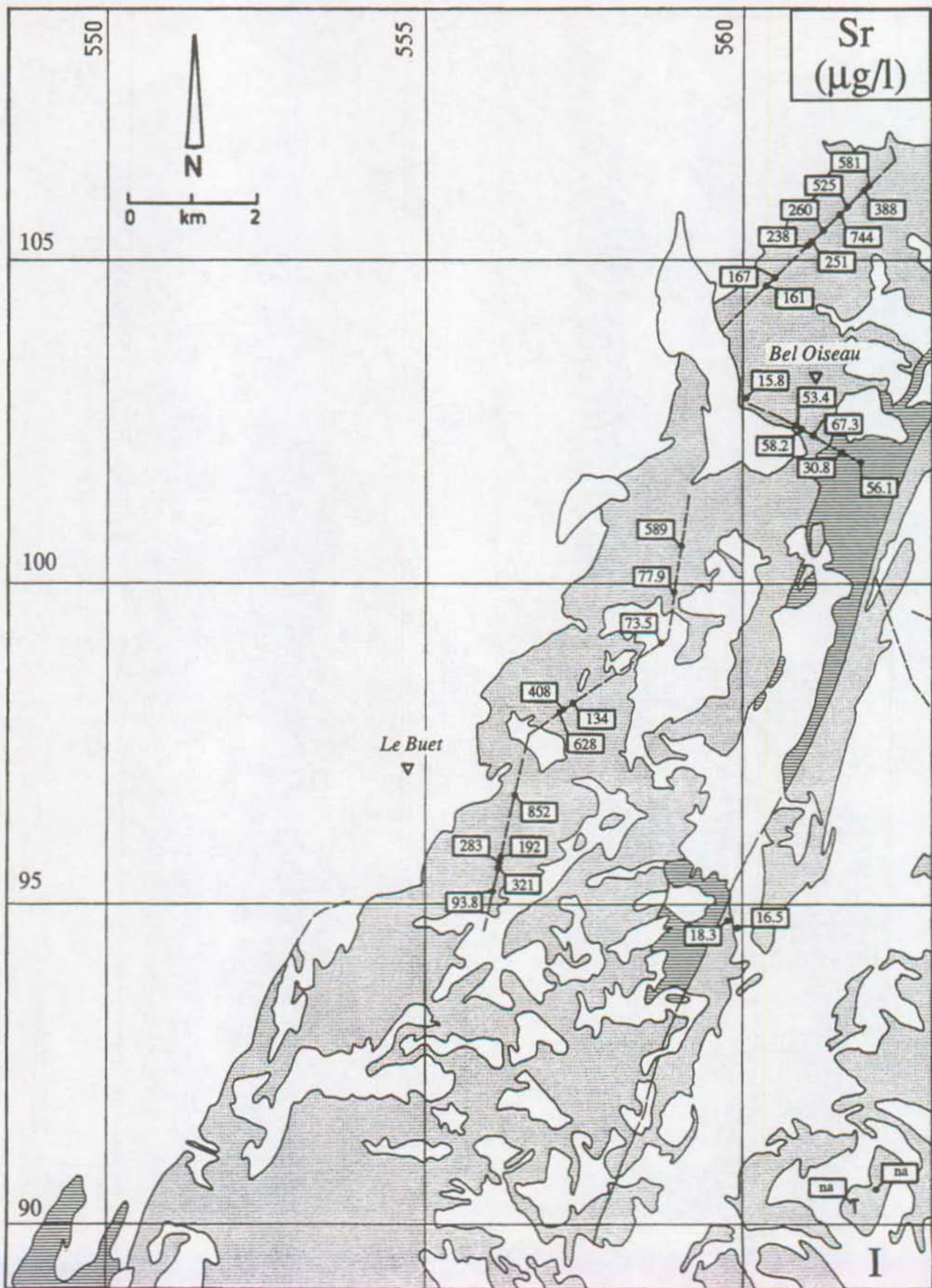


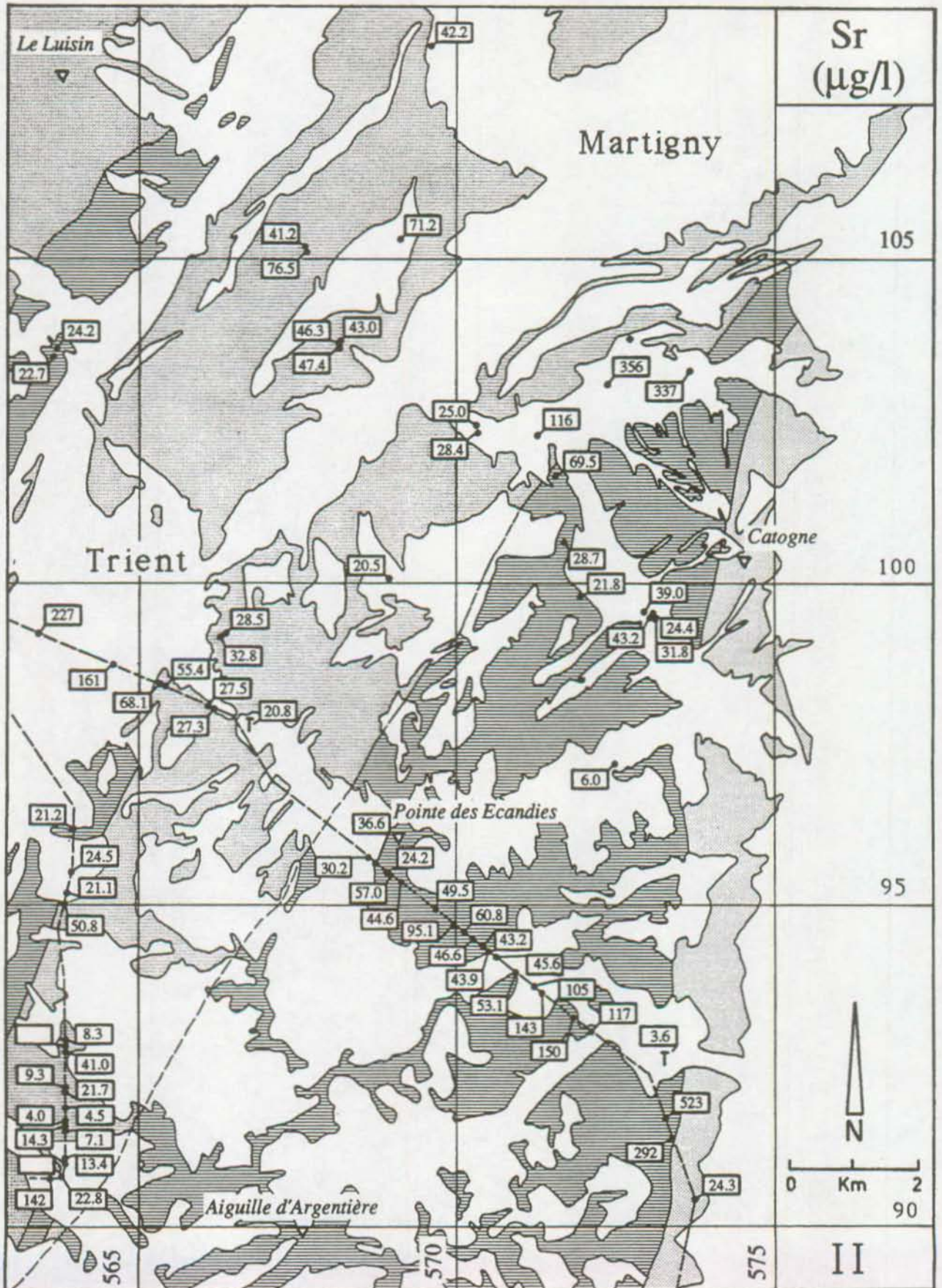


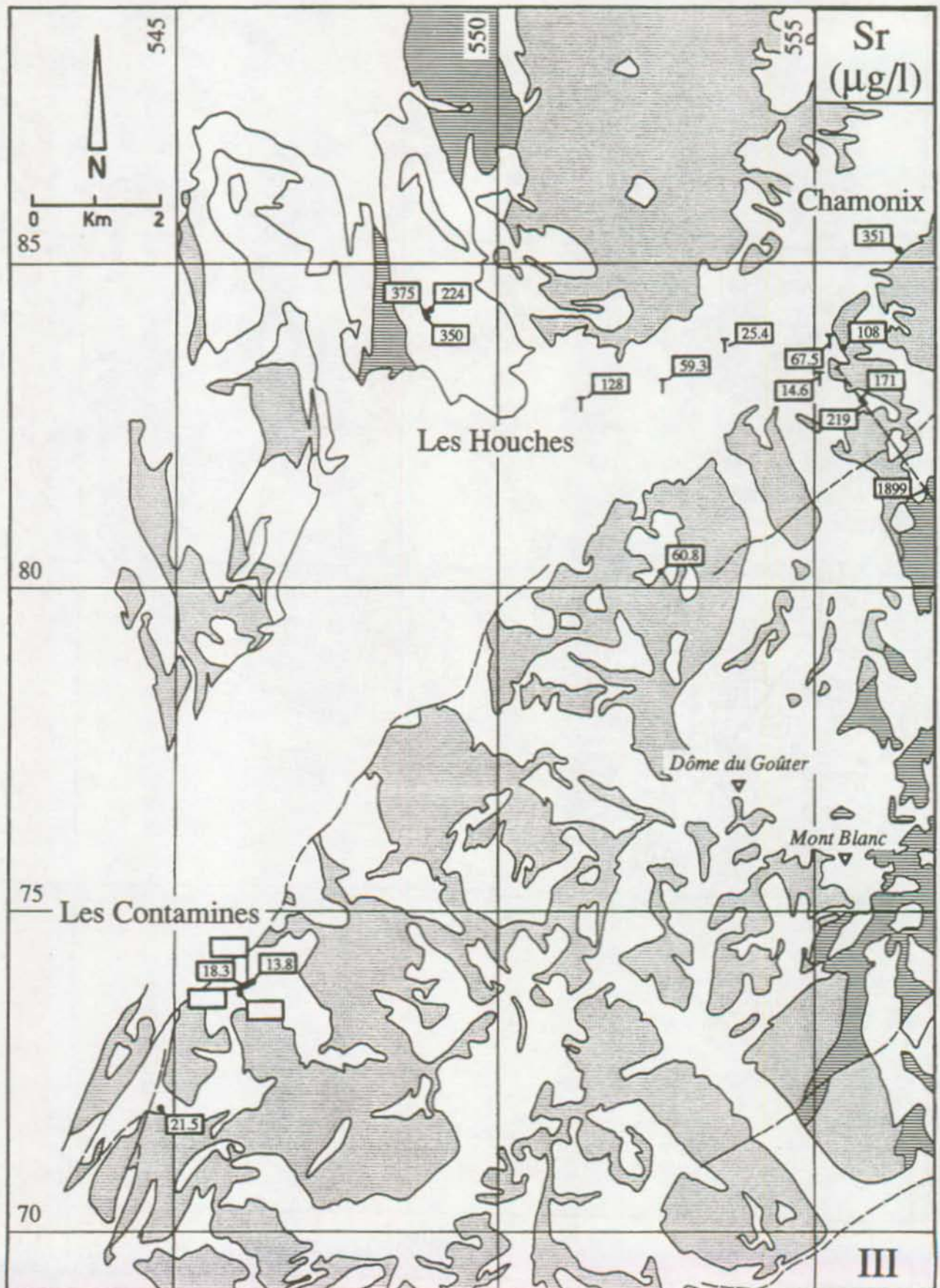


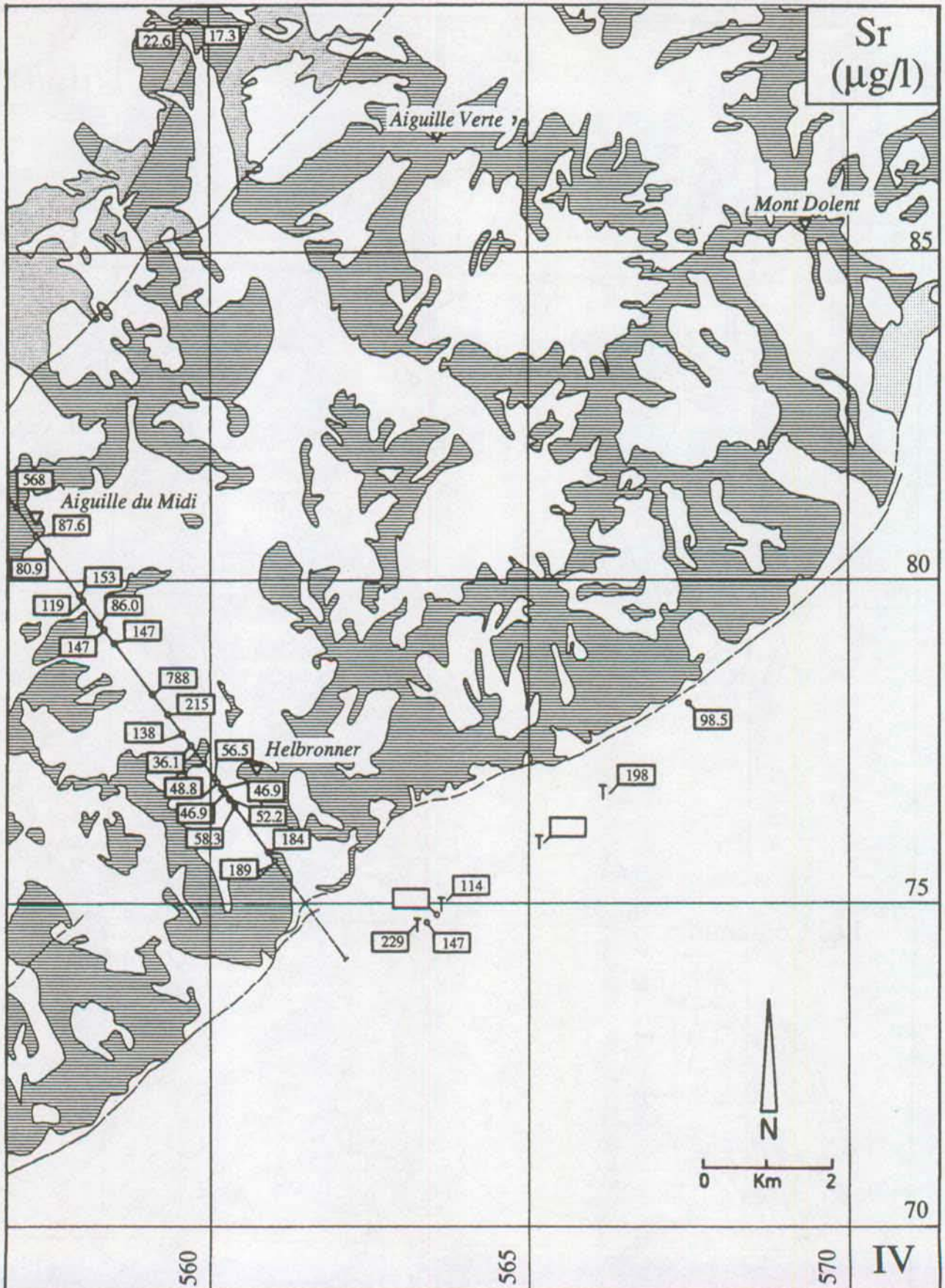


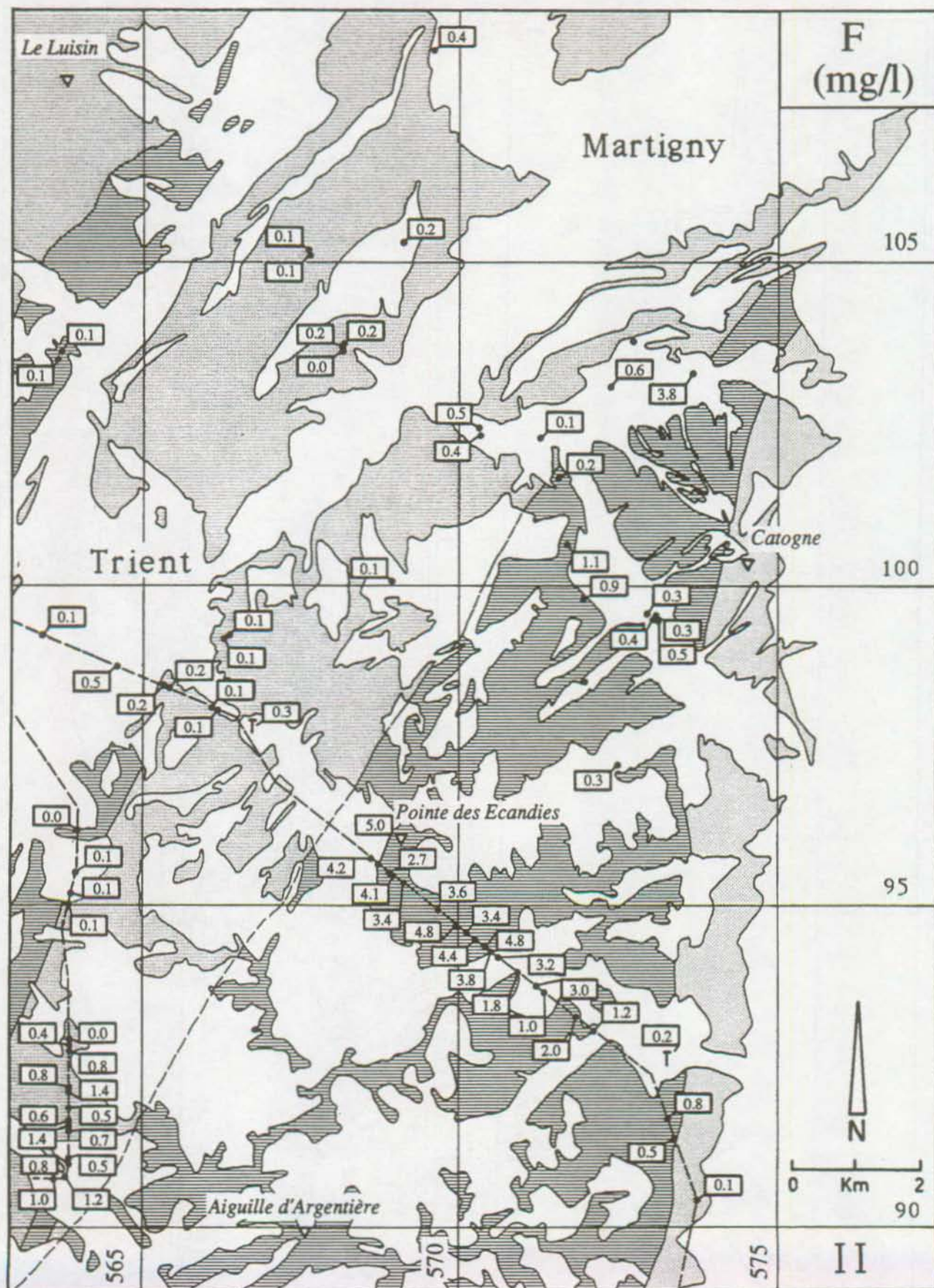


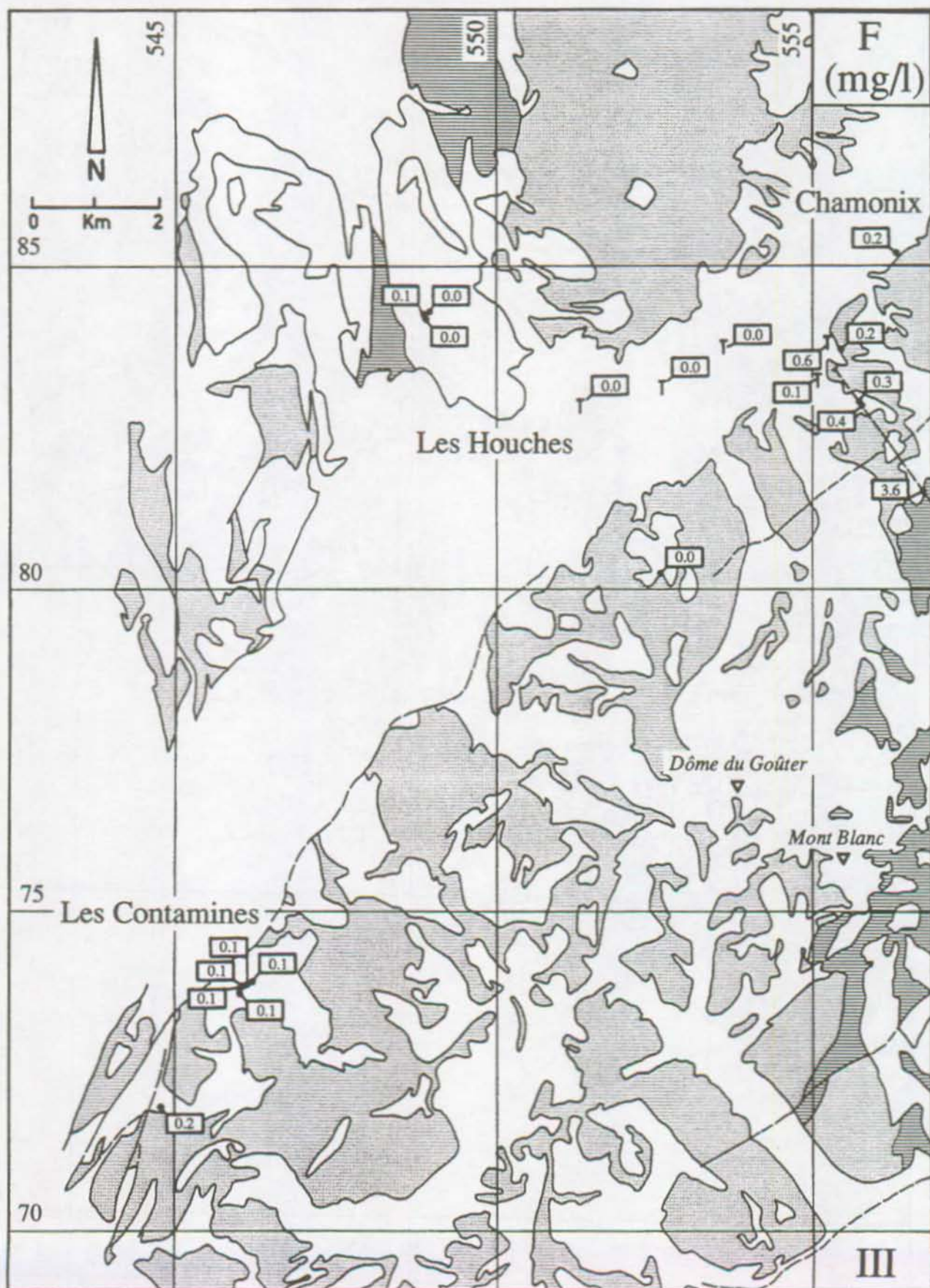


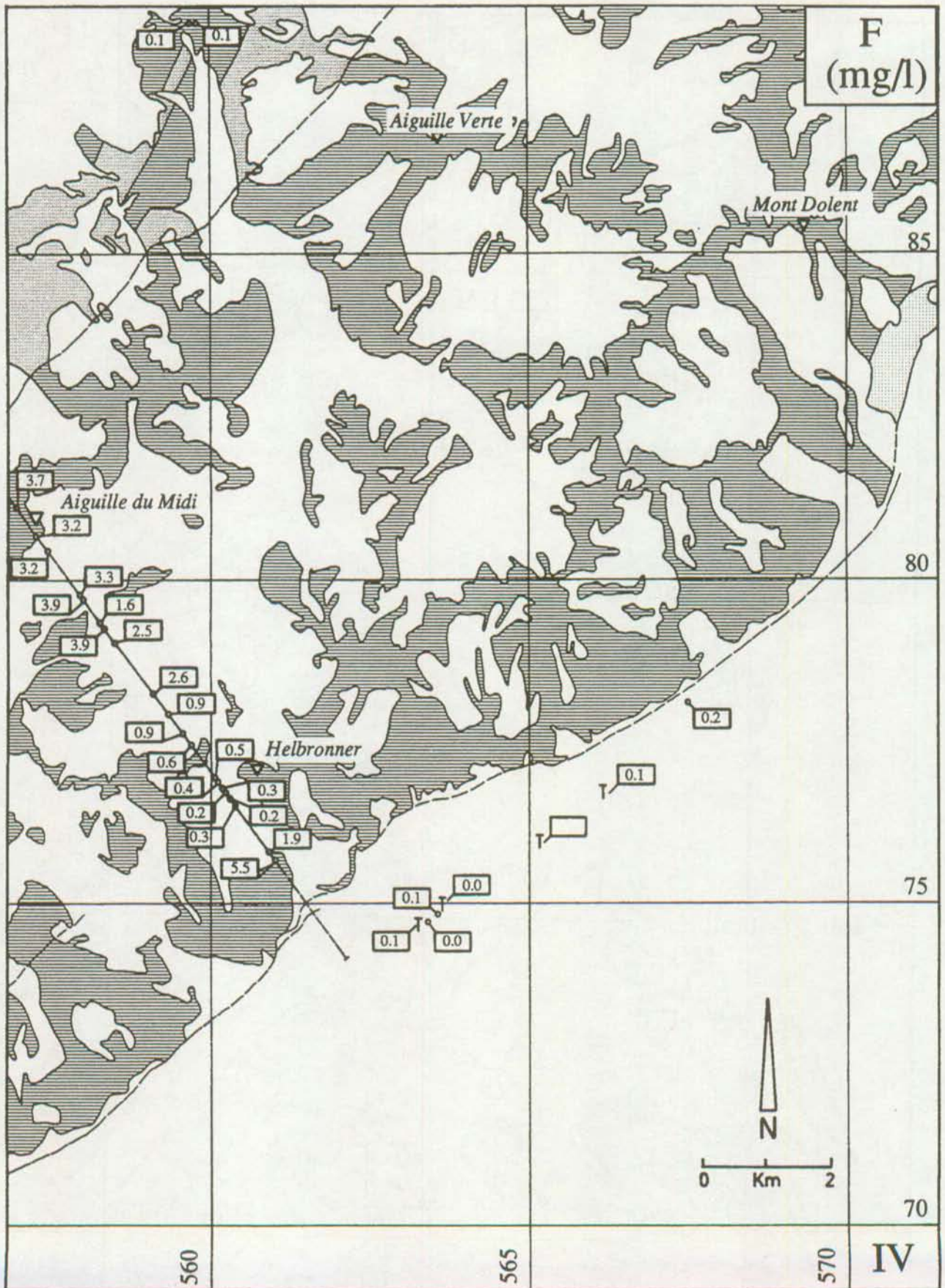


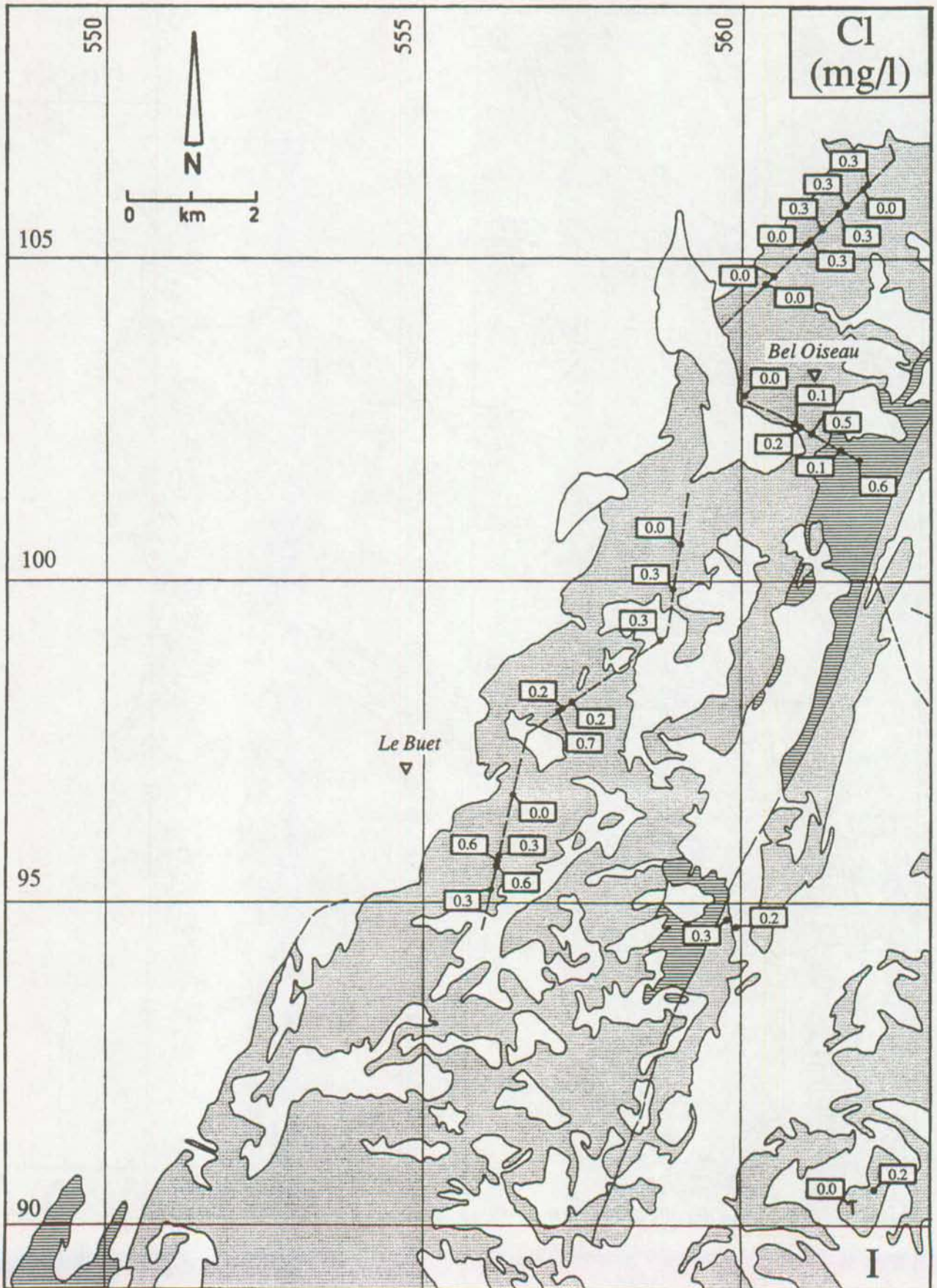


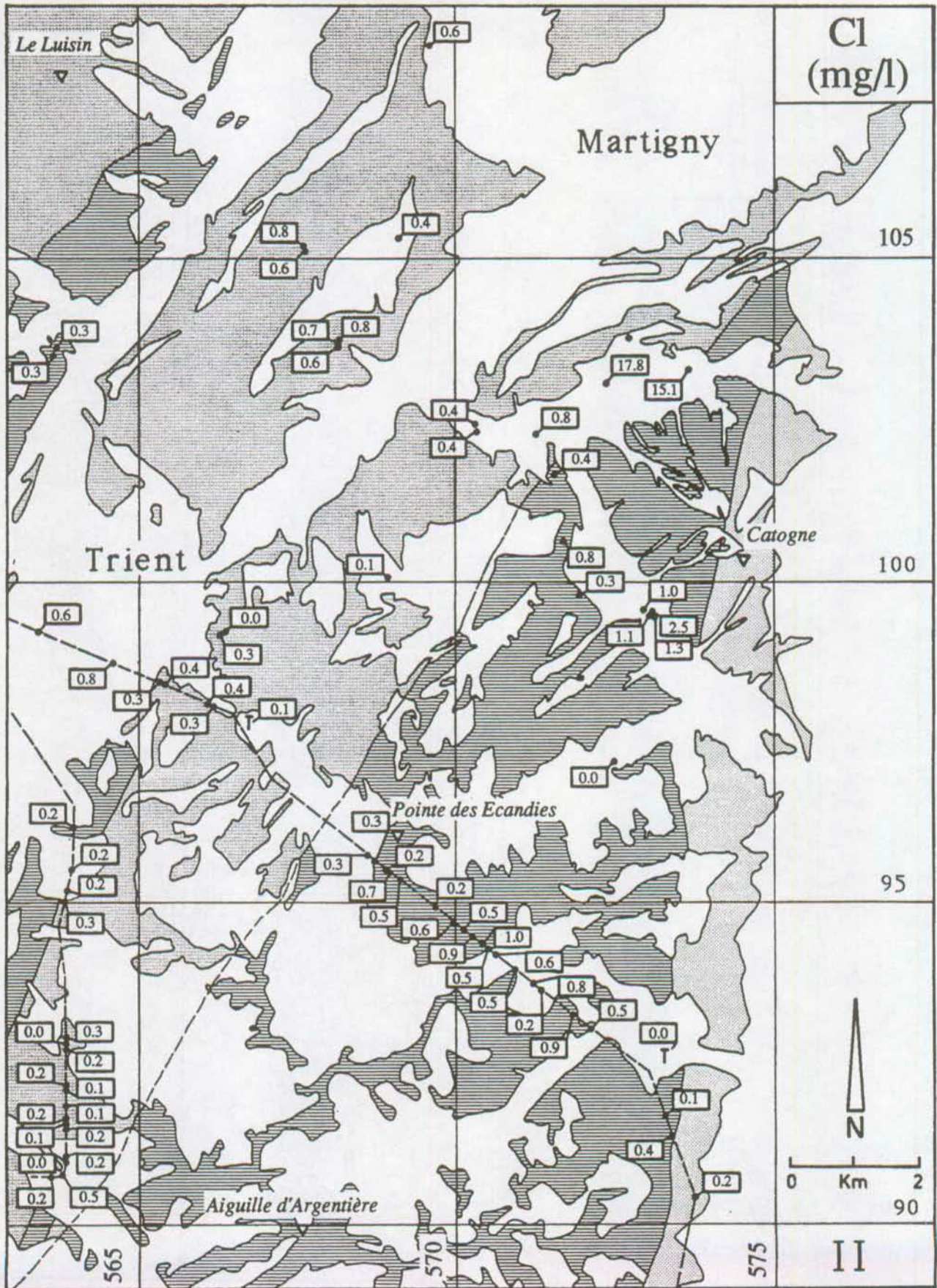


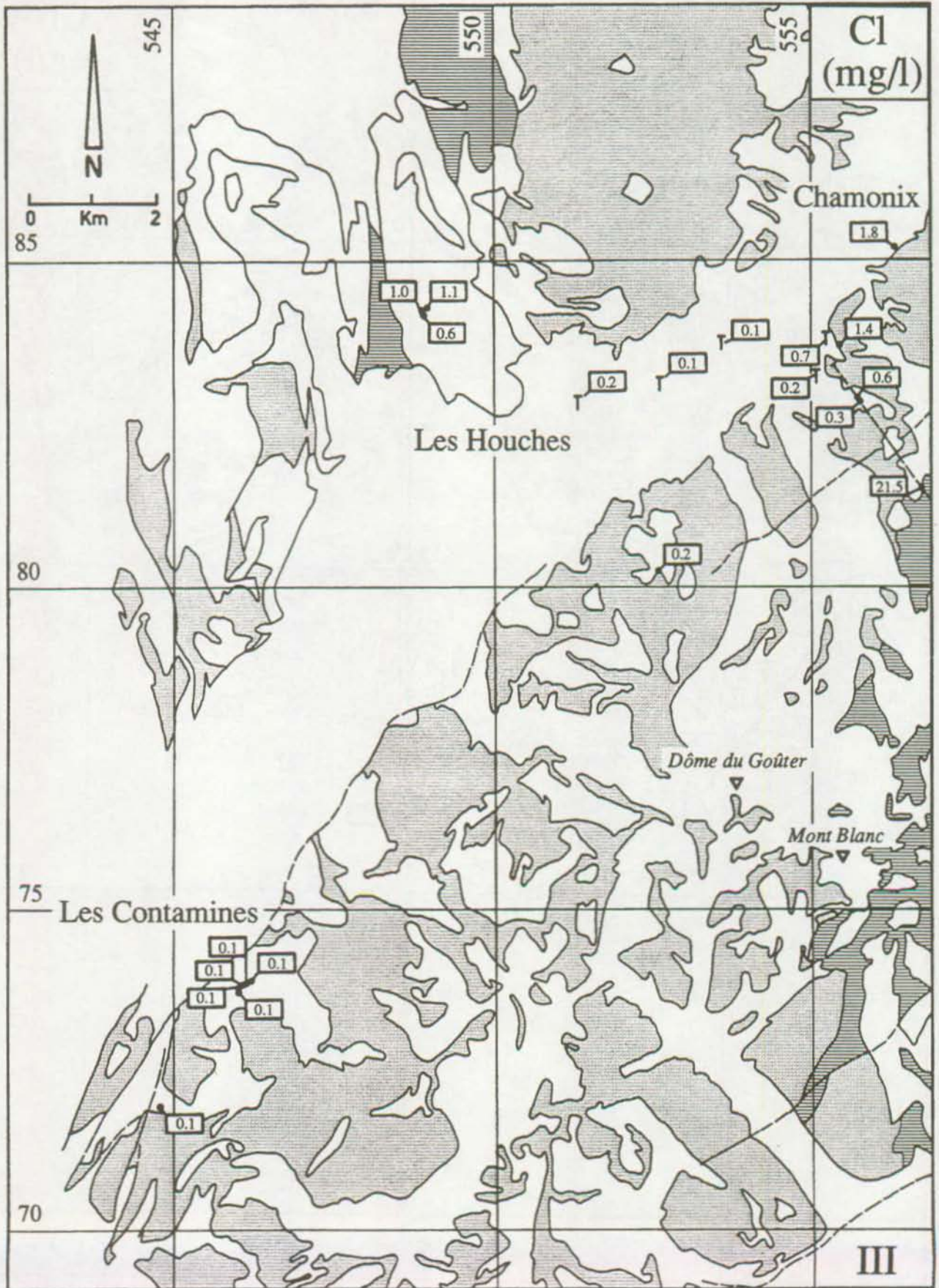


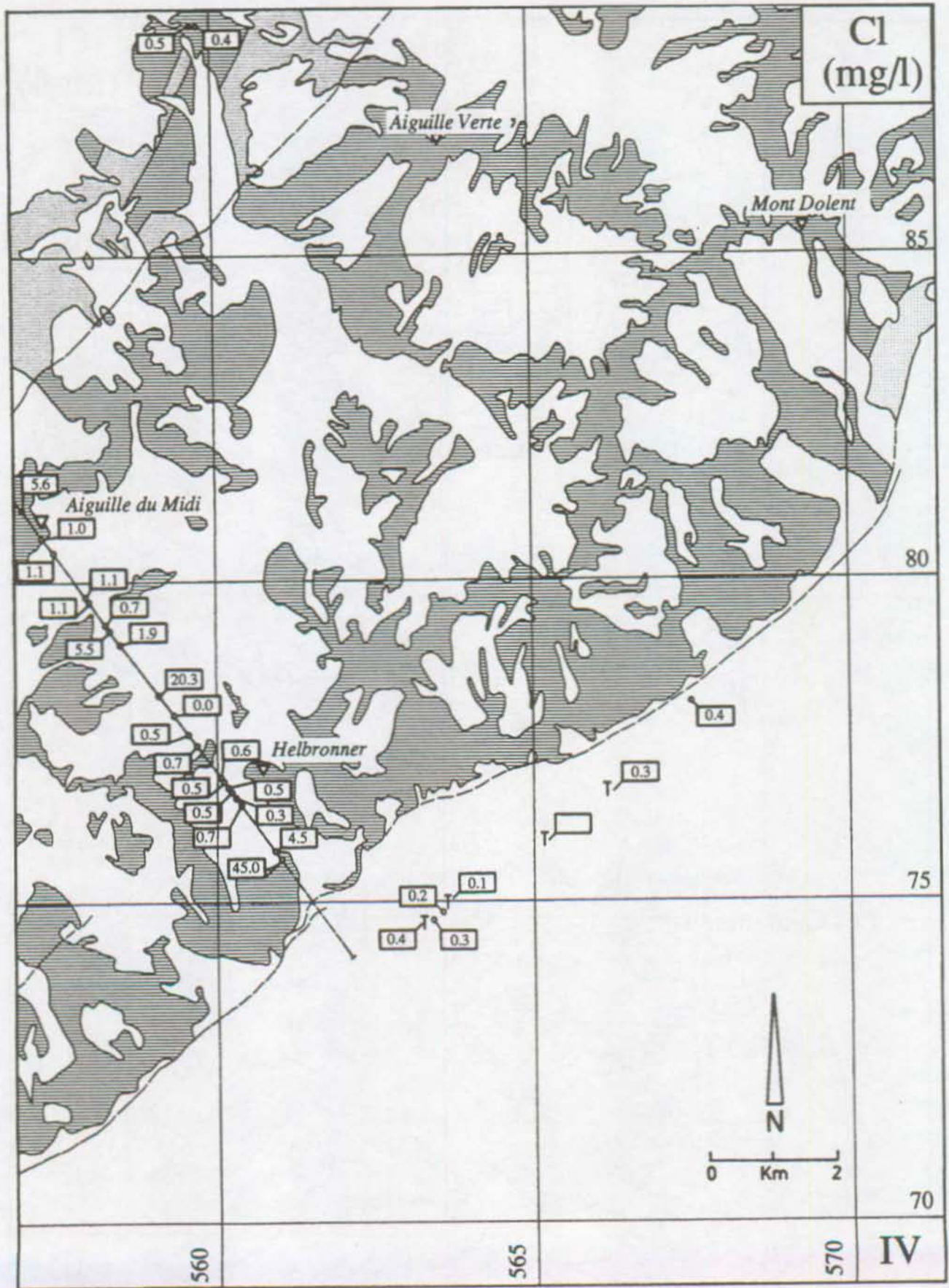


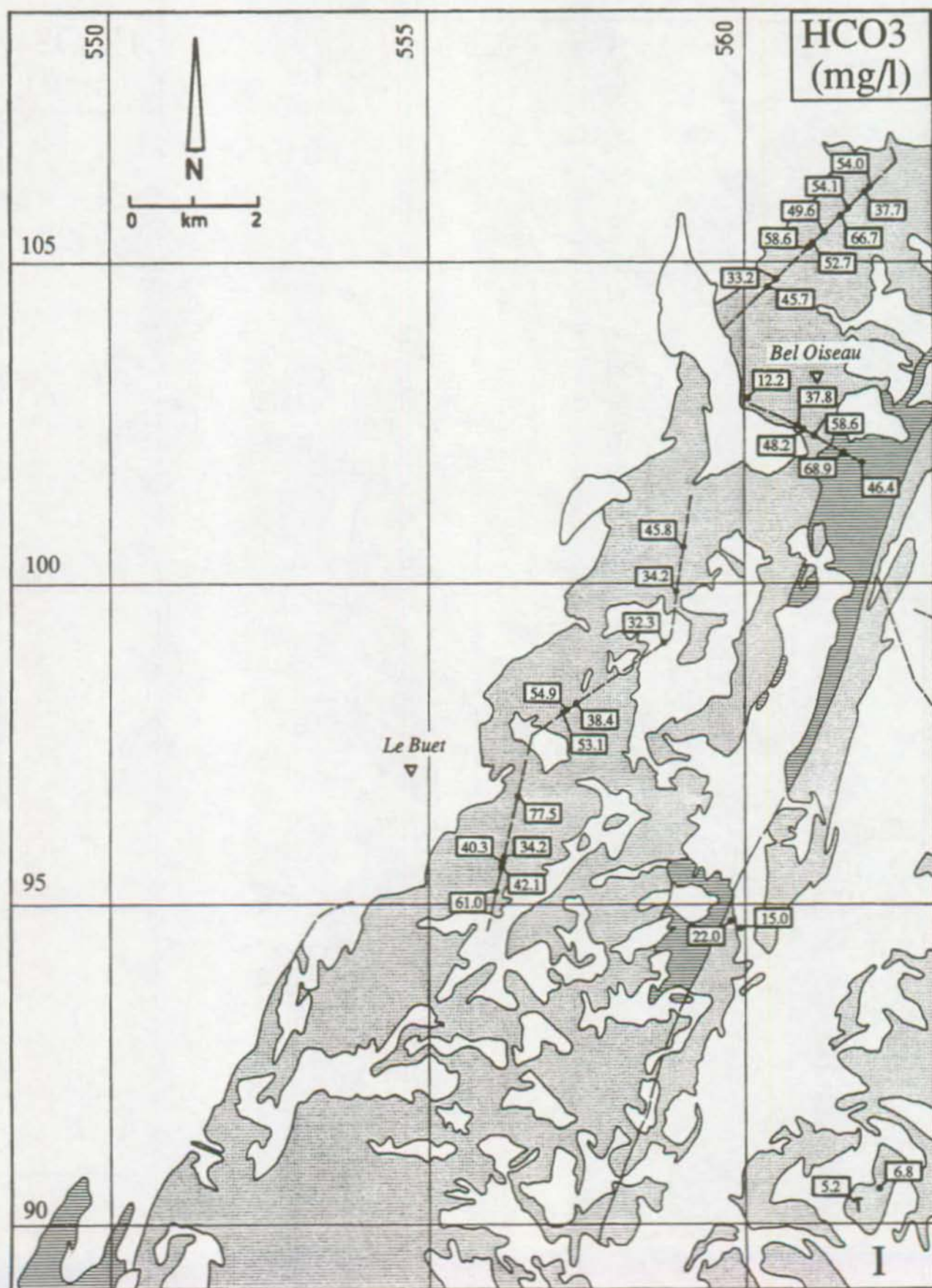


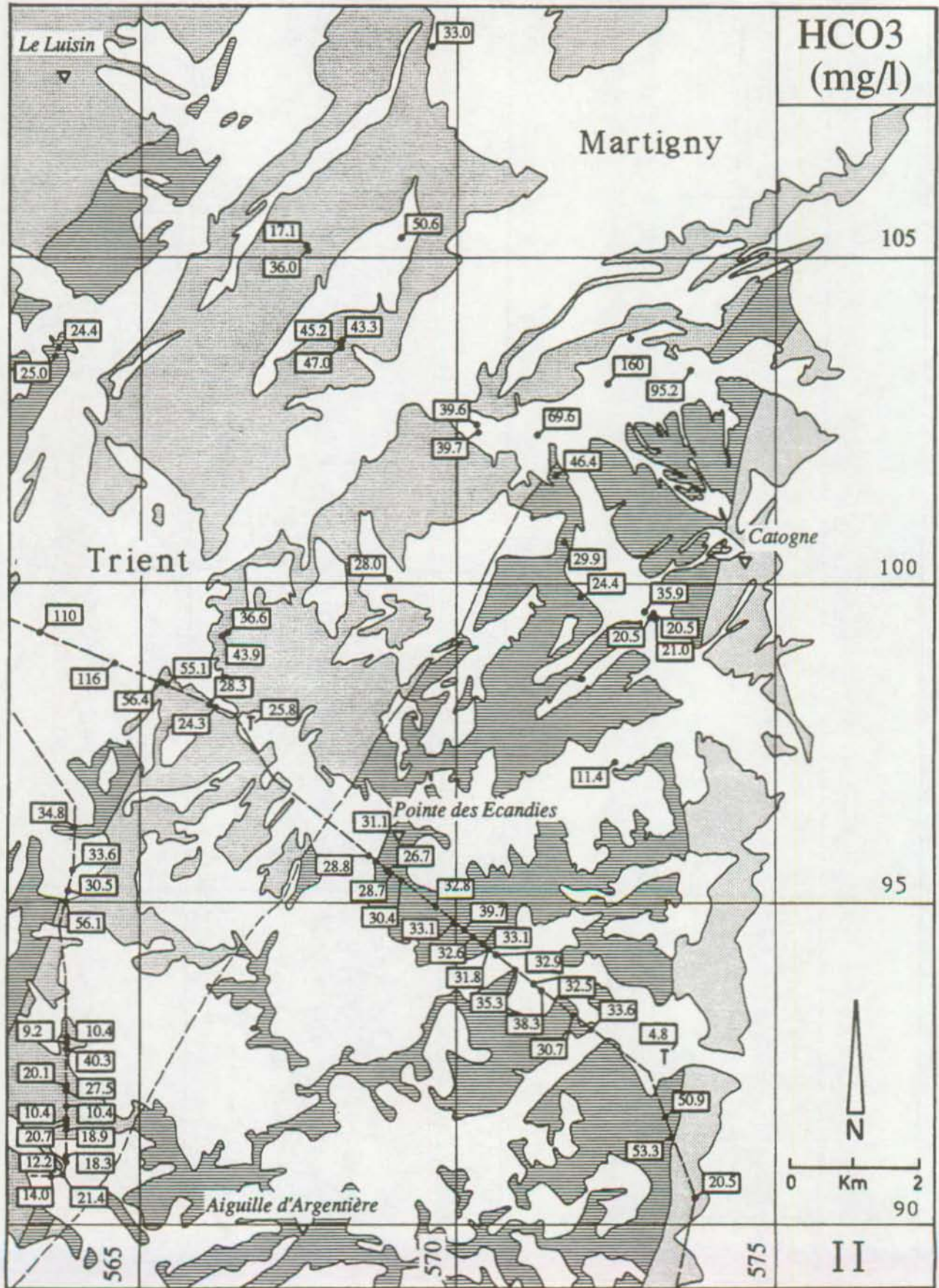


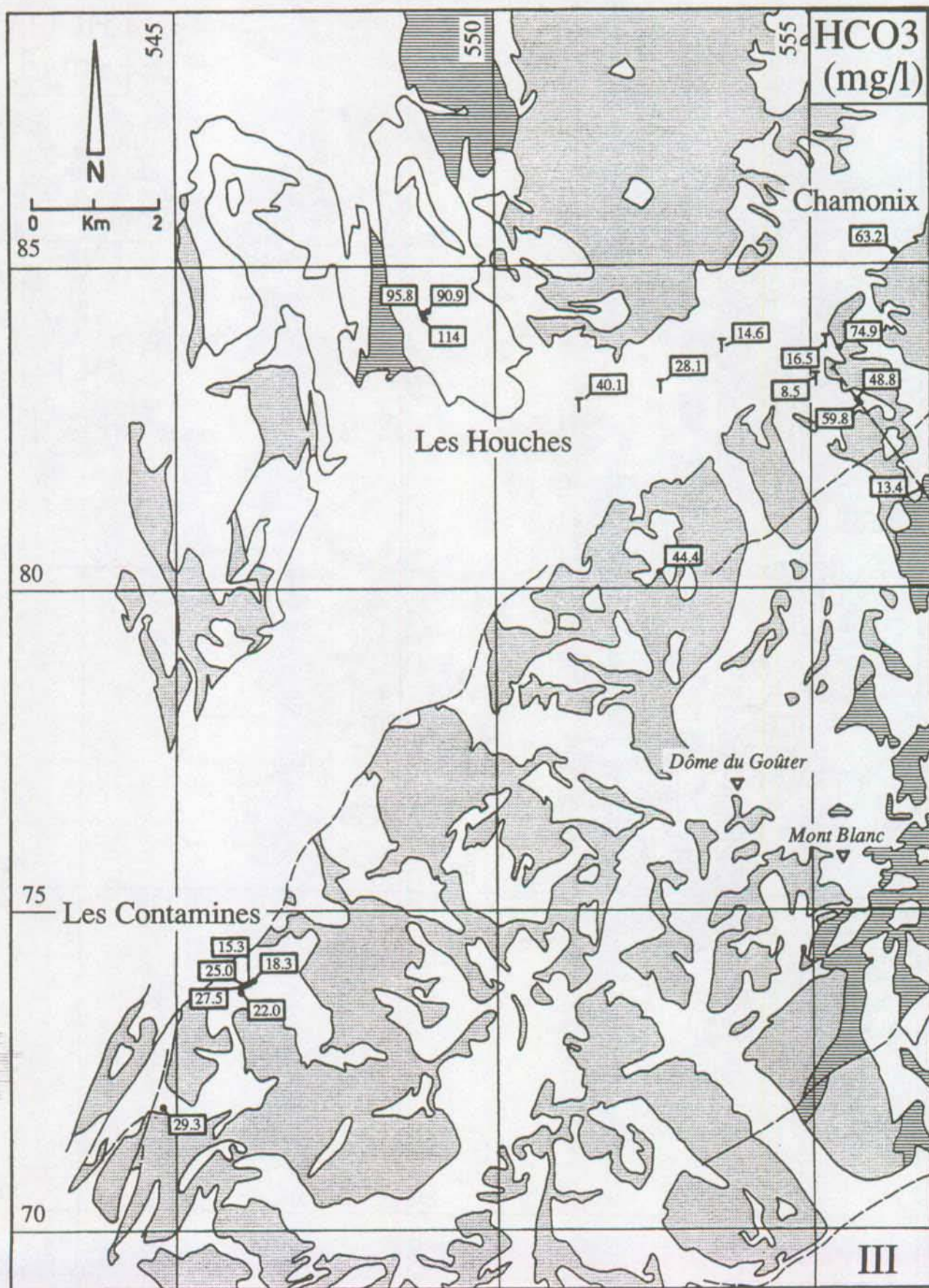


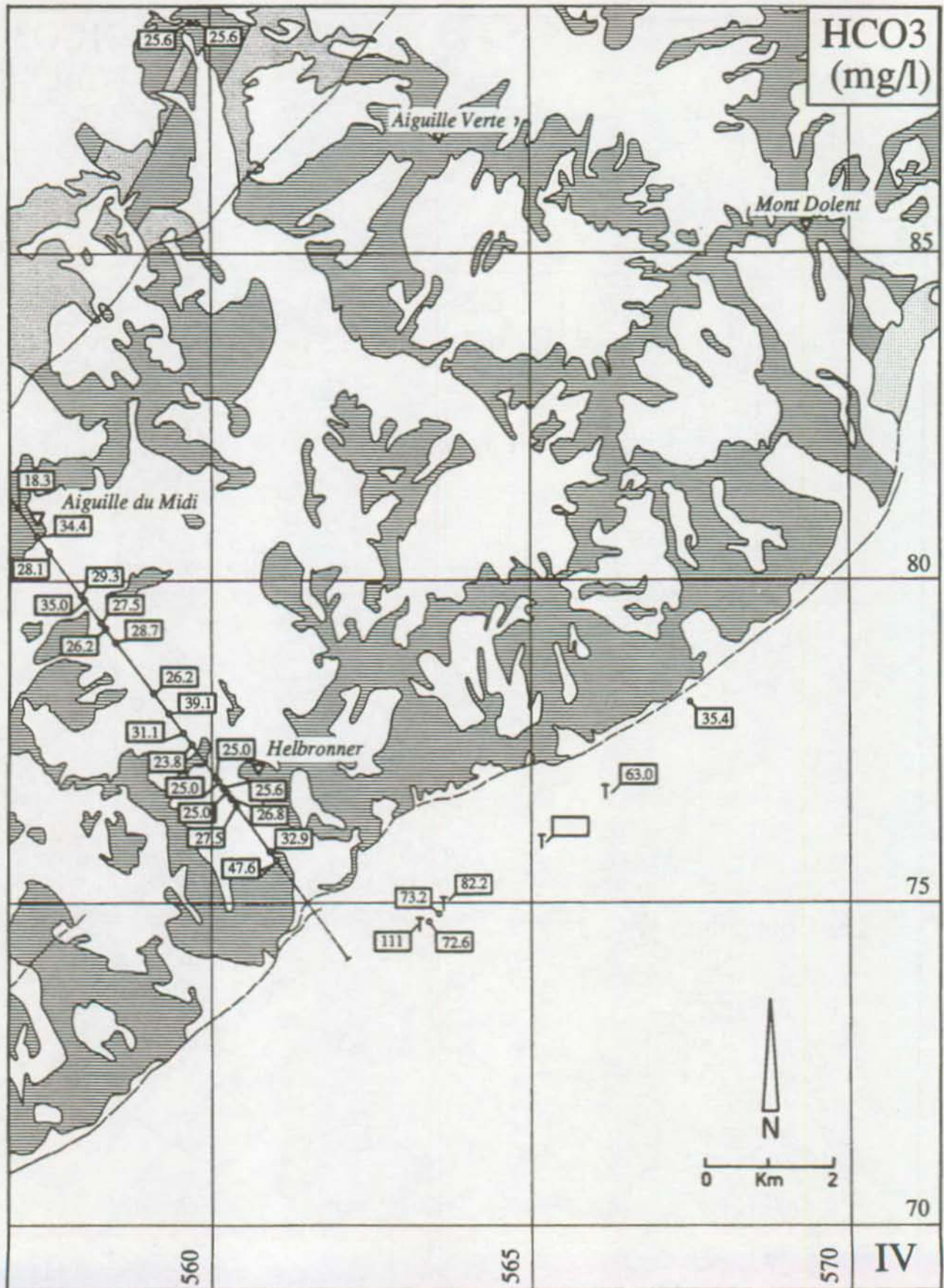


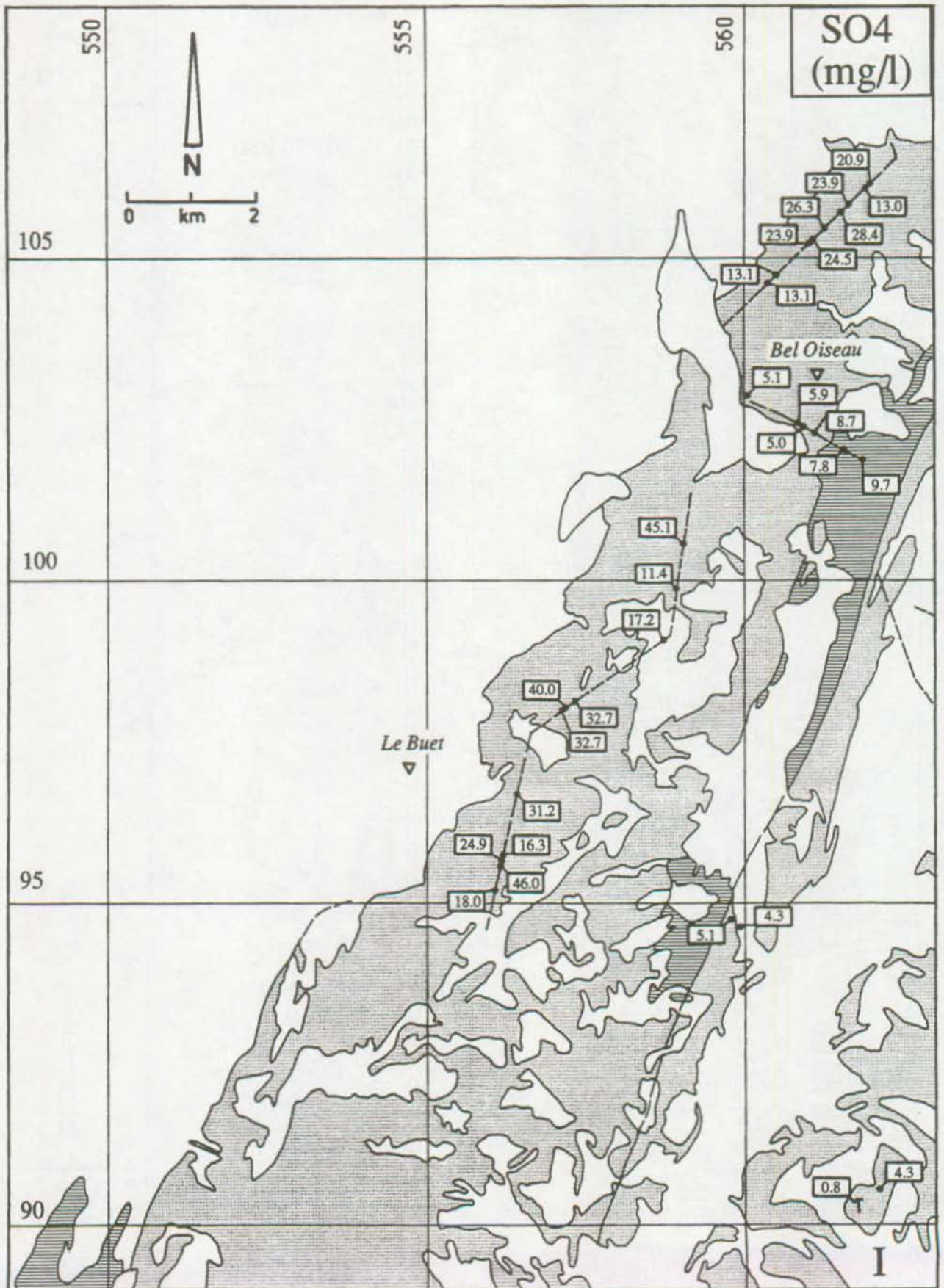


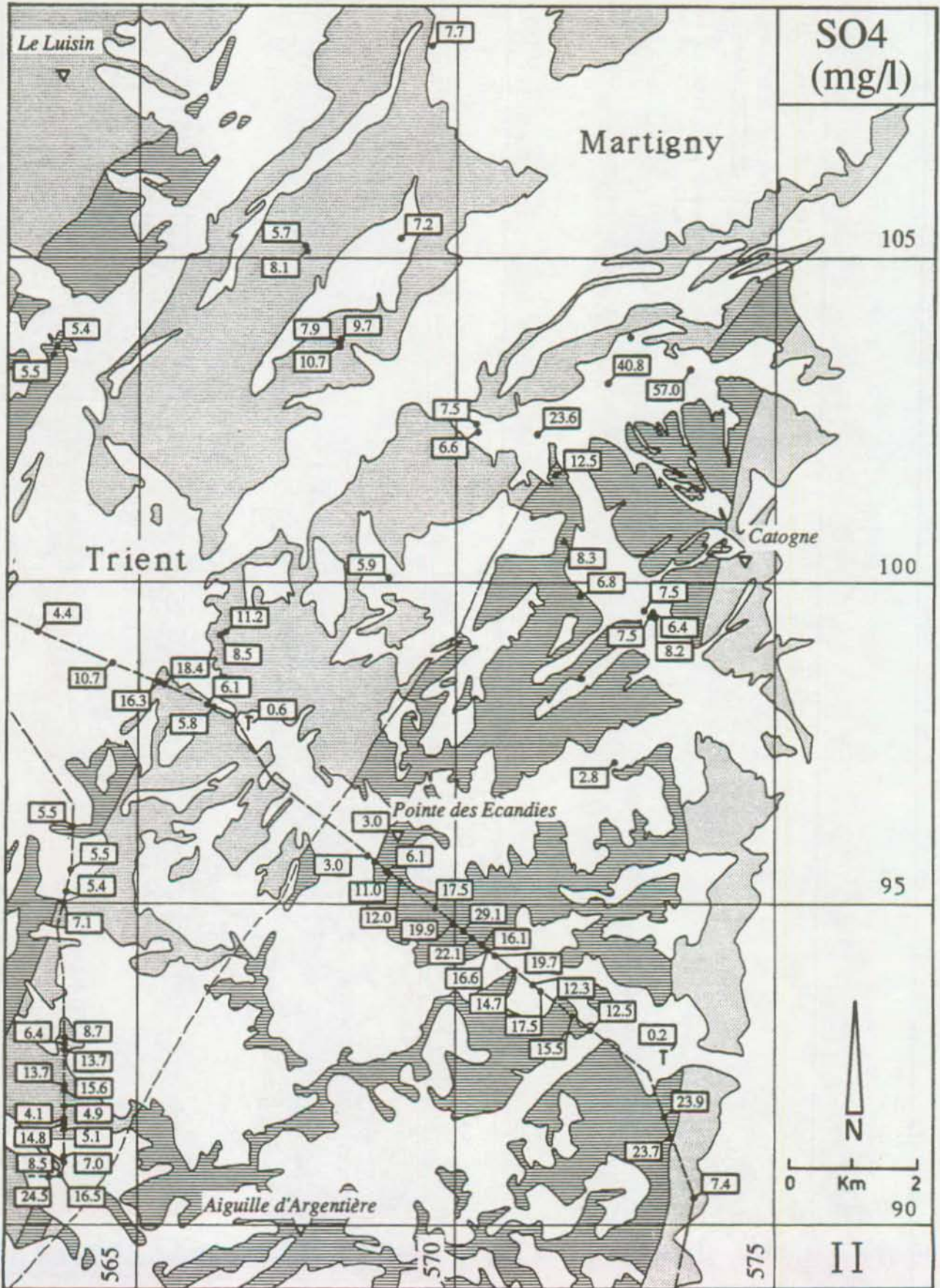


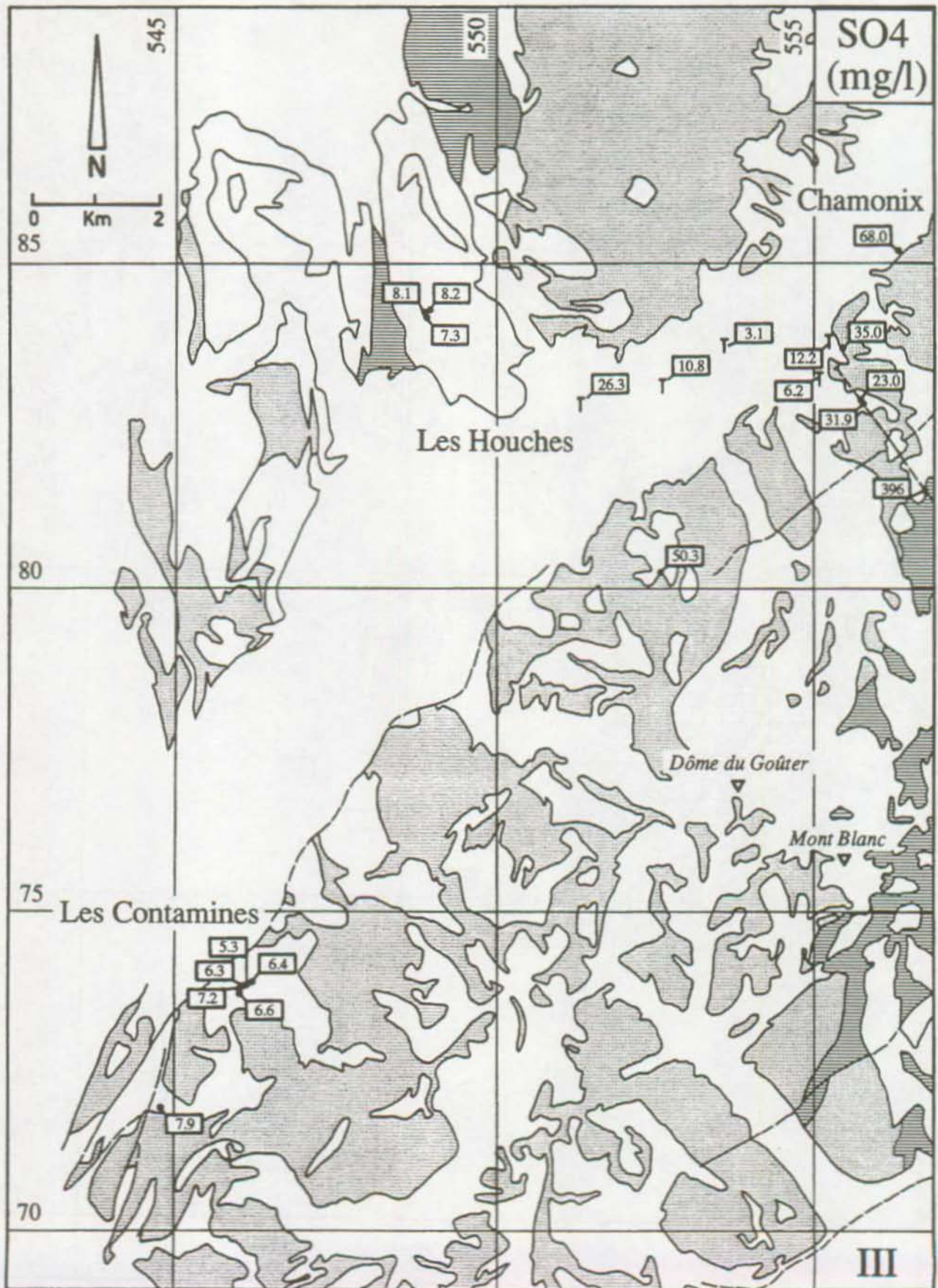


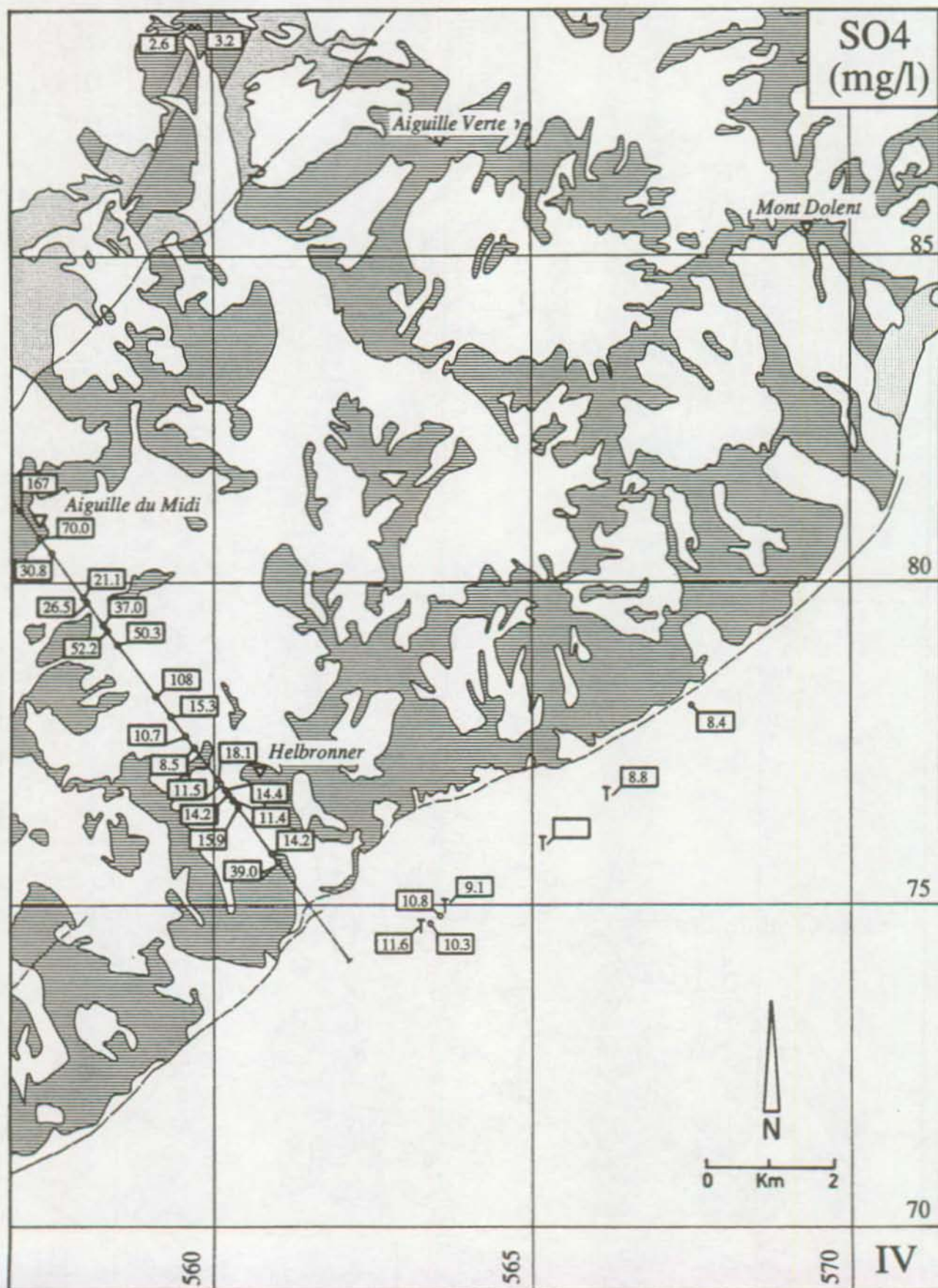


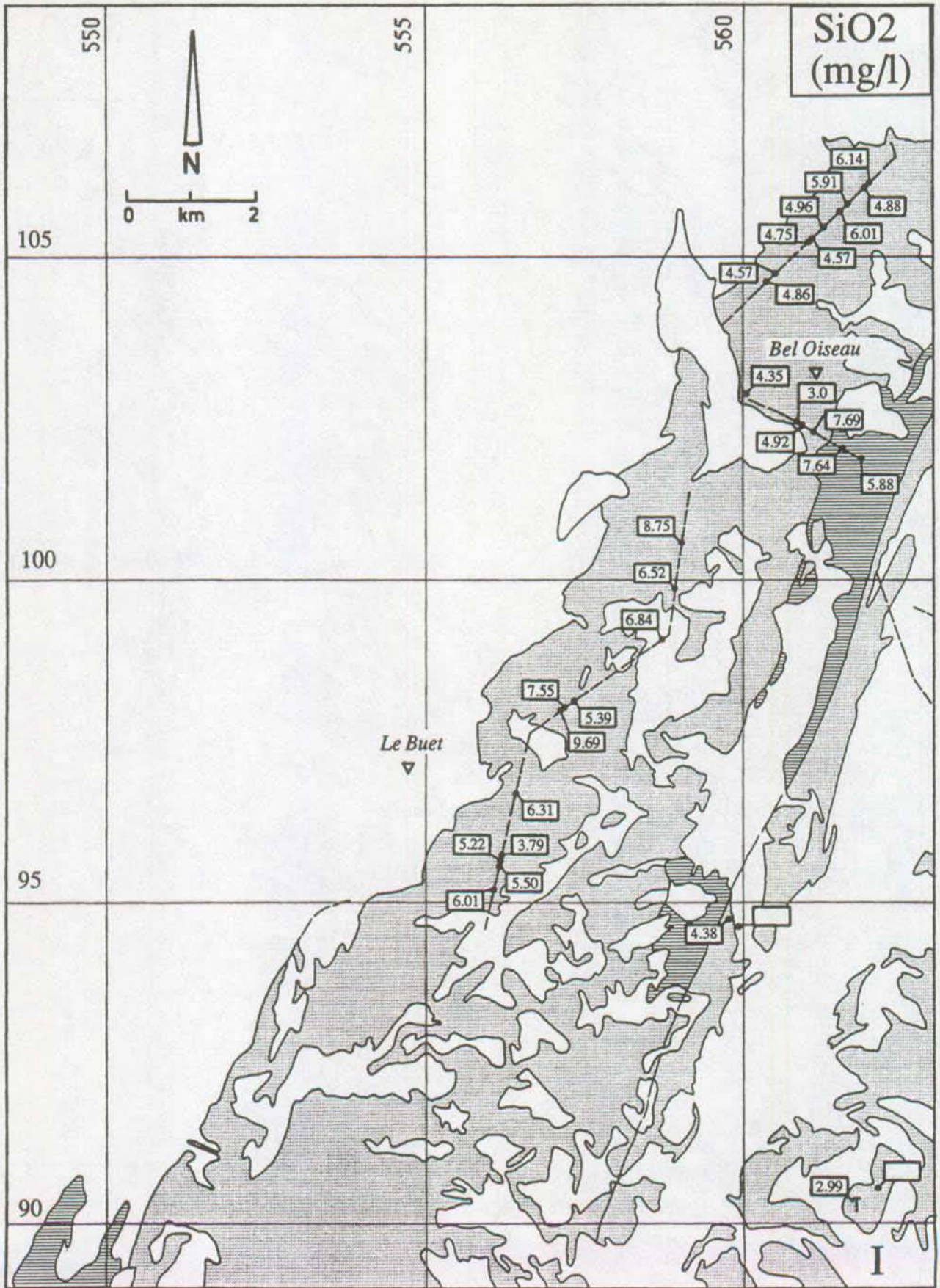


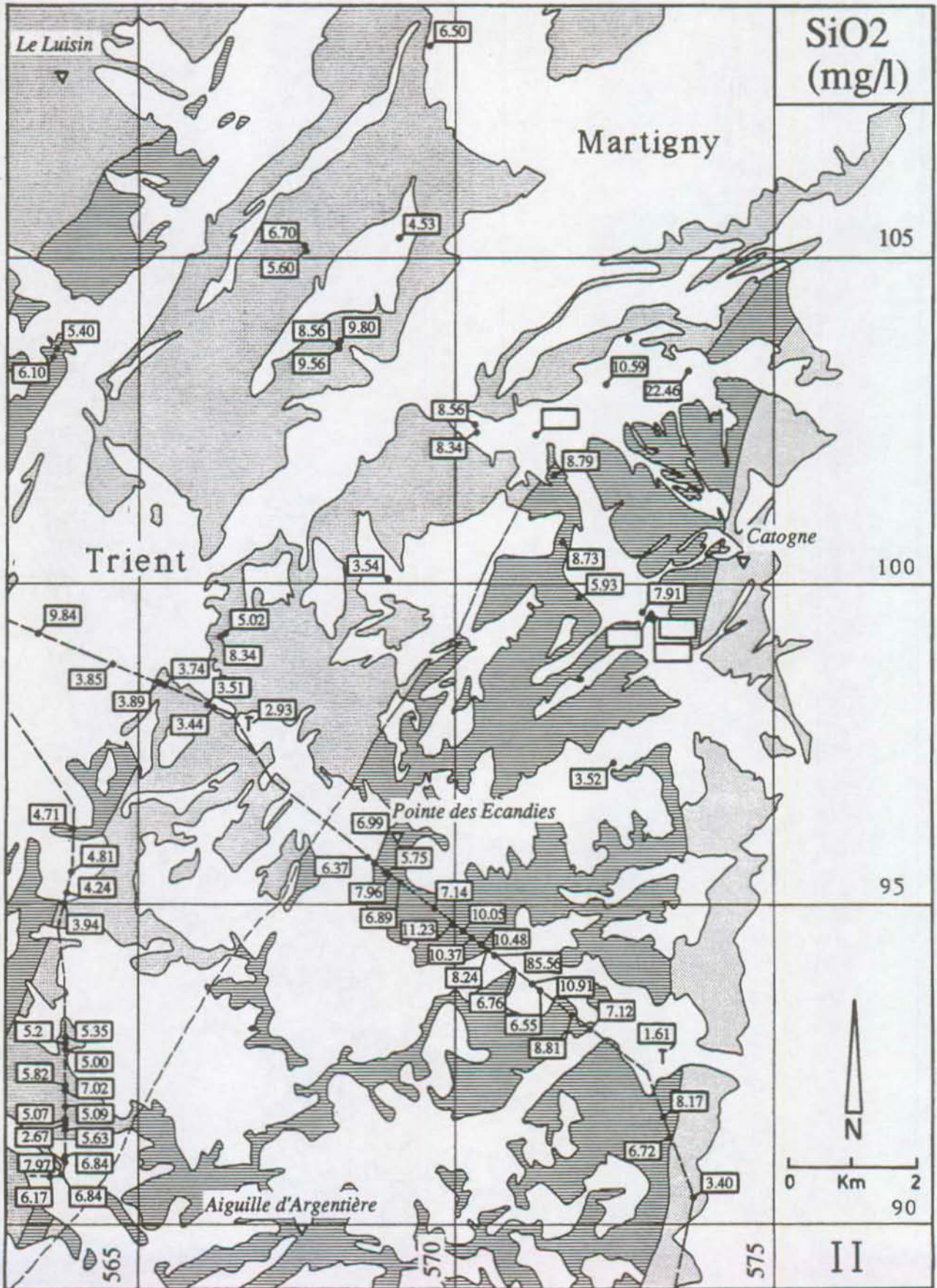


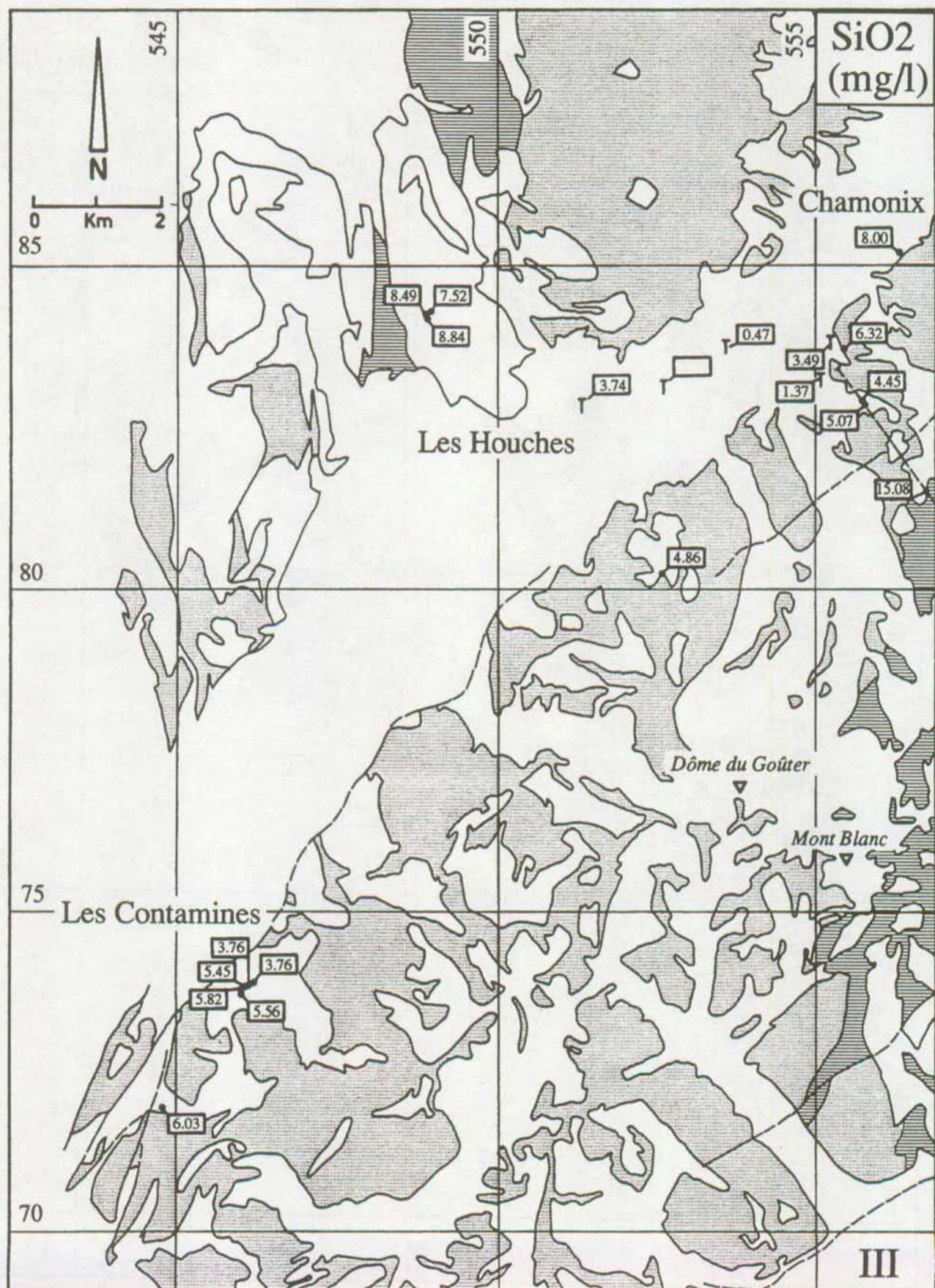


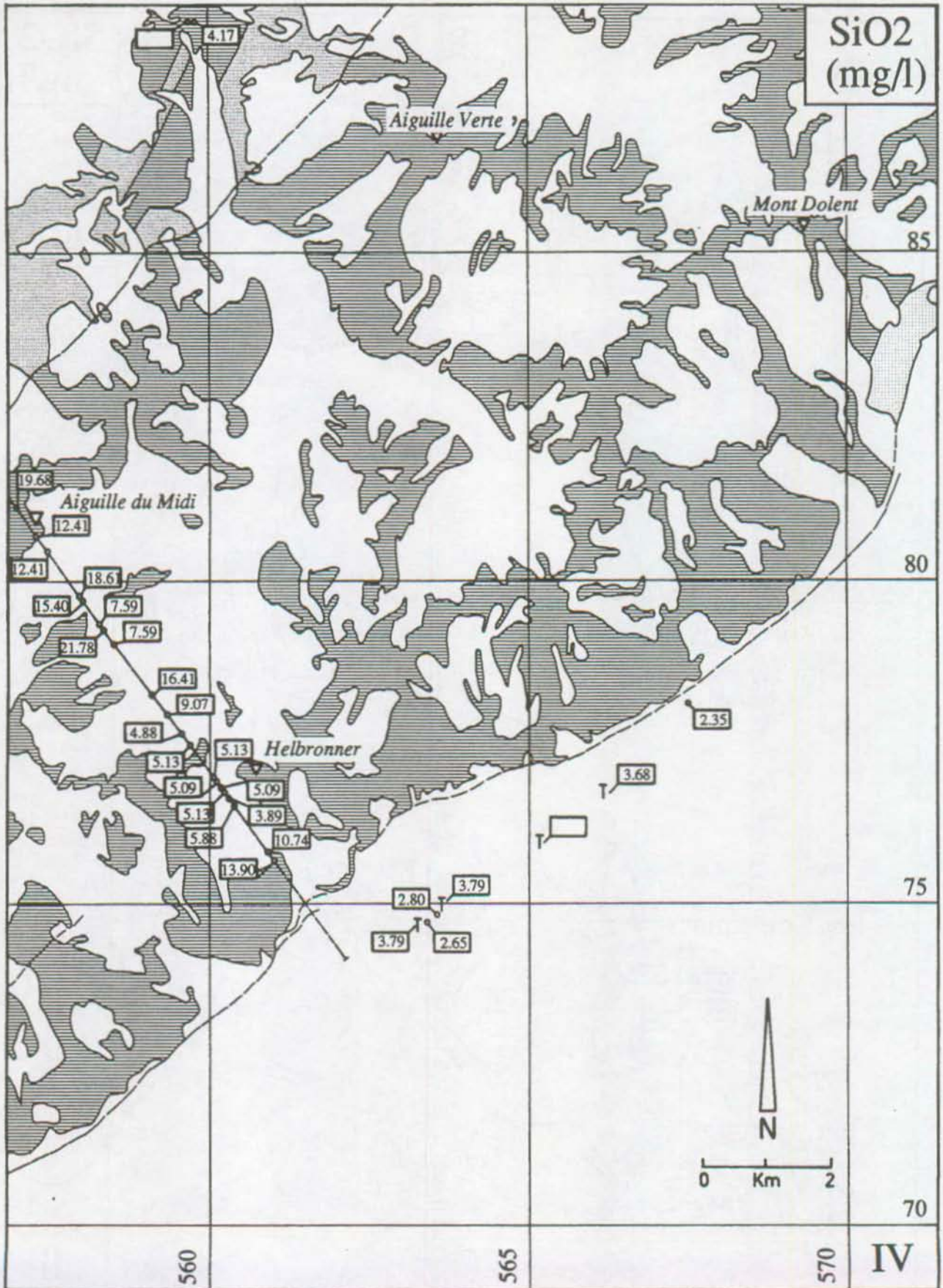


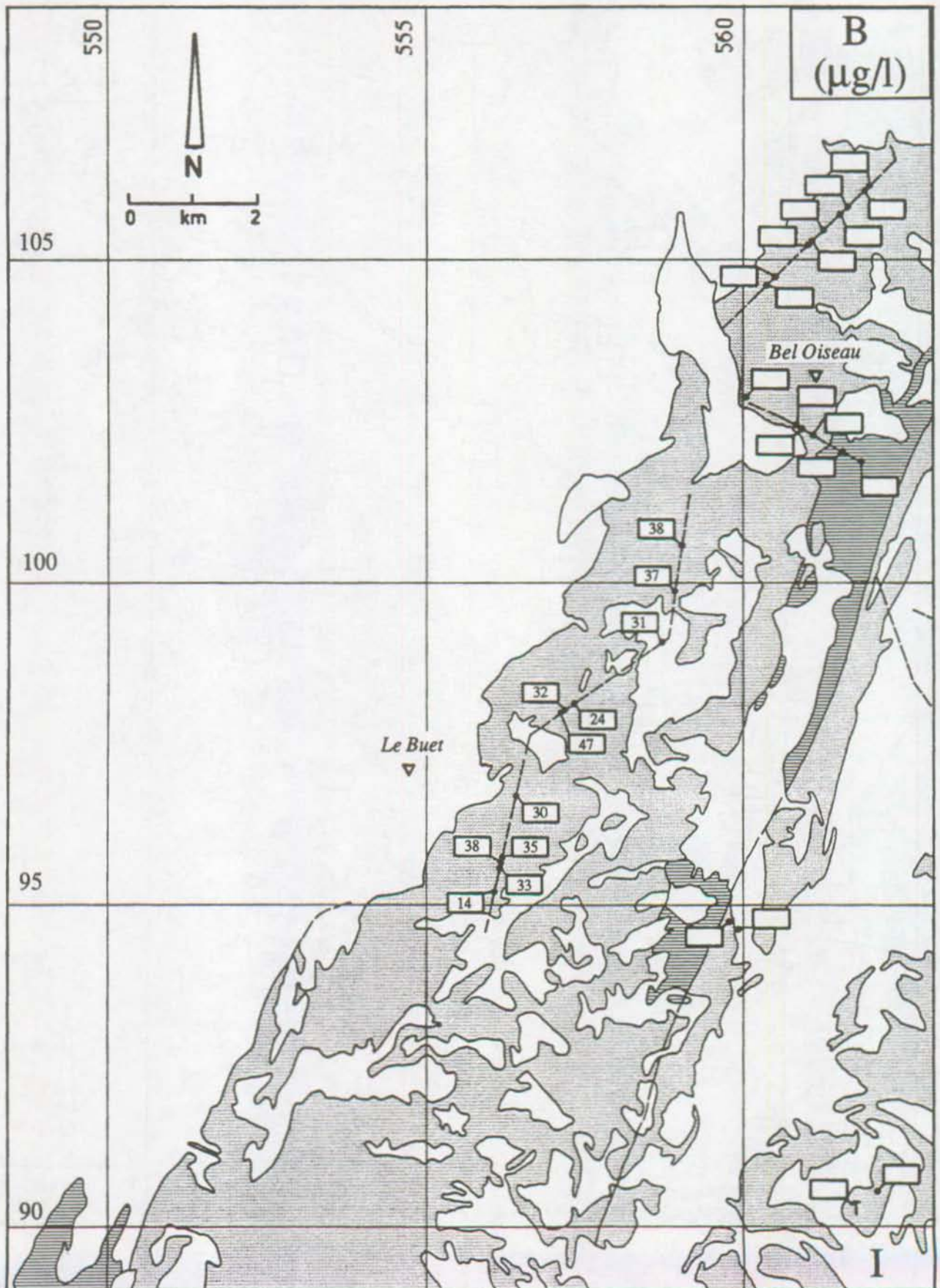


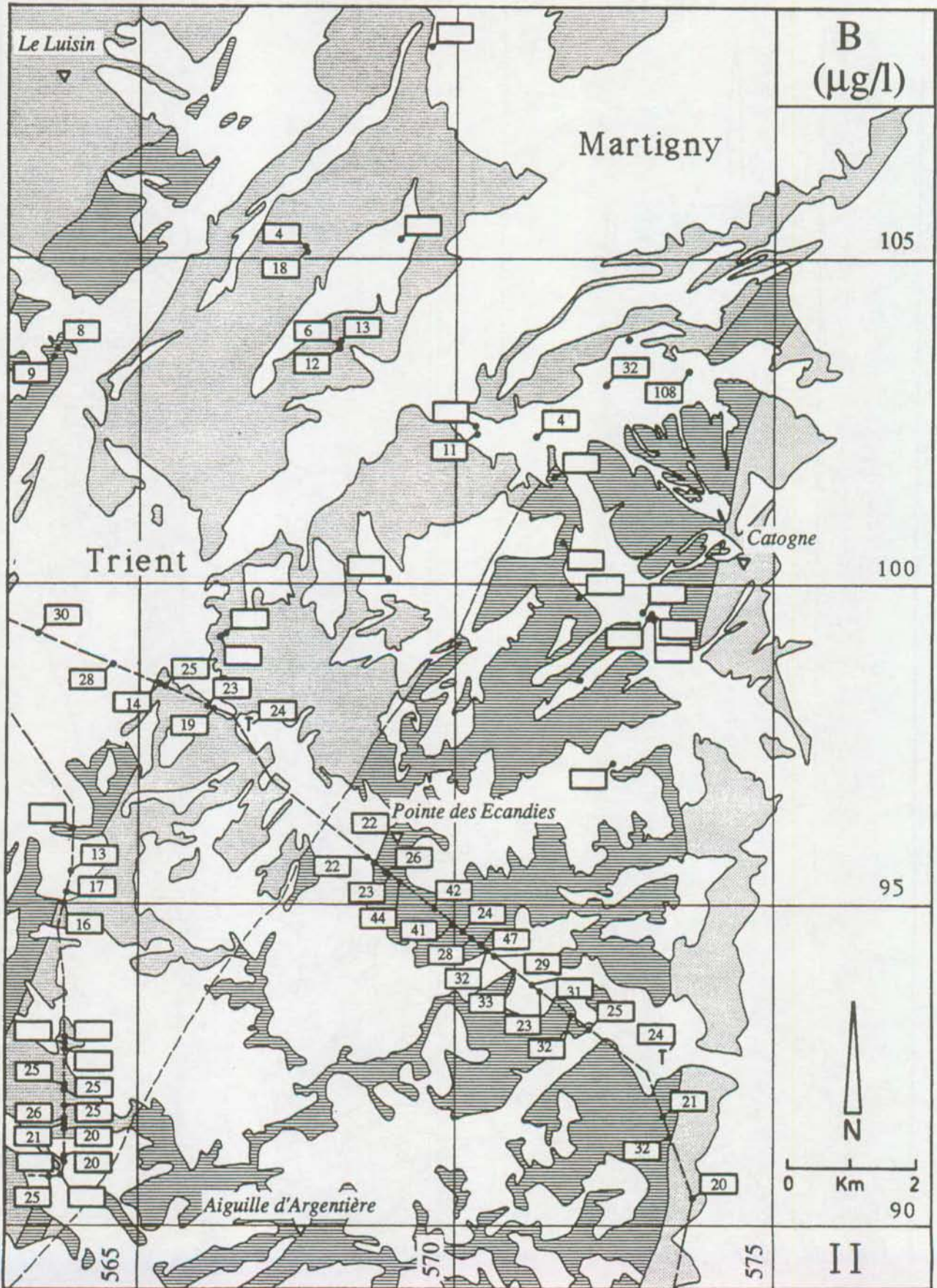


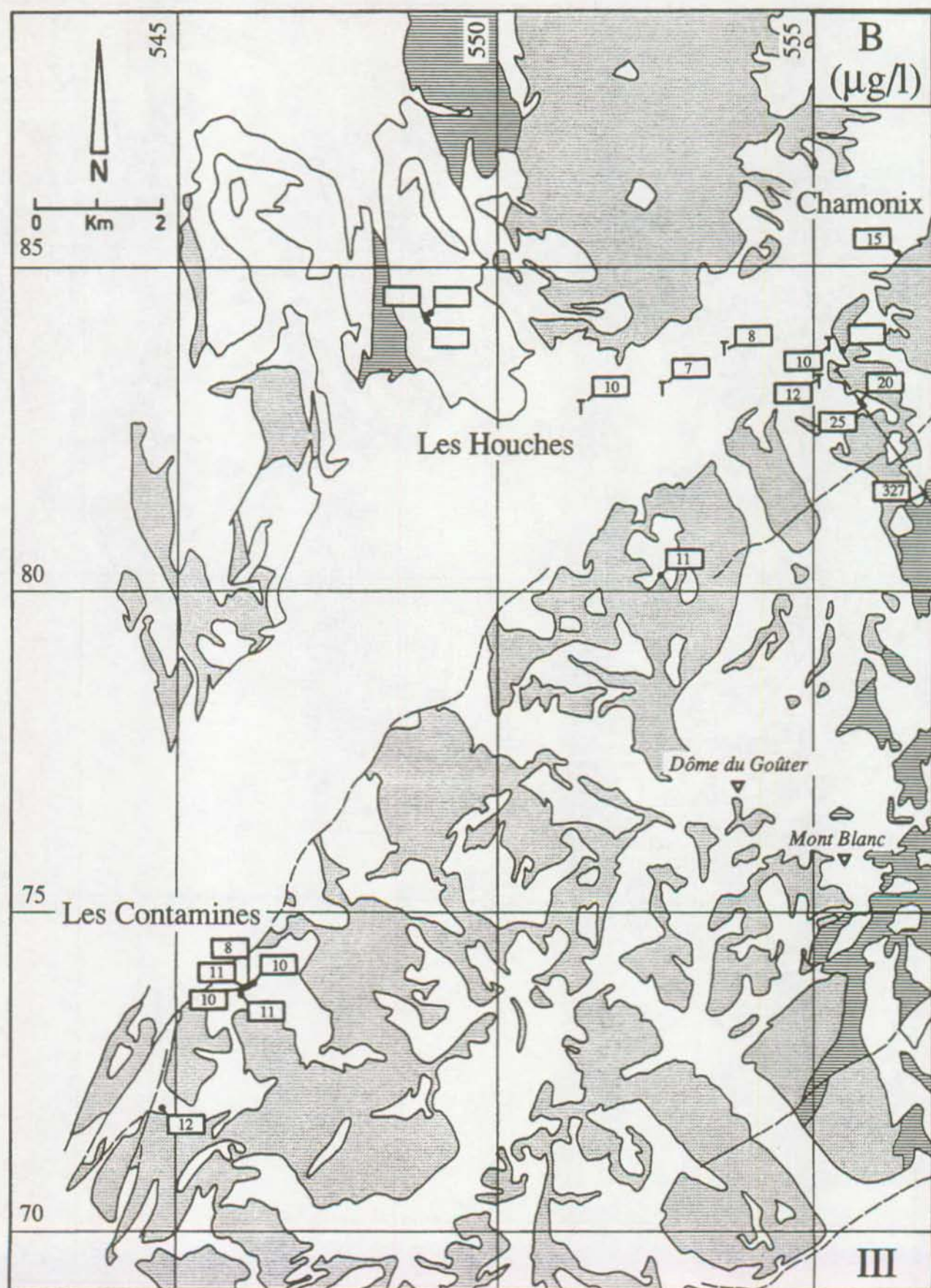


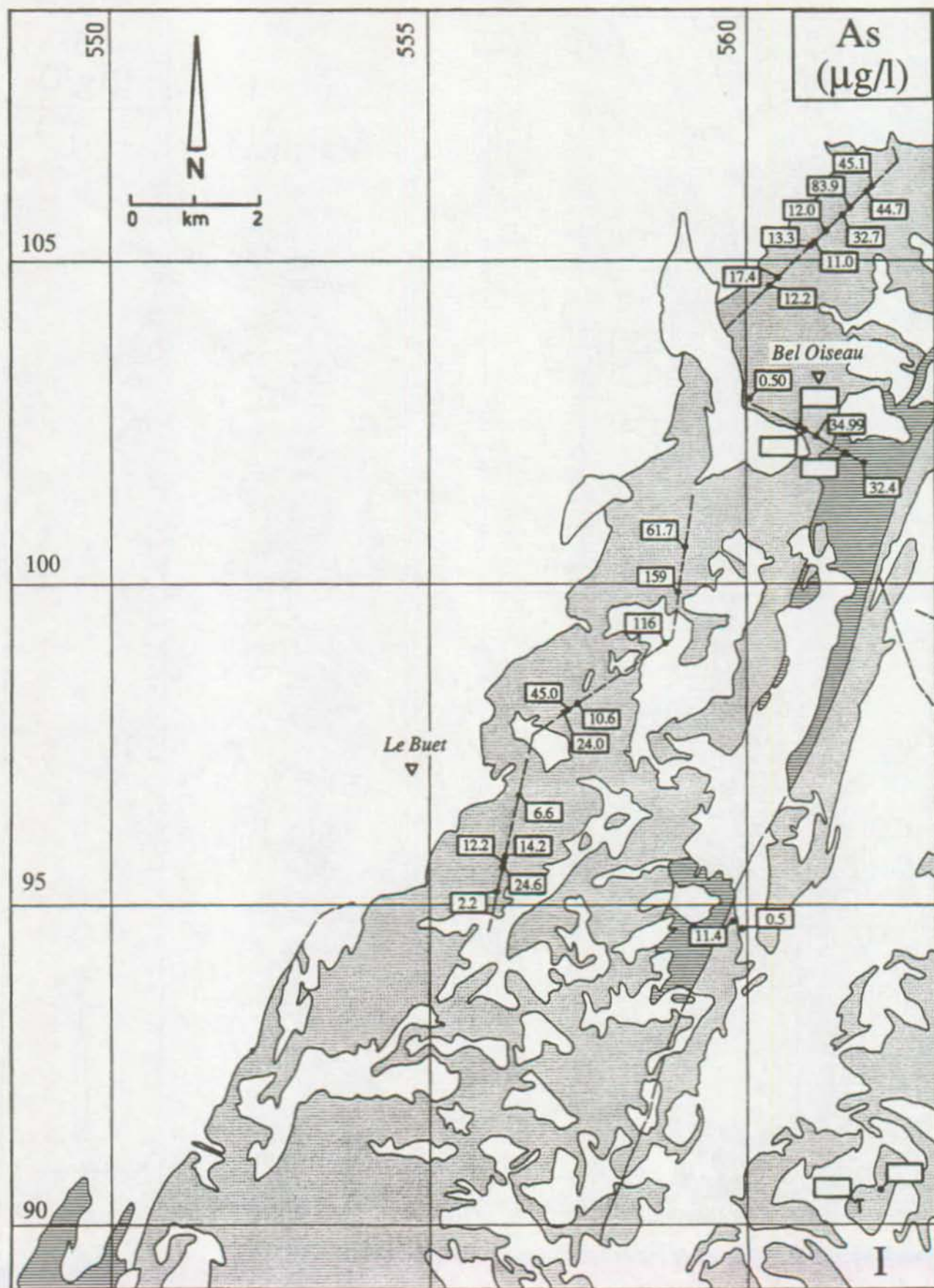


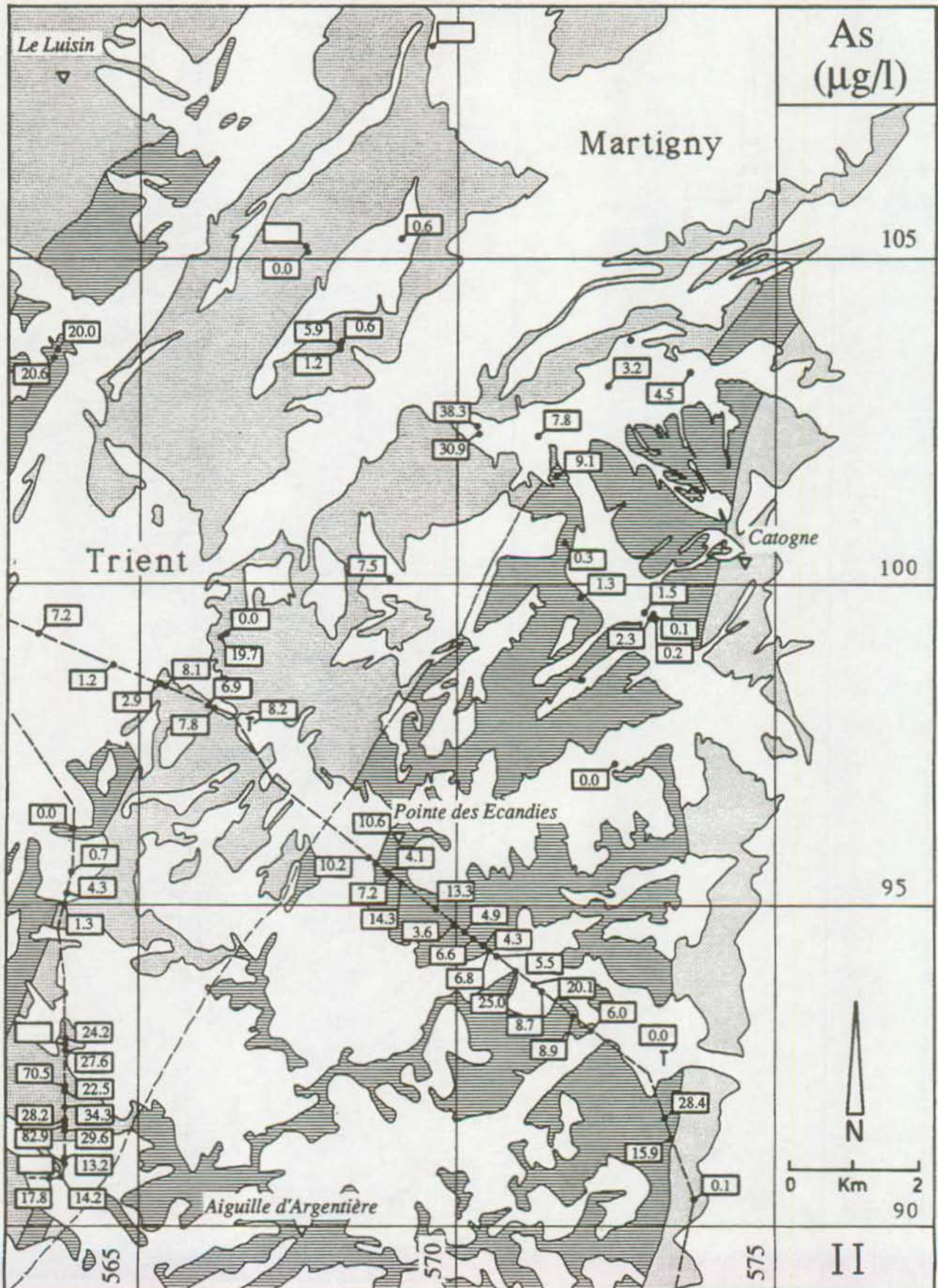


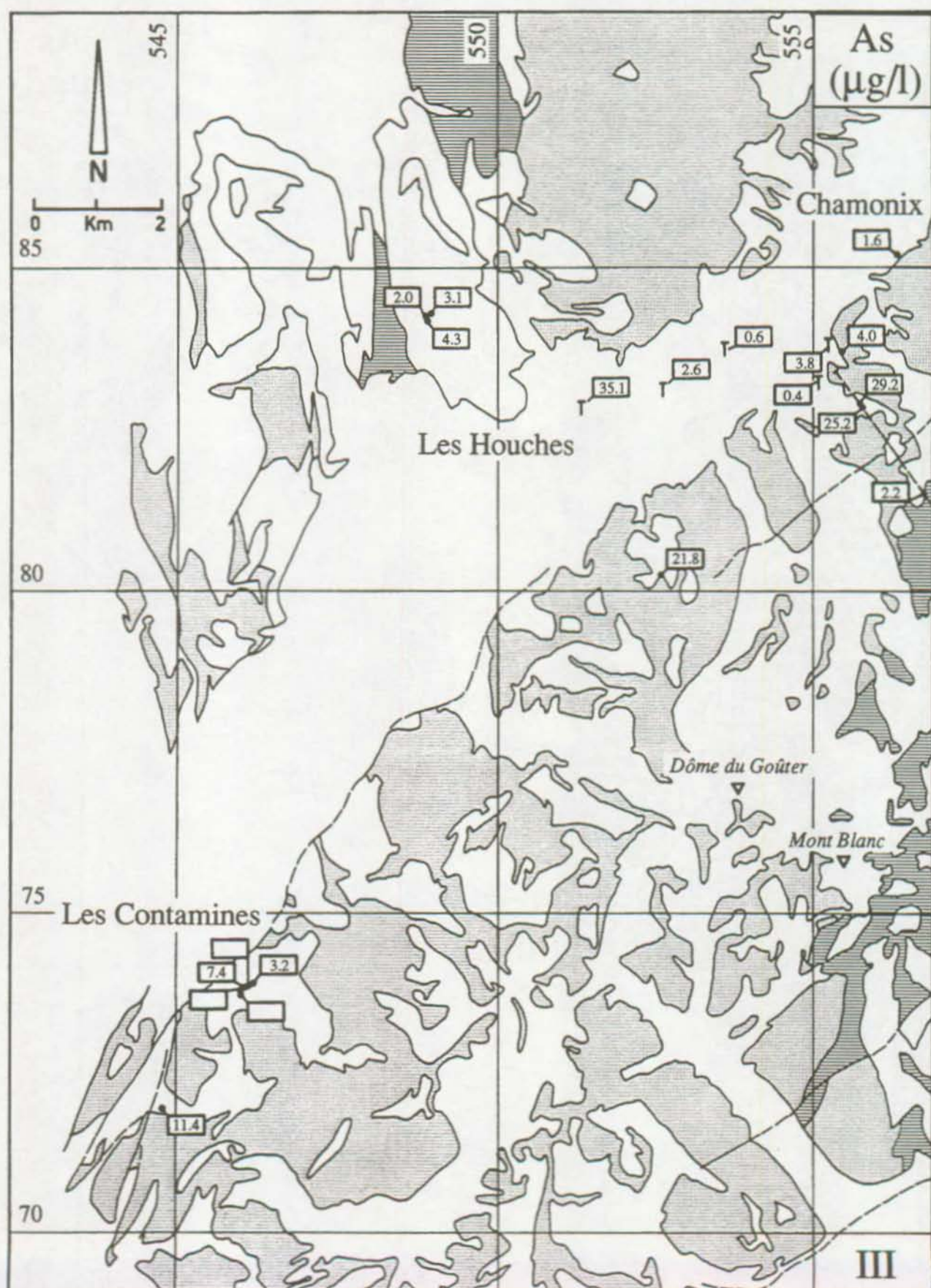


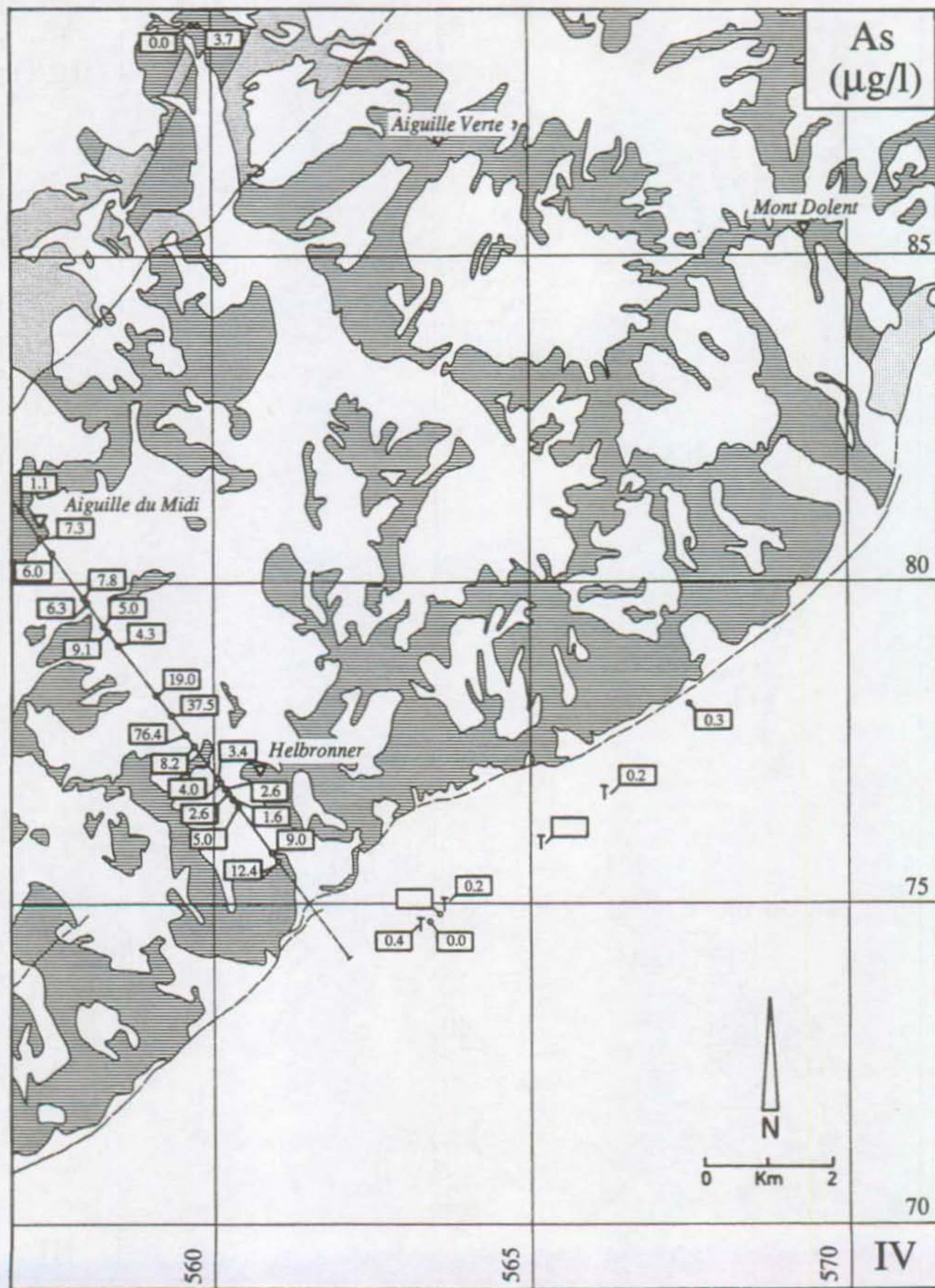


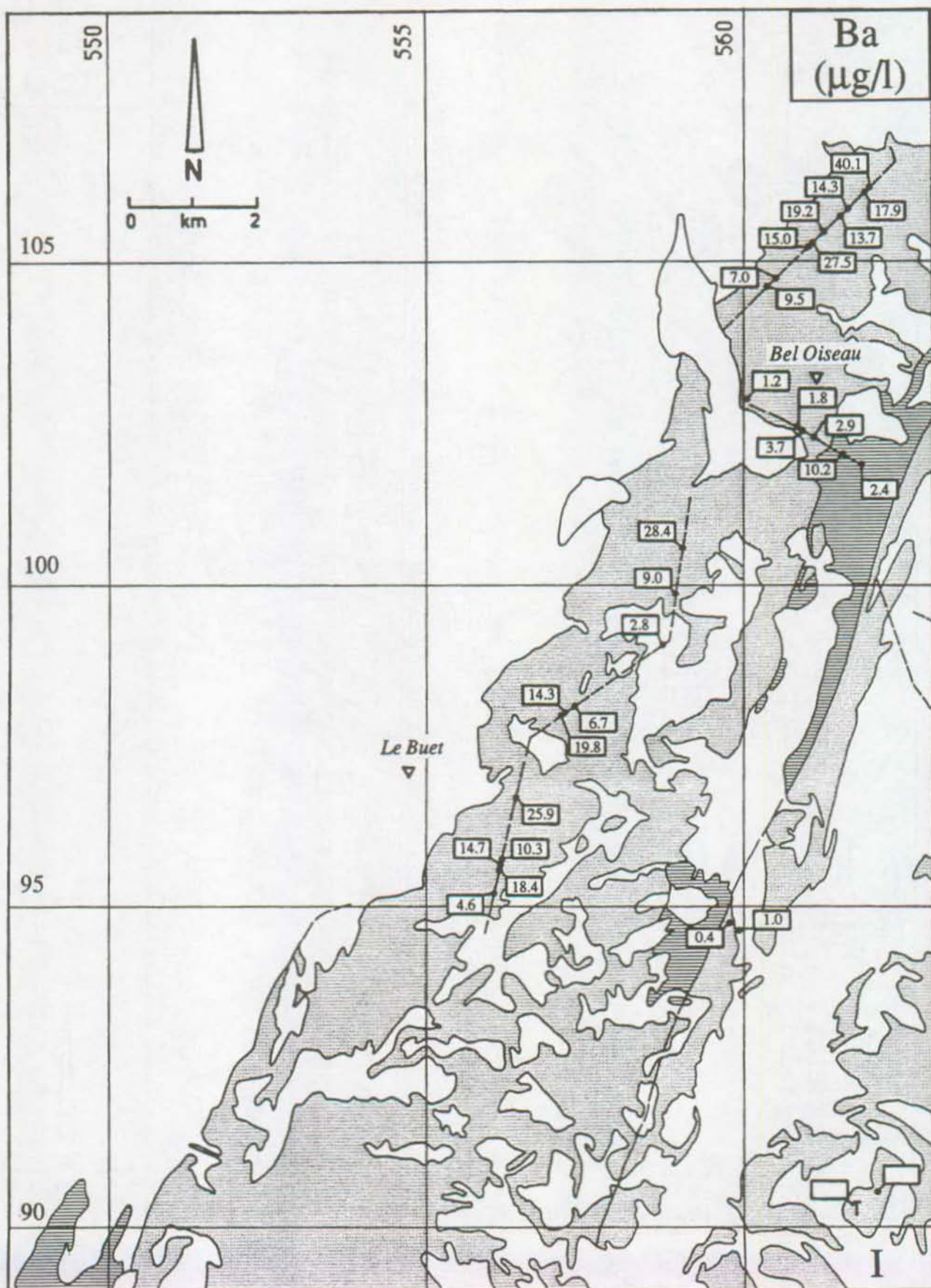


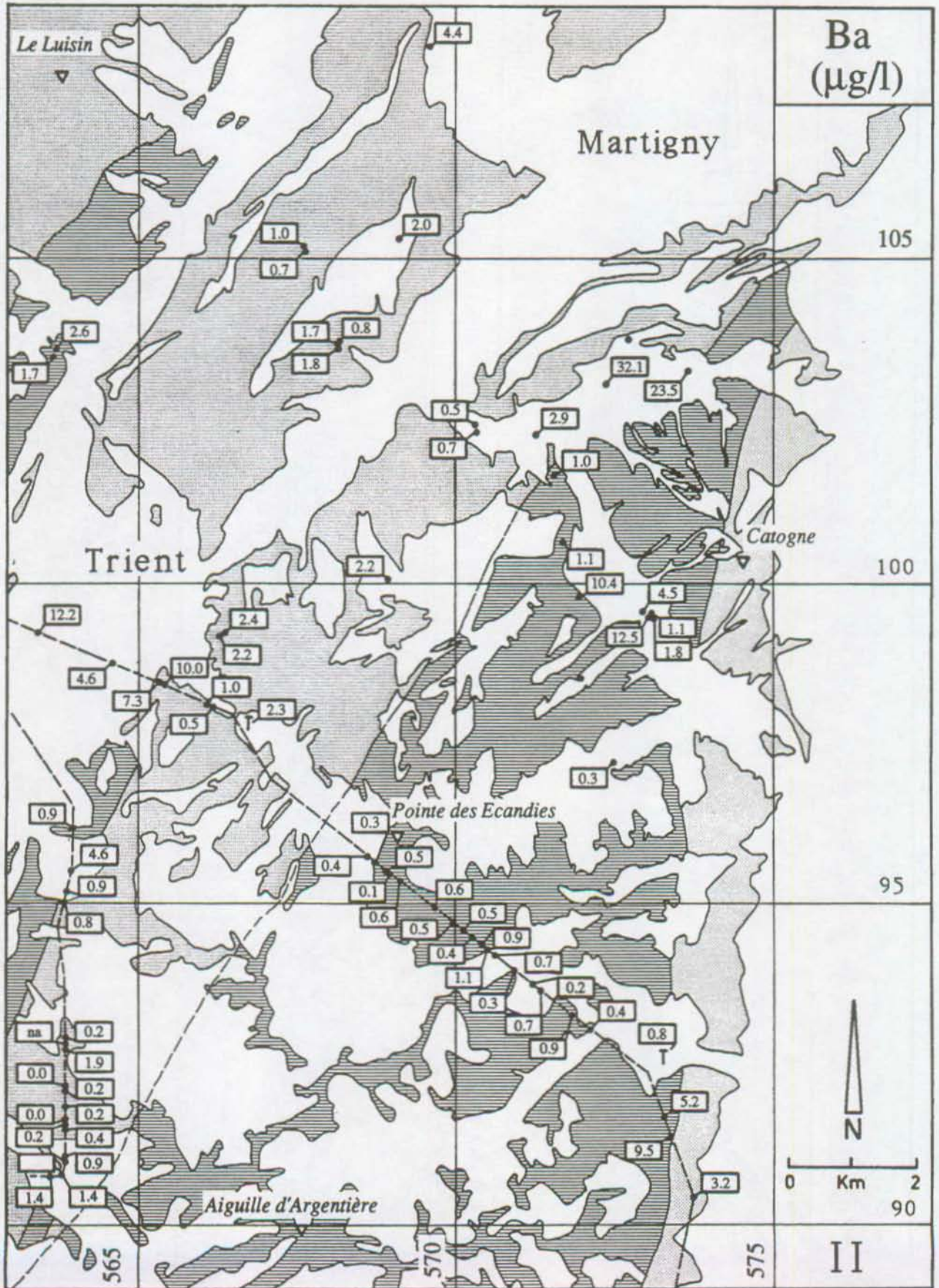


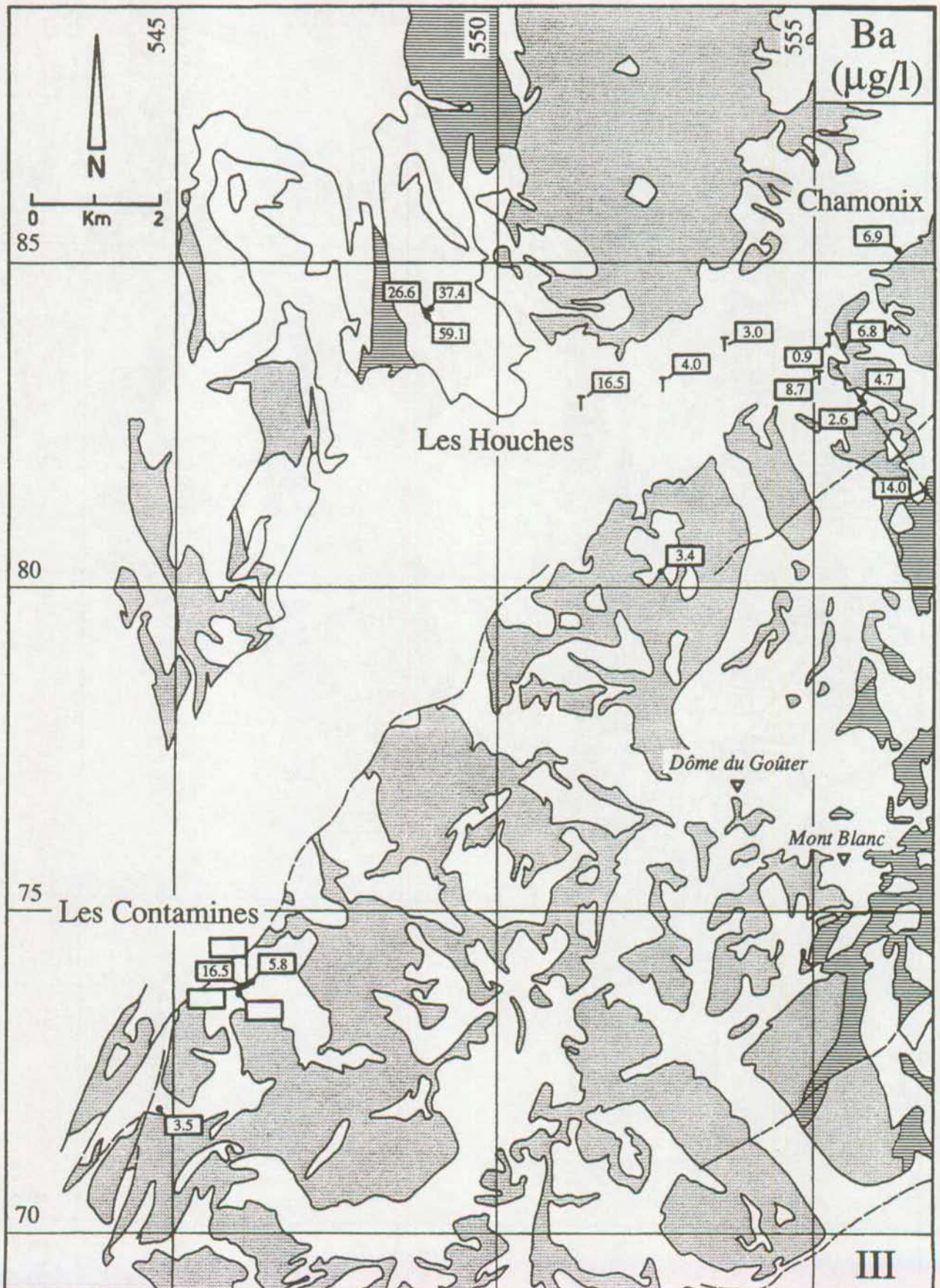


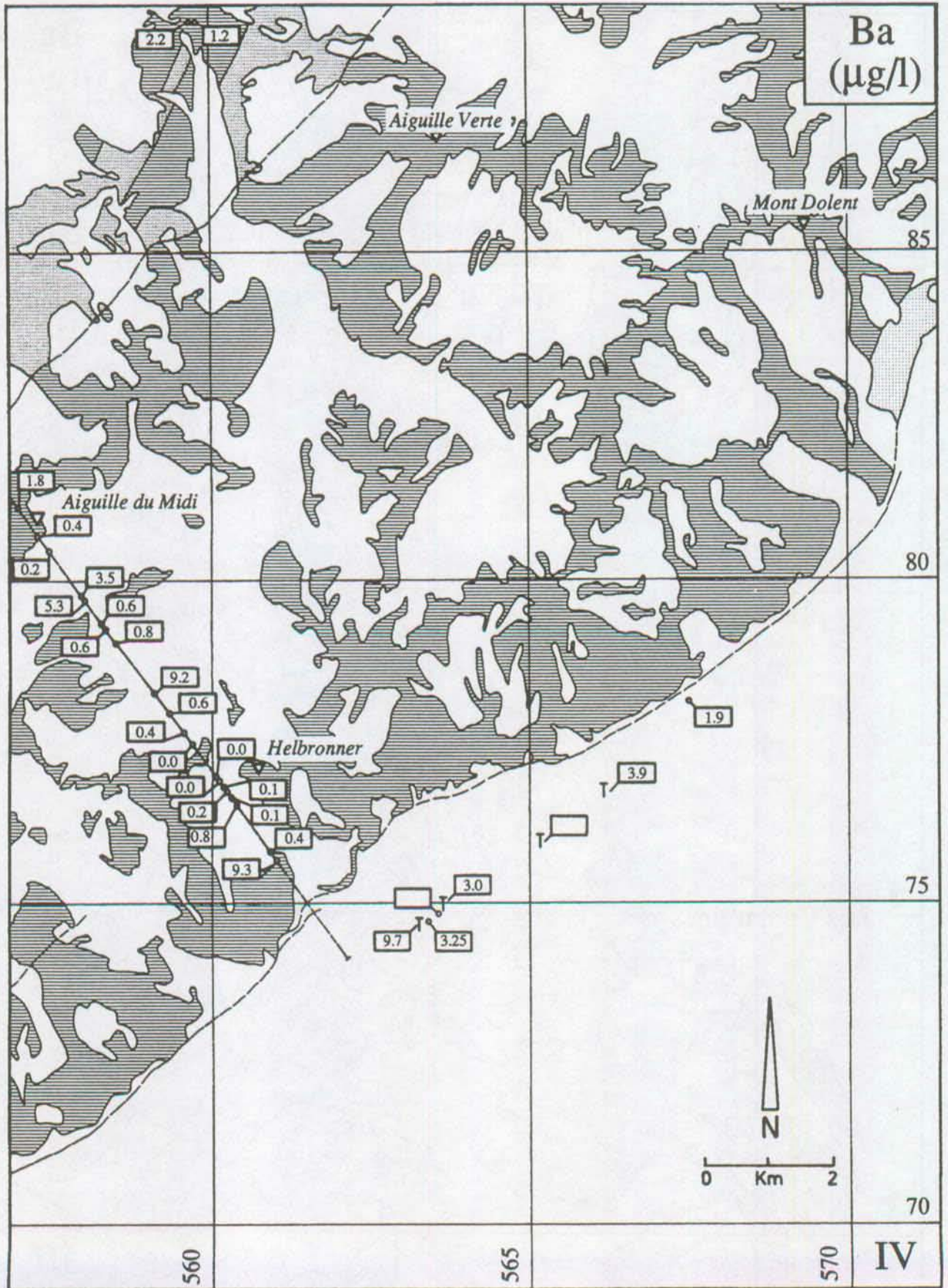


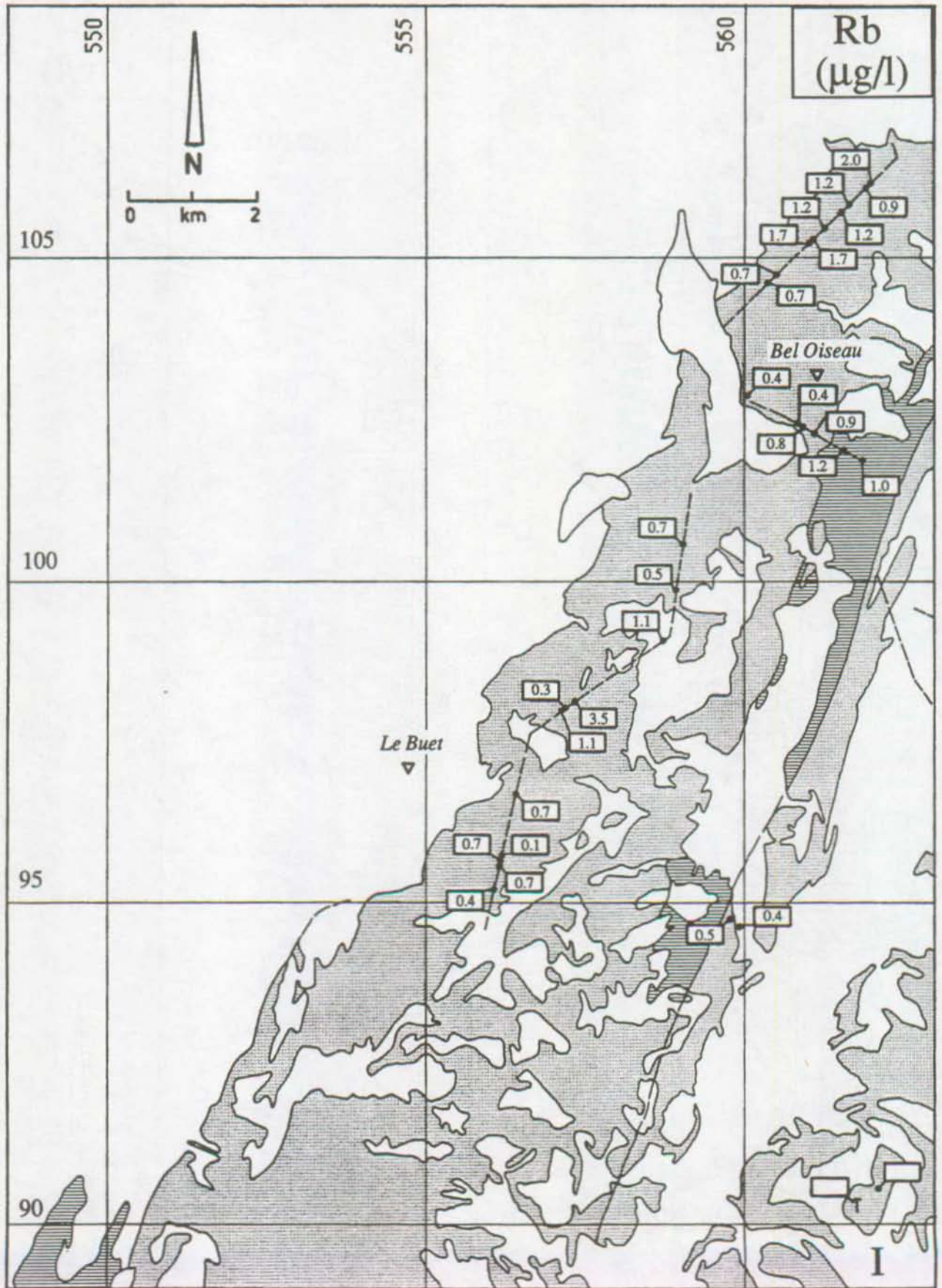


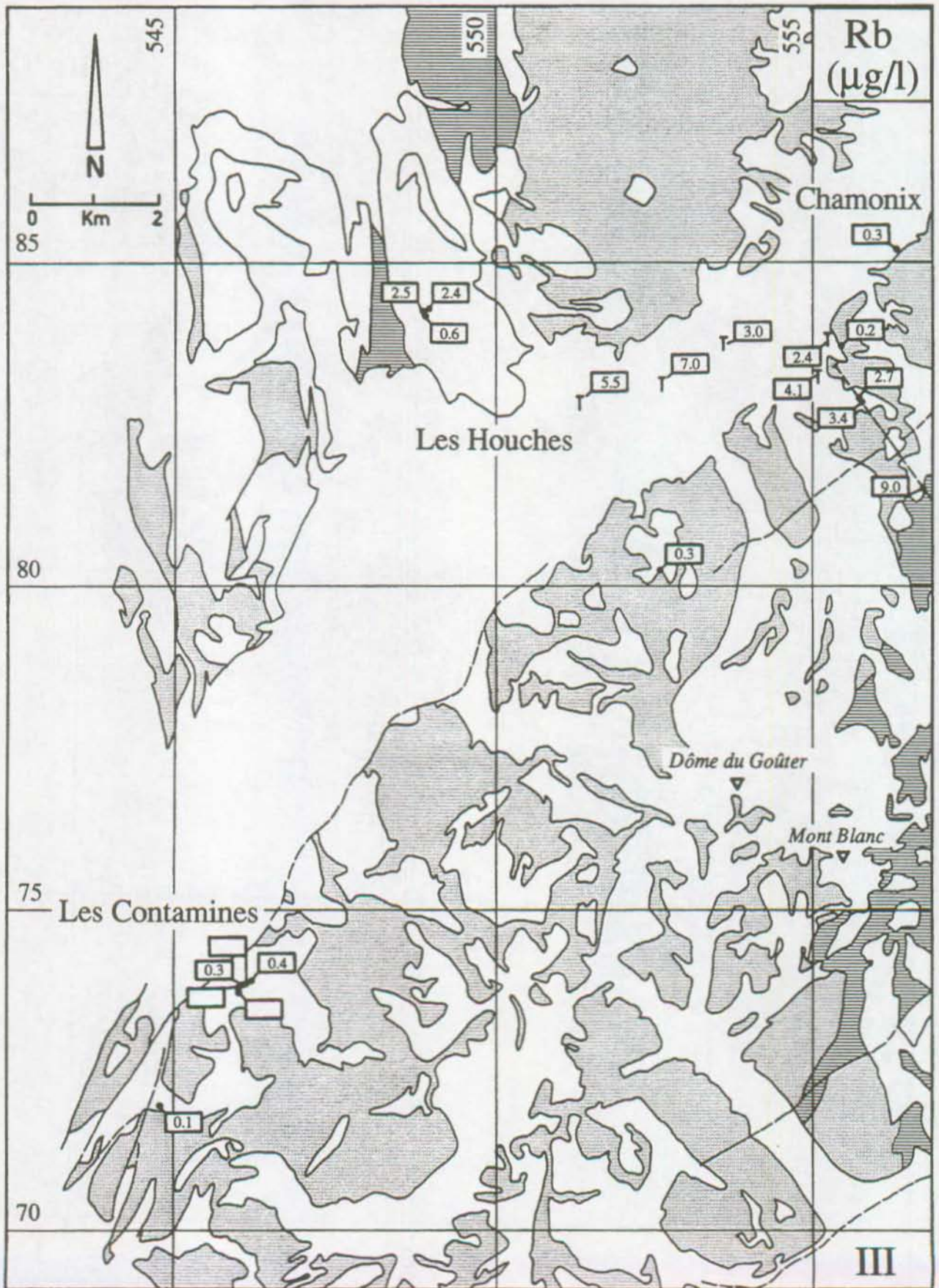


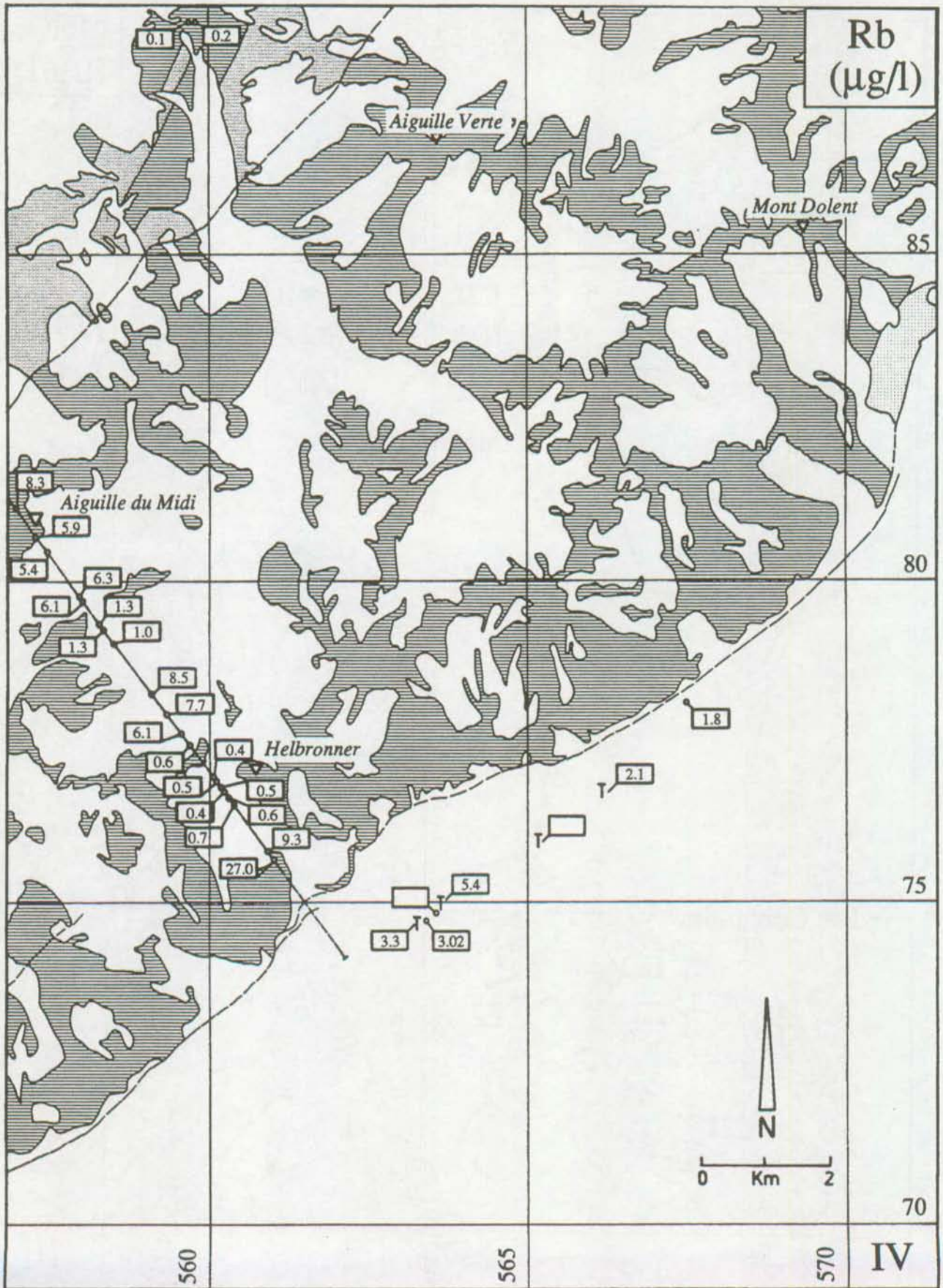


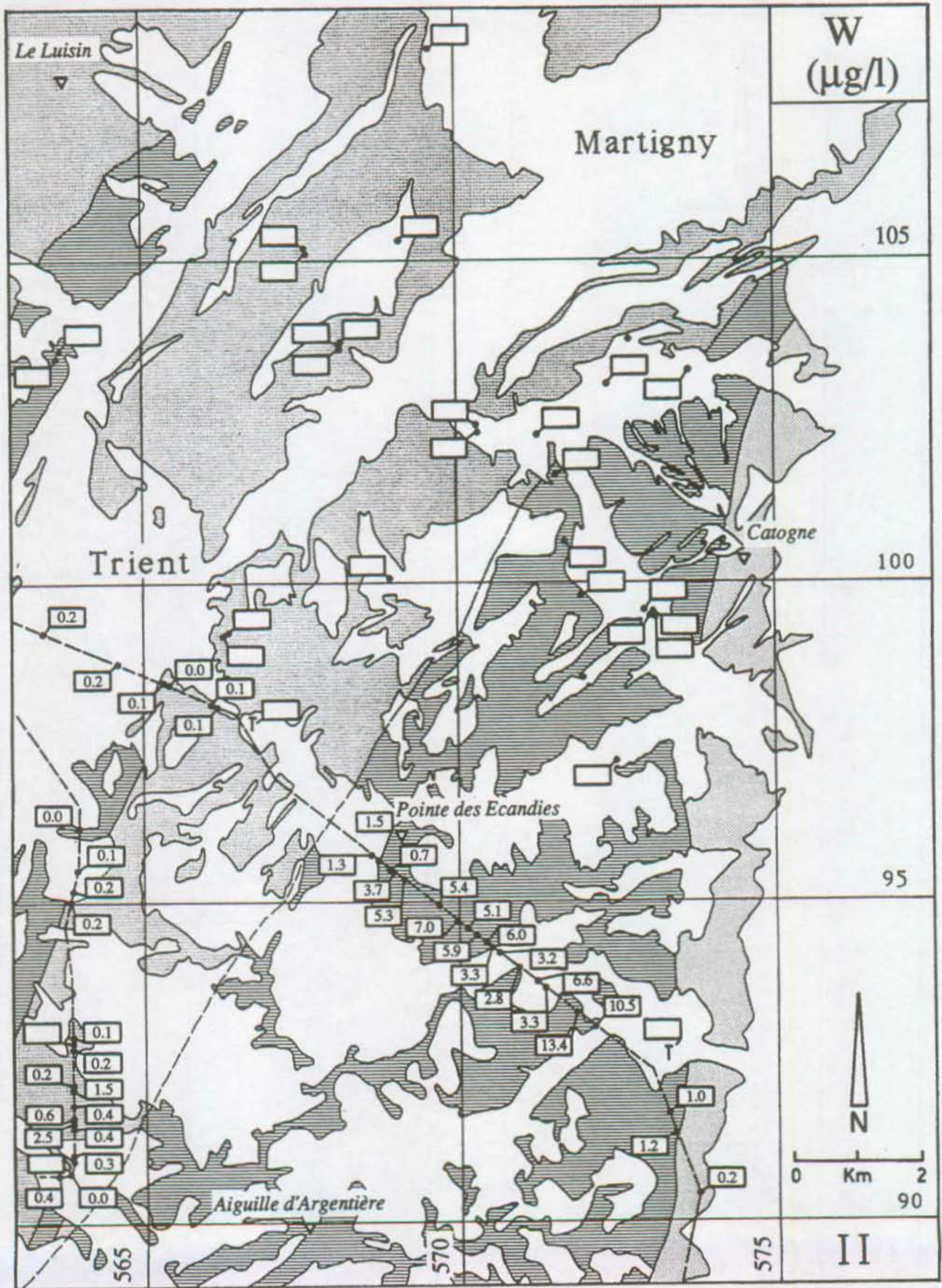


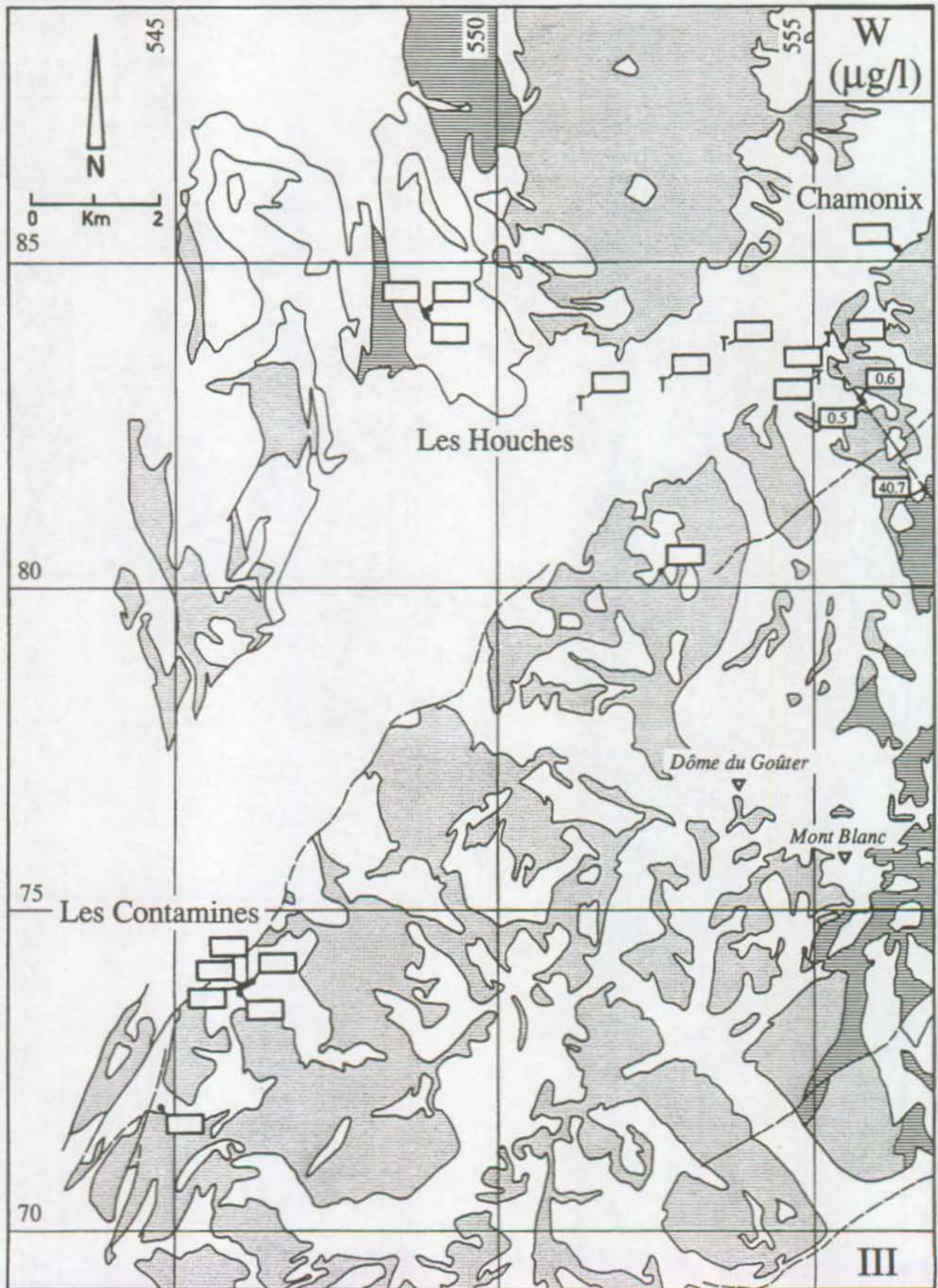


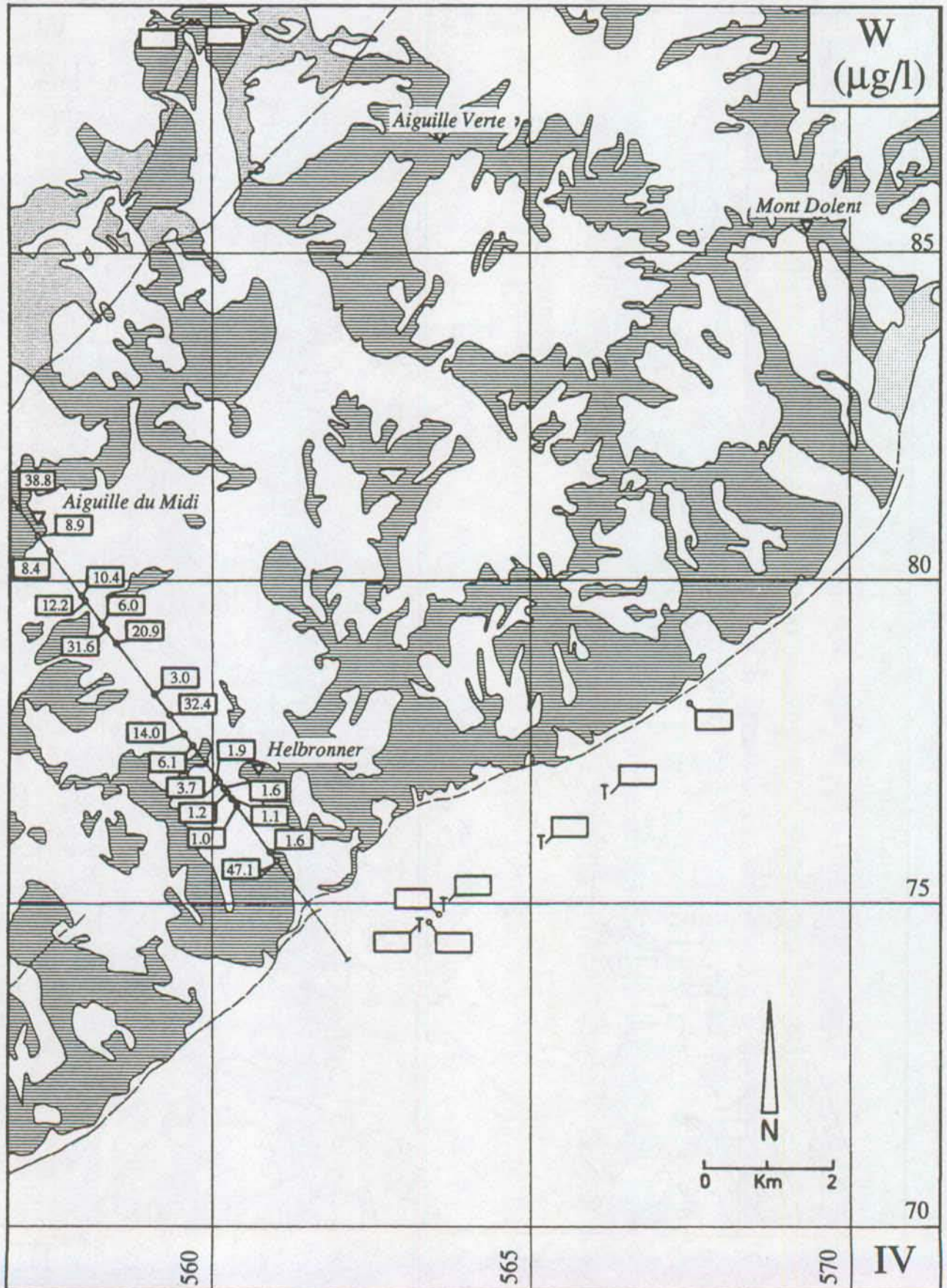


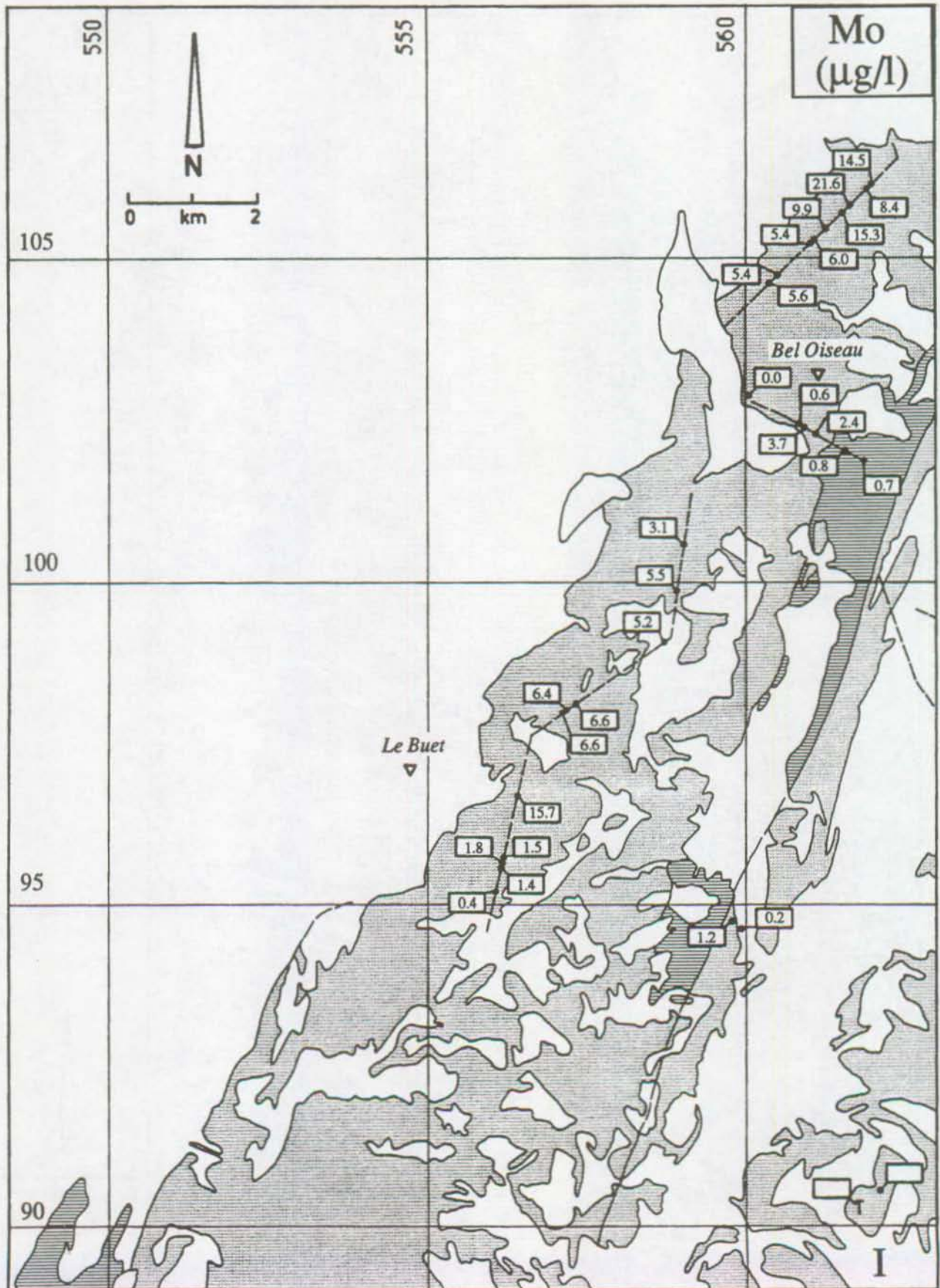


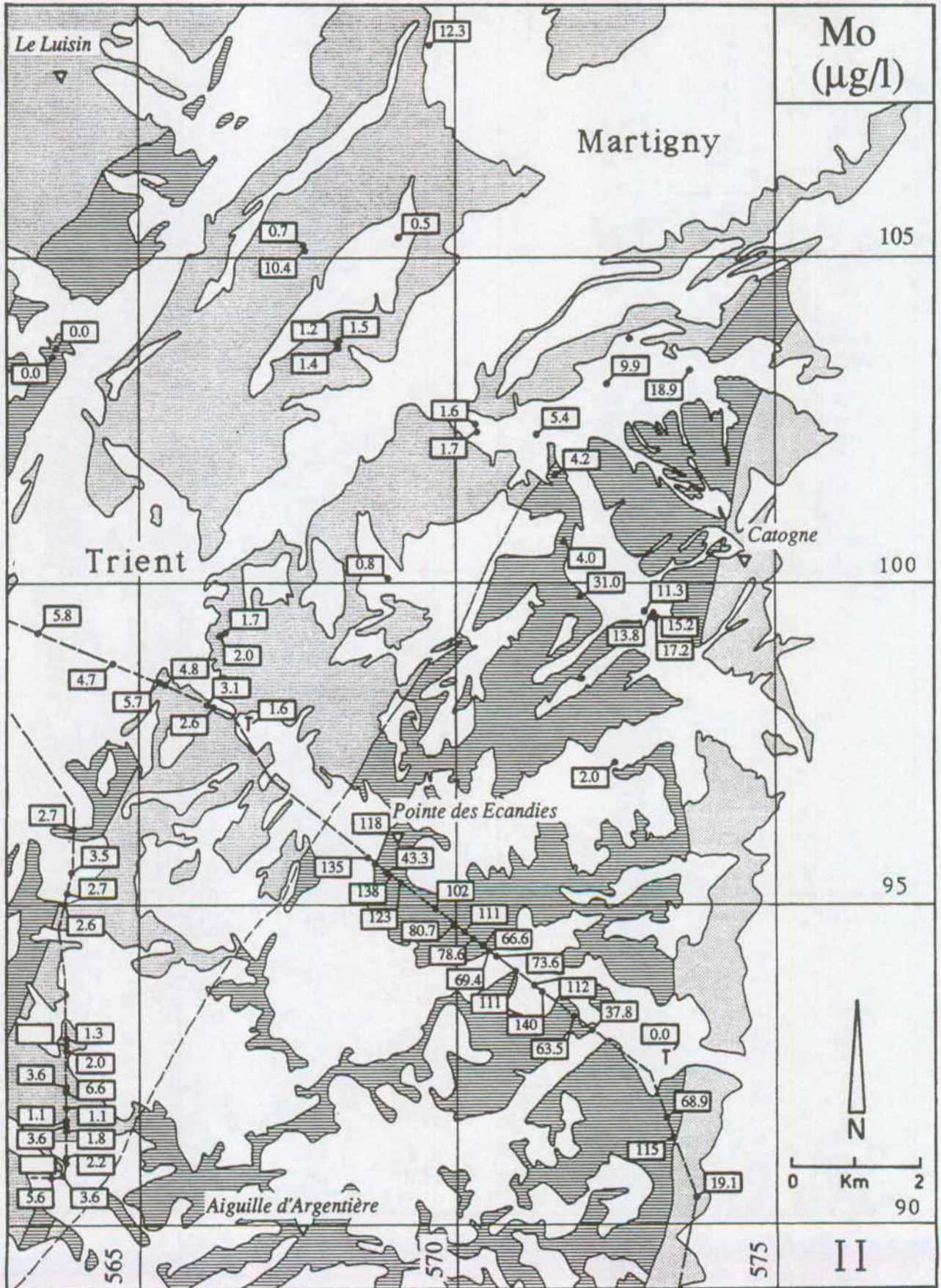


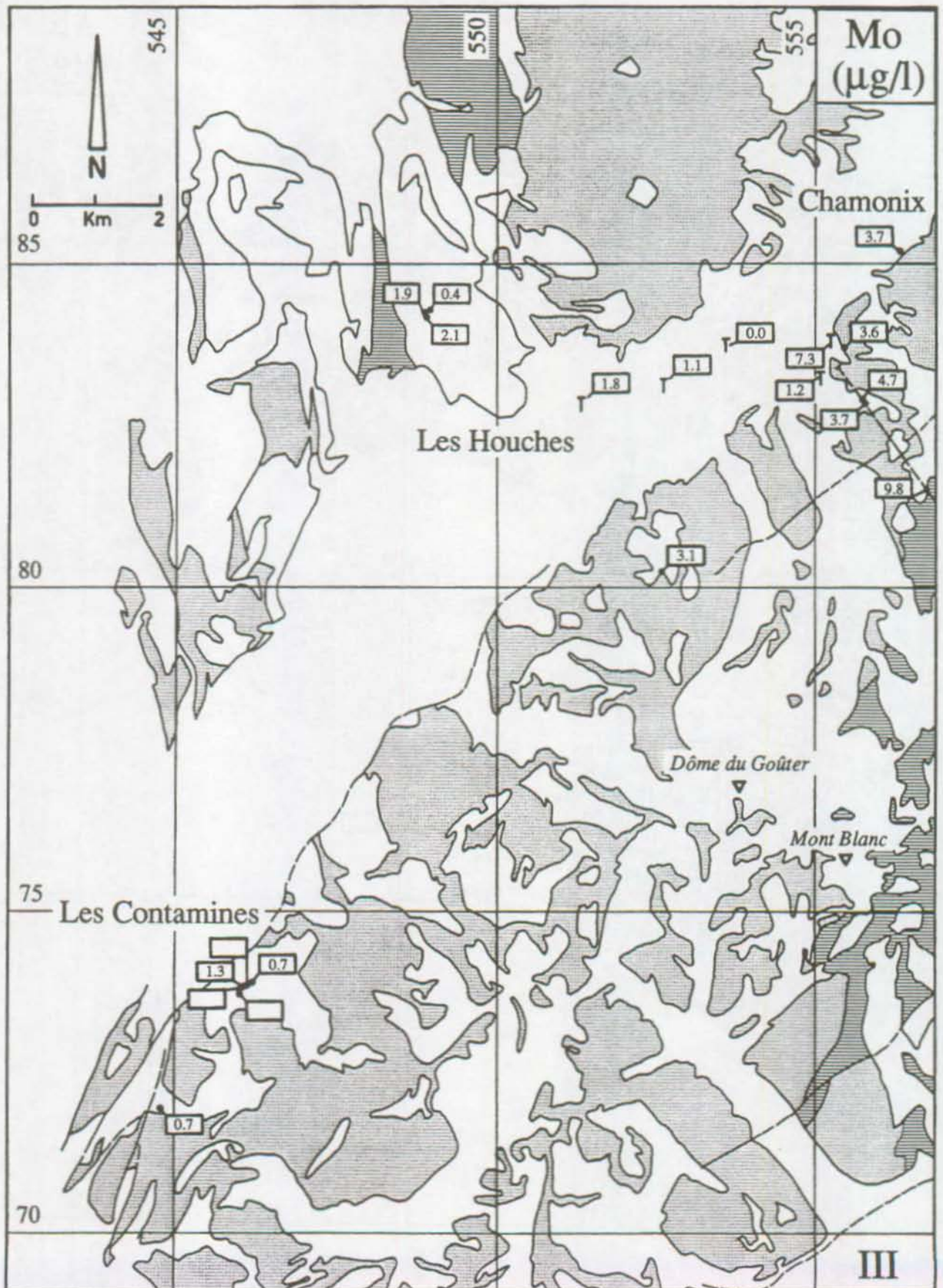


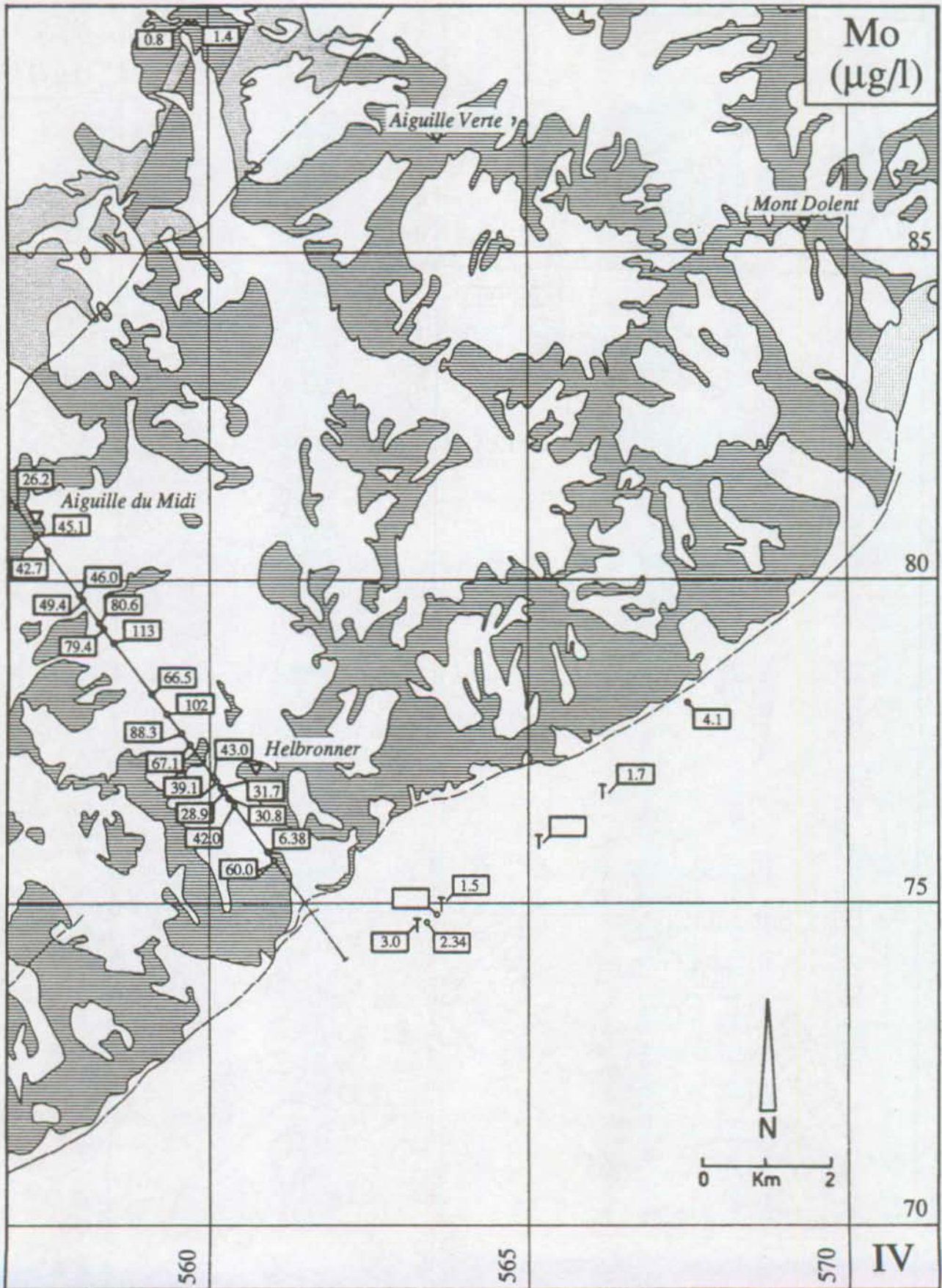


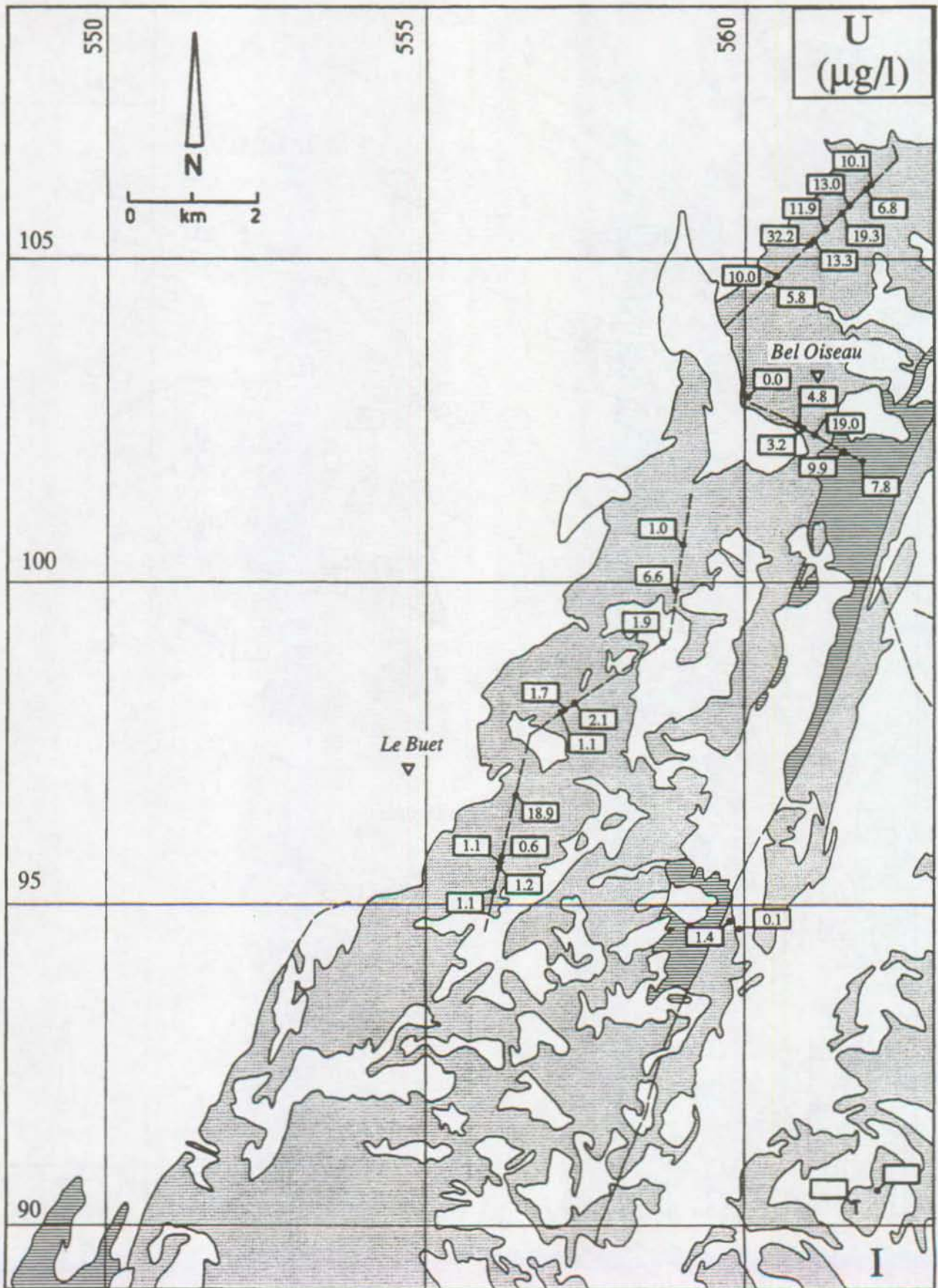


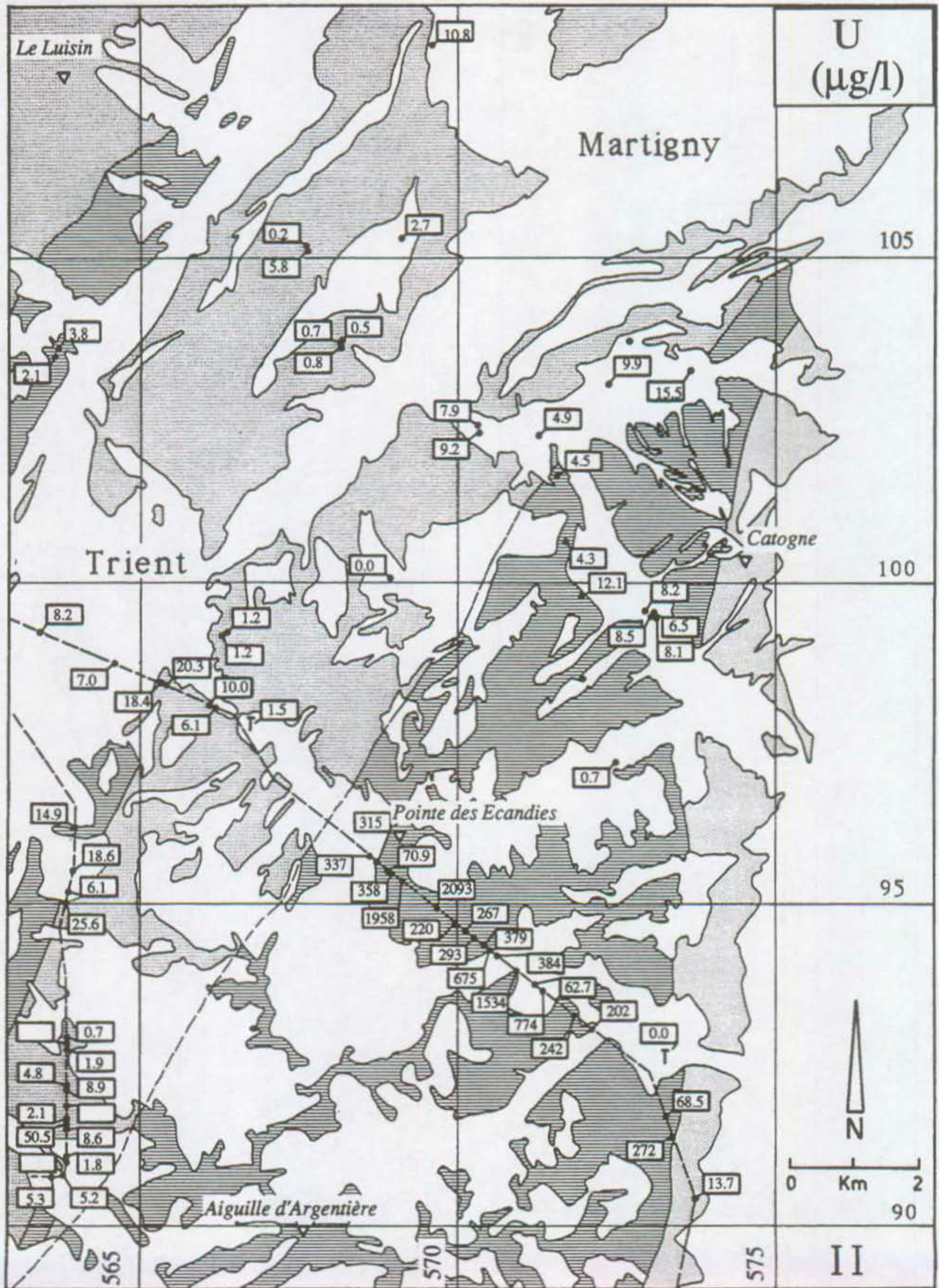


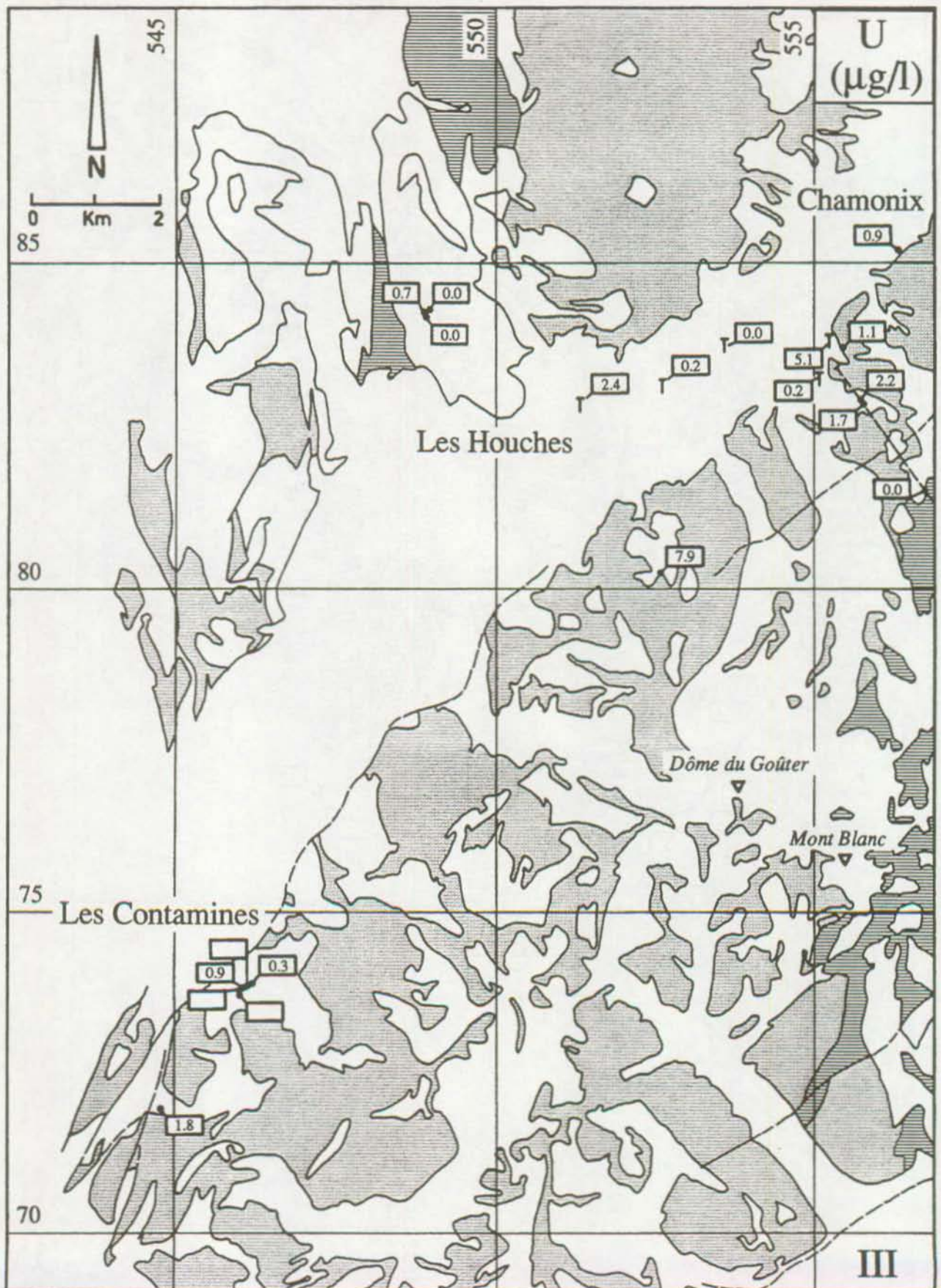














Annexe 8.1

Essais de traçage massif de Bel-Oiseau, Finhaut (massif des Aiguilles Rouges)

Traceurs	Lieu d'injection Coordonnées Y X Z:	Date	N°	Lieu de prélèvement	Coordonnées Y / X / Z	Type de prélèvement	Date d'arrivée du traceur	Temps de transit	Distance parcourue	Vitesse de transit		
5 kg Fluoroscéine	Lac d'Emosson 560.000 / 103.150 1930	18.8.87	19	Sources: Les Fontaines	563.790 / 103.650 / 1360	E + F	8.9.87	22 jours	3'840 m	175 m/j		
					20	Source "Radioactive"	563.750 / 103.600 / 1340	F	28.8-25.9.87	10 à 39 jours	3'800 m	98 à 380 m/j
					A	Captage CFF	563.800 / 103.650 / 1360	F	ND (20.12.87)			
					161	Château d'eau	561.850 / 101.850 / 1930	F	30.10-15.3.88	73 à 118 jours	2'000 m	17 à 27 m/j
					B	Fontaines (côté)	563.792 / 103.640 / 1360	F	ND (25.9.87)			
					C	Fontaines (dessus)	563.880 / 103.650 / 1365	F	ND (25.9.87)			
2 kg Naphionate	Combe Rossa 563.160 / 104.760 1920	18.8.87	19	Sources: Les Fontaines	563.790 / 103.650 / 1360	E + F	ND (20.12.87)					
					20	Source "Radioactive"	563.750 / 103.600 / 1340	F	ND (20.12.87)			
					A	Captage CFF	563.800 / 103.650 / 1360	F	ND (20.12.87)			
					161	Château d'eau	561.850 / 101.850 / 1930	F	ND (20.12.87)			
					B	Fontaines (côté)	563.792 / 103.640 / 1360	F	ND (20.12.87)			
					C	Besson	563.500 / 103.550 / 1440	F	ND (20.12.87)			
2 kg Duasyné	Col de Fenestral 562.050 / 104.750 2230	18.8.87	19	Sources: Les Fontaines	563.790 / 103.650 / 1360	E + F	ND (20.12.87)					
					20	Source "Radioactive"	563.750 / 103.600 / 1340	F	ND (20.12.87)			
					A	Captage CFF	563.800 / 103.650 / 1360	F	ND (20.12.87)			
					161	Château d'eau	561.850 / 101.850 / 1930	F	ND (20.12.87)			
					B	Fontaines (côté)	563.792 / 103.640 / 1360	F	ND (20.12.87)			
					C	Besson	563.500 / 103.550 / 1440	F	ND (20.12.87)			
			19	Sources: Les Fontaines	563.790 / 103.650 / 1360	E + F	ND (20.12.87)					
					20	Source "Radioactive"	563.750 / 103.600 / 1340	F	ND (20.12.87)			
					A	Captage CFF	563.800 / 103.650 / 1360	F	ND (20.12.87)			
					161	Château d'eau	561.850 / 101.850 / 1930	F	ND (20.12.87)			
					B	Fontaines (côté)	563.792 / 103.640 / 1360	F	ND (20.12.87)			
					C	Besson	563.500 / 103.550 / 1440	F	ND (20.12.87)			

ND = non détecté au terme (19.8.88)

F = prélèvement de fluocapteurs (charbon actif)

E = prélèvement d'échantillons d'eau

Annexe 8.2

Essai de traçage, massif de Bovine (massif du Mont-Blanc)

Traceur	Injection: lieu	date	N°	Prélèvement			Date arrivée du traceur	Temps de transit	Distance parcourue	Vitesse de transit
				lieu	coordonnées	type				
10 kg fluorescéine	lac de Bovine Coordonnées: 568.600 / 099.150 / 2436	24.9.86	1	Sources: Brocard inf.	570.030 / 102.490 / 570	E + F	ND (17.9.88)	≤ 69 jours ≤ 324 jours ≤ 324 jours	3'150 m 1'550 m 1'050 m	≥ 45,6 m/j ≥ 4,8 m/j ≥ 3,2 m/j
			2	Brocard sup.	570.410 / 102.370 / 620	F	ND (17.9.88)			
			6	Bonnette	571.600 / 101.700 / 920	F	ND (12.9.88)			
			A	Bonnes Fontaines	571.580 / 101.500 / 1000	F	ND (12.9.88)			
			3	Borgeau	571.425 / 102.280 / 770	F	ND (17.9.88)			
			7	Chamois	571.600 / 100.500 / 1100	F	ND (12.9.88)			
			25	Cheneau inf.	566.125 / 099.296 / 1547	F	ND (21.8.87)			
			B	Les Fontaines	568.100 / 103.050 / 780	F	D			
			C	Les Fraites	567.950 / 101.950 / 1010	F	24.9 - 2.12.86			
			D	La Gîète (marais)	568.500 / 100.600 / 1850	F	24.9 - 14.7.87			
			14	La Gîète (sources)	568.850 / 100.045 / 2040	F	24.9 - 14.7.87			
			E	Goudran (réservoir)	572.570 / 100.070 / 1210	F	ND (3.6.87)			
			10	Mariotti (réservoir)	572.900 / 099.600 / 1315	F	ND (3.6.87)			
			F	Meylan	567.050 / 101.500 / 1260	F	ND (3.6.87)			
8	Plan de l'Au	572.050 / 099.950 / 1340	F	ND (3.6.87)						
1 kg pyranine	Cône d'éjection du Tiersclin 570.600 / 102.100 / 800	25.9.86	G	Torrents: Le Borgeau	571.000 / 102.000 / 760	F	24.11 - 14.8.87	30 à 324 jours	?	?
			H	Le Durmand de la Jure	571.420 / 100.300 / 1240	F	Réf positive			
			I	La Drance	570.180 / 102.750 / 540	F	ND (19.8.88)			
			J	Les Faces	567.500 / 101.500 / 1260	F	ND (19.8.88)			
			K	Le Fays	568.700 / 102.350 / 980	F	ND (17.9.88)			
			L	Le Lavanchy	570.100 / 102.700 / 560	F	D			
			M	La Vouarde	568.450 / 101.920 / 1100	F	D			
			N	Le Tiersclin	570.600 / 102.100 / 800	F	D			
				Brocard inf.	570.030/102.490/570	E + F	ND (17.9.88)			

E = prélèvement d'échantillon d'eau
 F = prélèvement de fluocapteurs (charbon actif)
 D = fluocapteur-dérivé ou perdu
 ND = non détecté au terme (19.8.88)

Annexe 8.3

Essai de traçage au dessus du tunnel du Mont-Blanc (massif du Mont-Blanc)

Traceur	Lieu d'injection Coordonnées Y / X / Z	Date	N°	Lieu de prélèvement	Coordonnées Y / X / Z	Temp (°C)	Cond (µS/cm)	Débit (l/m)	Type de prélèvement	Date d'arrivée du traceur	Temps de transit	Distance parcourue	Vitesse de transit		
10 kg Eosine	Helbronner 956.675 2104.075 / 3470	17.6.88 11h30	<i>Tunnel du Mont-Blanc, France</i>												
			126	km 0,630	951.279/2109.497	7.3	122	22.20	E + F	ND (29.9.88)					
			127	km 0,660	951.297/2109.473	9.1	157	23.0	E + F	ND (29.9.88)					
			128	km 2,300	952.284/210.784	24.0	830	6.9	E + F	ND (29.9.88)					
			129	km 2,810	952.591/2107.756	26.1	421	8.33	E + F	ND (29.9.88)					
			130	km 3,300	952.886/2107.365	27.5	23	3.0	E + F	ND (29.9.88)					
			131	km 3,580	953.054/2107.141	26.2	125	120	E + F	ND (29.9.88)					
			132	km 4,500	953.608/2106.406	28.6	107	8.0	E + F	ND (29.9.88)					
			133	km 4,501	953.609/2106.406	29.6	153	10	E + F	ND (29.9.88)					
			135	km 5,030	953.927/2105.983	13.3	128	250	E + F	ND (29.9.88)					
			136	km 5,100	953.969/2105.927	31.5	183	17.4	E + F	ND (29.9.88)					
			138	km 5,407	954.154/2105.682	27.0	173	150	E + F	ND (29.9.88)					
			<i>Tunnel du Mont-Blanc, Italie</i>												
			140	km 6,780	954.980/2104.585	28.0	329	37.5	E + F	ND (3.10.88)					
			141	km 7,140	955.197/2104.298	23.9	99	21.4	E + F	ND (3.10.88)					
			142	km 7,380	955.341/2104.106	18.5	80	93.8	E + F	ND (3.10.88)					
			143	km 8,020	955.727/2103.595	8.7	63	1000	E + F	ND (3.10.88)					
			148	km 8,130	955.793/2103.443	8.1	81	107	E + F	17.6.- 3.10.88	≤ 108 j	1800 m	≥ 16.7 m/j		
150	km 8,150	955.805/2103.491	8.2	72	600	E + F	17.6.- 3.10.88	≤ 108 j	1800 m	≥ 16.7 m/j					
152	km 8,230	955.853/2103.428	9.1	68	93.8	E + F	17.6.- 3.10.88	≤ 108 j	1800 m	≥ 16.7 m/j					
154	km 8,250	955.865/2103.412	9.2	67	250	E + F	17.6.- 3.10.88	≤ 108 j	1800 m	≥ 16.7 m/j					
155	km 8,290	955.889/2103.380	10.5	68	62.5	E + F	17.6.- 3.10.88	≤ 108 j	1800 m	≥ 16.7 m/j					
156	km 8,330	955.913/2103.348	13.6	76	200	E + F	17.6.- 3.10.88	≤ 108 j	1800 m	≥ 16.7 m/j					
159	km 9,420	956.271/2102.873	22.6	105	25	E + F	ND (3.10.88)								
160	km 9,885	956.849/2102.106	21.3	283	22	E + F	ND (3.10.88)								
<i>Sources</i>															
33	Nant Provant	949.800/2110.550	6.1	167	855	E + F	ND (14.12.88)								
32	Betty	950.808/2111.950	7.0	220	1000	E + F	ND (14.12.88)								
34	Enchapeleuse	948.050/2107.450	4.0	159	550	E + F	ND (13.10.88)								
51	Meyvens sup.					E + F	ND (13.10.88)								
<i>Torrents</i>															
171	Bossons		3.0	21		E + F	ND (13.10.88)								
173	Bourgeat	947.050/2108.950	13.6	115		E + F	ND (13.10.88)								
A	Blaitère	951.150/2112.150				E + F	D								
B	Crépon	951.150/2112.700				E + F	D								
170	Creuset	948.700/2110.850	3.0	69		E + F	D								
169	Dard	949.750/2110.550	6.8	63		E + F	D								
172	Tacornaz	948.250/2109.000	6.4	64		E + F	ND (13.10.88)								
175	Meyvens	559.250/2101.075	5.5	135		E + F	ND (13.10.88)								
174	Praz Moulin	959.500/2100.500	6.4	181		E + F	ND (13.10.88)								

E + F = prélèvements d'eau et fluocaptateurs ND = non détecté au terme du (29.9.88) D = fluocaptateur perdu ou détruit

Annexe 10.1

Données comparatives d'autres massifs cristallins

			GraMBAR	GneMBAR	GraLG	GneLG	GraBT	GraBD	GneBD	GraA
Profondeur	(m)				859	448	327			
"	"				1427	859	1321			
Température	(°C)	min.	0.10	0.10	42.0	25.0	27.0	6.6	10.0	10.4
"	"	max.	29.60	8.0	59.0	42.0	60.0	28.0	28.0	18.7
Li	(mg/l)	min.	0.00	0.00	0.78	0.40	1.40			0.01
"	"	max.	0.50	0.06	2.60	3.10	3.00			0.10
Na	"	min.	0.47	0.63	295	320	354	5.00	2.50	6.00
"	"	max.	62.00	5.40	580	1060	2345	15.00	8.00	16.00
K	"	min.	0.00	0.16	6.20	4.10	8.40	0.00	2.00	0.10
"	"	max.	3.86	3.25	16.30	14.00	25.00	1.00	4.00	3.00
Mg	"	min.	0.03	0.36	0.10	0.11	0.16	0.50	0.50	0.01
"	"	max.	4.50	6.13	0.93	2.00	5.70	1.00	5.00	0.50
Ca	"	min.	2.94	3.80	10.20	6.30	8.50	8.00	8.00	2.90
"	"	max.	133	42.0	17.6	426	497	19.0	33.0	11.0
Sr	"	min.	0.01	0.00	0.22	0.13	0.09			0.08
"	"	max.	1.90	0.85	0.79	7.40	12.00			0.34
F	"	min.	0.00	0.00	11.30	3.60	1.10			0.90
"	"	max.	5.50	1.40	14.50	15.50	12.60			9.60
Cl	"	min.	0.0	0.0	124	108	120	0.0	0.0	0.2
"	"	max.	45.00	1.21	636	194	3923	0.50	45.00	6.10
HCO ₃	"	min.	11.40	10.4	134	34.0	31.0	26.00	40.00	4.00
"	"	max.	159	77	256	284	390	29.00	125	10.00
SO ₄	"	min.	2.80	4.10	252	247	286	18.0	10.0	4.00
"	"	max.	396	65.0	298	2864	919	32.0	42.0	11.0
TSD	"	min.	24.0	27.0	1038	903	1180	90.0	90.0	69.0
"	"	max.	647	188	1552	4600	2000	170	230	177
SiO ₂	"	min.	3.40	3.40	40.00	12.50	2.00	8.60	8.50	2.60
"	"	max.	22.50	9.84	72.50	81.30	20.00	17.10	12.90	18.00
As	(µg/l)	min.	0.00	0.00						0.40
"	"	max.	76.4	225						0.50
Ba	"	min.	0.00	0.00	0.01	0.04	0.03			
"	"	max.	32.1	40.10	0.12	0.19	0.06			9.00
Rb	"	min.	0.08	0.10	0.09	0.03	0.03			
"	"	max.	31.1	7.60	0.10	0.09	0.14			
U	"	min.	0.0	0.0			0.0	2.0	0.0	0.05
"	"	max.	2092	50.5			1.0	1000	1.5	72.8

Gra = Granite, Gne = Gneiss, MB = Mont-Blanc, AR = Aiguilles Rouges, LG = forage de Leuggern (CEDRA), BT = forage de Böttstein (CEDRA), BD = Belledonne, A = massif de l'Aar (laboratoire du Grimsel).

Annexe 10.2

**Classification hiérarchique de la répartition des domaines paramétriques
des différents aquifères**

Paramètres	Aquifères								
Température	GraLG	>	GraBT	>	GraBD	>	GraMBAR	>	GraA
	GneLG	>	GneBD	>	GneMBAR				
TSD	GraBT	>	GraLG	>	GraMBAR	>	GraBD	=	GraA
	GneLG	>	GneBD	>	GneMBAR				
Li	GraMBAR	>	GraA	>	GraBD				
Na	GraBT	>	GraLG	>	GraMBAR	>	GraA	=	GraBD
	GneLG	>	GneMBAR	=	GneBD				
K	GraBT	>	GraLG	>	GraMBAR	>	GraA	>	GraBD
	GneLG		GneBD	>	GneMBAR				
Mg	GraBT	>	GraMBAR	>	GraBD	>	GraLG	>	GraA
	GneMBAR	>	GneBD	>	GneLG				
Ca	GraBT	>	GraMBAR	>	GraLG	=	GraBD	>	GraA
	GneLG	>	GneMBAR	=	GneBD				
Sr	GraBT	>	GraMBAR	>	GraLG	>	GraBD	>	GraA
	GneMBAR	>	GneLG	=	GneBD				
F	GraLG	>	GraBT	>	GraA	>	GraMBAR		
Cl	GraBT	>	GraLG	>	GraMBAR	>>	GraA	>	GraBD
	GneLG	>	GneBD	>>	GneMBAR				
HCO ₃	GraBT	>	GraLG	>	GraMBAR	>	GraBD	>	GraA
	GneLG	>	GneBD	>	GneMBAR				
SO ₄	GraBT	>	GraLG	=	GraMBAR	>>	GraBD	>	GraA
	GneLG	>	GneMBAR	=	GneBD				
SiO ₂	GraLG	>	GraMBAR	=	GraBD	=	GraBT	=	GraA
	GneLG	>	GneBD	>	GneMBAR				
Ba	GraMBAR	>	GraA	>	GraLG	>	GraBT		
	GneMBAR	>	GneLG						
Rb	GraMBAR	>	GraLG	>	GraBT				
	GneMBAR	>	GneLG						
U	GraMBAR	>	GraBD	>	GraA	>	GraBT		

GraLG: Granite, forage Leuggern (CEDRA), GneLG: Gneiss, forage Leuggern (CEDRA), GraBT: Granite, forage Bötstein (CEDRA), GraMBAR: Granite, Mont Blanc et Aiguilles Rouges, GneMBAR: Gneiss, Mont Blanc et Aiguilles Rouges, GraBD: Granite, Belledonne, GneBD: Gneiss, Belledonne, GraA: Granite, Aar (Grimmel)

Annexe 11.1

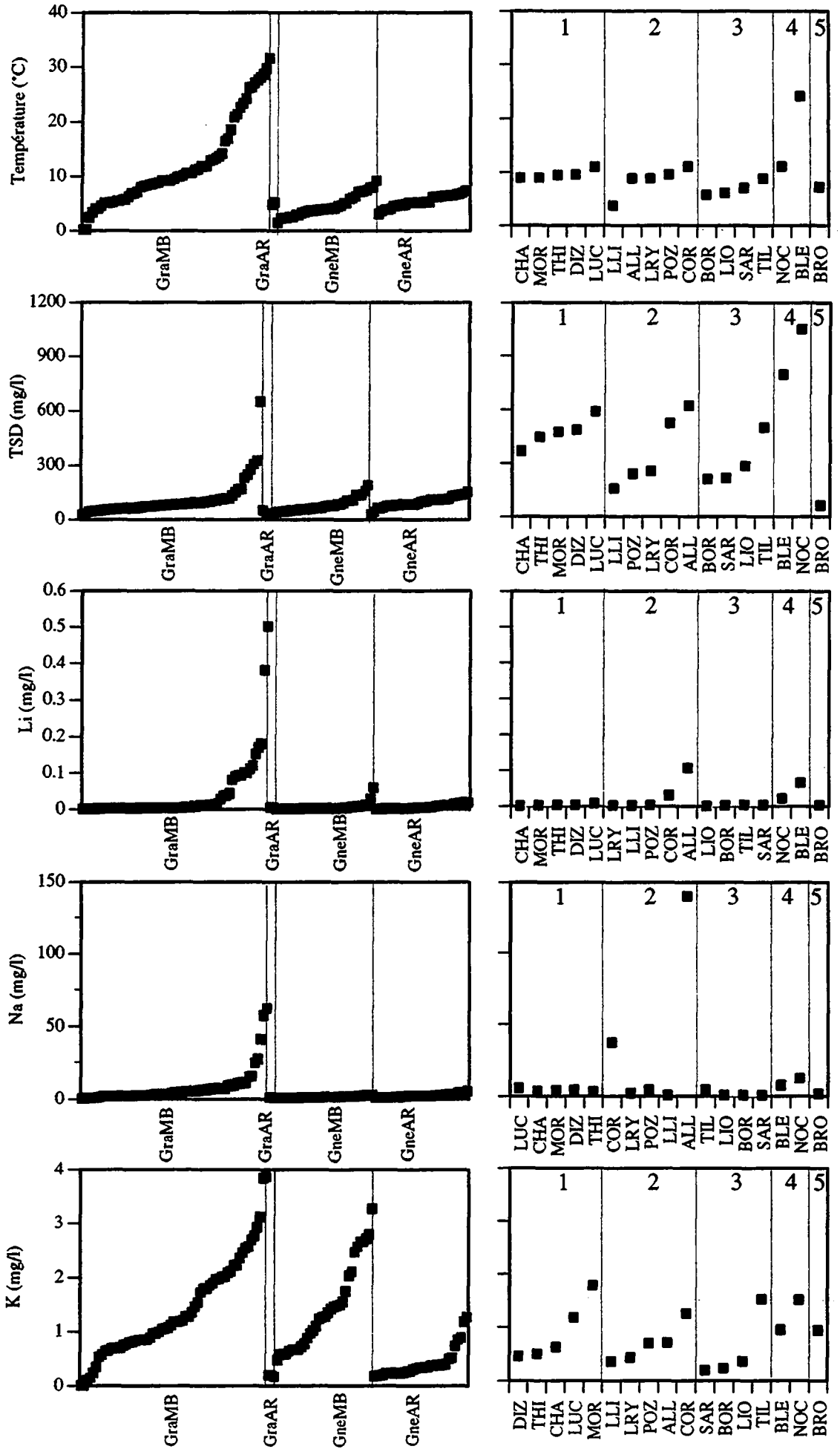
Sources du réseau AQUITYP

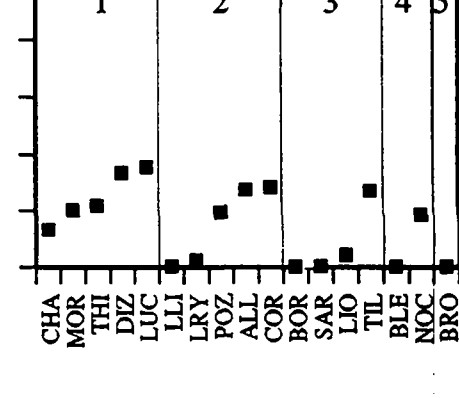
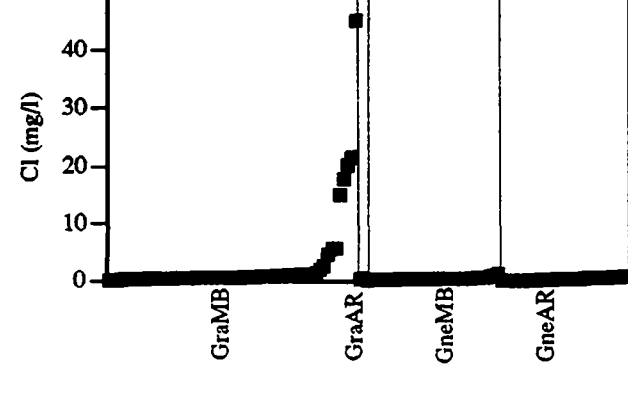
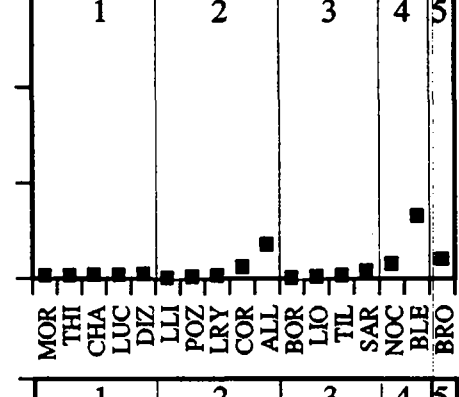
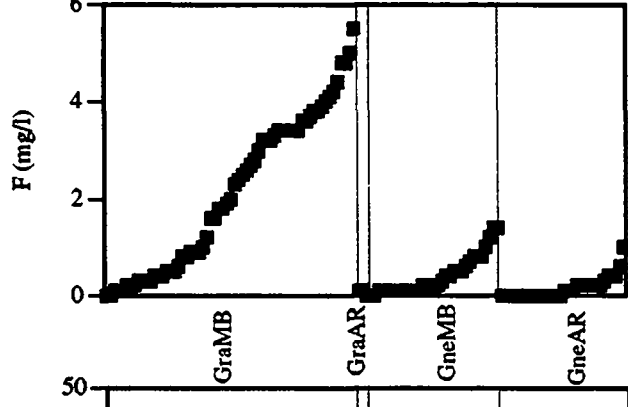
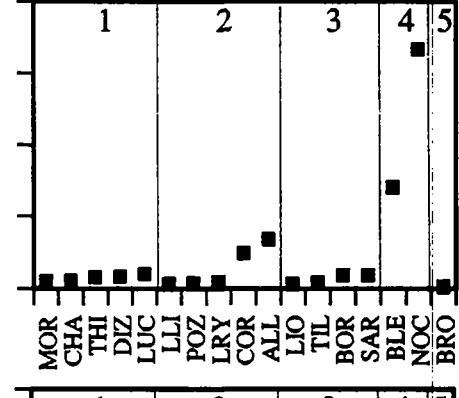
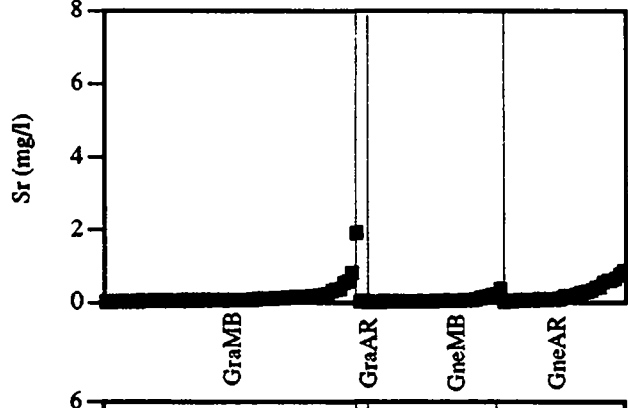
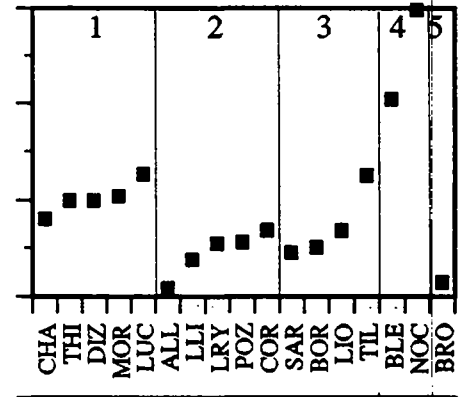
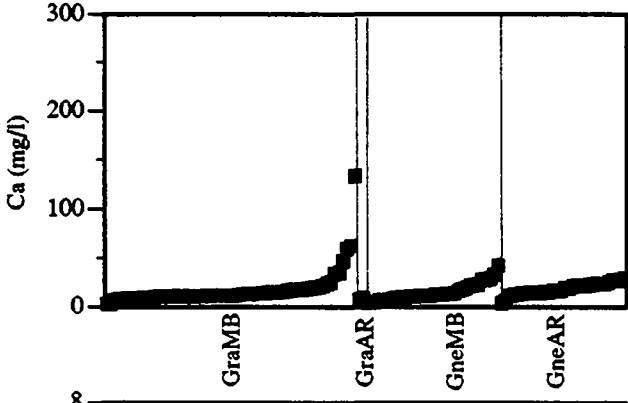
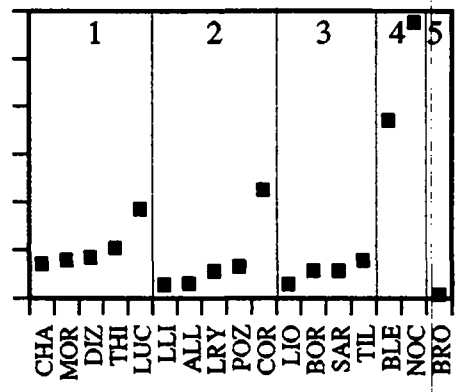
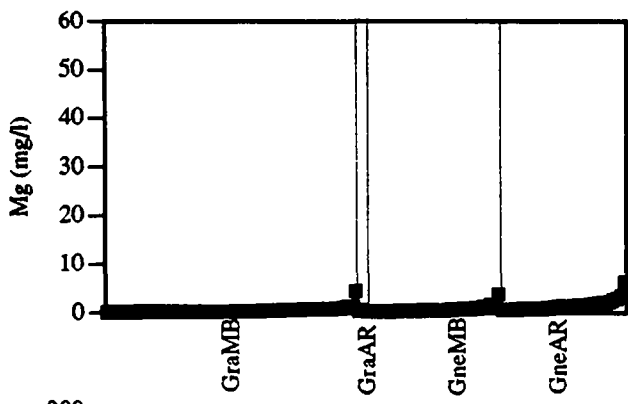
Groupes d'aquifères-types	Groupes n°	Aquifères-types	Code	Point d'eau		Unité géographique	S / P +	Feuille au 1:25000	Coordonnées		Altitude du point d'eau	Altitude max. bassin	Enregistr. Niveau/Q depuis	Chimie GEOLBP depuis
				Nom	Commune				Y	X				
Terrains meubles quaternaires	1	Graviers de plaine alluviale	LUC	Lucens	Lucens	Plateau	P	1204	555.46	174.19	484	680	4.11.74	24.11.81
			CHA	Chantivaz	Buchillon	Plateau	P	1242	520.93	146.50	390	1485	1.9.78	10.10.83
		Graviers fluvioglaciers sur karst	MOR	Morand	Montricher	Pied du Jura	P	1222	520.38	161.87	659	1650	27.2.74	6.4.81
			DIZ	Dizy	Dizy	Plateau	S	1222	527.24	164.75	576	620	1.4.84	7.4.81
			THI	Thierrens	Thierrens	Plateau	S	1203	547.09	172.02	765	860	-	16.2.87
Roches sédimentaires à porosités fissurées et d'interstices	2	Molasse subalpine	COR	Cornaille	Epesses	Plateau	S	1243	547.42	149.24	597	800	3.6.83	24.11.81
			CHE	Chescaux	Morrens	Plateau	S	1223	537.30	160.28	675	717	8.8.84	7.2.84
		Molasse burdigalienne	LRY	Lutry	Savigny	Plateau (forêt)	S	1243	544.62	157.35	878	895	3.8.83	24.11.81
			POZ	Pierre-Ozairé	Savigny	Plateau (calhaires)	S	1243	544.86	156.69	855	880	3.8.83	25.11.81
			LLJ	Lac Lioson	Omnont-Dessous	Préalpes	S	1265	576.12	137.39	1845	2478	10.5.82	27.11.81
Roches karstiques carbonatées	3	Crétacé du Jura	ALL	Alliaz	Blonay	Préalpes	S	1224	560.05	147.05	1020	1250	-	16.10.84
			TIL	Tilenet	Brettonnières	Jura	S	1202	526.26	173.45	650	1010	12.11.80	25.11.80
		Malm du Jura	LIO	Lionne	L'Abbaye	Jura	S	1221	514.53	166.72	1040	1679	25.11.80	25.11.80
			MAL	Malagne	Montricher	Jura	S	1222	518.05	160.61	720	1650	6.1.76	8.12.80
			BOR	Bornels	L'Etivaz	Préalpes	S	1265	576.78	142.26	1140	2458	1.1.70	27.11.81
Roches karstiques évaporitiques	4	Helvétique	SAR	Sarve	Sailion	Alpes	S	1305	579.72	113.16	470	3051	23.12.81	26.11.81
			NOC	Noches	Aigle	Préalpes	S	1284	564.04	128.24	395	2112	23.11.82	27.11.81
		Trias évaporitique alpin	BLE	Bains de Leytron	Leytron	Alpes	S	1305	580.58	114.56	560	3051	20.10.81	26.11.81
			BRO	Brocard	Martigny	Alpes	S	1325	570.30	102.49	570	2838	12.2.81	8.4.81

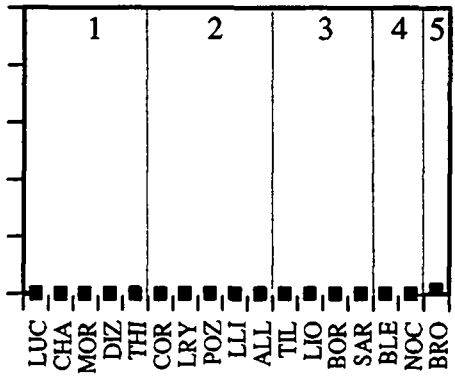
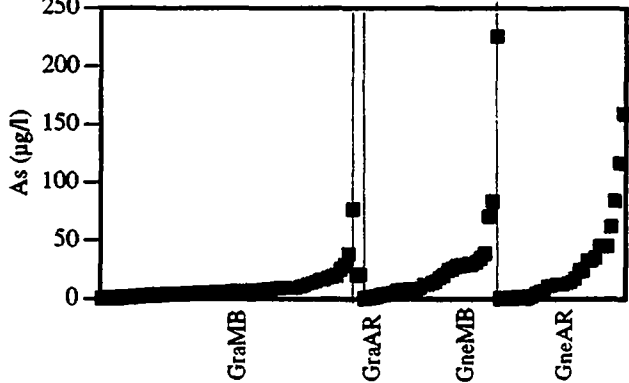
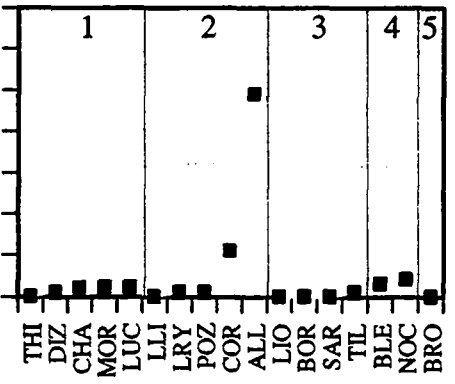
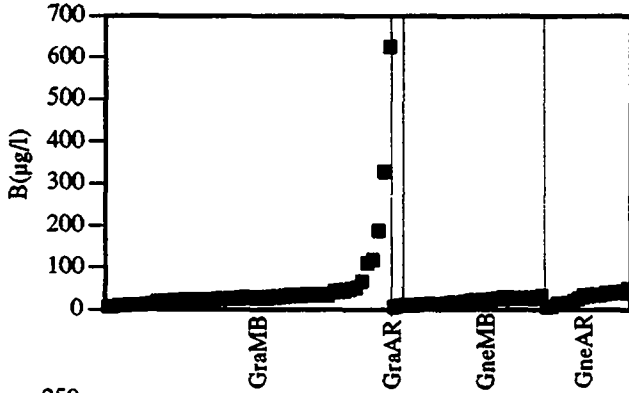
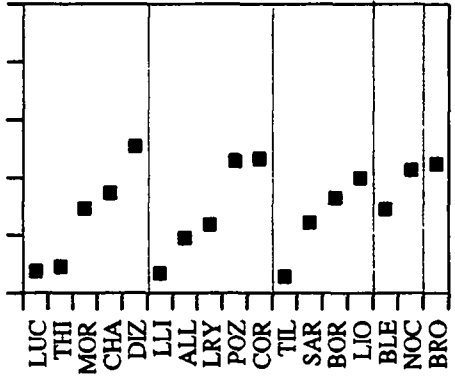
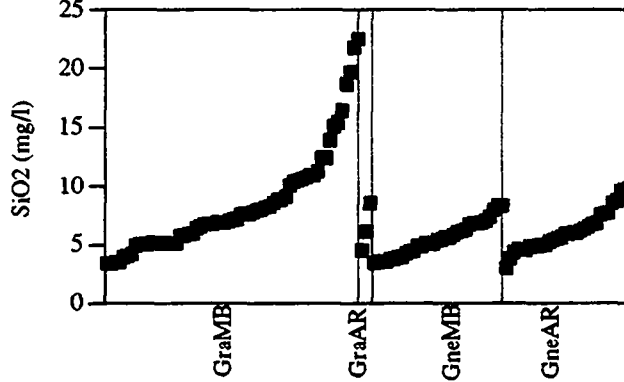
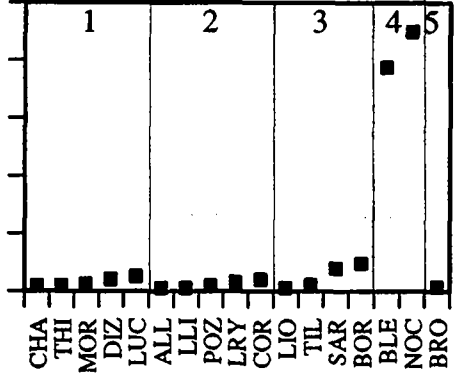
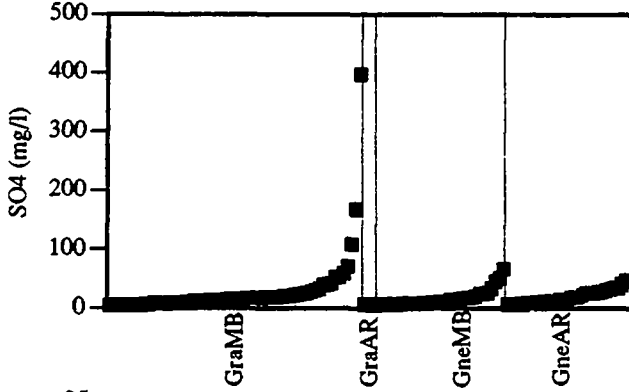
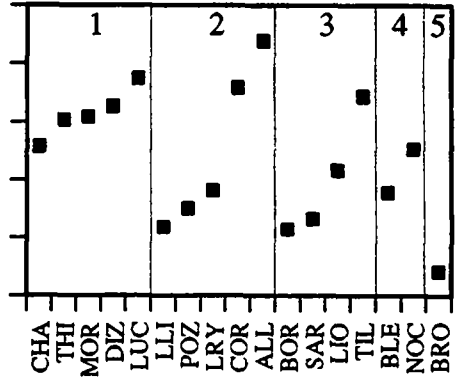
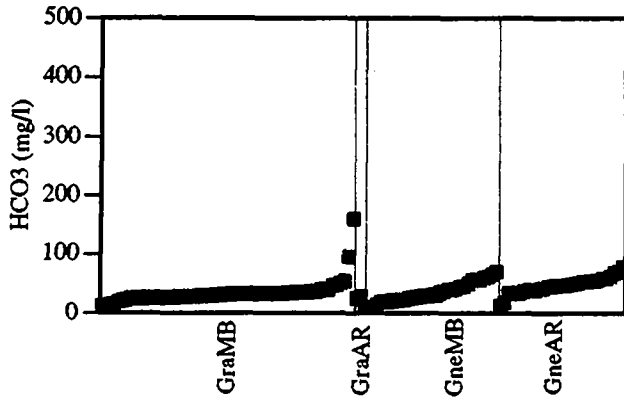
* S = source P = puits

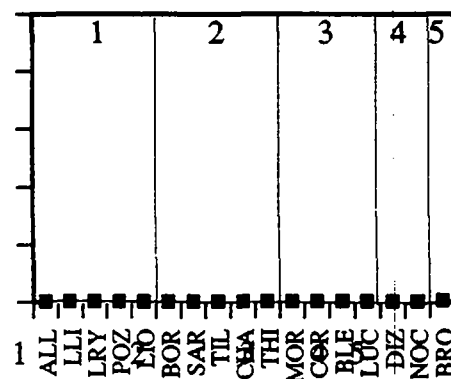
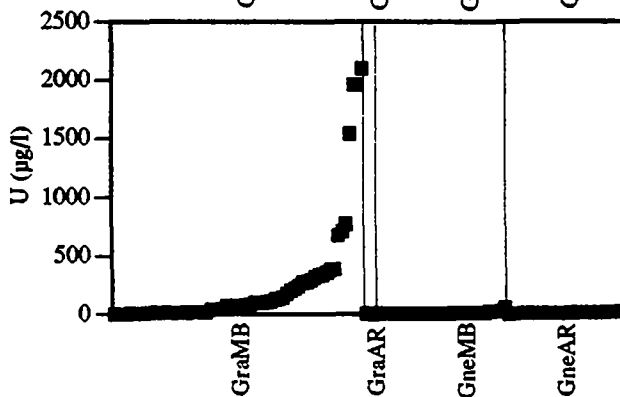
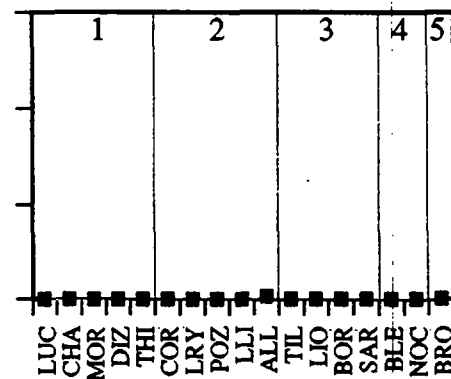
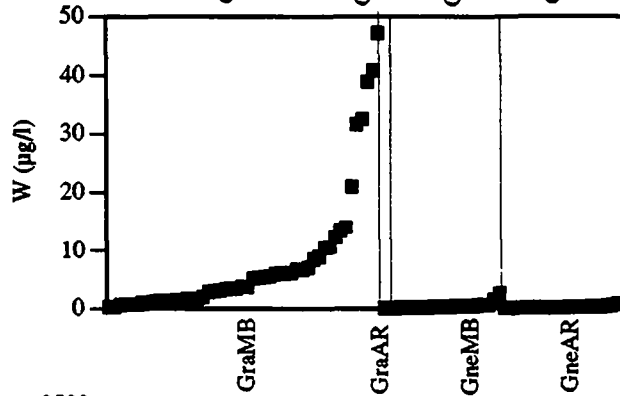
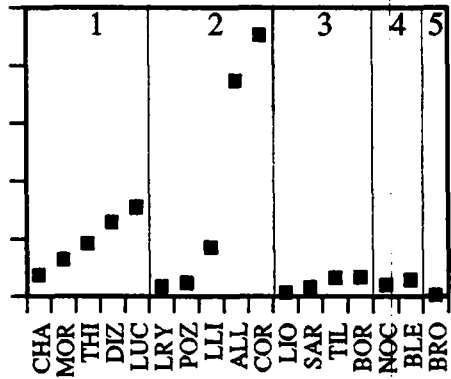
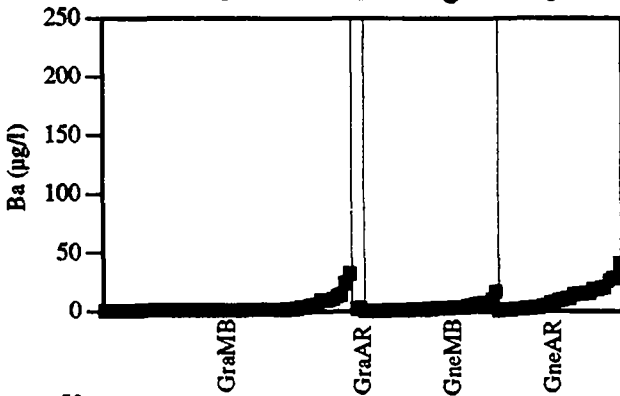
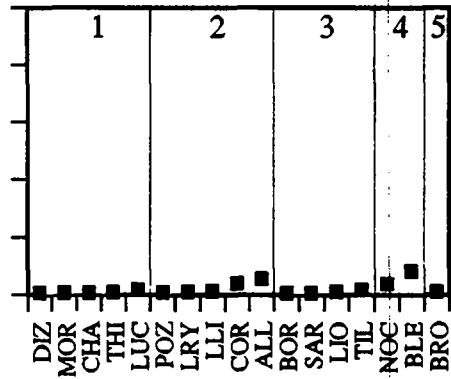
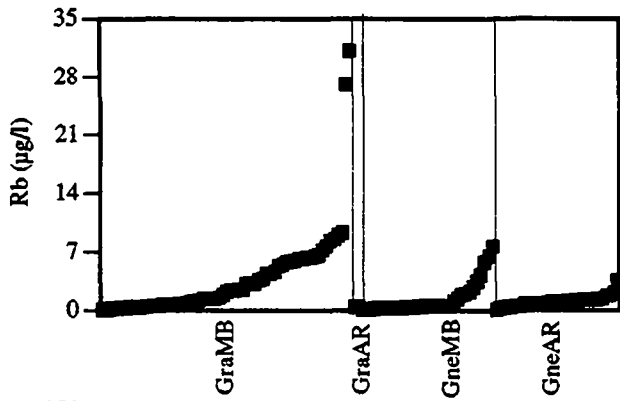
Annexe 11.2

**Représentation graphique comparative des données physico-chimiques
des aquifères du cristallin du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges
avec celles du réseau AQUITYP**









Annexe 11.3

Données analytiques des sources du réseau AQUITYP

Sources	Date	Température (°C)	Li (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	Sr (mg/l)	F (mg/l)	Cl (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	B (mg/l)	TSD (mg/l)	As (µg/l)	Ba (µg/l)	Rb (µg/l)	W (µg/l)	U (µg/l)
CHA	11.89	8.9	0	3.03	0.62	6.7	80.5	0.2	0.1	6.6	257	8.2	4.7	0.019	366	0	17.8	0.2	0	0.5
COR	"	11.0	0.029	37.24	1.25	22.5	68.2	0.97	0.2	14.2	357	19.0	7.3	0.11	524	0	226	1.4	0	0.7
NOC	"	11	0.02	11.76	1.51	57.6	297	6.65	0.3	9.2	253	448	7.3	0.04	1050	0	9.3	1.3	0	2.1
LUC	"	10.9	0.006	5.13	1.18	18.4	127	0.40	0.1	17.7	373	24.8	9.9	0.02	587	0	76.7	0.5	0	1.0
POZ	"	9.5	0.002	3.59	0.69	6.4	55.7	0.13	0.0	9.6	149	9.1	11.2	0.01	239	0	11.1	0.2	0	0.2
LLI	"	3.7	0.001	0.21	0.35	2.7	37.5	0.11	0	0.12	117	4.6	1.8	0	156	0	42.3	0.4	0	0.1
LRY	"	8.8	0.001	1.67	0.42	5.6	54.4	0.16	0.1	1.1	181	14.2	11.5	0.01	255	0	7.8	0.3	0	0.2
BRO	"	7.3	0.002	1.45	0.93	0.6	14.4	0.03	0.4	0	40.3	6.8	8.7	0	62.2	4	0.7	0.3	0.1	9.1
BLE	"	24.1	0.065	7.14	0.94	37.0	204	2.84	1.3	0	178	387	12.7	0.03	793	0	14.0	2.9	0	0.8
TIL	"	8.8	0.002	3.71	1.52	7.8	125	0.15	0.0	13.5	343	9.9	5.9	0.01	498	0	15.6	0.5	0	0.5
BOR	"	5.7	0.001	0.21	0.22	5.6	50.3	0.35	0	0	113	46.6	1.4	0	209	0	16.2	0.1	0	0.4
ALL	"	8.8	0.106	139	0.7	3.0	8.3	1.37	0.7	13.7	437	3.9	8.2	0.49	621	0	186	1.9	0.5	0.0
MOR	"	8.9	0.001	3.23	1.78	7.8	104	0.17	0.0	9.10	308	11.6	6.1	0.02	474	0	31.4	0.1	0	0.7
DIZ	"	9.5	0.003	3.62	0.45	8.4	99.2	0.33	0.1	16.7	326	18.4	11.6	0.01	485	0	64.0	0.1	0	1.5
SAR	"	7.0	0.002	0.31	0.19	5.7	45.0	0.36	0.2	0.1	131	38.2	2.2	0	215	0	7.1	0.2	0	0.5
THI	"	9.4	0.003	2.65	0.49	10.4	98.9	0.30	0.1	10.8	302	8.8	10.7	0	446	0	45.3	0.2	0	0.6
LIO	"	6.1	0	0.28	0.35	2.9	68.1	0.10	0.0	2.0	216	4.0	1.7	0	283	0	2.6	0.3	0	0.3

Annexe 11.4

Comparaison des domaines de répartition de paramètres

Paramètres	Sous-types d'aquifères du cristallin		
	Granite Mont-Blanc	Gneiss Mont-Blanc	Gneiss Aiguilles Rouges
TSD	<1	<1	<1
	≤2	<2	<2
	≤3	≤3	<3
	<4	<4	<4
Li	≥1	≥1	≥1
	≥2	≤2	≥2
	≥3	≥3	≥3
	≥4	≤4	≤4
Na	≥1	≤1	≤1
	≤2	≤2	≤2
	≥3	≤3	≤3
	≥4	<4	<4
K	≥1≤	≥1	≤1
	≥2≤	≥2	≤2
	≥3≤	≥3≤	≤3
	≥4≤	≥4≤	≤4
Mg	<1	<1	<1
	<2	<2	≤2
	<3	<3	≤3
	<4	<4	<4
Ca	<1	<1	<1
	≤2	≤2	<2
	≤3	<3	<3
	<4	<4	<4
Sr	≥1	≤1	≥1
	≤2	≤2	≤2
	≥3	≤3	≥3
	<4	<4	<4
F	≥1	≥1	≥1
	≥2	≥2	≥2
	≥3	≥3	≥3
	≥4	≤4	≤4
Cl	≥1≤	<1	<1
	≥2	≤2	≤2
	≥3	≤3	≤3
	≥4	≤4	≤4
HCO ₃	<1	<1	<1
	<2	<2	<2
	<3	<3	<3
	<4	<4	<4

Paramètres	Sous-types d'aquifères du cristallin		
	Granite Mont-Blanc	Gneiss Mont-Blanc	Gneiss Aiguilles Rouges
SO ₄	≥1	≥1	≥1
	≥2	≥2	≥2
	≥3	≥3	≥3
	≤4	<4	<4
SiO ₂	≥1	≤1≥	≤1
	≥2	≤2≥	≤2
	≥3	≥3	≥3
	≤4≥	≤4	≤4
B	≥1	=1	≥1
	=2	≤2	≤2
	≥3	=3	=3
	≥4	<4	=4
As	≥1	≥1	≥1
	≥2	≥2	≥2
	≥3	≥3	≥3
	≥4	≥4	≥4
Rb	≥1	≥1	≤1
	≥2	≥2	≤2
	≥3	≥3	≥3
	=4	≥4	≥4
Ba	<1	<1	≤1
	<2	<2	≤2
	=3	=3	≥3
	=4	=4	≥4
W	≥1	≥1	≥1
	≥2	≥2	≥2
	≥3	≥3	≥3
	≥4	≥4	≥4
U	≥1	≥1	≥1
	≥2	≥2	≥2
	≥3	≥3	≥3
	≥4	≥4	≥4

Curriculum vitae

Originaire de Genève, j'y suis né le 24 janvier 1952. Après avoir achevé mes études au Collège moderne de Genève (1969), ayant un esprit très peu scolaire, mais attiré par l'architecture, j'ai été présenté à Monsieur Moser, architecte connu de la place, pour entreprendre dans ses bureaux un apprentissage de dessinateur architecte. Au terme de cette formation qui m'a beaucoup apporté, aussi bien du point de vue technique qu'artistique, j'ai travaillé plusieurs années dans l'atelier d'architecture de Messieurs Cuccodoro et Darmon à la réalisation et la restauration de maisons d'habitation pour lesquelles j'avais essentiellement la charge de réaliser les dossiers de plans d'exécution et le suivi de différents chantiers de construction. C'est durant cette période que j'ai préparé, le soir, une maturité scientifique au Collège Calvin de Genève. Après avoir réussi mes examens, en 1977, j'ai quitté la Suisse pour plus de 6 mois afin de faire le point et d'envisager la suite de ma vie. Durant ce voyage en Amérique Centrale et du Sud, riche d'espace et d'aventure, j'ai décidé de rentrer en Europe pour entreprendre à l'Université de Genève des études de géologie. Trois ans plus tard, ayant obtenu ma licence ès Sciences de la Terre. Parallèlement à la réalisation de mon diplôme de géologue, j'ai entrepris un 3^{ème} cycle d'étude approfondi en hydrogéologie à l'Université de Neuchâtel. Mon travail de diplôme a été dirigé par le Professeur Jaffé également de l'Université de Genève et le Professeur Burger de l'Université de Neuchâtel (1983). Cette recherche, financée par l'Office Fédéral de l'Energie, a été réalisée sur le site géothermal de Saillon, Valais, Suisse. Durant cette même année, j'ai été l'un des assistants du professeur Vuagnat, directeur du département de minéralogie de l'Université de Genève. Familiarisé avec les problèmes d'hydrogéologie profonde, le Professeur Jaffé m'a proposé de participer en tant qu'hydrogéologue à un vaste projet de recherche géothermique pluridisciplinaire, financé par le Fonds National pour la Recherche Energétique, dont le terrain essentiel d'investigation était situé dans le nord de la Suisse et le pied du Jura, de Genève à Bâle (1985). C'est au cours de ce projet que j'ai eu la chance de passer plusieurs mois chez le Professeur E. Mazor à l'Institut Weizmann (Israël) qui m'a initié en particulier aux interprétations des isotopes de l'eau et des gaz nobles. Ce dernier projet publié, le Professeur A. Burger m'a donné la possibilité d'entrer à l'Institut d'Economie et d'aménagement Energétique (IENER) de l'EPFL, dirigé par le Professeur A. Gardel. Cependant quelques semaines après mon arrivée à l'EPFL, le Dr. A. Parriaux, adjoint scientifique du Professeur J.H. Gabus, m'a proposé de venir travailler dans leur laboratoire et, à côté de l'enseignement des travaux pratiques et de la charge de mandats de type privé, il m'a donné la possibilité d'entreprendre et de réaliser la présente thèse de doctorat.

En 1990, avant même la fin de la rédaction de mon manuscrit, Monsieur J.D. Rouiller, Directeur du Centre de Recherches Scientifiques Fondamentales et Appliquées à Sion, m'a proposé un poste de chef de projet dans le cadre d'une importante étude d'impact liée aux projets de percement du tunnel de base du Lötschberg sur les sources thermales de Leukerbad et Brigerbad (Valais, Suisse).



Liste des publications

- Davit, A., Jaffé, F.C., Parriaux, A. & Dubois, J.D. (1990):** The problem of groundwater protection in a composed karstic and fluvioglacial aquifer at the foot of the Jura chain (Switzerland). *Memoires of the XXIIInd Congress of IAH, EPFL, Lausanne, Part 2, 1144-1153.*
- Dray, M., Parriaux, A., & Dubois, J.D. (1990):** Image synchrone de la composition isotopique de la couverture neigeuse des Alpes de Suisse occidentale. *Hydrology in mountainous regions. I - Hydrological measurements; Water cycle. IAHS Publ. 193, 447-454.*
- Dubois, J.D. & Flück, J. (1985):** In *geothermische Prospection am Jurasüdfuss* (Ed .H.L. Gorhan). *Bulletin du Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel.*
- Dubois, J.D., Flück, J. & Jaffé, F. (1988):** Geo- und Isotopenchemische Charakterisierung der tiefen Thermalwasser. - *Geothermische Prospektion im Raume Schinznach Bad-Baden* (ed. M. Gorhan und J.C. Griesser). *Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie. Kümmerly & Frey, Bern.*
- Dubois, J.D. & Parriaux, A. (1990):** Hydrogeological characteristics of crystalline aquifers. Example of the Mont Blanc and Aiguilles rouges Massifs (France, Italy and Switzerland): First results. *Memoires of the XXIIInd Congress of IAH, EPFL, Lausanne, Part 1, 504-513.*
- Mazor, E., Dubois, J.D., Flück, J., & Jaffé, F. (1988):** Noble gases as tracers identifying geothermal components in regions devoid of surface geothermal manifestations: A case study in the Baden springs area, Switzerland. - *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section), 72 (1988) 47-61.* - Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Mazor E., Dubois, J.D., Jaffé, F., Soom-Flück, J., Vuataz, F.D. & Wexsteen, P. (1990):** Time-data series as major diagnostic tool in groundwater hydrology: Case studies from Switzerland. *Memoires of the XXIIInd Congress of IAH, EPFL, Lausanne, Part 1, 273-288.*
- Mazor, E., Jaffé, F., Flück, J., & Dubois, J. D. (1986):** Tritium corrected ^{14}C and atmospheric noble gas corrected ^4He applied to deduce ages of mixed groundwaters: Examples from the Baden region, Switzerland. - *Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 50, pp. 1611-1618.*
- Parriaux, A. & Dubois, J.D. (1990):** Groundwater typology before and after the introduction of the ICP-MS. *Chimia, 44/1990, 243-245.*
- Parriaux, A., Dubois, J.D. & Dray, M. (1990):** Chemical composition of snow cover on the West Swiss Alps. *Hydrology in mountainous regions. I - Hydrological measurements; water cycle. IAHS Publ. 193, 501-509.*

- Parriaux, A., Dubois, J.D. & Mandia, Y. (1990):** Persistence des traceurs fluorescents dans les nappes souterraines. *Hydrogéologie*, 3/90, BRGM.
- Parriaux A., Mandia Y & Dubois, J.D. (1990):** The concept of protection zones in karstic montains. *Memoires of the XXIIInd Congress of IAH, EPFL, Lausanne, Part 2,1136-1143.*
- Parriaux, A., Dubois, J.D., Mandia, Y., Basabe, P. & Bensimon, M. (1990):** The AQUITYP project: towards an aquifer typology in the alpine orogen. *Memoires of the XXIIInd Congress of IAH, EPFL, Lausanne, Part 1, 254-262.*