

ETUDE DE LA POLLUTION DES SEDIMENTS  
DU LEMAN ET DU BASSIN DU RHONE

Campagne 1977

Laboratoire de limnogéologie  
Université de Genève

J.-P. VERNET

et

Département de géologie marine  
Bureau de Recherches Géologiques et Minières

G. SCOLARI

---

Introduction générale

Les études de la campagne 1977 ont été restreintes aux deux parties suivantes :

PARTIE A : Contamination par les métaux lourds des sédiments de quelques  
affluents du Léman et des principales rivières du canton de Genève.  
Le Rhône amont et ses affluents.

PARTIE B : Contamination des sédiments côtiers par les métaux lourds.

Quelque 700 échantillons ont été récoltés sur les rivières du bassin et dans les zones côtières du Léman. Préparation, analyses et interprétation ont été effectuées au laboratoire de limnogéologie de l'Université de Genève. Seules les analyses des éléments trace autres que le mercure et le cadmium ont été effectuées au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) à Orléans.

Tous les collaborateurs du laboratoire de limnogéologie ont, de près ou de loin, participé à ce travail. Cependant, certains se sont plus particulièrement chargés de l'interprétation des résultats pour l'une ou l'autre des parties du présent rapport.

## METHODOLOGIE

P.-Y. FAVARGER

Laboratoire de limnogéologie

A l'exception du mercure et du cadmium, analysés par absorption atomique (rapport 1976, p. 250), les métaux trace et le bore sont dosés par spectrométrie d'émission (arc électrique alternatif appliqué directement sur l'échantillon en poudre granulométrée) sous la responsabilité du B.R.G.M..

Cette méthode est satisfaisante tant du point de vue de la précision que de la reproductibilité des résultats. Nous avons pu le constater en envoyant les mêmes échantillons à 2 dates différentes (fig. 1)

## CONTROLE BRGM: ANALYSES 1978 (y) / 1977 (x), ppm

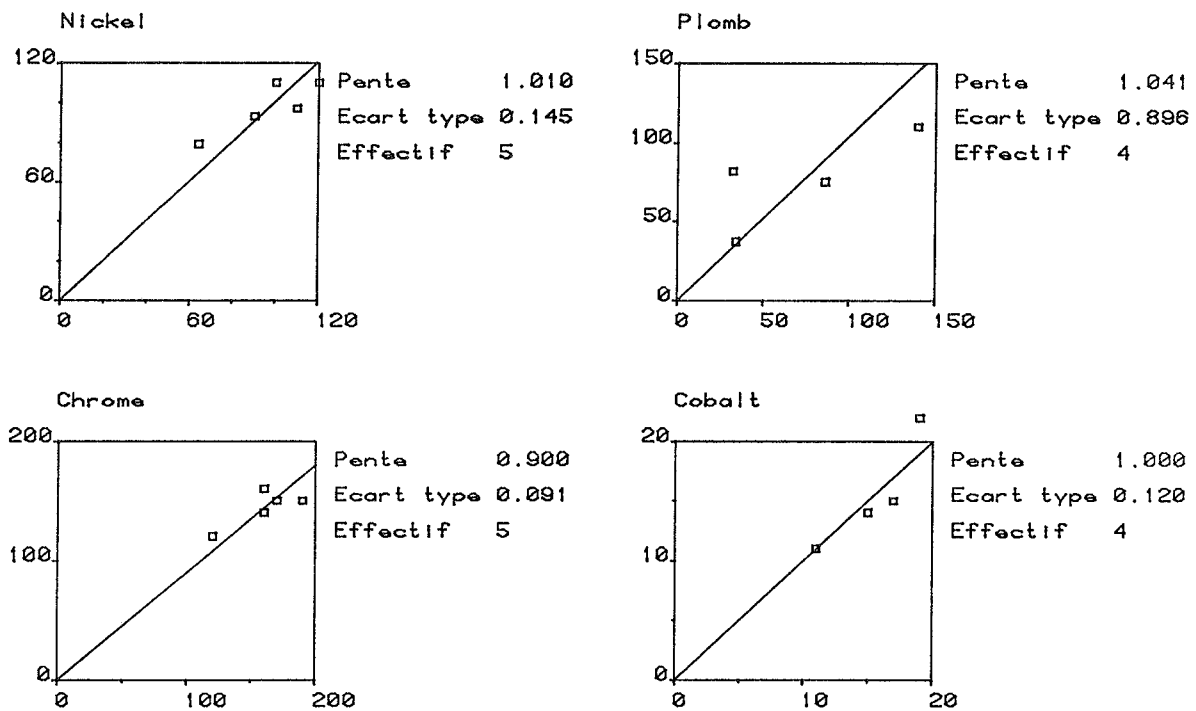


Fig. 1

A la suite d'une indisponibilité temporaire du spectromètre du B.R.G.M., les échantillons 1976 ont été analysés sur un spectromètre identique mais de marque différente dans les laboratoires du C.E.A. Il en est résulté une divergence systématique importante nettement apparente sur les résultats des séries de contrôle (voir fig. 2). Cet écart s'explique d'une part par les difficultés de standardisation inhérentes aux méthodes d'analyse par voie sèche, et d'autre part par le fait qu'au B.R.G.M. les échantillons sont calcinés préalablement à l'analyse. Il en résulte qu'au C.E.A., les valeurs obtenues se rapportent au sédiment brut alors qu'au B.R.G.M le calcul des teneurs est établi de la façon suivante :

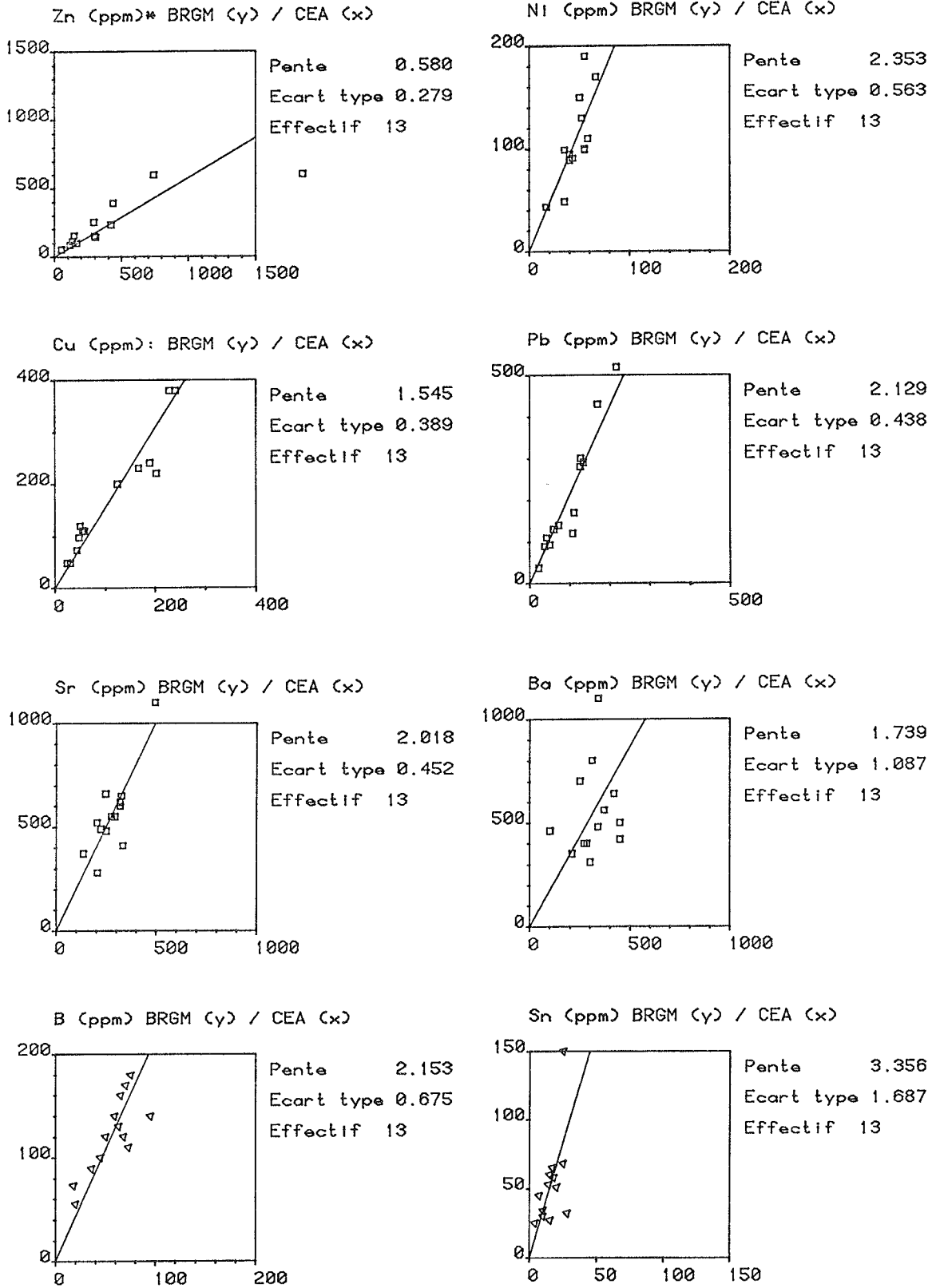


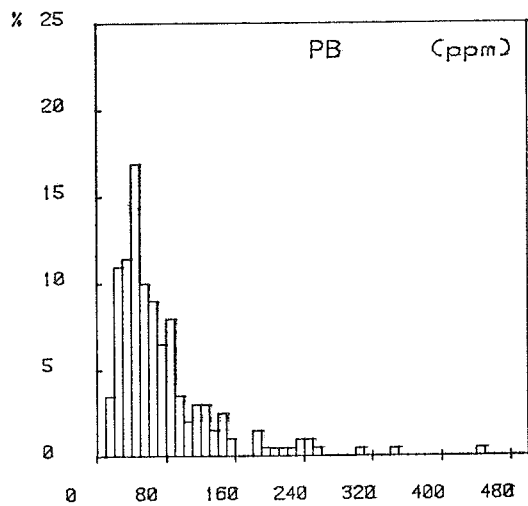
Fig. 2

- 1) On débarrasse le sédiment de ses fractions volatiles :  $H_2O$ ,  $CO_2$  et matières organiques.
- 2) On dose les oxydes majeurs suivants :  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$  et  $K_2O$ .
- 3) Les résultats fournis pour les traces sont rapportés à la somme, ramenée à 100, des oxydes majeurs.

De ce fait, les résultats B.R.G.M. sont généralement plus élevés que ceux du C.E.A. puisqu'ils se rapportent à un échantillon débarrassé de ses matières volatiles qui sont en quantités très variables d'un échantillon à l'autre. Il a donc été nécessaire de procéder à un ajustement des teneurs naturelles précédemment admises dans lequel on a aussi tenu compte de la hauteur du seuil de détection car au voisinage de celui-ci l'erreur relative est très grande (tableau 1). Comme en 1976 (rapport 1976, p. 257) nous nous sommes basés, pour l'essentiel, sur la valeur médiane du mode situé dans les faibles teneurs (voir histogrammes).

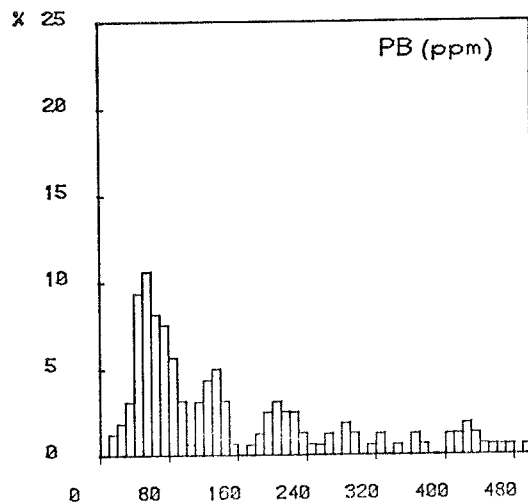
ELEMENT	C.E.A. 1976 (en ppm)		B.R.G.M. 1977 (en ppm)	
	Seuil	T. nat.	Seuil	T. nat.
Pb	5	50	15	50
Hg	0,03	0,05	0,03	0,05
Mn	1	500	20	500
Cu	1	50	3	50
Zn	5	100	5	60
Ni	2	50	5	50
Co	5	10	10	10
Cr	10	50	10	100
Cd	0,05	0,3	0,05	0,3
V	5	50	5	50
Sr	10	250	20	800
Sn	5	10	20	20
Ba	10	250	5	350
Mo	4	1,5	3	3
B	3	70	10	70
Ag	-	-	0,2	1

Tableau 1



P L O M B CEA(1976)

moyenne : 74.627  
 ecart-type : 61.568  
 effectif : 201



PLOMB BRGM (1977)

moyenne : 155.988  
 ecart-type : 134.937  
 effectif : 163

La méthode consistant à définir une pollution par rapport à un multiple de la teneur naturelle de l'élément correspondant permet de minimiser les erreurs systématiques inhérentes aux techniques d'analyse utilisées et de faire des comparaisons année après année.

## Partie A/1 :

CONTAMINATION PAR LES METAUX LOURDS  
DES SEDIMENTS DE QUELQUES AFFLUENTS DU LEMAN  
ET DES PRINCIPALES RIVIERES DU CANTON DE GENEVE

M. VIEL, E. DAVAUD, J.-P. VERNET  
Laboratoire de limnogéologie

1. Introduction

Faisant suite à la campagne organisée en 1976, 164 échantillons de sédiment ont été prélevés entre les mois de mai et de juillet 1977 sur certaines rivières du bassin lémanique, dans les limites du territoire suisse.

La stratégie de prélèvement a été choisie en fonction des problèmes soulevés et des réponses apportées par l'analyse des résultats de 1976.

Les rivières ne présentant aucun signe de pollution métallique lors de la campagne 1976 ont été écartées de cette étude. Par contre, celles où la pollution s'était avérée évidente (Venoge, Chamberonne, Aubonne, Promenthouse, Asse) et celles où les quelques échantillons prélevés laissaient suspecter une contamination importante ont fait l'objet d'un échantillonnage serré et systématique.

Comme en 1976 - et pour les mêmes raisons - seules les fractions limoneuses et argileuses ont été analysées.

Au dosage des éléments trace de la matière organique et du carbonate de calcium, nous avons adjoint l'analyse non prévue des éléments majeurs qui fournit de précieux renseignements sur la composition pétrographique des sédiments ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ).

L'analyse de la plupart des éléments trace a été effectuée sur un autre équipement que celui utilisé l'an dernier. Les tests d'homogénéité que nous avons fait en reprenant des échantillons de la campagne 76 (cf. Introduction générale) ont montré des différences systématiques dans les dosages de certains éléments. De ce fait, nous avons été contraints - pour rendre comparables les études menées en 77 et 76 - de redéfinir les teneurs naturelles de quelques éléments-trace (table 1).

L'évolution de la pollution entre 76 et 77 doit donc être estimée en comparant non pas les valeurs absolues des dosages mais plutôt les rapports valeurs observées/teneur naturelle.

Sur la table 1, nous avons reporté pour les 14 éléments trace, leur teneur naturelle et leurs variations moyenne et maximale en regard de cette teneur.

Ces rapports donnent une idée de l'importance relative des différentes pollutions métalliques dans le bassin.

Le mercure reste le métal le plus polluant avec une teneur moyenne 7 fois supérieure à la teneur naturelle

Le Cadmium, le cuivre, le plomb, le zinc et l'argent le suivent avec des teneurs moyennes 2 à 5 fois plus élevées que les teneurs naturelles.

Pour les autres métaux (nickel, cobalt, chrome) les contaminations ne sont pas prononcées et les teneurs moyennes varient entre 1 fois et 1 fois et demi la teneur naturelle.

	Moyenne	Ecart-type	Teneur max.	Teneur naturelle	Moy./teneur nat.	Teneur max/teneur nat.
Pb (ppm)	156	135	660	50	3.12	13.2
Hg (ppb)	365	645	5330	50	7.3	106.6
Mn (ppm)	1248	318	2400	950	1.3	2.5
Cu (ppm)	133	113	620	50	2.7	12.4
Zn (ppm)	167	102	600	70	2.4	8.6
Ni (ppm)	119	54	360	80	1.5	4.5
Co (ppm)	22	10	74	20	1.1	3.7
Cr (ppm)	212	94	1200	125	1.7	9.6
Cd (ppb)	1398	1592	7660	300	4.7	25.5
V (ppm)	122	25	180	100 (95)	1.3	1.9
Sr (ppm)	603	161	1600	400	1.5	4.
Ba (ppm)	517	276	2600	350	1.5	7.4
Ag (ppm)	4	8	40	1	4	40

Table 1

Par rapport à 1976, il semble que les contaminations par le cuivre, le plomb et le cadmium soient plus marquées, alors que pour les autres métaux elles apparaissent à peu près identiques.

## 2. Etude des associations géochimiques

Afin de distinguer les pollutions polymétalliques des pollutions spécifiques et d'examiner le rôle joué par la matière organique et les argiles dans la fixation des différents métaux, nous avons soumis toutes les données à une analyse factorielle (table 2).

- Le premier facteur (F1) réunit tous les éléments majeurs ( $\text{SiO}_2$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  -  $\text{Na}_2\text{O}$  -  $\text{K}_2\text{O}$ ), le plomb, le manganèse, le cuivre, le zinc, le nickel, le cobalt, le chrome, le vanadium, le bore et - avec un poids négatif - le carbonate de calcium et le strontium.  
Dans la fraction inférieure à 63 microns, les éléments majeurs cités et certains éléments-trace (B, V, Co, Mn) représentent les argiles.
- Le deuxième facteur (F2) met en évidence une association entre matière organique, plomb, mercure, cuivre, zinc, argent, baryum et cadmium qui suggère l'existence d'un deuxième type de contamination polymétallique dominante, liée à des rejets organiques.
- Le troisième facteur (F3) indique la présence d'une association plus discrète entre carbonate de calcium, magnésium, strontium (ces deux éléments se substituent au calcium dans le réseau des carbonates naturels) et trois métaux lourds polluants : le nickel, le chrome et le cadmium. Comme nous le verrons plus loin, cette association s'observe essentiellement dans les sédiments de l'Arve.
- Le quatrième facteur (F4) montre que la relation cadmium et strontium peut exister également sans que le carbonate de calcium intervienne.

- Le cinquième facteur (F5) suggère enfin que dans certains cas le mercure est lié à des formes inorganiques du phosphore, probablement des orthophosphates. Cette interprétation, fondée sur le faible poids attribué à la matière organique dans ce facteur, sera confirmée plus loin par la mise en évidence d'une contamination polymétallique liée à des formes inorganiques du phosphore (Venoge).

L'origine des différentes associations que nous venons d'énumérer pourrait en partie s'expliquer par l'adsorption sélective sur un support naturel (argile, matière organique) de certains métaux lourds rejetés indépendamment les uns des autres et provenant de sources spécifiques différentes. La nature du support et sa réceptivité sélective détermineraient dans ce cas le type d'association entre les métaux lourds.

Cependant, le caractère ubiquiste de certains métaux lourds vis-à-vis des différents facteurs (des différents supports) laisse penser que les associations détectées reflètent plutôt l'existence de contaminations polymétalliques distinctes et de nature variable que le sédiment enregistre sans en modifier fondamentalement la nature. L'absence de modification géochimique lors du passage au milieu naturel peut être totale si les métaux lourds rejetés se trouvent déjà fixés à un "support" (matière organique ou orthophosphates ?) de manière relativement stable. Dans ce cas, le sédiment joue un rôle passif et "hérite" de ces associations si les conditions hydrodynamiques locales le permettent (faible énergie).

Table 2 : Analyse factorielle

	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	Somme des carrés
SiO <sub>2</sub>	<u>.897</u>	-.093	-.246	.086	.010	.881
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<u>.779</u>	-.192	-.044	.024	.246	.707
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<u>.907</u>	-.140	-.154	-.090	-.051	.876
MgO	.276	-.544	<u>.520</u>	-.165	.201	.711
Na <sub>2</sub> O	<u>.698</u>	-.223	-.321	.219	-.145	.709
K <sub>2</sub> O	<u>.732</u>	-.110	.073	<u>.497</u>	.131	.817
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	.330	<u>.624</u>	-.215	-.131	<u>.406</u>	.727
CaCO <sub>3</sub>	<u>-.797</u>	.033	<u>.340</u>	-.141	.052	.774
Corg	.141	<u>.731</u>	-.303	-.399	.168	.833
Pb	<u>.468</u>	<u>.680</u>	-.027	.067	-.341	.804
Hg	.181	<u>.579</u>	-.068	-.161	<u>.542</u>	.691
Mn	<u>.601</u>	-.352	.098	-.192	-.302	.622
Cu	<u>.419</u>	<u>.485</u>	.238	-.009	-.201	.508
Zn	<u>.460</u>	<u>.649</u>	.147	.124	-.279	.747
Ni	<u>.638</u>	-.166	<u>.505</u>	-.459	.081	.908
Co	<u>.557</u>	-.052	.042	-.260	-.284	.463
Cr	<u>.425</u>	.025	<u>.554</u>	-.405	.132	.669
Cd	.060	<u>.389</u>	<u>.376</u>	<u>.497</u>	.162	.569
V	<u>.874</u>	-.098	.068	.216	.126	.841
Sr	<u>-.416</u>	.227	<u>.536</u>	<u>.522</u>	.047	.786
Ba	.090	<u>.670</u>	.113	.016	-.018	.470
B	<u>.677</u>	-.262	.063	.266	.281	.681
Ag	.339	<u>.437</u>	.330	-.036	-.308	.510
Variance exprimée	32.68	16.85	8.42	7.38	5.56	



### 3. Localisation géographique des contaminations

Les figures la à lg schématisent la répartition des polluants majeurs dans les rivières étudiées. Le diamètre des cercles est une fonction logarithmique du rapport valeur observée/teneur naturelle, et seuls les points présentant des teneurs supérieures à 2 fois la teneur naturelle sont figurés en noir :

- La Venoge présente à nouveau de fortes contaminations (Hg, Cd, Cu, Pb, Zn) à l'aval de Cossonay. La Zone industrielle de Cossonay et la station d'épuration et d'incinération de Penthaz en sont probablement à l'origine.
- La Chamberonne, le petit Flon et le Flon drainent l'agglomération industrielle de Renens et de Lausanne. On y observe aussi une pollution polymétallique qui s'accroît à l'aval de la Chamberonne.
- Sur l'Aubonne, on constate à nouveau une pollution mercurielle immédiatement à l'aval de Lavigny (égoût).
- Sur la Serine, affluent de la Promenthouse, se précise une pollution polymétallique (Hg, Cd, Cu, Zn, Pb) liée à de fortes concentrations en matière organique. Les deux points les plus contaminés de ce ruisseau correspondent à des embouchures d'égoûts.
- Le Vengeron et son affluent le Gobé présentent une forte contamination en mercure et en cadmium. La pollution par le cadmium se marque surtout en aval de la station d'épuration située sur le Vengeron. Le mercure semble d'origine différente et la teneur la plus haute a été relevée sur un petit bras faisant frontière avec la France.
- La pollution de l'Aire par le mercure est aussi importante, surtout en aval de St Julien.
- L'Arve se caractérise par des teneurs en cadmium très élevées. Cette pollution d'origine française se répercute dans le Rhône aval avec une superposition des rejets de la station d'épuration de Genève.
- La Seimax, affluent de l'Arve présente une pollution polymétallique qui s'accroît à l'aval.
- Enfin, la pollution par le chrome est toujours aussi énigmatique et n'affecte que les affluents de la rive droite du Petit Lac.

### 4. Comparaison des associations géochimiques de quelques rivières

Comme le montrent les cartes de répartition des polluants, certaines rivières présentent des contaminations caractérisées par des métaux lourds. C'est ainsi, en particulier, que des contaminations importantes détectées dans les sédiments de quatre rivières sont le cadmium pour l'Arve, le mercure pour l'Aire, le mercure et le cadmium pour le Vengeron et une association polymétallique pour la Venoge.

Les données géochimiques relatives à chaque rivière ont été soumises à une analyse statistique (multidimensional scaling) permettant de mettre en évidence les interactions entre les différents métaux lourds et les composants majeurs du sédiment.

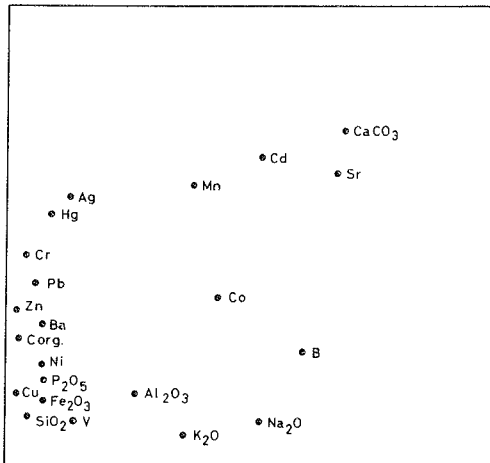
Les résultats de cette analyse sont représentés sous forme graphique à la fig. 2. Dans ce type de configuration, la distance séparant les éléments les uns des autres est une mesure de leur degré d'association (au sens statistique du terme) dans la rivière étudiée : la juxtaposition de deux ou plusieurs éléments indique qu'ils sont fortement corrélés, tandis que l'éloignement de deux éléments ou de deux groupes d'éléments traduit l'absence de relation ou des corrélations négatives.

Les sédiments de l'Arve sont caractérisés par deux pôles importants :

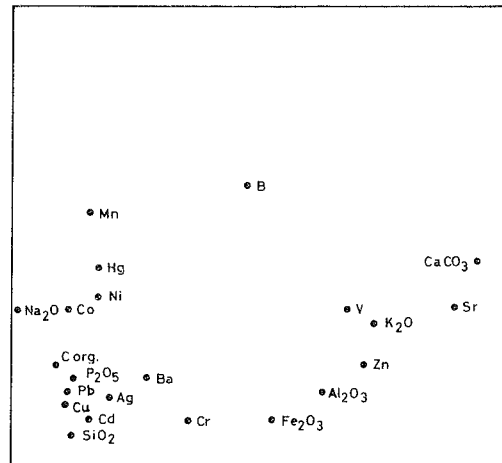
- L'association cadmium-strontium-carbonates, déjà pressentie lors de l'analyse factorielle globale. L'origine de ces rejets n'a pas pu être précisée mais la formation de carbonate de cadmium a été signalée dans des cours d'eau très pollués par FORSTNER et MULLER (1974)<sup>1)</sup>.
- La plupart des autres métaux lourds (Hg, Ag, Cr, Zn, Ba, Ni, Cu) sont liés à la matière organique et aux minéraux argileux.

1) FORSTNER, U., MULLER, G. (1974) *Schweermetalle in Flüssen und Seen als Ausdruck der Umweltverschmutzung*. Springer Verlag, Berlin.

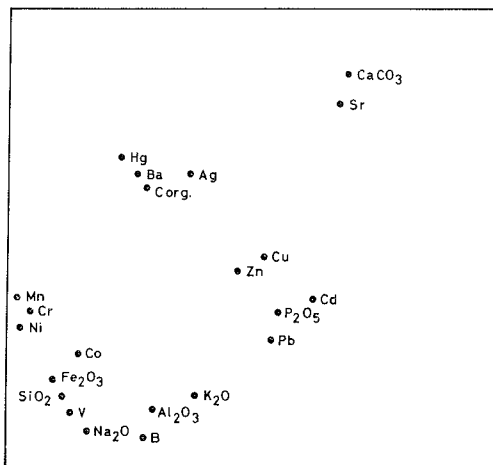
## ARVE et affluents



## AIRE



## VENGERON



## VENOGE

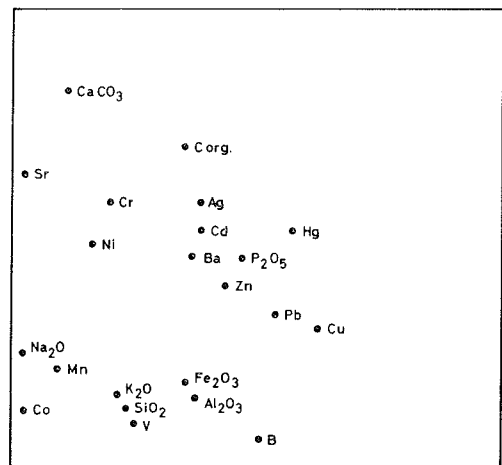


Fig. 2

Pour les sédiments de l'Aire, on note une forte association entre Pb, Cu, Ag, Ba, Cd, Co, Ni, Hg, la matière organique et le phosphore. La position intermédiaire de certains éléments (Cd, Ba, Cr) entre la matière organique et les oxydes constitutifs des argiles indique que ces éléments sont ubiquistes. Par contre, la position excentrique du mercure montre qu'il n'est, dans cette rivière, fixé qu'à la matière organique.

Le diagramme relatif aux sédiments du Vengeron met en évidence l'existence de quatre pôles distincts dont deux rassemblent la plupart des métaux lourds :

- un pôle mercure, argent, baryum, matière organique;
- un pôle zinc, cuivre, cadmium, plomb, phosphore.

La distance séparant ces deux groupes d'éléments (notamment le phosphore du carbone organique) prouve que le phosphore se trouve sous une forme inorganique (orthophosphates ?) et renforce l'idée que la pollution du Vengeron est due à deux sources de contamination distinctes dont l'une est la STEP et l'autre provient de la France voisine.

L'association de certains métaux lourds à des formes inorganiques du phosphore confirme qu'il s'agit des rejets de la station d'épuration. La faible contamination des argiles laisse penser que les polluants sont déjà fixés à un "support" autre que les minéraux argileux, lors du rejet.

Enfin, les associations géochimiques caractéristiques de la Venoge présentent certaines analogies avec celles du Vengeron :

- La plupart des métaux lourds se regroupent autour du phosphore (Hg, Cd, Ba, Zn, Pb, Cu, Ag).
- La matière organique et surtout les argiles ne sont pas contaminées, ce qui semble indiquer que - comme précédemment - les métaux lourds rejetés se trouvent déjà combinés sous une forme relativement stable au phosphore au moment où ils pénètrent dans le milieu naturel.

5. Evolution des contaminations par le mercure et le cadmium de 1976 à 1977.  
Influence du débit sur les teneurs observées

	Nb. échant.		Mercure (ppb)		Cadmium (ppb)		Carbone organique %	
	1976	1977	1976	1977	1976	1977	1976	1977
CHAMBERONNE	11	13	236	283	1544	1699	2.7	3.0
FLON (LAUSANNE)	3	11	163	199	1510	720	3.5	2.6
VENOGE	18	23	448	202	2311	1313	4.4	2.4
AUBONNE	12	10	591	245	662	370	4.1	2.4
PROMENTHOUSE	14	16	222	174	651	741	3.7	3.7
VENGERON	4	11	742	1604	2162	2534	2.8	4.1

Table 3

La table 3 montre les variations des concentrations moyennes en mercure, cadmium 1) et matière organique des principales rivières de la côte suisse entre 1976 et 1977.

On constate une diminution du mercure et du cadmium dans l'Aubonne et la Venoge, une augmentation du mercure dans le Vengeron et une diminution du cadmium dans le Flon; la Chamberonne et la Promenthouse montrent des variations de faible amplitude.

Ces différences doivent être interprétées avec prudence et l'apparente diminution des concentrations moyennes de quelques rivières ne traduit pas forcément une diminution des rejets. En effet, ces variations semblent plutôt devoir être imputées aux fluctuations du débit des rivières dans les semaines qui précèdent l'échantillonnage : une augmentation du débit entraînant la remise en suspension et l'évacuation des particules fines fixant les polluants et peut-être le lessivage des éléments trace les moins solidement fixés.

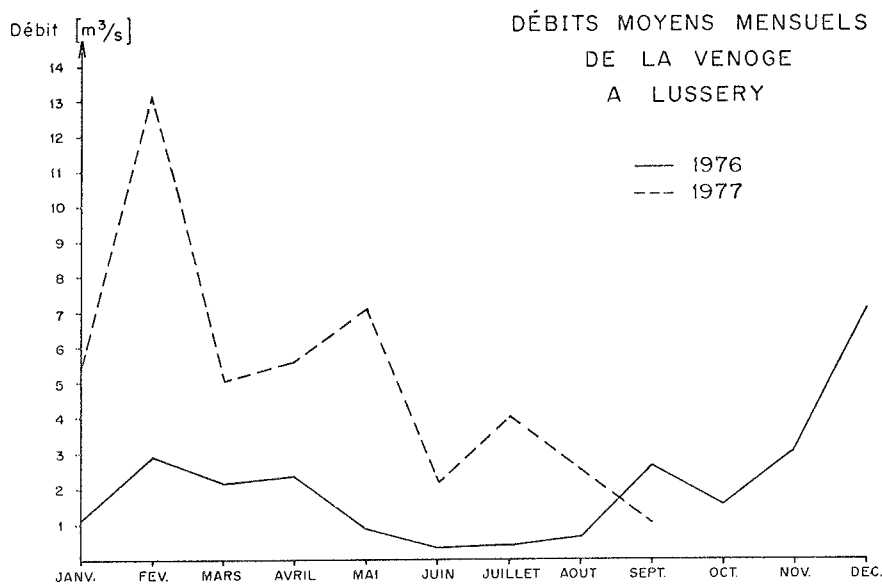


Fig. 3

1) La comparaison a été volontairement limitée à ces deux éléments du fait que les méthodes analytiques utilisées en 76 et 77 sont restées identiques.

Les courbes des débits de la Venoge mesurés à Lussery (fig. 3) incitent à la prudence et montrent que les forts débits du printemps pourraient être à l'origine de la diminution des concentrations en mercure et en cadmium observée sur cette rivière.

A défaut de pouvoir contrôler précisément les effets du régime hydrologique sur l'évolution et pour rendre néanmoins comparables les études effectuées sur plusieurs années, il semble judicieux d'échantillonner désormais en période d'étiage et dans un laps de temps très court.

## 6. Conclusions

- La plupart des pollutions identifiées en 1976 se confirment en 1977. Le mercure et le cadmium restent les polluants majeurs.
- Un meilleur échantillonnage des rivières du canton de Genève a permis de mettre en évidence :
  - 1) la contamination du Vengeron par deux sources distinctes;
  - 2) la pollution de l'Arve par le cadmium et de l'Aire par le mercure.
- L'étude des associations géochimiques combinées à l'étude des cartes de répartition géographique des pollutions permet une meilleure identification et localisation des sources de contamination. Par exemple, l'association phosphates/métaux lourds bien caractéristique des rejets de STEP.
- Les variations considérables du débit moyen des rivières entre 76 et 77 rendent les comparaisons délicates et ne permettent pas, dans un temps d'étude aussi restreint, de préciser si la situation s'est aggravée ou améliorée. Une étude plus détaillée est actuellement en cours pour mieux cerner les relations entre le débit et l'évolution des contaminations.

---

## FIGURES 1a à 1g des pages 165 - 178

Le diamètre des cercles est une fonction logarithmique du rapport " concentration observée / teneur naturelle ". Seuls les points présentant des teneurs supérieures à deux fois la teneur naturelle ont été figurés en noir.

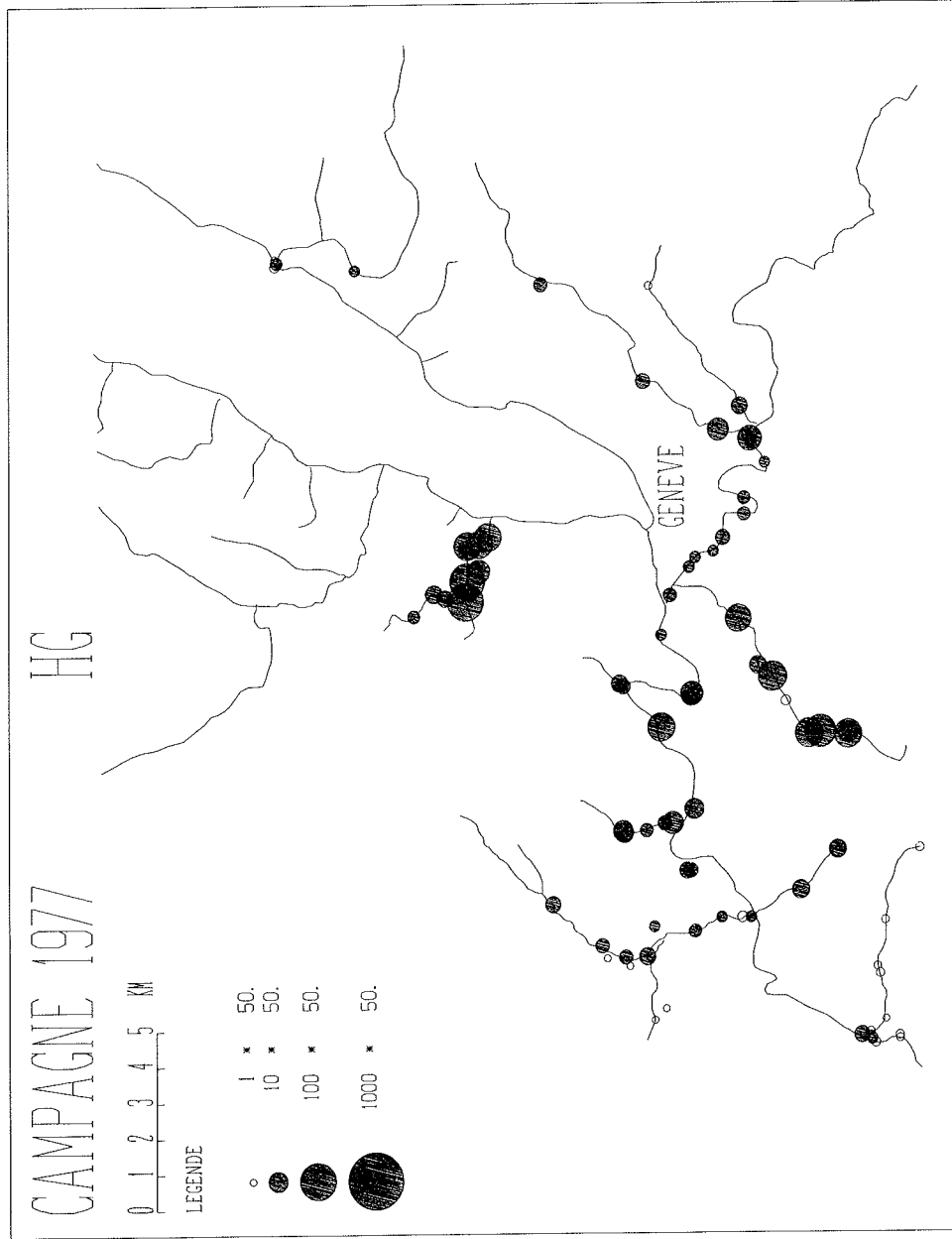


Fig. 1a

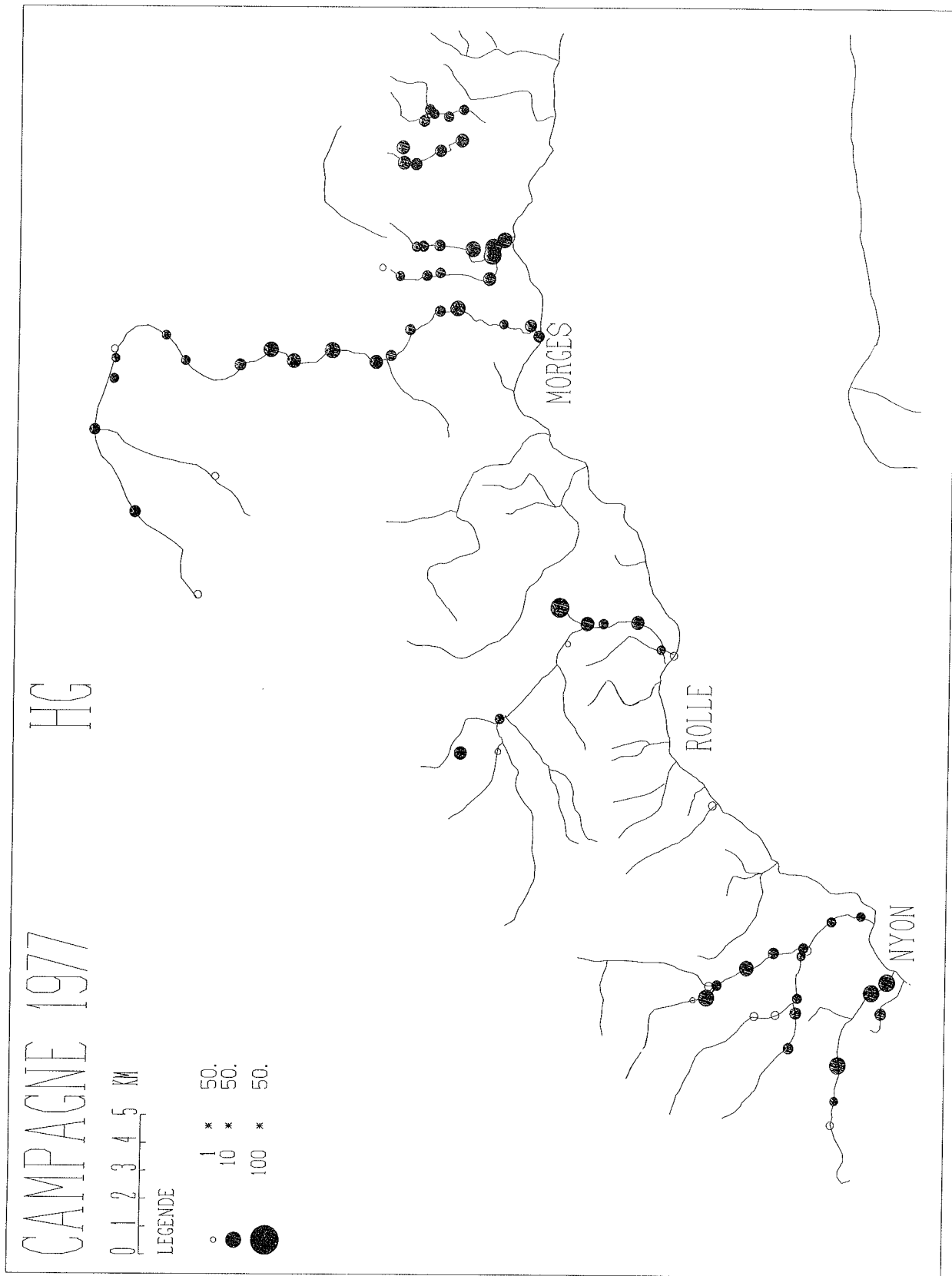


Fig. 1 a a

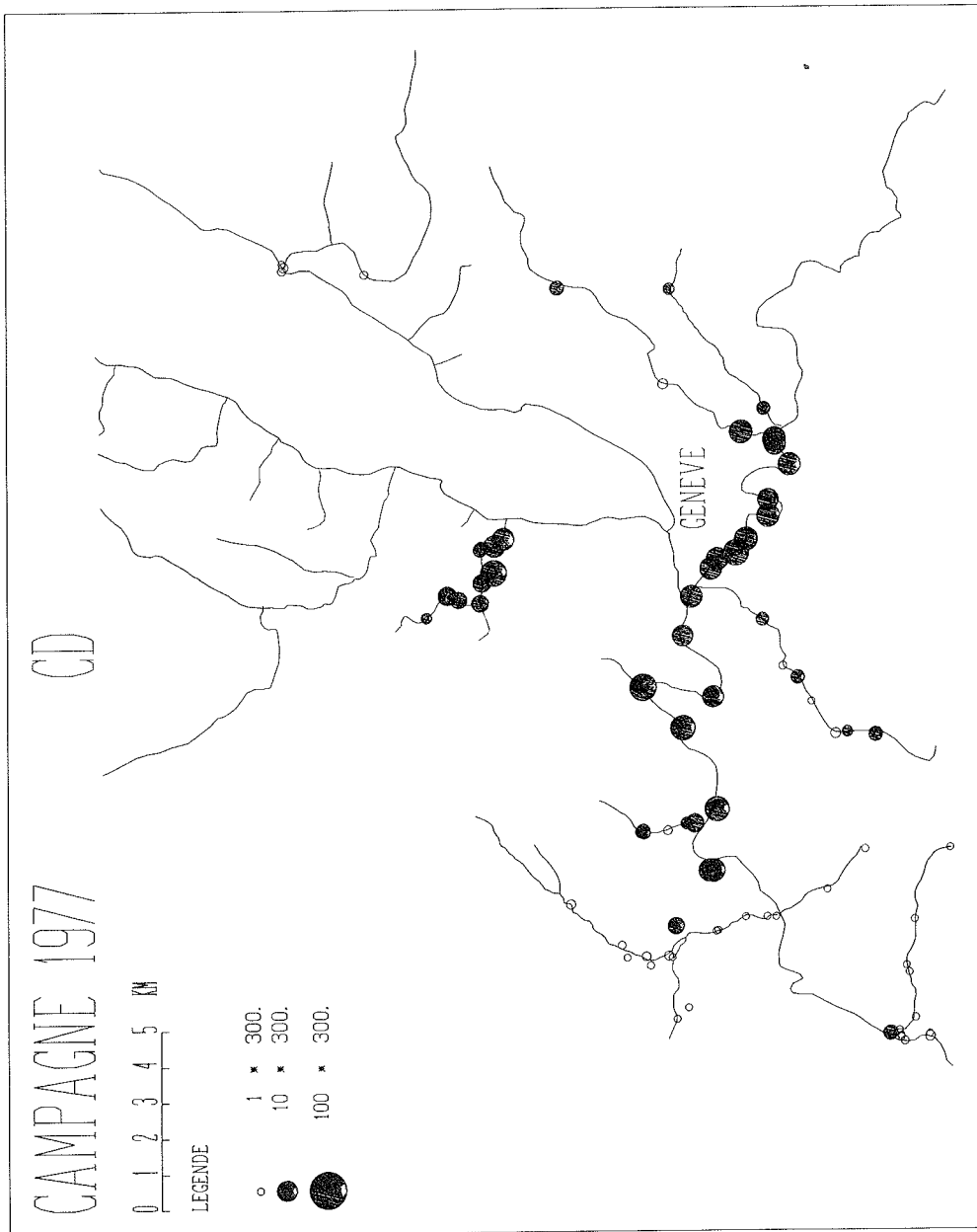
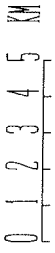


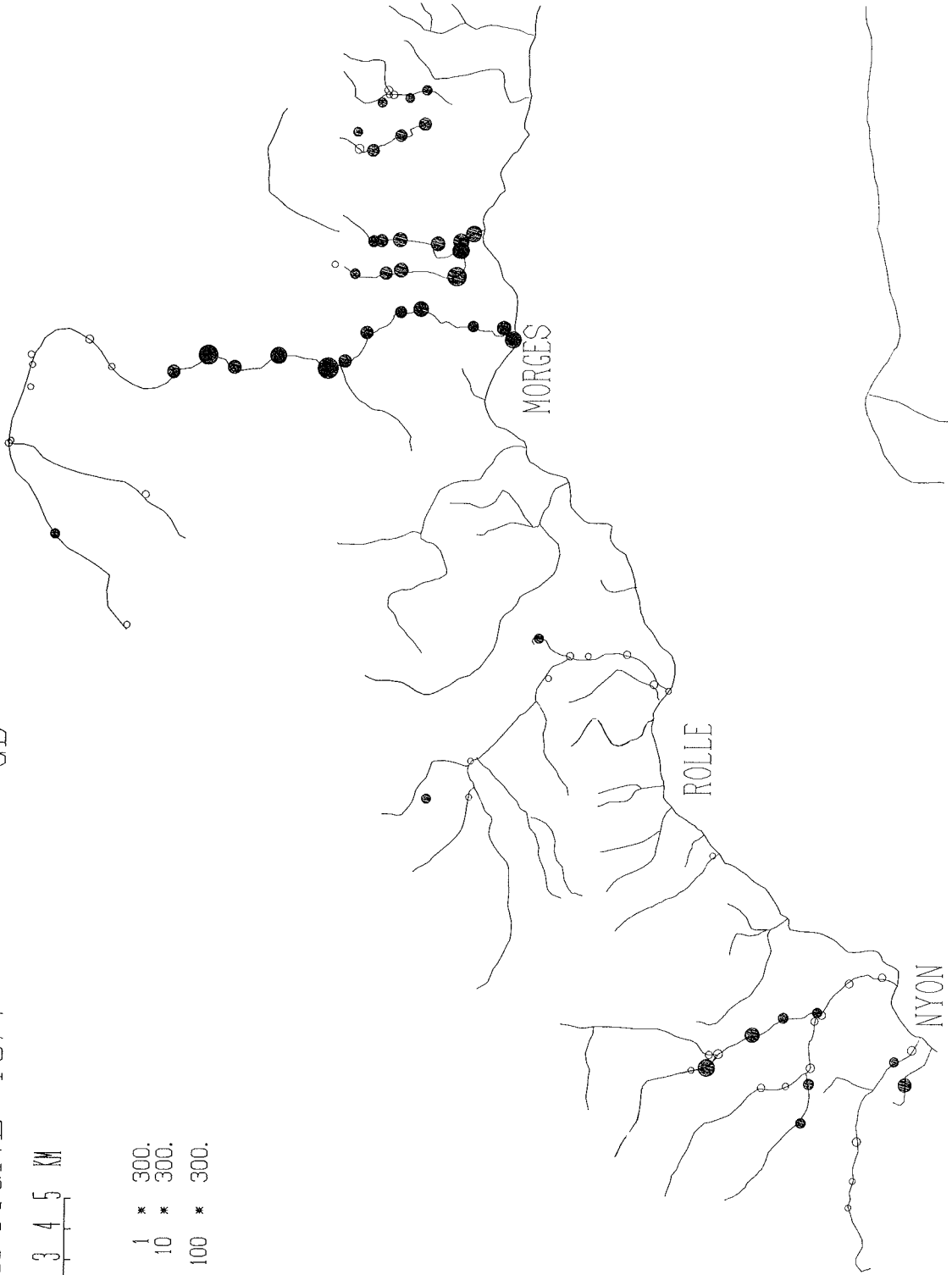
Fig. 1b

# CAMPAGNE 1977 CD



LEGENDE

- 1 \*
- 10 \*
- 100 \*
- 300.
- 300.
- 300.





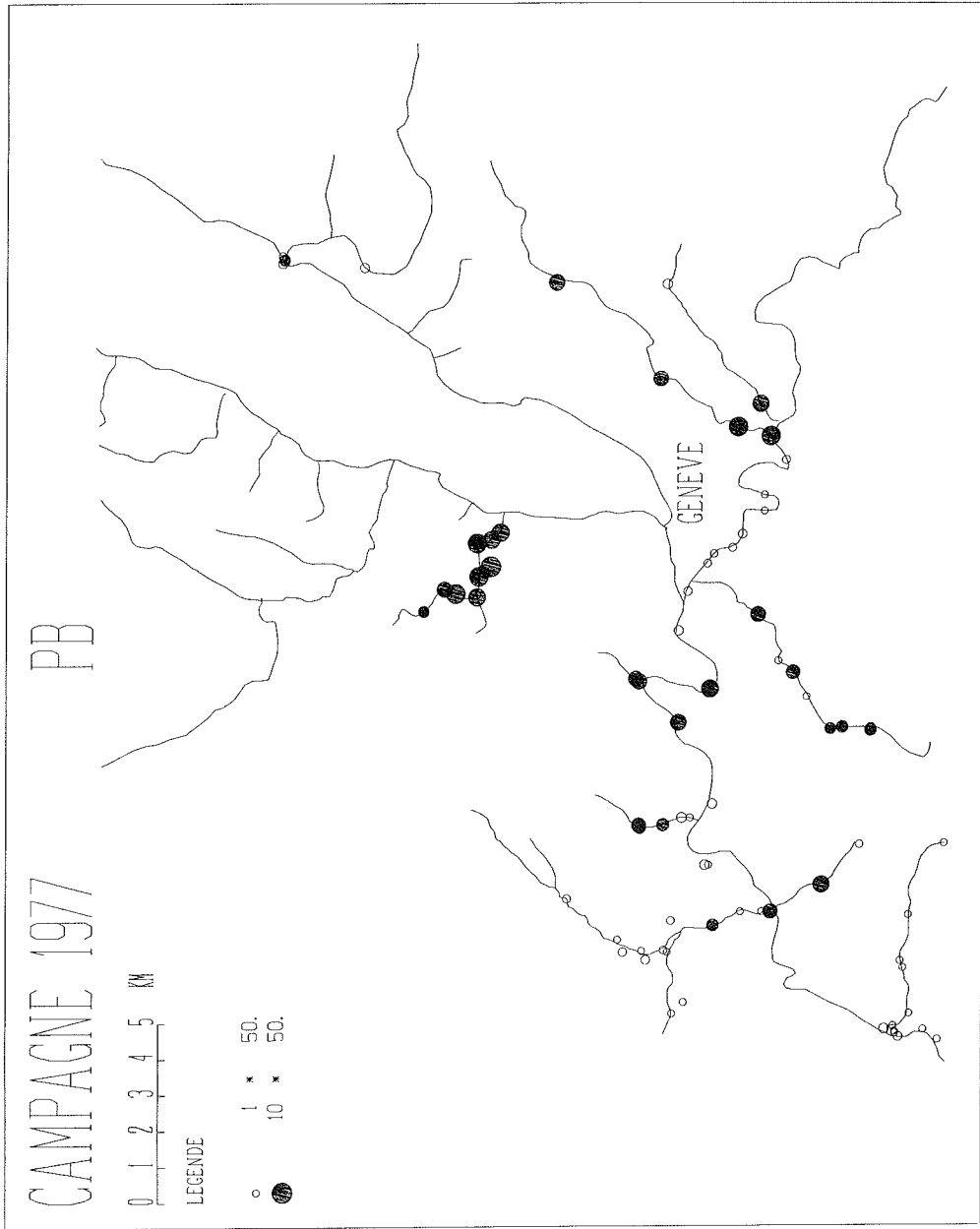


Fig. 1 c

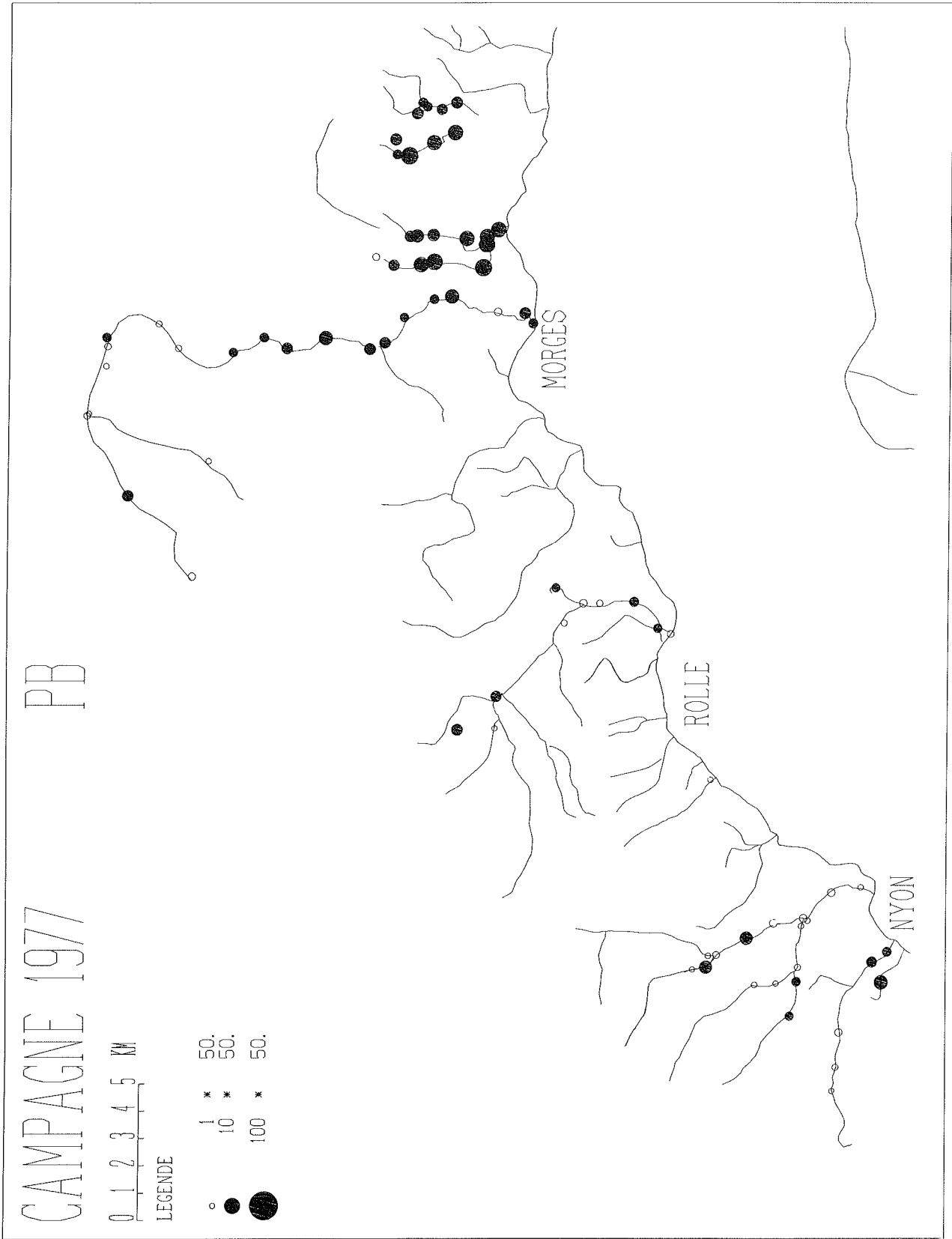


Fig. 1 c c

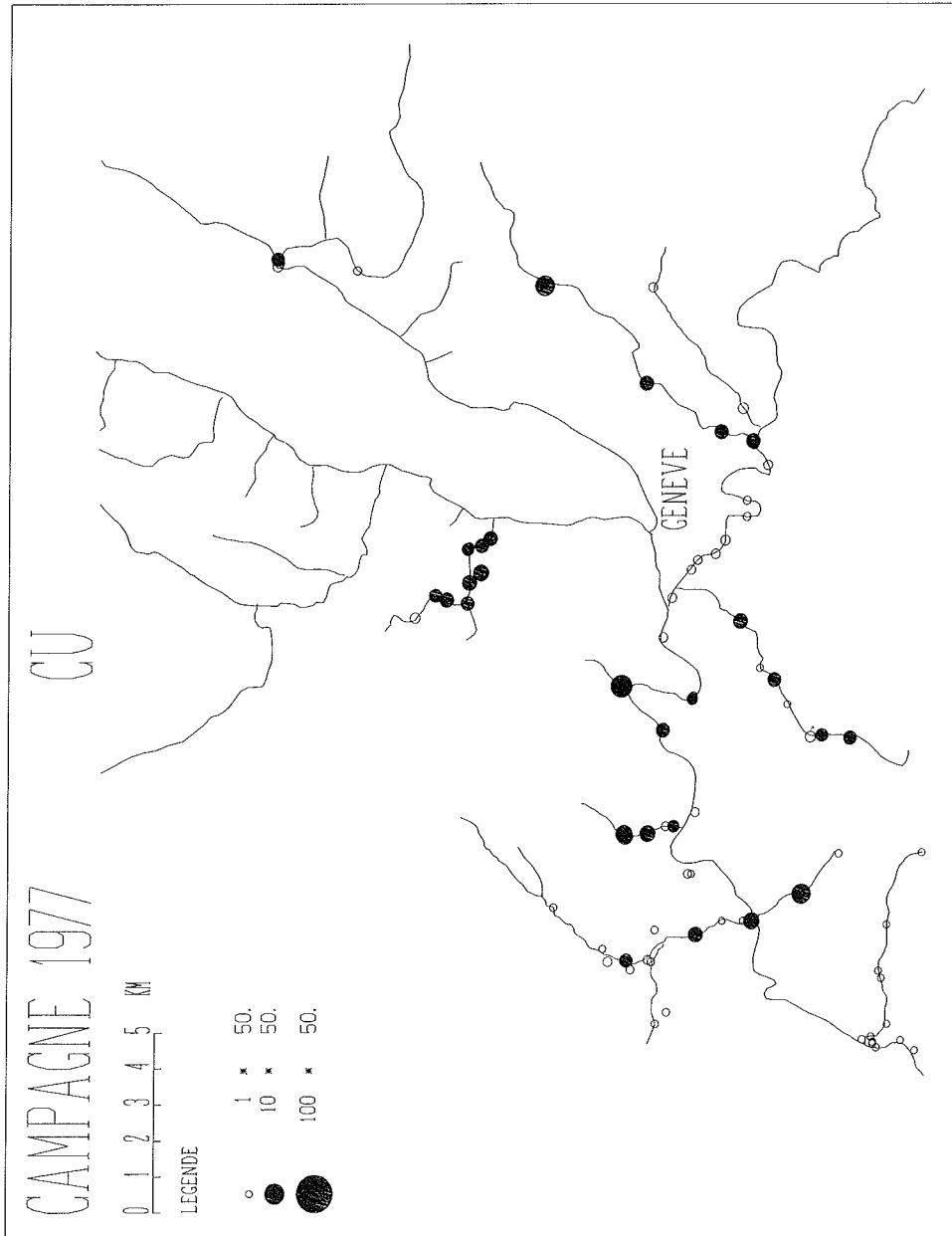


Fig. 1 d

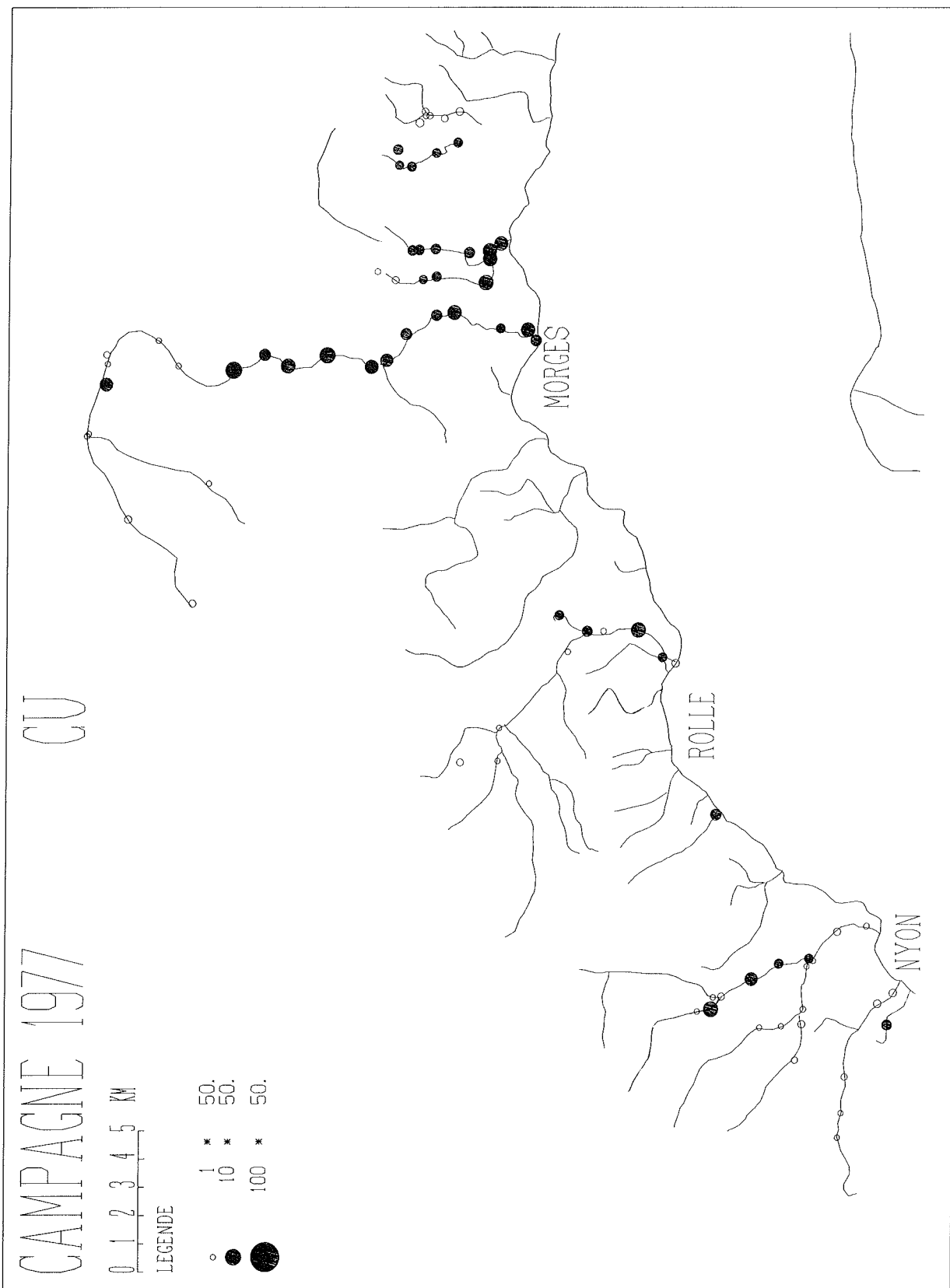


Fig. 1 d d

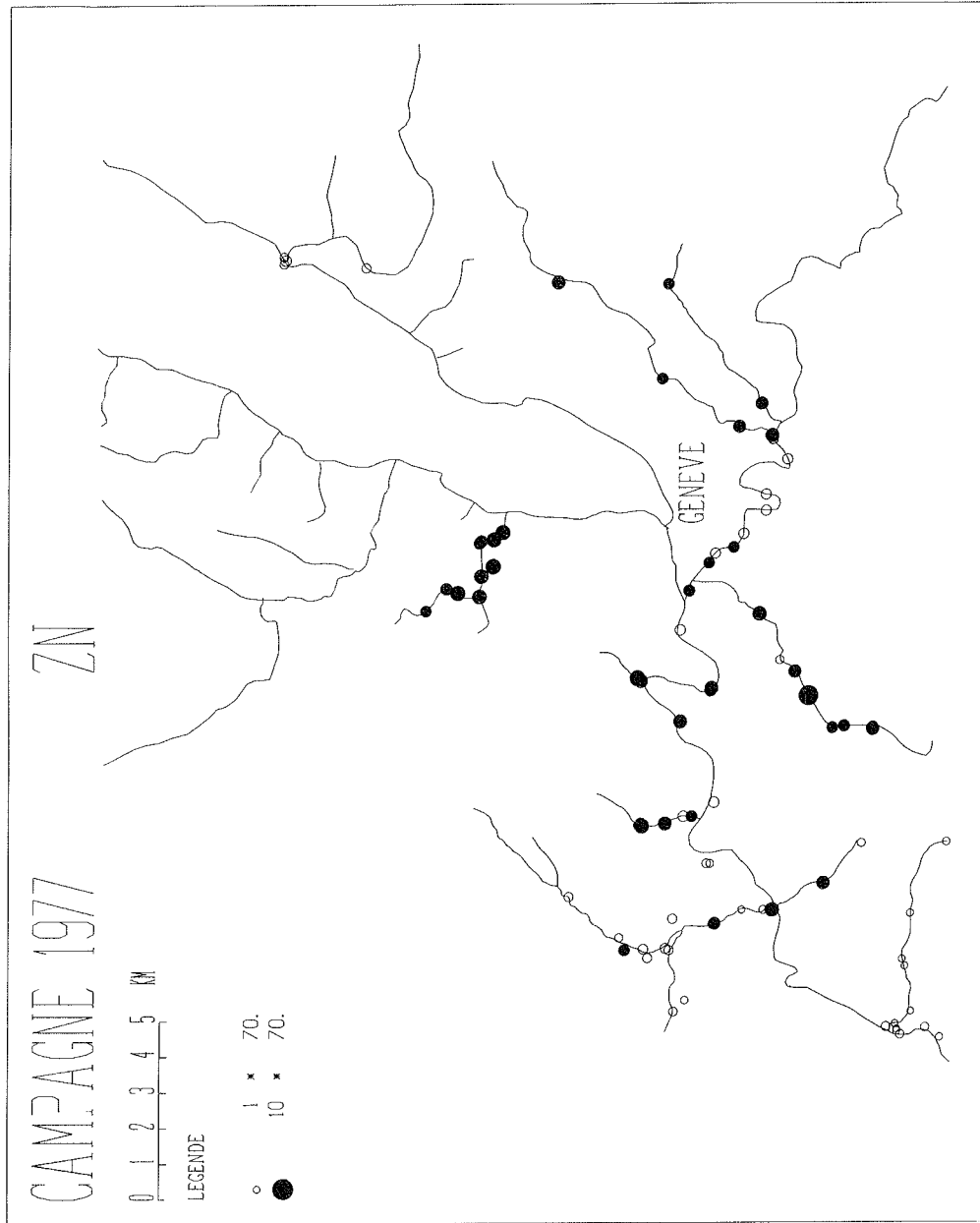


Fig. 1 e

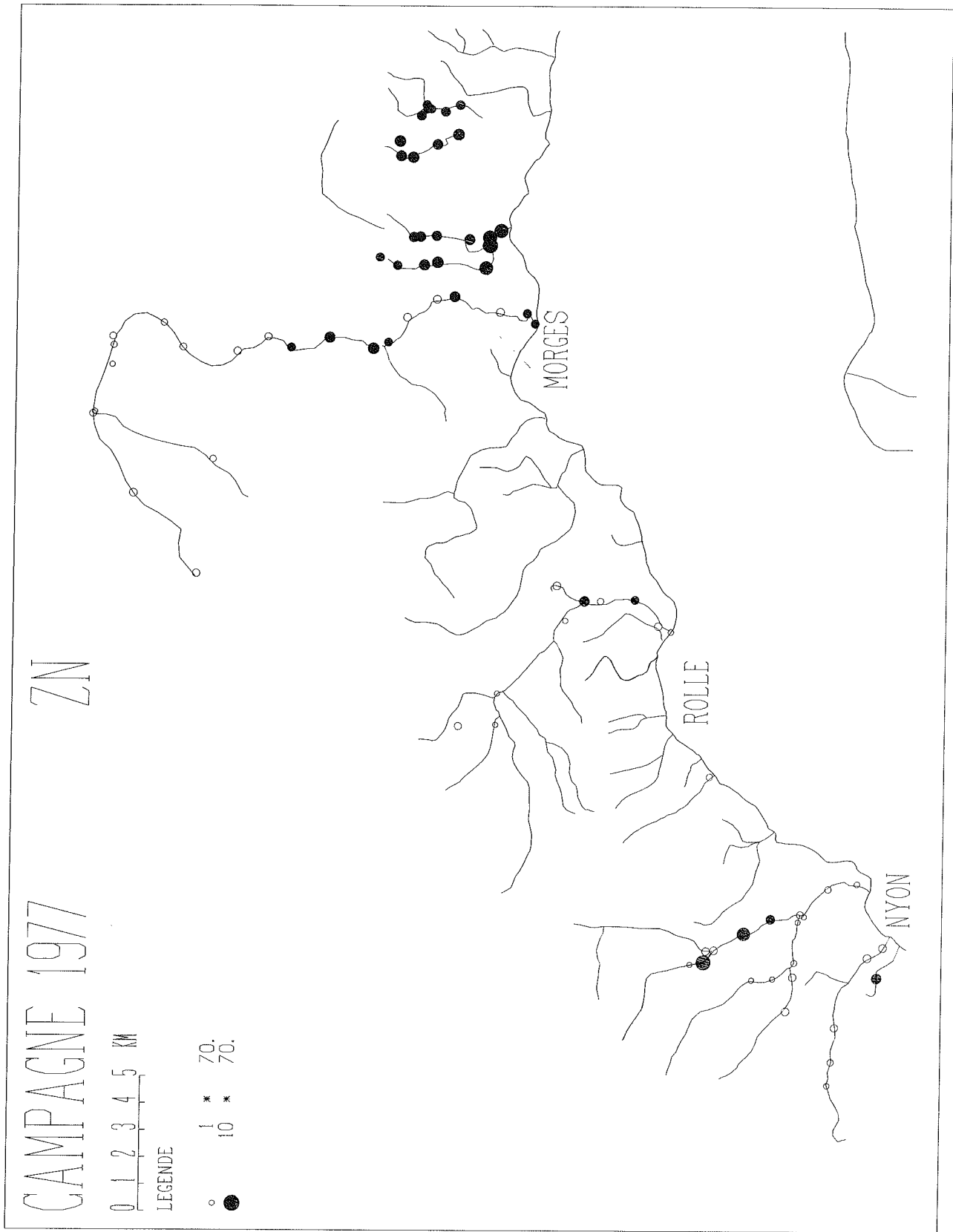


Fig. 1 e e

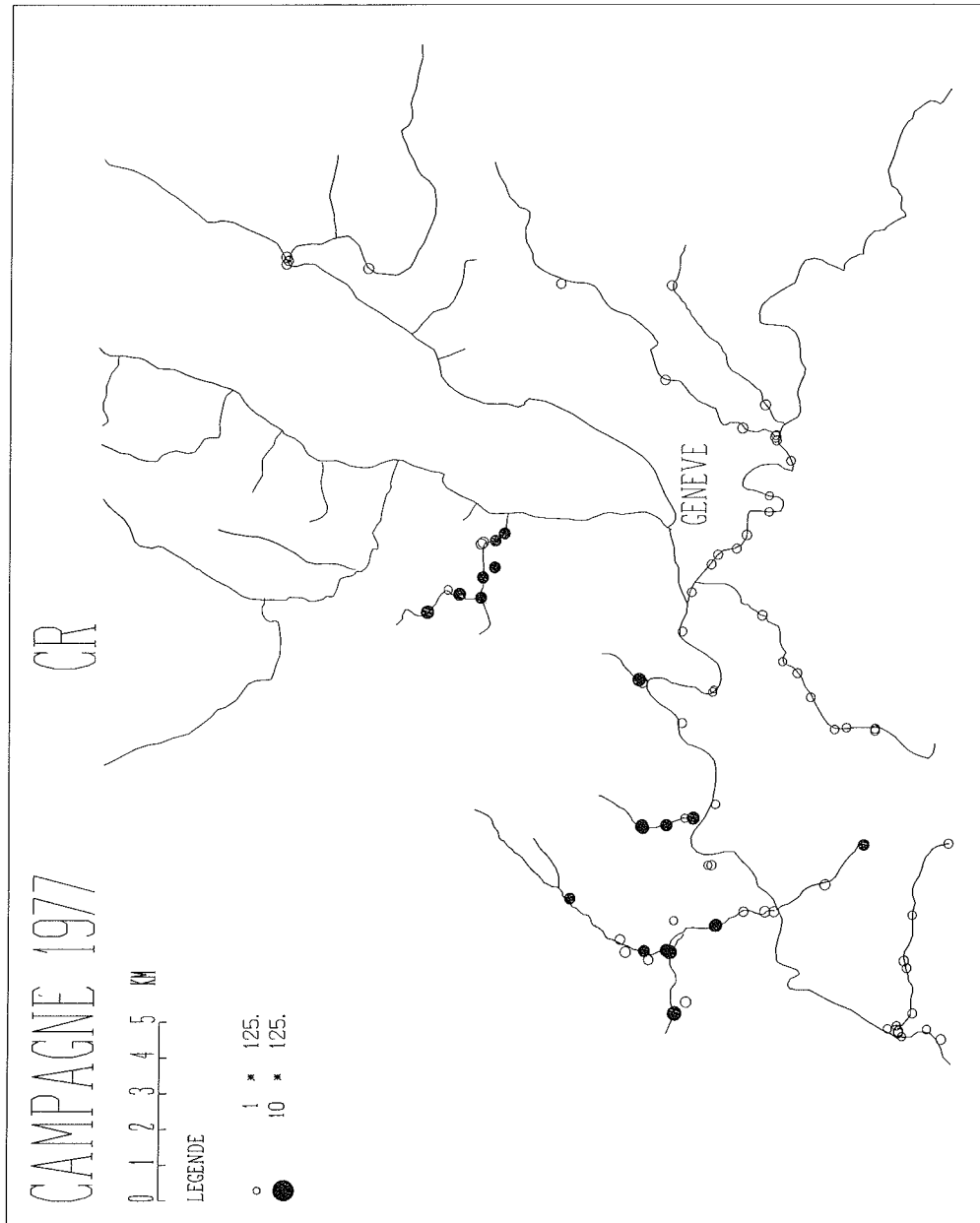


Fig. 1 f

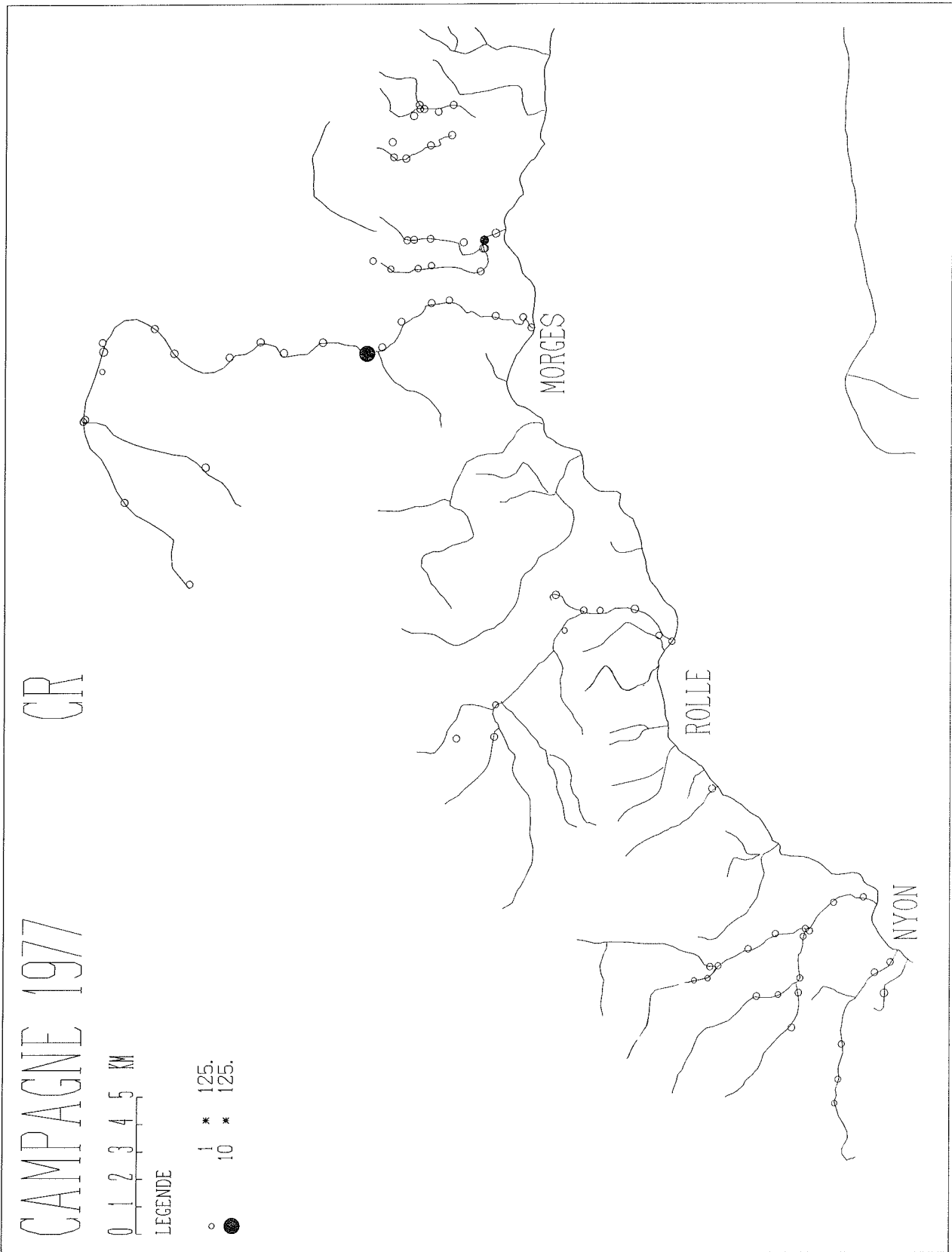


Fig. 1 f f



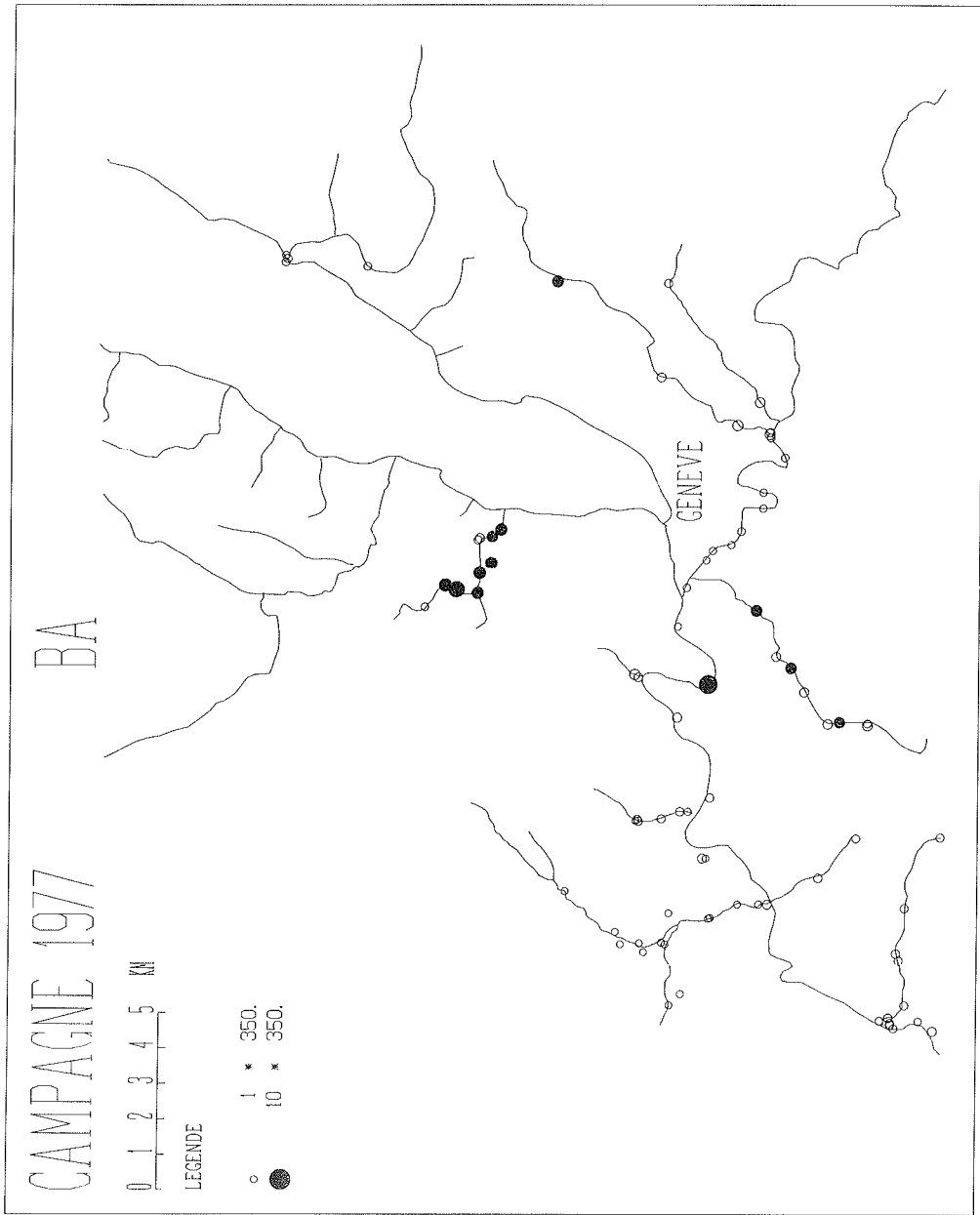


Fig. 19

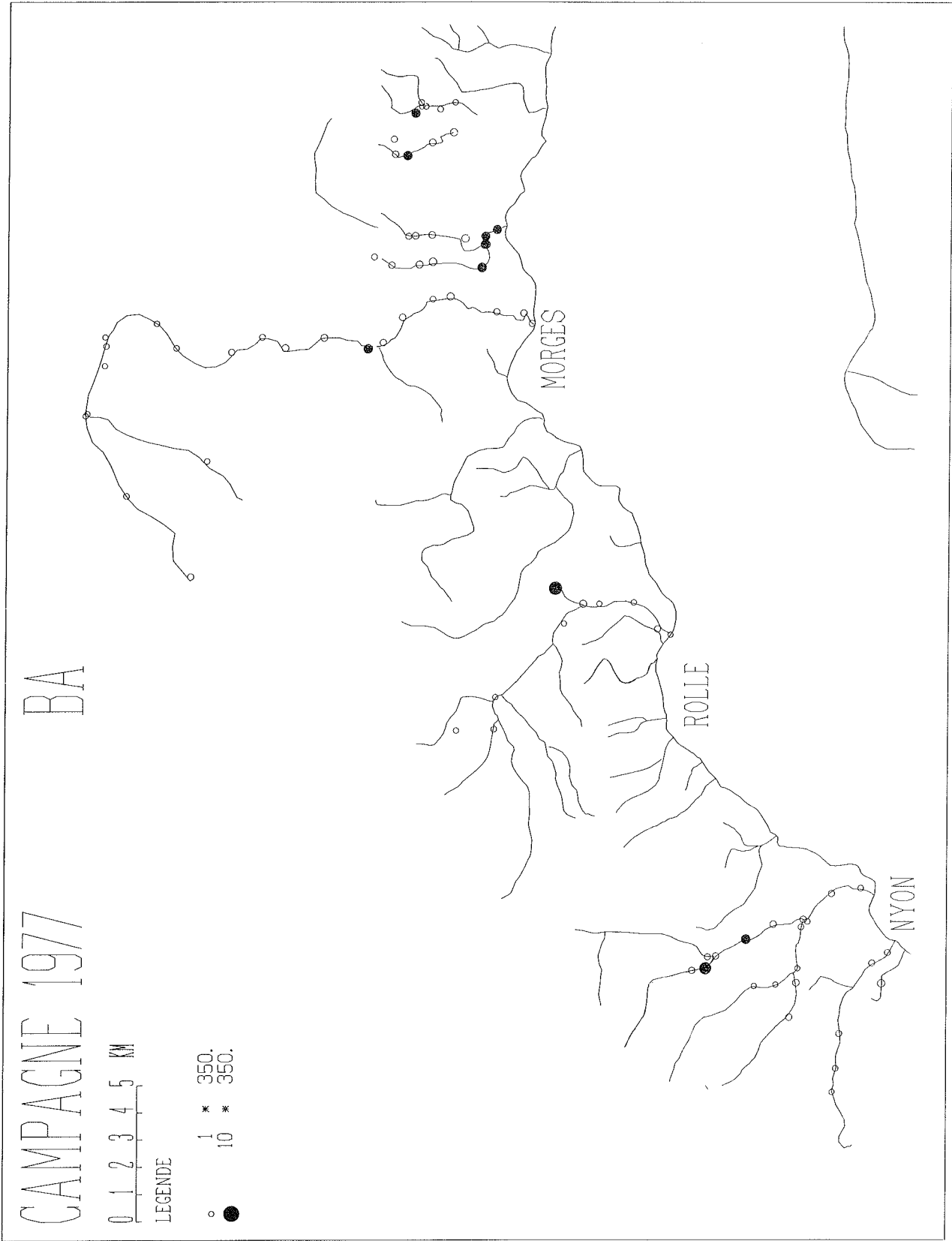


Fig. 1 g g