

Secrétariat d'État chargé de l'Environnement et de la Qualité de la Vie
Mission des Études et de la Recherche Comité «Sols et Déchets Solides»
14, Boulevard du Général Leclerc - 92524 NEUILLY-SUR-SEINE Cedex

ESTIMATION DU FOND GÉOCHIMIQUE NATUREL DANS LES SOLS ET ÉVALUATION DU NIVEAU DE POLLUTIONS DUES AUX ACTIVITÉS HUMAINES : CAS DU BASSIN VERSANT DE L'ORNE, AFFLUENT DE LA MOSELLE

par

Denis BONNEFOY et Alain BOURG



Bureau de Recherches Géologiques et Minières

Service Géologique National

Département Gîtes Minéraux

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

Mars 1984

Rapport du B.R.G.M.

84 SGN 169 GMX

*Rapport final
Étude SDS 81-241*

S O M M A I R E

	Pages
Avant-propos	i
Résumé	ii
Abstract	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	v
I - <u>INTRODUCTION</u>	1
II - <u>DESCRIPTION DU SITE ETUDIE : CADRES GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE</u>	2
III - <u>MATERIAUX ET METHODES</u>	5
III.1. Prélèvement des échantillons	5
III.2. Préparation et analyse	5
III.3. Traitement des données	6
IV - <u>RESULTATS ET DISCUSSION</u>	7
IV.1. Résultats analytiques	7
IV.2. Traitement statistique de l'ensemble des données	7
IV.3. Estimation des fonds géochimiques régionaux	20
IV.4. La rivière Orne	22
IV.5. Le bassin versant de l'Orne	27
V - <u>CONCLUSIONS</u>	49
Références	50
Annexe 1 : Techniques de traitement des données géochimiques	
Annexe 2 : Résultats analytiques	
Annexe 3 : Planche 1 : Plan de positionnement des échantillons.	

AVANT - P R O P O S

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une action concertée avec le Secrétariat d'Etat chargé de l'Environnement et de la Qualité de la Vie (Convention BRGM-SEEQV n° 81-396 correspondant au projet accepté par le Comité Sols-Déchets-Solides sous le n° SDS 81-241).

ESTIMATION DU FOND GEOCHIMIQUE NATUREL DANS LES SOLS
ET EVALUATION DU NIVEAU DE POLLUTIONS DUES AUX ACTIVITES HUMAINES :
CAS DU BASSIN VERSANT DE L'ORNE, AFFLUENT DE LA MOSELLE

par

Denis BONNEFOY et Alain BOURG

84 SGN 169 GMX

Convention BRGM-SEEQV 81-396

R E S U M E

L'étude, selon une technique classique de prospection géochimique, des teneurs en éléments traces et de leurs associations dans les "stream-sédiments" et sols du bassin versant de l'Orne, affluent de la Moselle, a permis de :

1) déterminer les fonds géochimiques naturels de divers éléments (Si, Al, Fe, Mg, Ca, K, Ti, Mn, P, Li, B, V, Cr, Co, Ni, Cu, Pb, Zn, As, Sr, Y, Ba, La, Ce, W, Zr et F).

2) cartographier la contamination industrielle de la zone aval du bassin.

L'existence simultanée d'importantes minéralisations (liées au gisement de fer lorrain) et d'industries (sidérurgiques) dans un bassin encaissé rend délicate l'interprétation des associations entre éléments pour la discrimination de l'origine des fortes teneurs métalliques.

A B S T R A C T

Geochemical background and sources of contamination in the drainage basin of the Orne River, a tributary of the Moselle River (Lorraine, France)

An investigation of the chemical composition and of elemental associations in the soils and stream sediments of the drainage basin of the Orne River, a tributary of the Moselle River, is carried out using a classical procedure of geochemical prospection.

The values of the regional geochemical background are determined for many elements (Si, Al, Fe, Mg, Ca, K, Ti, Mn, Pb, Li, B, V, Cr, Co, Ni, Cu, Pb, Zn, As, Sr, Y, Ba, La, Ce, W, Zr and F).

The anthropogenic contamination of the lower part of the basin is evaluated. The simultaneous presence in a deep valley of important mineral deposits (iron of Lorraine) and industry (smelters) makes it difficult to use elemental associations to discriminate between these two possible sources of anomalous concentrations.

LISTE DES FIGURES

	Pages
1 - Situation géographique de l'étude	3
2 - Contexte géologique	3
3 - Contexte minier et industriel du site	4
4 - Histogrammes (sur l'ensemble des échantillons)	9
5 - Classification des échantillons	14
6 - Analyse factorielle (sur l'ensemble des échantillons)	16
7 - Analyse factorielle (échantillon non pollués)	21
8 - Teneurs dans les sédiments de berges de l'Orne	25
9 à 29 - Représentation des teneurs par classes	28-48

LISTE DES TABLEAUX

	<u>Pages</u>
1 - Paramètres statistiques élémentaires (ensemble des échantillons)	8
2 - Analyse factorielle en composantes principales (ensemble des échantillons)	15
3 - Matrice de corrélation (ensemble des échantillons)	17
4 - Paramètres statistiques élémentaires (échantillons non pollués)	18
5 - Fonds géochimiques du bassin versant de l'Orne	19
6 - Teneurs moyennes en éléments traces des argiles et carbonates	20
7 - Analyse factorielle en composantes principales (échantillons non pollués)	23
8 - Matrice de corrélation (échantillons non pollués)	24

I - INTRODUCTION

L'analyse des métaux dans les sédiments de rivière et les sols est un procédé classique de prospection minière. Afin de mieux détecter les anomalies éventuelles, les échantillons sont généralement prélevés dans les affluents plutôt que dans le collecteur principal. Ainsi, non seulement la localisation est-elle plus précise, mais l'identification est plus facile grâce à l'absence de dilution par des sédiments originaires de zones (bassins versants) non anormales.

Un inventaire géochimique, à finalité métallogénique, est en cours de réalisation sur le territoire français métropolitain. Cet inventaire, bien que national, se limite aux zones les plus favorables géologiquement à l'existence de gisements métallifères, c'est-à-dire les massifs cristallins (et plus particulièrement leurs bordures).

La campagne de prospection géochimique réalisée dans le cadre de cet Inventaire National, complétée par une étude ultérieure couvrant les zones intentionnellement non échantillonnées (par exemple : collecteur principal, zones au voisinage de sources évidentes de contamination) a permis de déterminer dans les bassins versants de la Thur et de la Doller (Haut Rhin) des critères de discrimination des teneurs élevées en éléments en trace toxiques, entre anomalies d'origine naturelle (géologique) et pollutions d'origine industrielle (BONNEFOY, 1980).

Le présent travail a pour objet l'étude, selon la méthodologie développée pour la prospection géochimique, d'une zone sédimentaire non couverte par cet inventaire, le bassin versant de l'Orne, un affluent de la Moselle. Il s'agit ainsi, sur une zone de géologie différente de celle de la Thur et de la Doller, de déterminer les fonds géochimiques et d'utiliser les associations d'éléments chimiques pour essayer de faire une discrimination au niveau de l'origine des fortes teneurs en métaux toxiques, entre les activités industrielles et les paragenèses minérales naturelles.

II - DESCRIPTION DU SITE ETUDIE : CADRES GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

L'Orne, affluent de la Moselle, traverse les départements de la Meuse, de la Meurthe-et-Moselle et de la Moselle tout au long de ses 70 km (cartes topographiques I.G.N. au 1/50 000 : feuilles de Briey et Uckange, et au 1/100 000 : feuille de Nancy-Metz-Luxembourg) (figure 1). Issue des Hauts de Meuse, dans le Jurassique supérieur, l'Orne forme avec ses affluents un réseau hydrographique long et ramifié, mais peu développé en largeur. Son bassin versant se divise en deux zones bien distinctes (figure 2). En amont il traverse les formes molles et moutonnées par l'érosion des plaines marneuses et d'un plateau marno-calcaire du Bajocien supérieur. C'est un pays agricole, à vallées marécageuses souvent occupées par des étangs. En aval (de Jarny), les cours d'eau s'enfoncent dans des vallées étroites en zone calcaire (cartes géologiques au 1/50 000 : feuilles de Briey et Etain, et au 1/80 000 : feuille de Metz). C'est une zone au sous-sol riche en minette (minerai de fer lié au niveau ferrugineux Aalénien), qui traverse de nombreuses concessions minières (figure 3). Une vingtaine de mines ont été recensées dans le bassin versant de l'Orne. Cette richesse naturelle s'est traduite par le développement d'une importante activité sidérurgique, et même industrielle au sens large du terme, avec pour conséquence la production de rejets (on y trouve en particulier plusieurs crassiers).

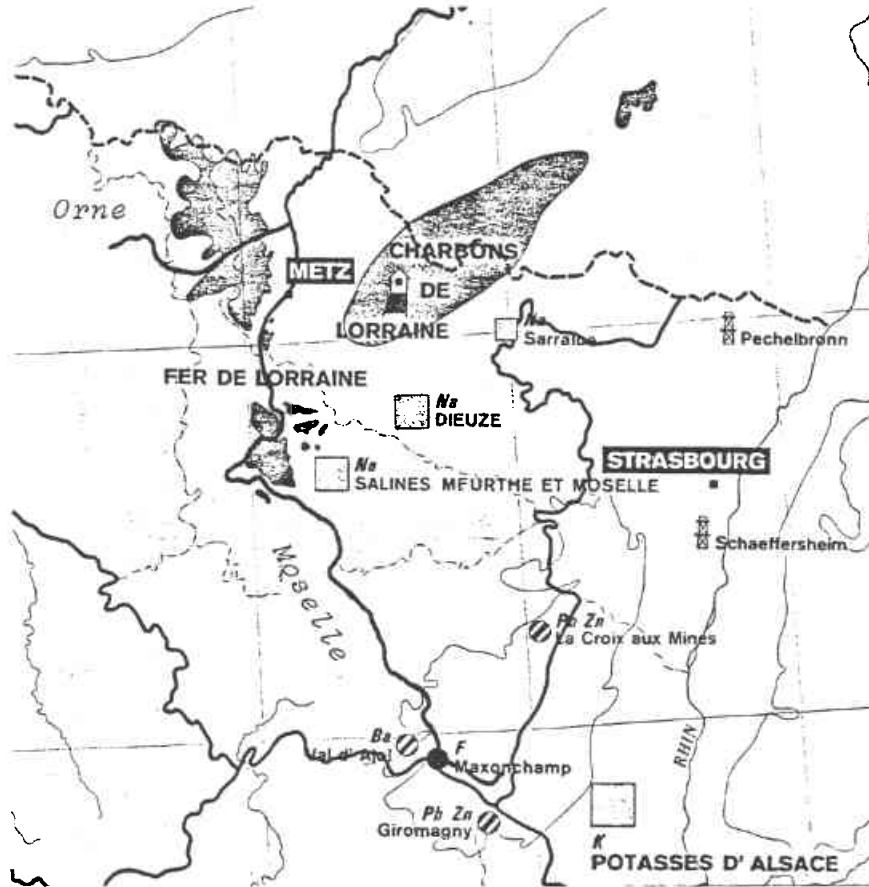


Figure 1 - Situation géographique du bassin versant (échelle : 1/1 500 000)

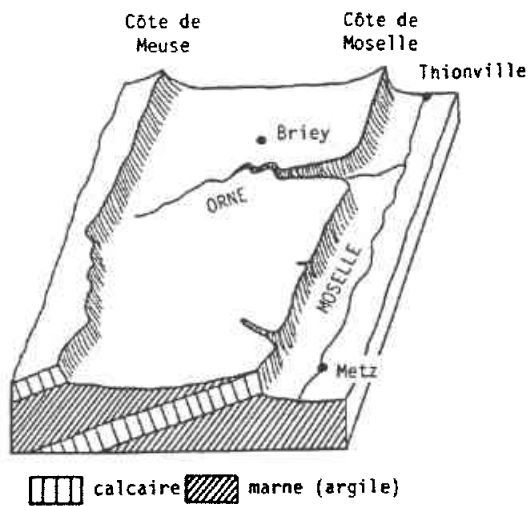


Figure 2 - Contexte géologique du bassin versant

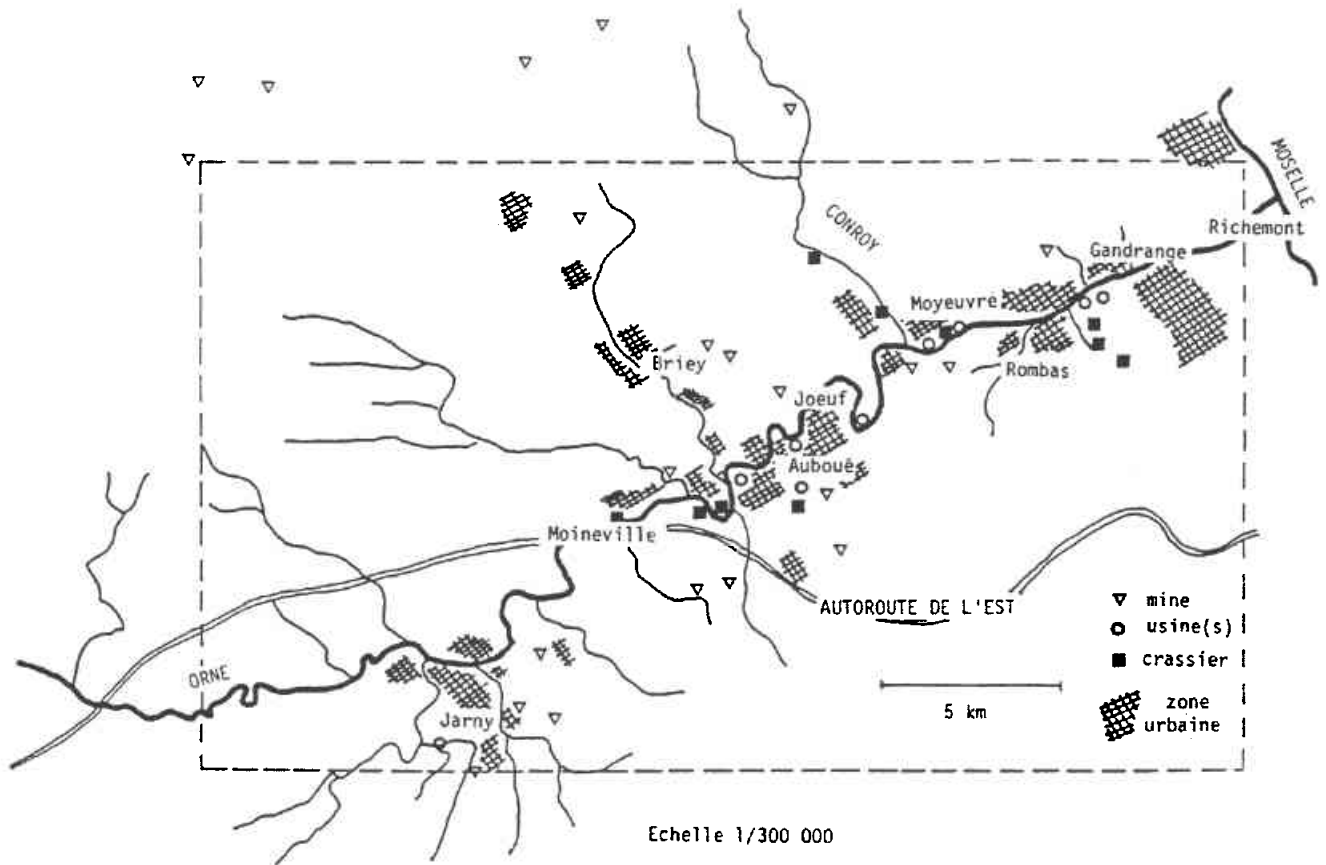


Figure 3 - Contexte minier et industriel du bassin versant

III - MATERIAUX ET METHODES

III.1. Prélèvement des échantillons (voir leur situation sur la planche 1 en annexe 3).

162 échantillons (numérotés de 1 à 162) ont été prélevés dans le bassin versant de l'Orne, au cours de l'automne 1981. Il s'agit de sédiments de ruisseau et de sols, sélectionnés en fonction de leur représentativité, soit du fond naturel, soit de sources potentielles de pollution. Les sols ont été prélevés à une profondeur d'environ 20 à 30 cm. La matière organique, qui constituait la majeure partie des prélèvements, a été éliminée. Les échantillons ramassés le long de l'Orne sont généralement d'une granulométrie très fine (vases). La zone de l'étude représente approximativement 200 km², ce qui correspond à une densité de prélèvement de 1,2 kilomètre carré par échantillon.

III.2. Préparation et analyse

Les échantillons ont été séchés à basse température (40°C). La présente étude ayant pour but ultime une application des techniques utilisées pour l'inventaire géochimique du territoire métropolitain aux problèmes de pollution industrielle, c'est la fraction granulométrique inférieure à 125 µm habituellement sélectionnée qui a été retenue pour l'analyse.

Trente quatre éléments ont été dosés simultanément par spectrométrie plasma à couplage inductif dans les 162 échantillons, après mise en solution par attaque totale : Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Mn, Ti (exprimés en SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, K₂O, MnO et TiO₂, respectivement), P, Li, Be, B, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Y, Nb, Zr, Mo, Ag, Cd, Sb, Ba, La, W, Pb et Bi. Des analyses complémentaires de Hg et F ont été réalisées sur 94 échantillons, par absorption atomique sans flamme pour le premier et par colorimétrie après pyrolyse pour le second.

Tous les éléments fournis par l'analyse multiélémentaire, plus spécifiquement adaptés à la prospection minière, n'ont pas le même intérêt pour les problèmes de pollution et de qualité d'environnement, mais comme nous le verrons plus loin la connaissance des teneurs en éléments habituellement non ou peu étudiés (tels Ag, As, Mo ou Sn) peut présenter un intérêt considérable.

III.3. Traitement des données (voir rappel des principes en annexe 1)

Les données analytiques (auxquelles ont été ajoutées les coordonnées géographiques des points de prélèvement) ont été stockées sur mémoire d'ordinateur. Leur traitement a été réalisé selon les programmes de statistique et de cartographie couramment utilisés en prospection géochimique au B.R.G.M. Brièvement, la synthèse de l'information disponible sur le bassin versant de l'Orne est fondée sur le calcul des histogrammes et des paramètres statistiques utilisés pour l'estimation des valeurs des fonds géochimiques et des seuils d'anomalies (moyenne des échantillons "naturels"), sur l'étude des matrices de corrélation, sur l'analyse multivariée par analyse factorielle et sur la classification ascendante hiérarchique, le tout facilitant la visualisation des principales associations d'éléments.

Un traitement cartographique informatique permet l'établissement de plans de positionnement, de visualisation géographique par classes de teneurs à noircissement variable et de tracés de profils.

IV - RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Résultats analytiques

Les résultats complets et les seuils de détection sont donnés dans l'annexe 2. Les valeurs obtenues sont en bon accord avec celles de l'étude menée en 1982 par NOURISSON (1983) sur les sédiments de trois stations sur l'Orne (Moineville, Rosselange et Richemont) (figure 3). Il n'est pas surprenant de noter que cet auteur a observé des teneurs en Zn, Cr, Cu, Pb et Cd plus élevées dans les particules en suspension que dans les sédiments de fond (pour les deux stations où ces paramètres ont été mesurés simultanément, soit Moineville et Richemont).

IV.2. Traitement statistique de l'ensemble des données

IV.2.1. Paramètres statistiques élémentaires

Le tableau 1 donne les valeurs des paramètres statistiques élémentaires (valeurs minimales, maximales, moyennes arithmétiques, écart-types et coefficients de variation).

L'échantillon n° 151 a été éliminé du traitement car il présente une valeur en K_2O de 32,5 %, bien supérieure à son seuil maximal de détectabilité de 20 % (Annexe 2). D'après la description de cet échantillon, un problème analytique est plus probable qu'une forte individualité (pollution) réelle.

Notons les valeurs moyennes très élevées du Pb et du Zn. Les forts coefficients de variation et écart-types du Pb, Zn, Ag et à un degré moindre du Mn, Mo, Hg, P, As, Fe, Sn et Cu indiquent des populations très disparates liées à l'existence d'anomalies significatives dues à des indices miniers et/ou associés à des pollutions. La dispersion des teneurs en Ca et Mg provient plutôt de variations dans deux contextes lithologiques (marnes et calcaires) des points d'échantillonnage (figure 2).

IV.2.2. Histogrammes

Les histogrammes en échelles linéaires et logarithmiques ont été établis pour tous les éléments analysés, le traitement étant effectué sur l'ensemble des échantillons. Seuls les diagrammes les plus caractéristiques sont présentés ici (figures 4).

Les histogrammes des différents éléments présentent d'une manière générale des répartitions log-normales, phénomène indiquant une bonne homogénéité des sols ainsi que de faibles variations causées par des facteurs internes (dissolution, diagénèse), subséquentes au transport.

Certains éléments présentent cependant des distributions bimodales (K, B, Cr, Co, Ni, Pb, Zn, As, Sr, Ag et Ba), plurimodales (Cu, Mo, Sn) indiquant la présence de populations d'origines diverses.

Tableau 1

* Parametres statistiques elementaires *

ENSEMBLE DES ECHANTILLONS

Element	Nombre d'echan.	Valeur mini	Valeur maxi	Moyenne arithm.	Ecart -type	Coeff. variation	Moyenne geom.	Deviation geom.
SI02	162	21.60	82.30	56.52	14.77	0.26	54.23	1.35
AL2X	162	4.30	15.20	9.23	2.46	0.27	8.87	1.32
FE2X	162	2.60	47.20	11.68	8.02	0.69	9.70	1.80
MGO	162	0.20	5.40	0.94	0.58	0.62	0.86	1.47
CA0	162	1.00	31.90	8.92	7.43	0.83	5.63	2.87
K20	161	0.20	3.70	1.89	0.91	0.48	1.53	2.20
TI02	162	0.17	1.15	0.75	0.22	0.29	0.72	1.38
MNO	162	0.01	2.04	0.23	0.24	1.03	0.18	2.04
F	162	529.00	19216.00	2856.08	2294.79	0.80	2277.21	1.93
LI	162	18.00	236.00	70.74	28.94	0.41	65.76	1.46
B	162	36.00	250.00	90.27	25.12	0.28	87.00	1.31
V	162	41.00	687.00	141.30	76.53	0.54	126.50	1.58
CR	162	69.00	288.00	140.33	35.49	0.25	136.03	1.27
CO	162	4.00	61.00	21.19	9.60	0.45	19.22	1.56
NI	162	19.00	116.00	48.42	17.80	0.37	45.44	1.42
CU	162	7.00	133.00	30.87	20.48	0.66	26.30	1.72
PB	162	1.00	3882.00	118.09	333.62	2.83	50.21	3.20
ZN	162	35.00	11628.00	415.49	1056.04	2.54	198.08	2.62
AS	162	20.00	243.00	57.06	40.67	0.71	45.15	1.98
SR	162	76.00	455.00	162.99	78.87	0.48	146.78	1.56
Y	162	11.00	109.00	38.64	15.94	0.41	36.03	1.43
NB	162	10.00	69.00	15.86	7.82	0.49	14.64	1.45
MO	162	1.00	29.00	2.50	2.51	1.00	2.21	1.44
AG	162	0.10	6.30	0.29	0.60	2.11	0.15	2.38
SN	162	10.00	84.00	11.41	7.67	0.67	10.64	1.33
SB	162	5.00	9.00	5.02	0.31	0.06	5.02	1.05
BA	162	171.00	1075.00	364.51	101.27	0.28	352.12	1.29
LA	162	10.00	78.00	29.22	13.74	0.47	26.37	1.57
CE	162	24.00	220.00	92.35	34.44	0.37	86.49	1.43
W	162	10.00	61.00	11.50	5.15	0.45	10.98	1.29
ED	162	1.00	7.00	1.04	0.47	0.45	1.01	1.16
BE	162	1.00	12.00	1.12	0.89	0.60	1.05	1.28
ZR	162	64.00	1025.00	357.40	122.52	0.34	336.19	1.43
HG	93	0.10	0.80	0.17	0.15	0.80	0.14	1.78
F2	93	250.00	905.00	595.11	140.76	0.24	575.94	1.30

Ecart-type nul pour BI

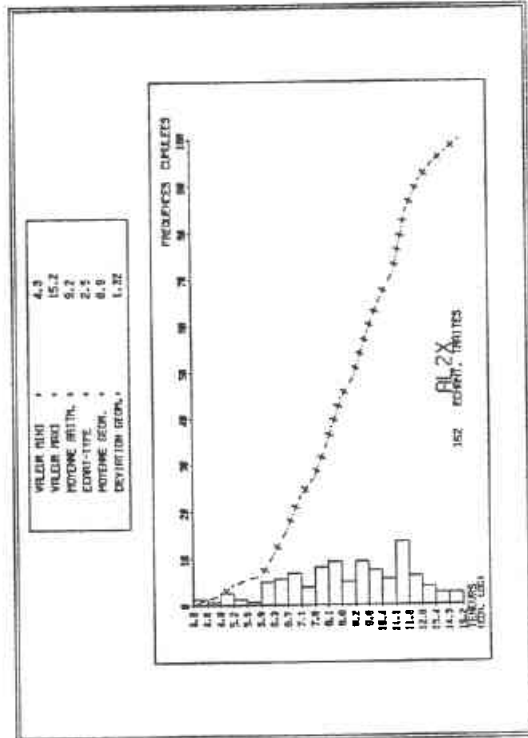
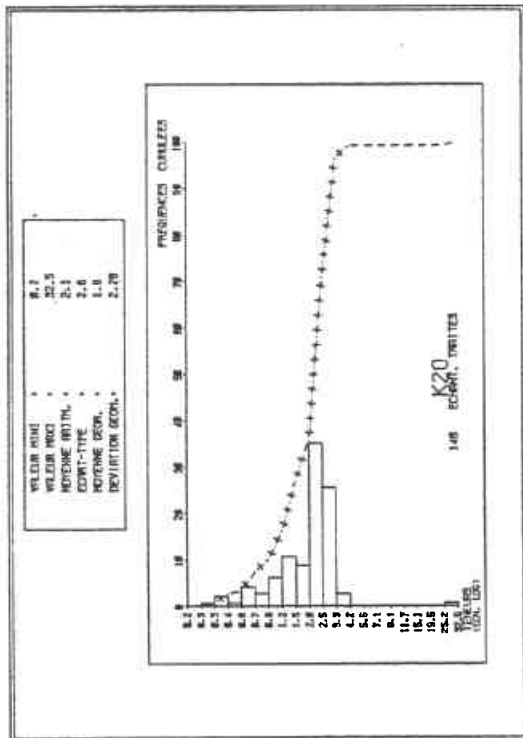
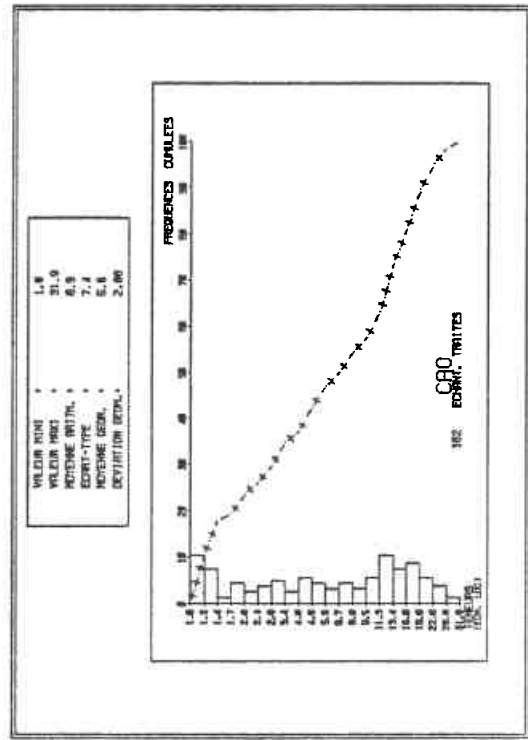
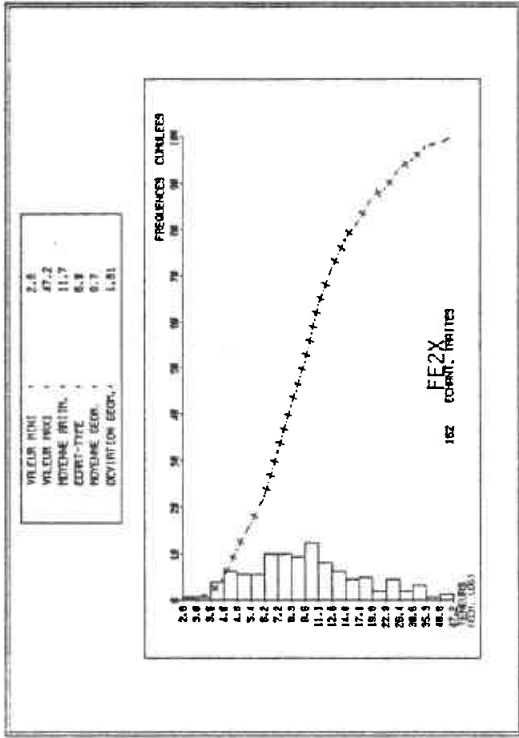


Figure 4 - Histogrammes (sur l'ensemble des échantillons)

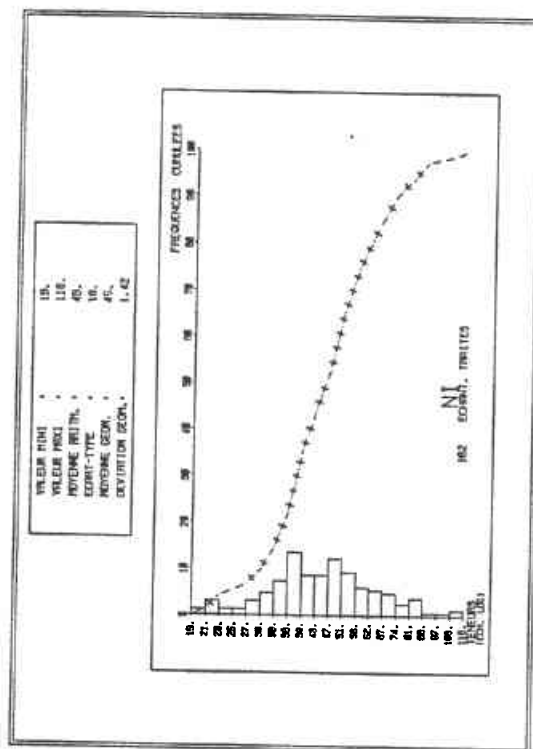
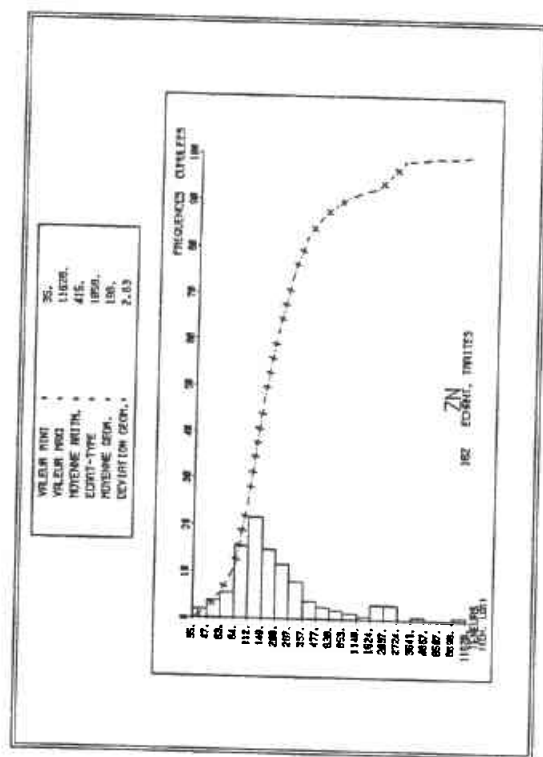
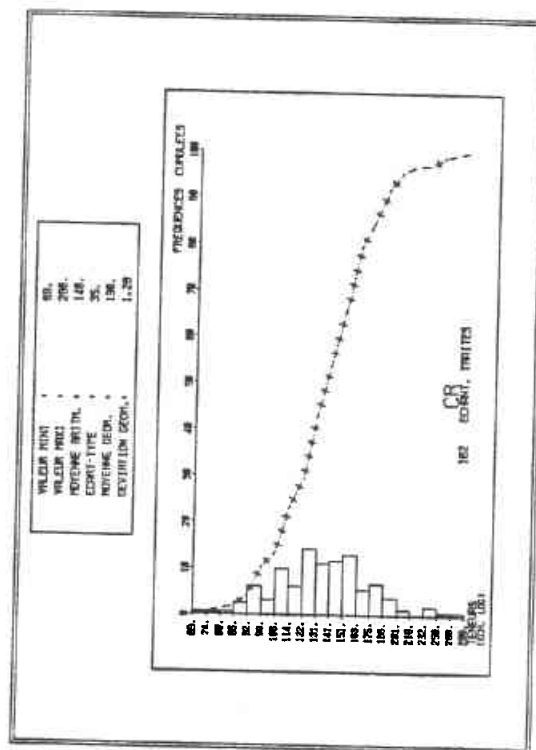
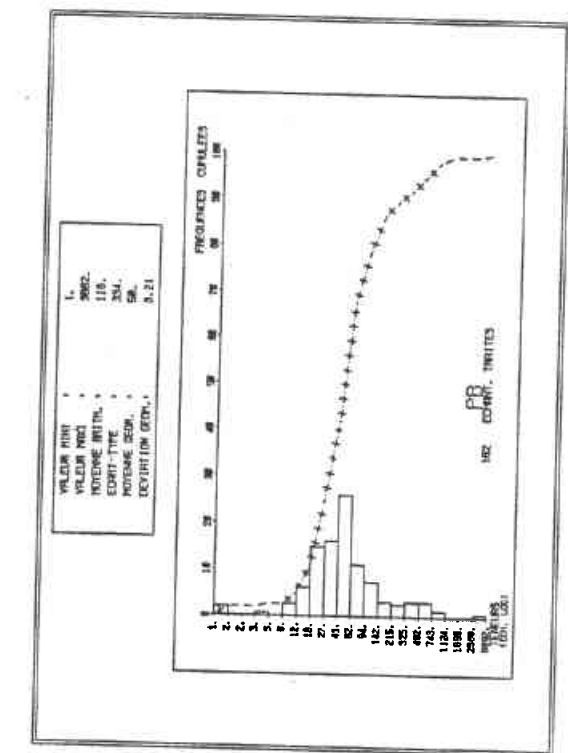


Figure 4 - (suite)

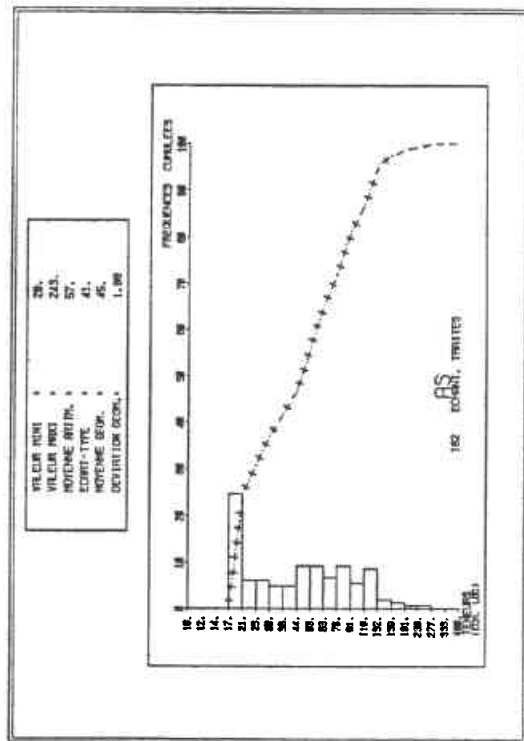
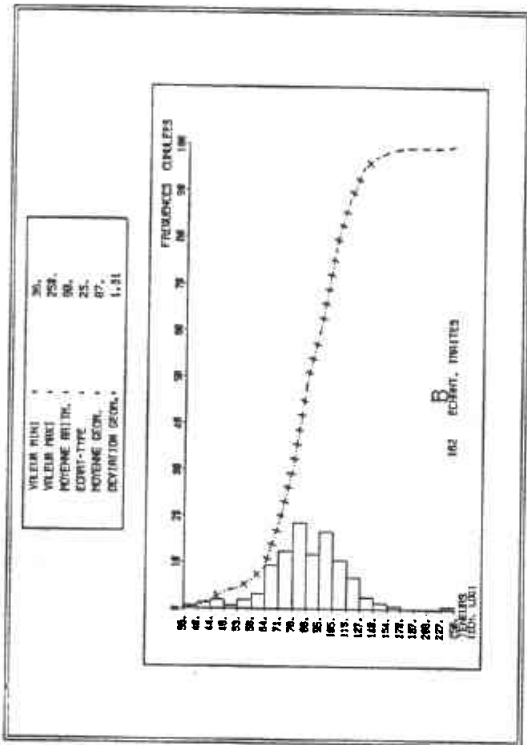
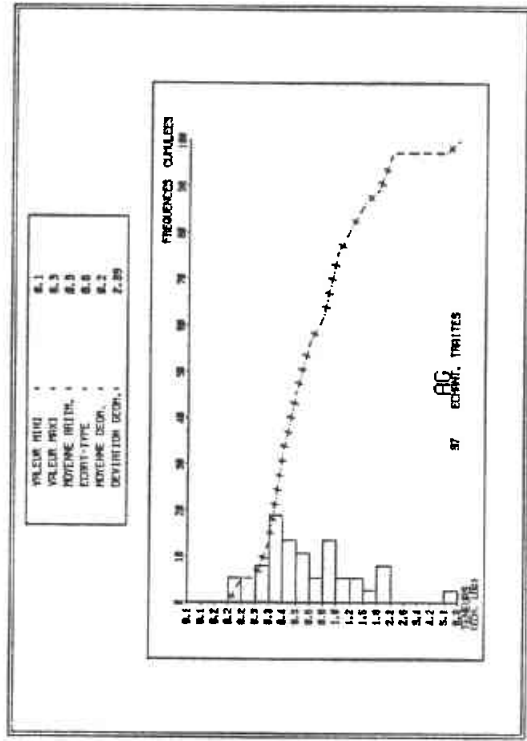
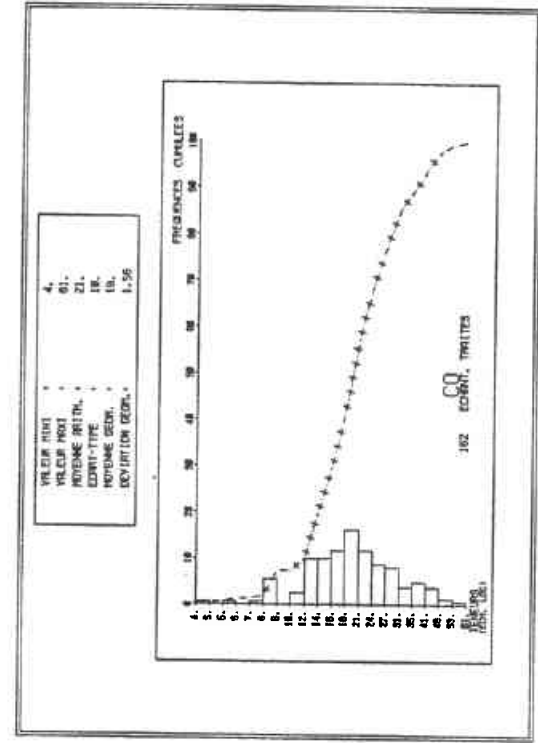


Figure 4 - (suite)

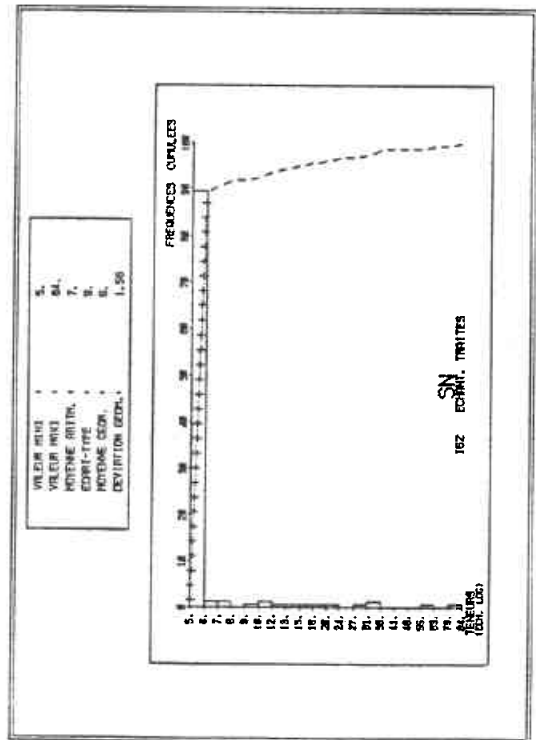
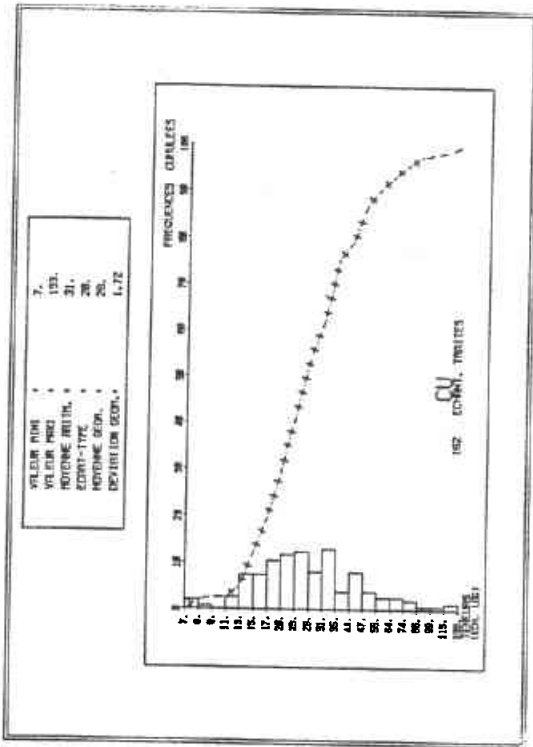
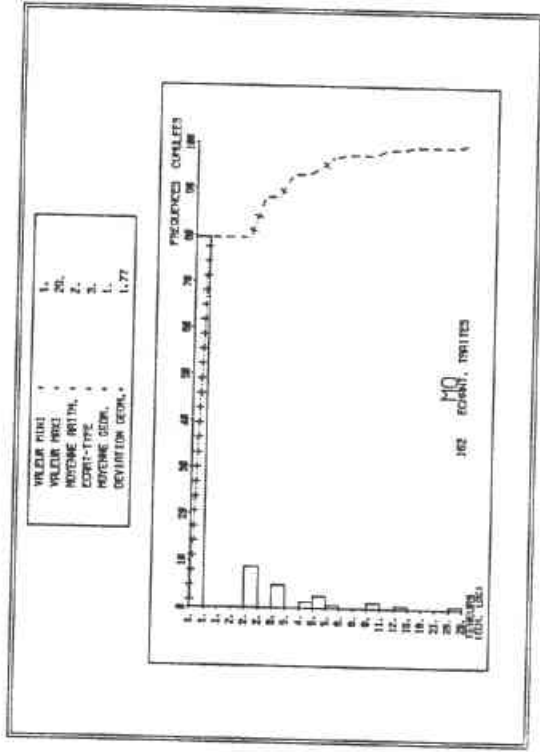


Figure 4 - (suite)

IV.2.3. Classement des échantillons

Un programme de classification automatique des échantillons permet le regroupement d'individus présentant des spectres géochimiques voisins (Annexe 1). La figure 5 présente la répartition géographique d'une classification en deux groupes d'échantillons (pollué/non pollué) établie sur l'ensemble des paramètres analysés. Il est ainsi possible d'isoler les échantillons représentatifs d'une part, du fond géochimique naturel et, d'autre part, d'une contamination. A quelques rares exceptions près, les échantillons de la classe polluée (triangles) ont été prélevés le long de l'Orne ou du Conroy. Parmi ces exceptions l'échantillon n° 151 (au Nord de Jarny) a déjà été mentionné et les prélèvements n° 53 et 57 sont liés aux crassiers de Rombas (voir la figure 3). La classe non polluée (cercles) correspond aux échantillons prélevés sur le plateau de part et d'autre de la vallée de l'Orne, ainsi qu'à la partie amont du bassin versant.

IV.2.4. Analyse factorielle

Un traitement des données par analyse factorielle permet d'identifier les associations entre éléments. D'après les résultats, présentés au tableau 2 et à la figure 6, trois facteurs significatifs apparaissent :

- axe factoriel n° 1 : Si, Ti et Zr sont opposés à la quasi-totalité des autres éléments (en particulier à Fe, Zn, Pb, Ni, P, Cu, Co, V, B et As). Cet axe reprend la caractéristique principale de la classification en deux groupes décrite au paragraphe précédent.
- axe factoriel n° 2 : cet axe regroupe Sr et Ca, deux éléments caractéristiques des carbonates en milieu naturel.
- axe factoriel n° 3 : Li et Al sont associés ; ces deux éléments entrent dans la composition des argiles et l'association observée est sans doute due à la présence de marnes dans les séries jurassiques.

IV.2.5. Corrélations binaires entre éléments

Une analyse statistique bivariée permet d'observer les variations simultanées de deux éléments par le calcul des coefficients de corrélations. On obtient ainsi des détails supplémentaires sur les associations entre éléments. La matrice de corrélation présentée au tableau 3 met en valeur de fortes associations entre Fe et Ni, Zn et Pb, Co et Ni, Y et Ce et à un degré moindre entre La et Ce, As et Fe, Cr et V, Cu et Pb, et Fe et V. D'une manière générale on remarque aussi les fortes liaisons entre le fer et les éléments traces (B, V, Cr, Co, Ni, Pb, Zn, As et Nb), des terres rares entre elles, de As, Zn, Pb et Ni avec plusieurs éléments traces, du phosphore avec Pb, Cu et Zn.



Figure 5 - Classification des échantillons (O : non pollué ; ▲ : pollué)

```

*****
m * 1 * 2 * 3 * 4 *
*****
Valeur propre * 11,806 * 6,550 * 2,861 * 2,191 *
Pourcentage * 36,894 * 20,470 * 8,940 * 6,846 *
*****

```

```

*****
* Analyse *
*****
F(B102) * -0,794 * 0,491 * -0,060 * 0,239 *
F(AL2X) * -0,095 * 0,642 * 0,379 * -0,072 *
F(FE2X) * 0,886 * 0,208 * -0,276 * -0,108 *
F(HG0) * 0,678 * 0,033 * 0,465 * -0,231 *
F(CAD) * 0,479 * -0,644 * 0,227 * -0,410 *
F(K20) * -0,266 * 0,755 * -0,043 * 0,215 *
F(T102) * -0,664 * 0,650 * 0,125 * 0,026 *
F(HND) * 0,694 * 0,490 * -0,072 * 0,119 *
F(P) * 0,830 * -0,033 * -0,090 * 0,029 *
F(LI) * 0,171 * 0,339 * 0,796 * -0,211 *
F(B) * 0,761 * 0,470 * 0,129 * 0,087 *
F(V) * 0,793 * 0,393 * -0,183 * -0,219 *
F(CR) * 0,523 * 0,586 * -0,460 * -0,101 *
F(CO) * 0,785 * 0,312 * -0,133 * -0,137 *
F(NI) * 0,843 * 0,304 * -0,186 * -0,159 *
F(CU) * 0,775 * -0,126 * 0,132 * 0,073 *
F(PB) * 0,831 * -0,013 * 0,148 * 0,211 *
F(ZN) * 0,884 * -0,093 * 0,012 * 0,298 *
F(AS) * 0,740 * 0,454 * -0,143 * -0,083 *
F(SR) * 0,451 * -0,664 * 0,452 * -0,185 *
F(Y) * 0,089 * 0,818 * 0,062 * -0,030 *
F(NB) * 0,638 * 0,210 * -0,566 * -0,108 *
F(MD) * 0,250 * 0,035 * -0,109 * 0,270 *
F(AG) * 0,675 * -0,290 * 0,007 * 0,291 *
F(SN) * 0,494 * -0,194 * 0,150 * 0,450 *
F(SR) * -0,075 * 0,049 * -0,044 * 0,149 *
F(BA) * -0,093 * 0,451 * 0,250 * 0,719 *
F(LA) * 0,124 * 0,698 * 0,292 * -0,313 *
F(CE) * 0,001 * 0,871 * 0,229 * -0,161 *
F(W) * 0,686 * -0,255 * 0,037 * 0,458 *
F(BE) * 0,435 * -0,081 * 0,408 * 0,468 *
F(ZF) * -0,696 * 0,384 * -0,284 * 0,184 *
*****

```

Tableau no 12
 Analyse factorielle en composantes principales,
 (Traitement sur valeurs logarithmiques)

(ensemble des échantillons)

Projection des facteurs F

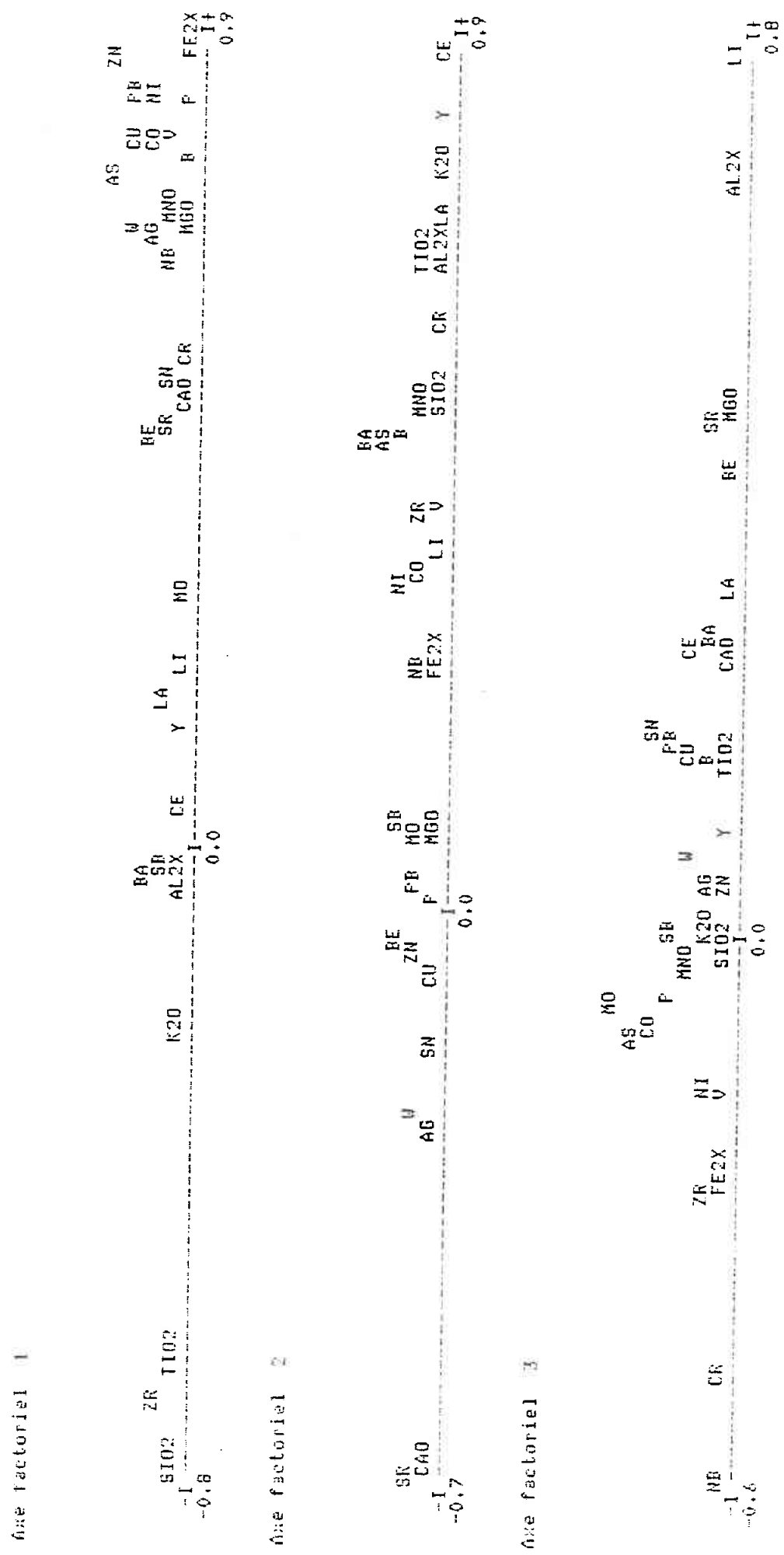


Figure 6 - Analyse factorielle sur l'ensemble des échantillons

Tableau 4

* Parametres statistiques elementaires *

ECHANTILLONS NON POLLUES

* Element *	* Nombre * * d'echan. *	* Valeur * * mini *	* Valeur * * maxi *	* Moyenne * * arithm. *	* Ecart * * -type *	* Coeff. * * variation *	* Moyenne * * geom. *	* Deviation * * geom. *
SI02	128	21.60	62.30	60.33	13.12	0.22	59.56	1.29
AL2X	128	4.30	15.20	9.49	2.47	0.26	9.14	1.32
FE2X	128	2.60	47.20	10.72	7.52	0.70	9.00	1.76
MGO	128	0.20	1.50	0.84	0.23	0.27	0.80	1.36
CA0	128	1.00	31.90	7.02	6.75	0.96	4.36	2.75
K20	127	0.20	3.70	2.12	0.82	0.39	1.83	1.95
TI02	128	0.28	1.15	0.80	0.20	0.24	0.78	1.32
MND	128	0.01	0.70	0.21	0.13	0.60	0.17	1.94
P	128	529.00	7321.00	2418.60	1543.97	0.64	2010.64	1.83
LI	128	18.00	163.00	70.33	27.19	0.39	65.40	1.47
B	128	36.00	165.00	88.09	21.36	0.24	85.28	1.29
V	128	41.00	339.00	137.27	61.66	0.45	124.42	1.56
CR	128	69.00	264.00	142.66	34.41	0.24	138.53	1.27
CO	128	4.00	61.00	20.59	9.41	0.46	18.70	1.55
NI	128	19.00	116.00	47.45	17.77	0.37	44.47	1.43
CU	128	7.00	133.00	26.35	16.05	0.61	23.35	1.60
PE	128	1.00	701.00	57.43	77.52	1.35	38.51	2.56
ZN	128	35.00	2545.00	210.32	282.30	1.34	155.94	1.95
AS	128	20.00	243.00	59.87	40.44	0.68	47.98	1.96
SR	128	76.00	451.00	138.27	62.01	0.45	127.87	1.45
Y	128	11.00	109.00	41.00	16.92	0.41	38.11	1.45
NB	128	10.00	44.00	15.49	6.36	0.41	14.49	1.41
MO	128	2.00	29.00	2.57	2.80	1.09	2.23	1.47
AG	128	0.10	2.10	0.20	0.33	1.67	0.13	1.99
SN	128	10.00	59.00	10.52	4.45	0.42	10.23	1.19
SB	128	5.00	9.00	5.03	0.35	0.07	5.02	1.05
BA	128	178.00	639.00	372.08	81.30	0.22	362.54	1.25
LA	128	10.00	78.00	31.41	14.41	0.46	28.33	1.58
CE	128	24.00	220.00	98.95	35.59	0.36	92.71	1.44
W	128	10.00	24.00	10.41	1.73	0.17	10.31	1.13
BE	128	1.00	3.00	1.04	0.23	0.22	1.03	1.15
ZR	128	132.00	1025.00	381.20	113.48	0.30	364.99	1.34
HG	65	0.10	0.61	0.12	0.07	0.61	0.11	1.37
F2	65	250.00	950.00	578.31	146.64	0.25	557.15	1.32

Ecart-type nul pour CD

Tableau 5 - Fonds géochimiques du bassin versant de l'Orne
(valeurs moyennes et écart-types)

SiO ₂	70,3	±	6,0	%	CaO	2,45	±	1,48	%
Al ₂ O ₃	9,57	±	2,13	%	K ₂ O	2,47	±	0,43	%
Fe ₂ O ₃	7,77	±	3,02	%	TiO ₂	0,91	±	0,14	%
MgO	0,73	±	0,20	%	MnO	0,17	±	0,07	%
P	1800	±	850	ppm	As	43,2	±	22,6	ppm
Li	64,4	±	24,0	ppm	Sr	99,7	±	14,4	ppm
B	111	±	81	ppm	Y	39,1	±	9,4	ppm
V	110	±	37	ppm	Ba	404	±	43	ppm
Cr	138	±	23	ppm	La	27,2	±	10,8	ppm
Co	16,4	±	5,7	ppm	Ce	95,0	±	25,1	ppm
Ni	39,6	±	11,0	ppm	W	4,46	±	2,34	ppm
Cu	20,6	±	8,1	ppm	Zr	439	±	81	ppm
Pb	35,0	±	17,9	ppm	F	413	±	108	ppm
Zn	133	±	22,6	ppm					

Les limites de détection de Nb, Mo, Ag, Sn, Sb, Cd, Be et Hg sont trop élevées pour permettre la détermination des fonds géochimiques de ces éléments.

IV.3. Estimation des fonds géochimiques régionaux

On peut estimer les valeurs des fonds géochimiques régionaux des éléments de deux manières :

- (a) Si l'on considère que la classe "non polluée" de la classification ascendante hiérarchique présentée précédemment correspond bien au fond régional, les valeurs sont données par la moyenne arithmétique des individus de ce sous-ensemble (tableau 4).
- (b) On peut aussi éliminer les échantillons encore trop anormaux de ce sous-ensemble en ramenant les forts coefficients de variation à des valeurs inférieures à 0,6. Le sous-ensemble initial de 129 échantillons ramenés à 54 individus donne les valeurs présentées au tableau 5.

A titre de comparaison et bien qu'il soit difficile de relier les teneurs observées en roches aux teneurs observées en sols, le tableau 6 indique les abondances moyennes des éléments chimiques dans les argiles et carbonates (d'après TUREKIAN et WEDEPOHL, 1961).

Tableau 6 - Teneurs moyennes en éléments traces des argiles et carbonates

Eléments	Teneurs (en ppm)	
	Argiles	Carbonates
Li	115	10
B	230	55
Ba	2300	100
Co	74	0,7
Cr	90	11
Cu	250	30
Ni	225	30
Pb	80	9
V	120	20
Zn	165	35

Les valeurs de fond géochimique qui présentent les plus forts écart-types (relatifs) correspondent aux éléments que l'on trouve aussi bien dans les carbonates que dans les argiles (Co, Pb). Par contre, les fonds géochimiques du Cu et Ni sont typiques de teneurs de carbonates et ceux du V et du Zn des argiles.

Notons au tableau 7 et à la figure 7 que la classe non polluée n'est pas foncièrement différente de l'ensemble des échantillons en ce qui concerne les associations entre éléments. Par contre, si l'on compare la matrice de corrélation (tableau 8) avec celle de l'ensemble des échantillons (tableau 3) des particularités importantes apparaissent :

- les associations de nombreux éléments avec les terres rares sont plus fortes dans la classe non polluée ;
- les associations de polluants classiques (Pb, Zn, As) avec les éléments Ag, Sn, W et Mo sont bien plus fortes au niveau de l'ensemble de l'échantillonnage. On pourra donc les utiliser comme indicateurs de pollution.

Remarquons aussi en comparant les tableaux 1 et 4 un enrichissement très marqué en la plupart des éléments pour les échantillons intégrant la classe "polluée" et plus particulièrement Fe, Mn, P, Pb, Zn, As et Ag. Les moyennes arithmétiques en Pb et Zn sont deux fois plus élevées dans la classe "polluée" que les fonds géochimiques régionaux correspondants.

VI.4. La rivière Orne

Les teneurs en éléments moyens et traces des sédiments de ruisseau de l'Orne peuvent maintenant être comparées aux valeurs respectives du fond géochimique (figure 8).

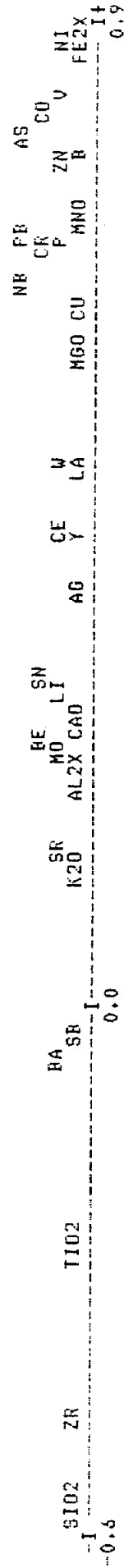
Les teneurs en calcium et en magnésium sont très variables ; dans tout le cours de l'Orne (partie étudiée) elles sont supérieures aux fonds géochimiques (2,54 % et 0,73 %, respectivement) indiquant l'alimentation du réseau hydrographique de l'Orne par un drainage riche en carbonates et sulfates qui induit une subséquente précipitation du calcium et du magnésium probablement sous forme de calcite et/ou de dolomite due au pH relativement élevé (8,2 à 8,5) de l'eau de l'Orne (MOUVET et al., 1982).

La partie amont du bassin-versant présente pour la grande majorité des éléments dosés des valeurs proches du fond naturel à l'exception de quelques points résultant de pollutions ponctuelles (points prélevés dans la ville de Jarny et en bordure de la RN 52).

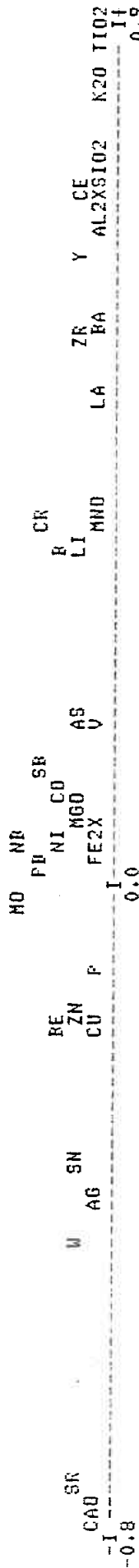
En aval de Joeuf, la contribution du fer à la constitution des sédiments augmente. La décroissance des contenus en Al et Si étant seulement relative, cela représente un apport important de fer.

Projection des facteurs F

Axe factoriel 1



Axe factoriel 2



Axe factoriel 3

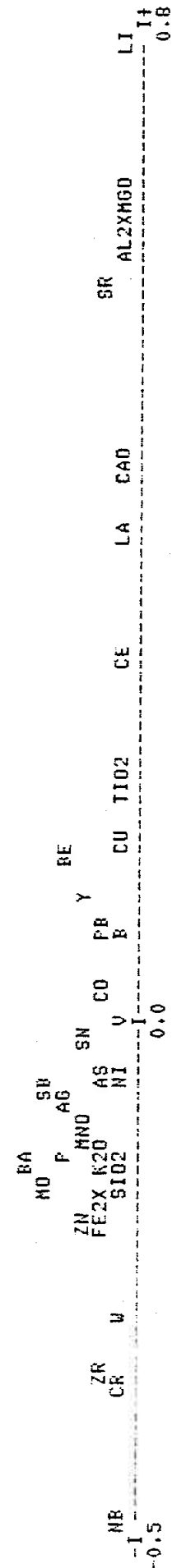


Figure 7 - Analyse factorielle (échantillons non pollués)

```

*****
m * 1 * 2 * 3 * 4 *
*****
Valeur propre * 11.160 * 6.458 * 3.071 * 2.160 *
Pourcentage * 34.877 * 20.181 * 9.598 * 6.749 *
*****

```

* Analyse *

```

*****
f(SIO2) * -0.570 * 0.730 * -0.184 * 0.175 *
f(AL2X) * 0.183 * 0.673 * 0.617 * 0.156 *
f(FE2X) * 0.936 * -0.020 * -0.213 * -0.187 *
f(MGO) * 0.622 * 0.022 * 0.660 * -0.036 *
f(CAO) * 0.240 * -0.757 * 0.428 * -0.180 *
f(K2O) * 0.088 * 0.829 * -0.162 * 0.025 *
f(TIO2) * -0.298 * 0.875 * 0.158 * 0.193 *
f(MNO) * 0.766 * 0.355 * -0.138 * 0.057 *
f(P) * 0.746 * -0.137 * -0.155 * 0.105 *
f(LI) * 0.279 * 0.329 * 0.789 * 0.026 *
f(B) * 0.841 * 0.325 * 0.034 * 0.018 *
f(V) * 0.399 * 0.139 * -0.037 * -0.288 *
f(CR) * 0.741 * 0.345 * -0.350 * -0.262 *
f(CO) * 0.882 * 0.052 * -0.017 * -0.025 *
f(NI) * 0.947 * -0.008 * -0.086 * -0.074 *
f(CU) * 0.676 * -0.207 * 0.110 * 0.450 *
f(FR) * 0.748 * -0.033 * 0.037 * 0.356 *
f(ZN) * 0.823 * -0.187 * -0.211 * 0.333 *
f(AS) * 0.849 * 0.139 * -0.083 * -0.249 *
f(SR) * 0.124 * -0.707 * 0.589 * 0.099 *
f(Y) * 0.449 * 0.657 * 0.067 * -0.009 *
f(NB) * 0.704 * -0.009 * -0.471 * -0.333 *
f(MD) * 0.226 * -0.069 * -0.184 * 0.241 *
f(AG) * 0.384 * -0.396 * -0.105 * 0.211 *
f(SN) * 0.292 * -0.349 * -0.054 * 0.577 *
f(SR) * -0.065 * 0.073 * -0.093 * 0.100 *
f(BA) * -0.095 * 0.570 * -0.161 * 0.637 *
f(LA) * 0.514 * 0.488 * 0.374 * -0.100 *
f(CE) * 0.444 * 0.719 * 0.272 * -0.069 *
f(W) * 0.526 * -0.435 * -0.289 * 0.324 *
f(BE) * 0.233 * -0.202 * 0.102 * 0.456 *
f(ZR) * -0.457 * 0.561 * -0.339 * 0.153 *
*****

```

Tableau no : 7
Analyse factorielle en composantes principales .
(Traitement sur valeurs logarithmiques)
(échantillons non pollués)

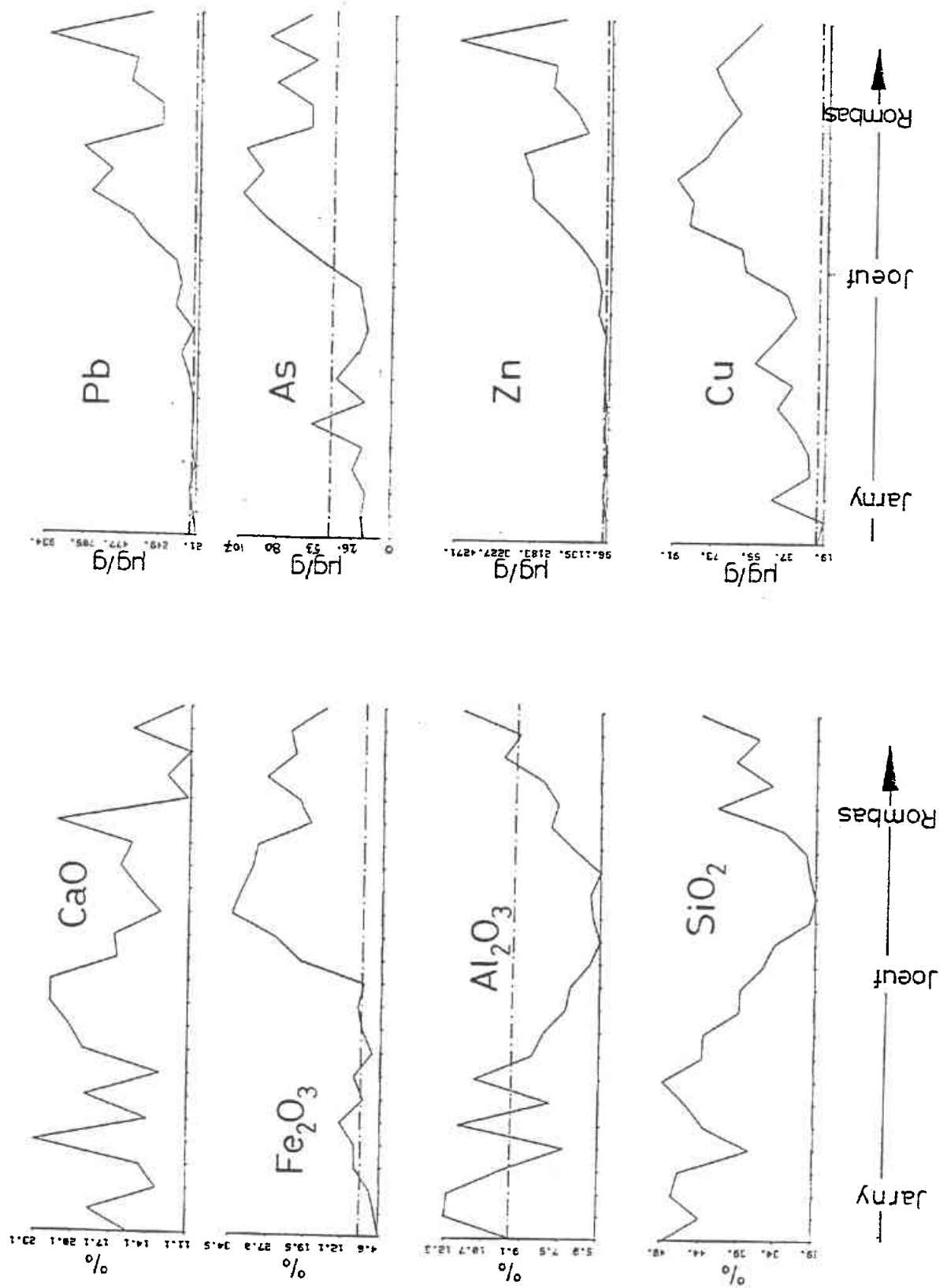


Figure 8 - Teneurs dans les sédiments de berges de l'Orne (--- : fond géochimique)

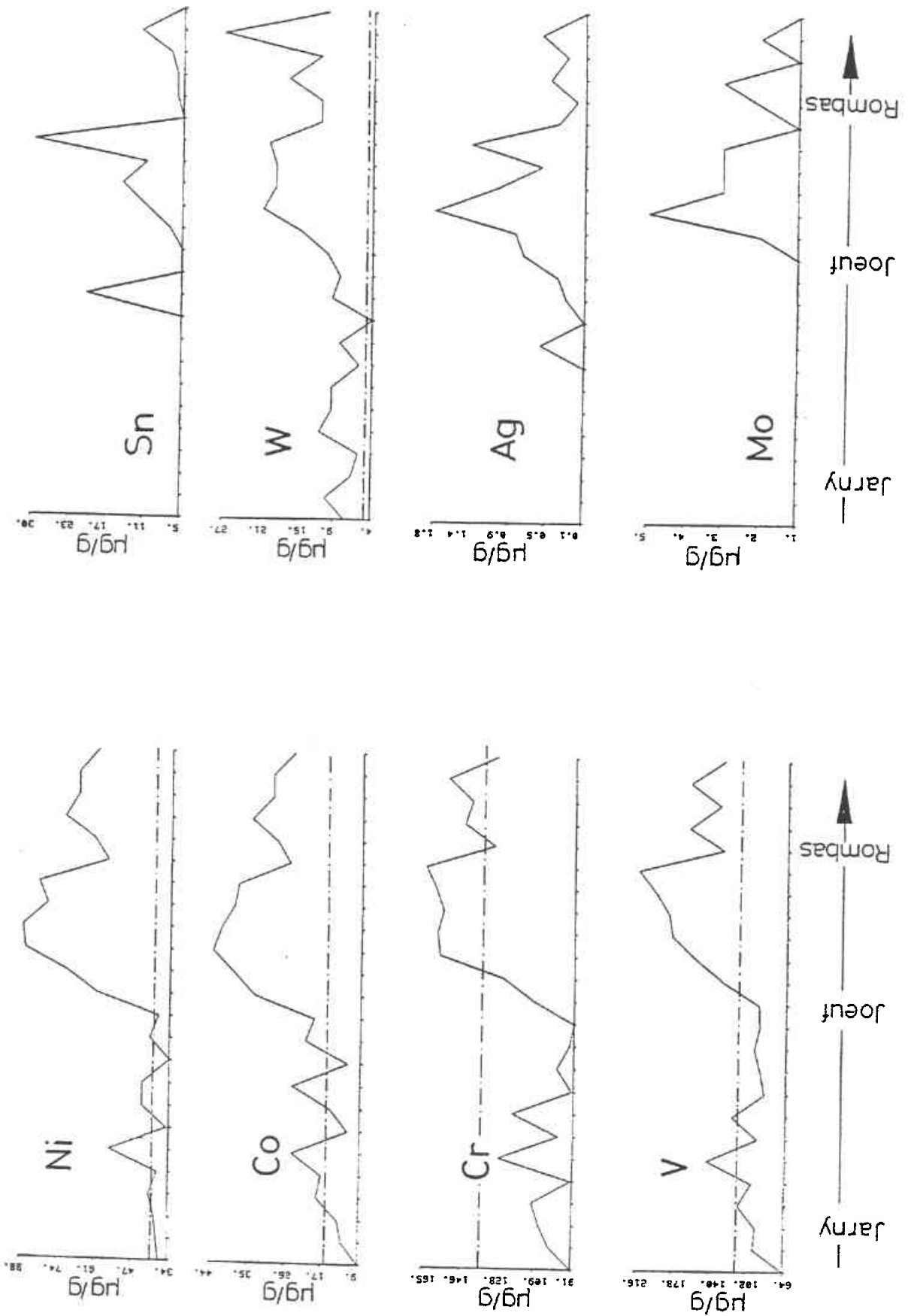


Figure 8 - (suite)

De même, les teneurs en éléments traces augmentent, phénomène particulièrement bien marqué pour Pb, Zn, Ni, Co, Sn, Ag, Mo, Hg et W. As, Cr et peut-être V suivent la même tendance mais ils présentent en amont de Joeuf des teneurs inférieures aux fonds géochimiques.

Nous retrouvons ici l'impact de l'activité humaine importante dans la vallée de l'Orne, tout en ne pouvant pas discriminer la part de pollution due aux industries de la part de pollution induite par les exploitations minières.

IV.5. Le bassin versant de l'Orne

Des cartes isovaleurs à noircissement variable sont présentées aux figures 9 à 29. Les coupures de valeurs représentent les teneurs correspondantes aux fréquences de 25, 50, 75 et 90 % des individus. On peut visualiser sur ces cartes l'étendue de l'influence des activités humaines sur l'environnement géochimique supergène.

SiO₂ donne des reliefs opposés à ceux de Al₂O₃ et CaO. Le fer et les éléments polluants associés (P, B, Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Cr, V, As, Hg, Ag, W, Sn et Mo) présentent des teneurs qui augmentent de l'amont vers l'aval et ceci surtout à partir de Jarny pour l'Orne. Les crassiers sont bien représentés dans les fortes valeurs en P, B, Mn, Pb, Zn, V, As, Ag, W, Mo et Sn.

Notons en particulier les contrastes importants des cartes isovaleurs pour les indicateurs géochimiques de pollution déjà mentionnés précédemment (Ag, W, Mo et Sn).

Figure 9

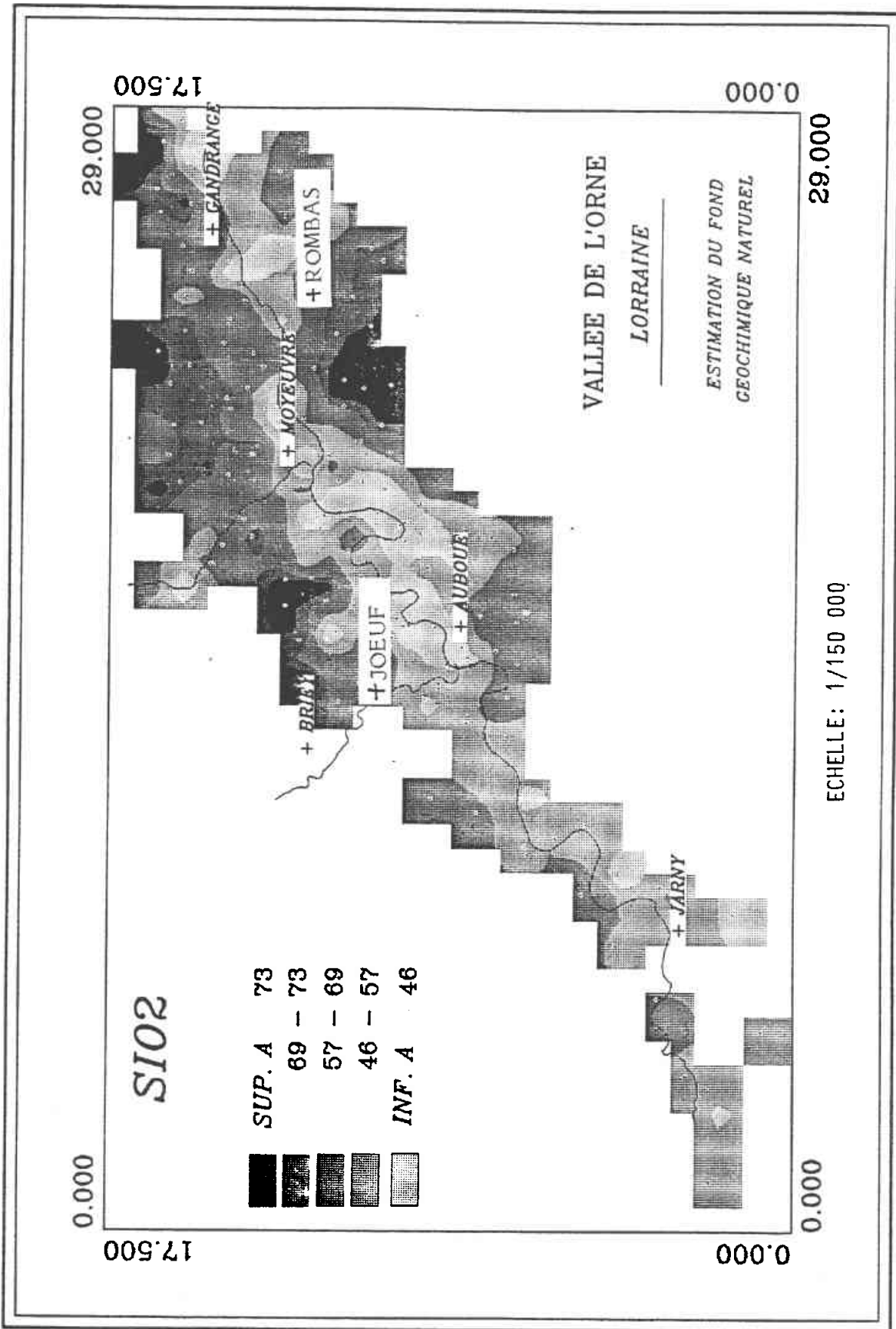


Figure 10

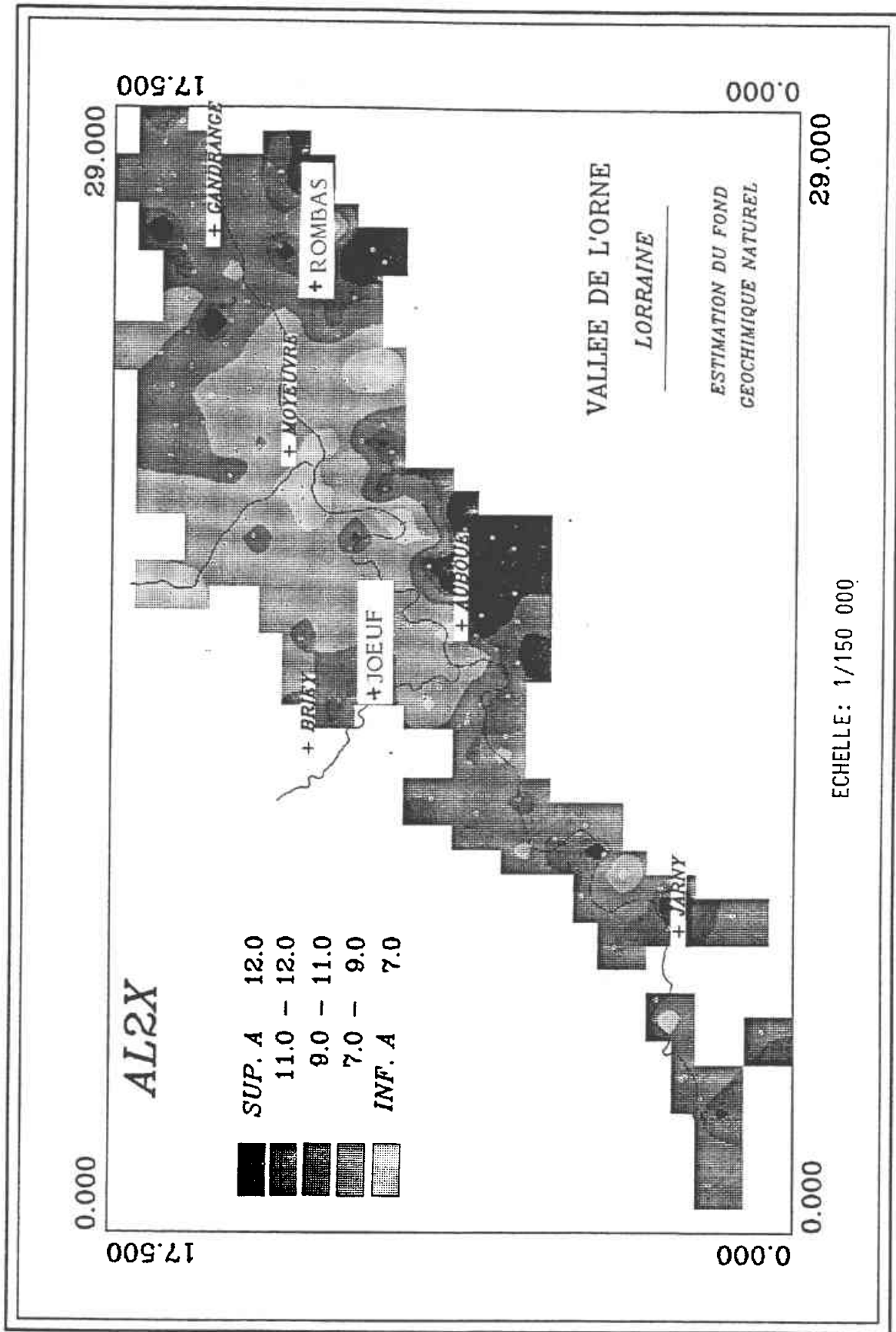


Figure 11

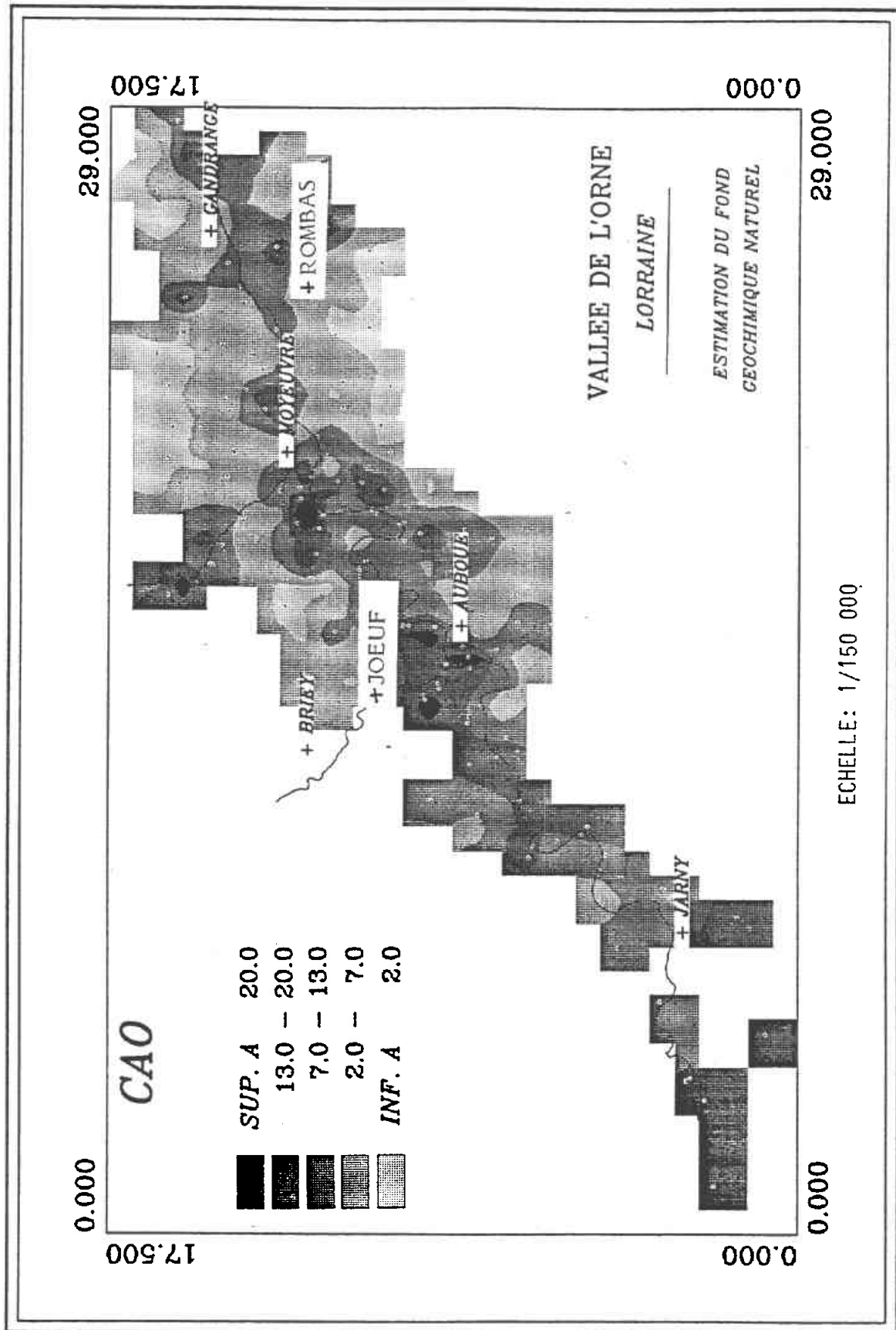


Figure 12

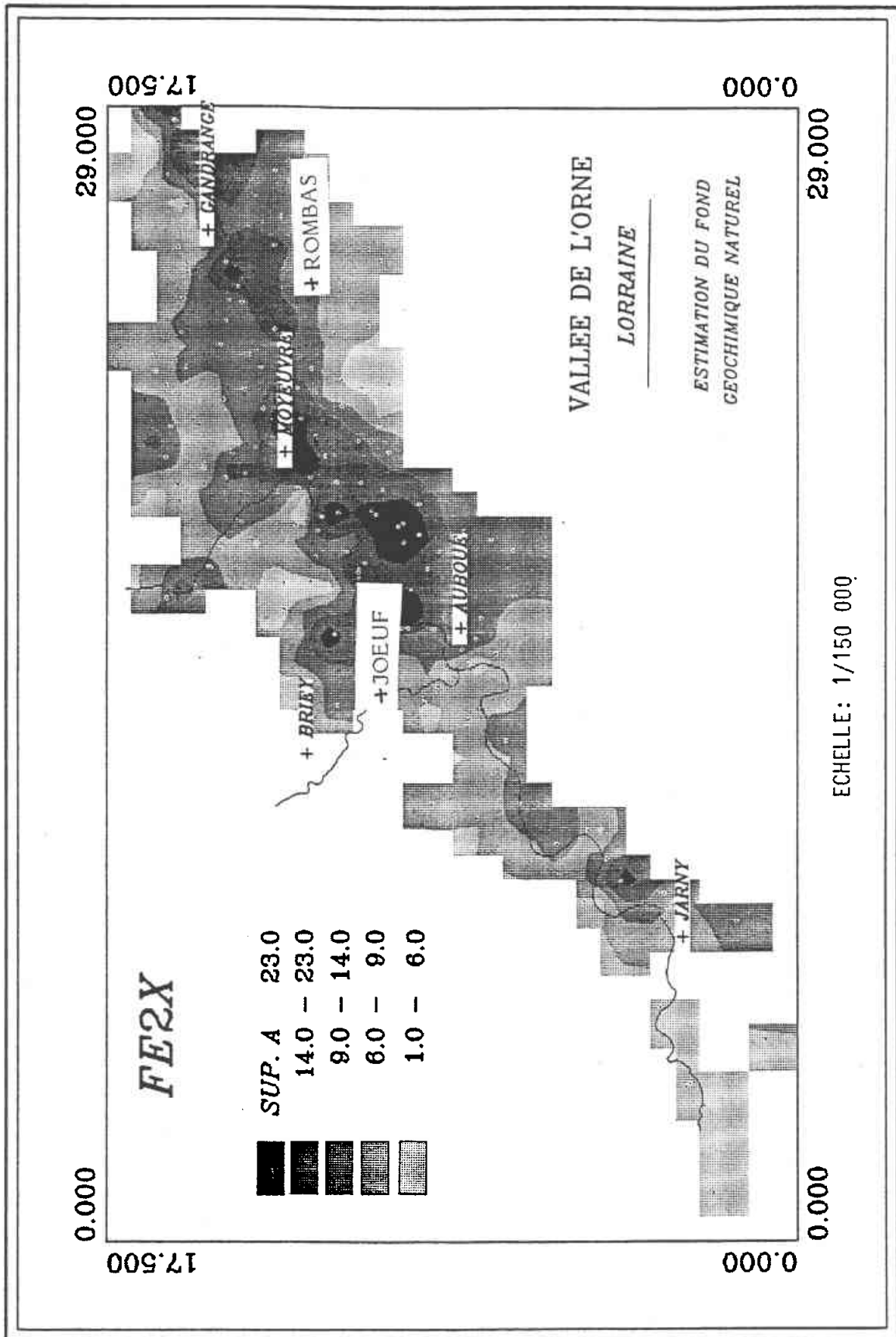


Figure 13

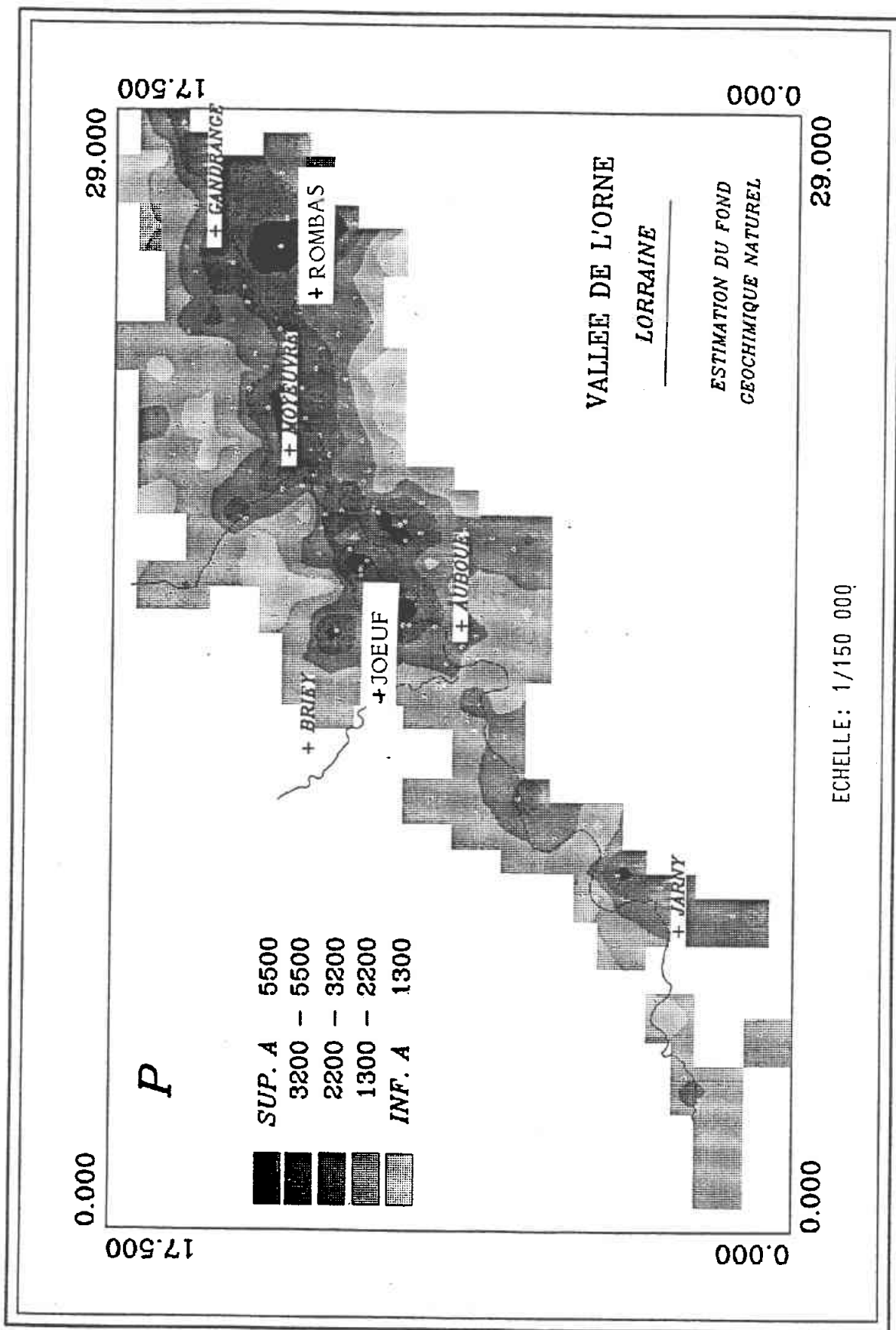


Figure 14

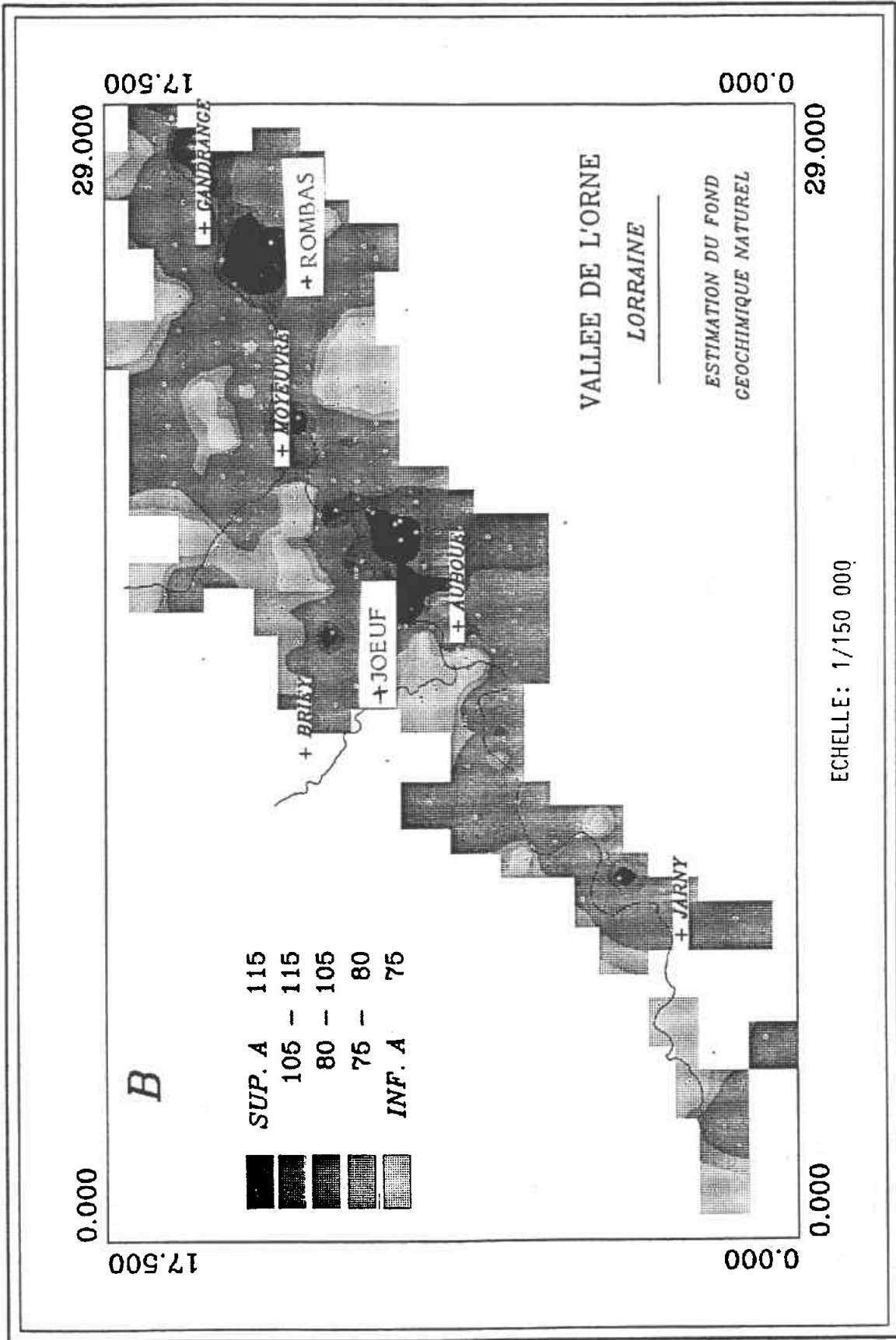


Figure 15

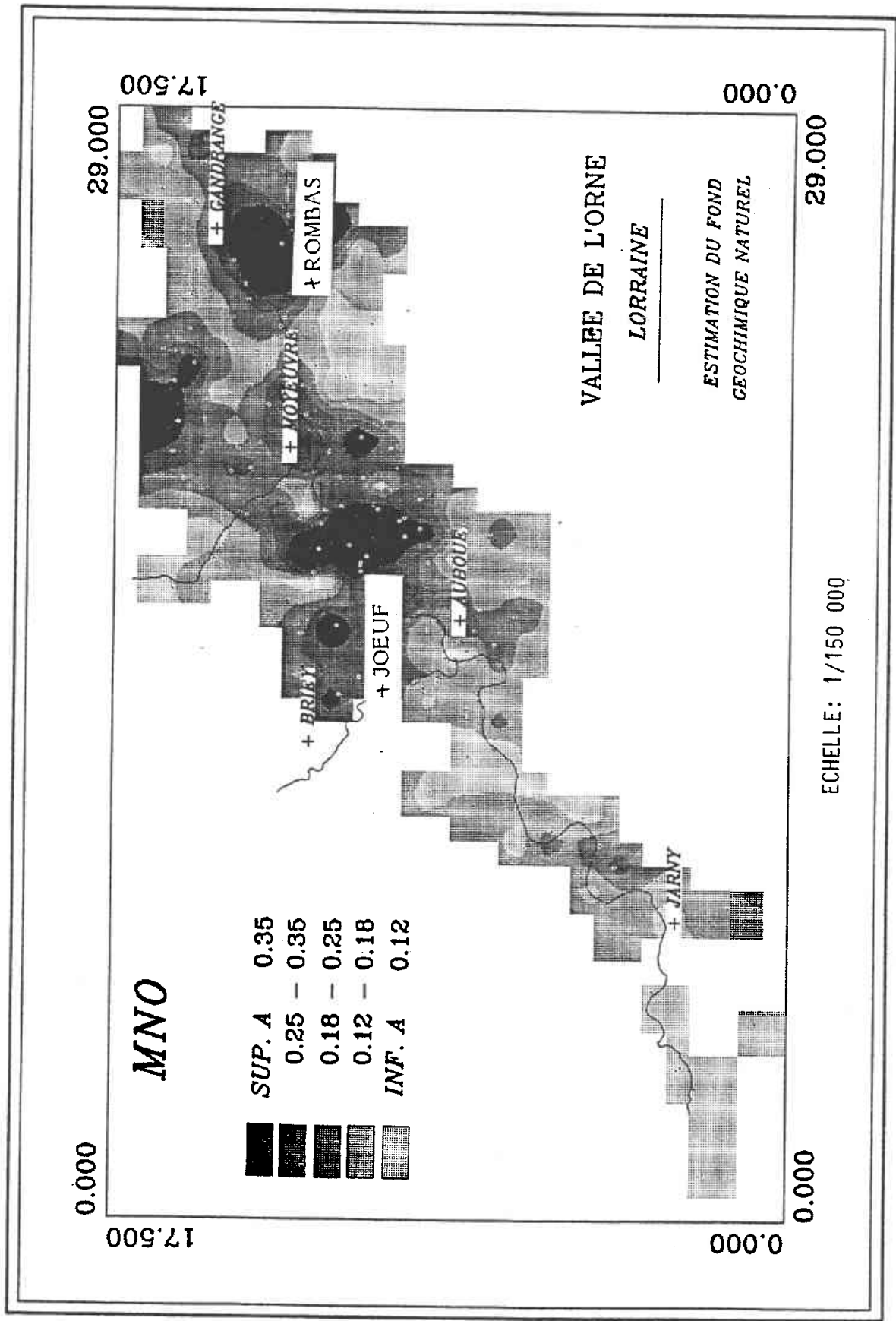


Figure 16

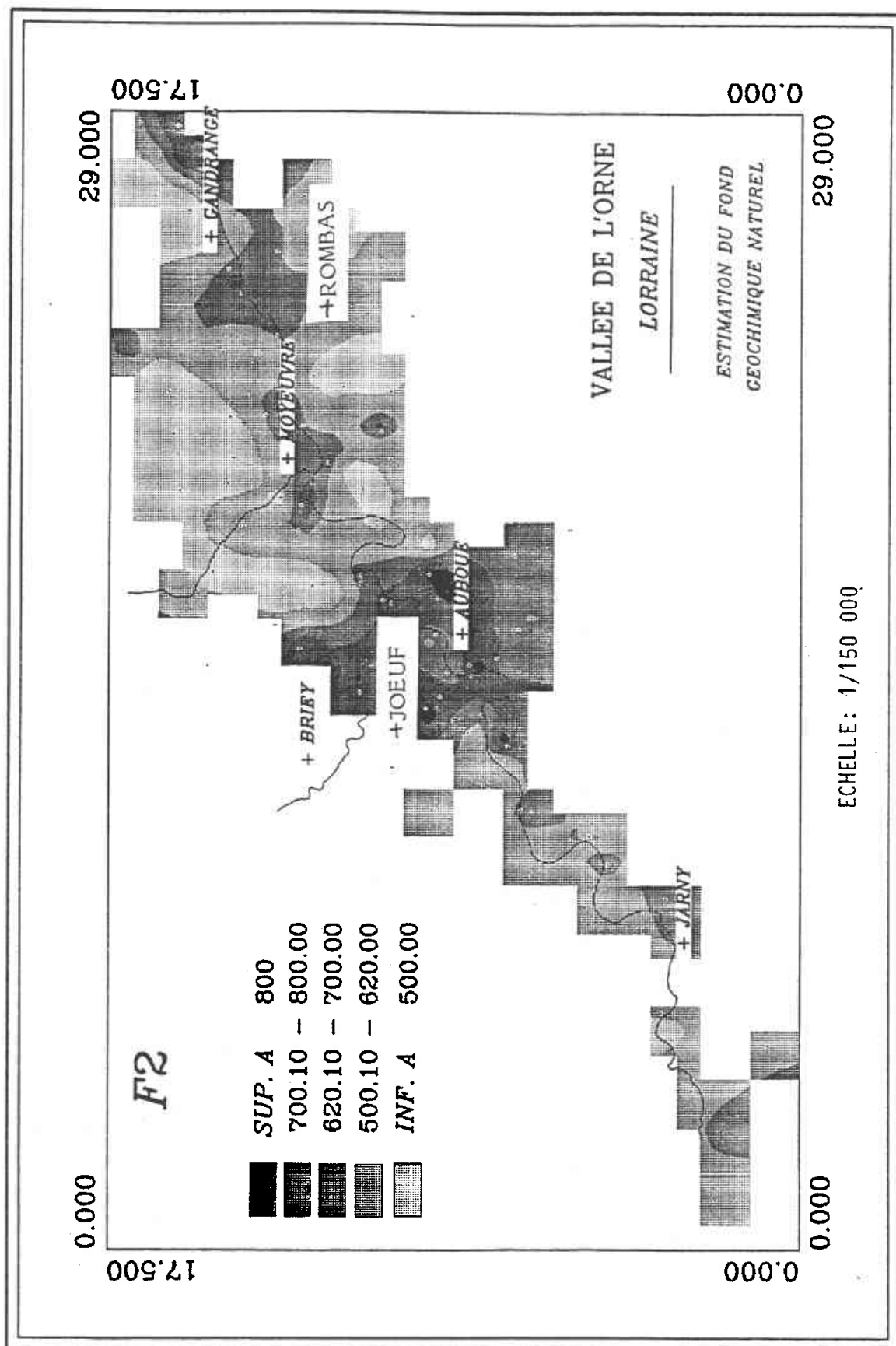


Figure 17

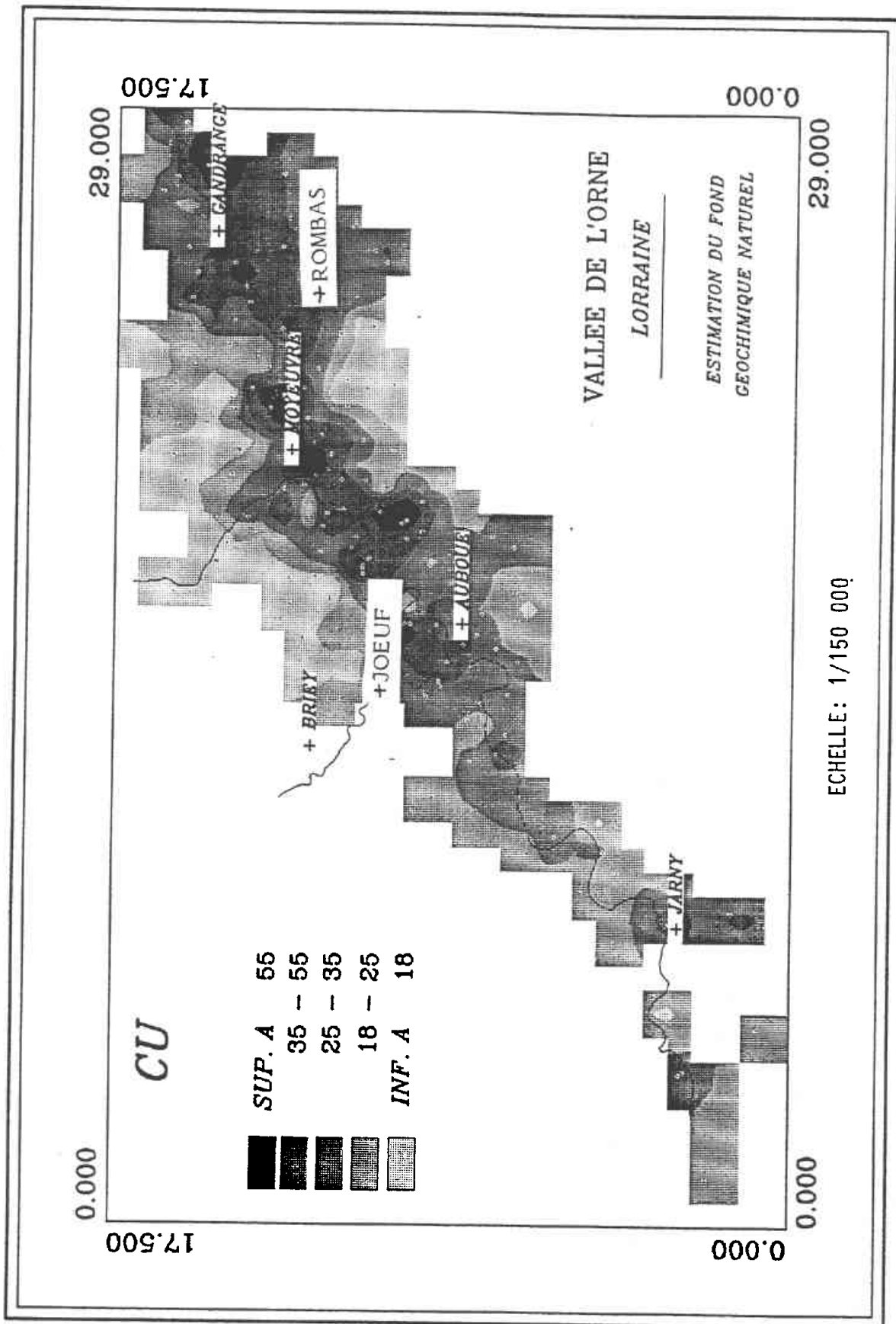


Figure 18

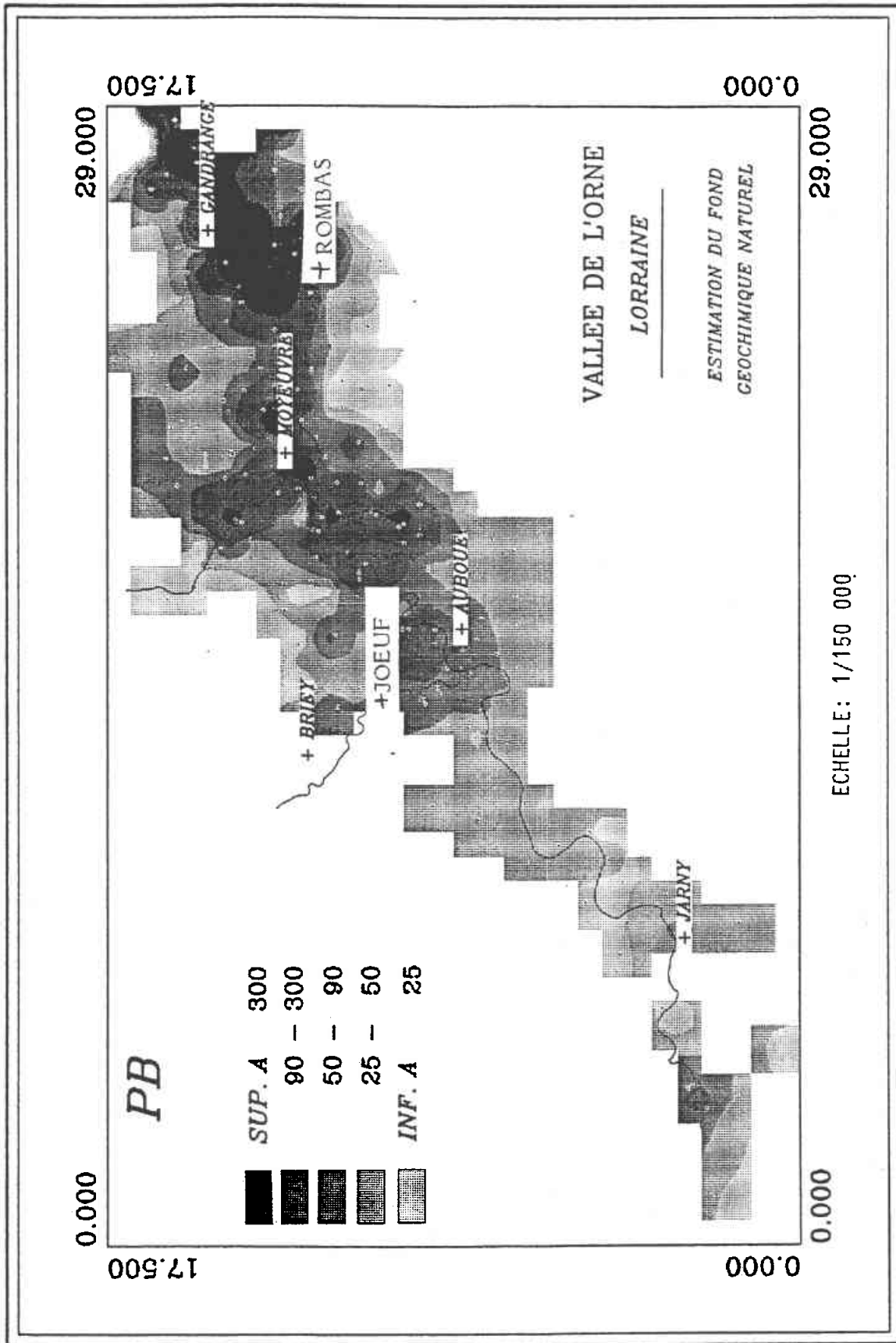


Figure 19

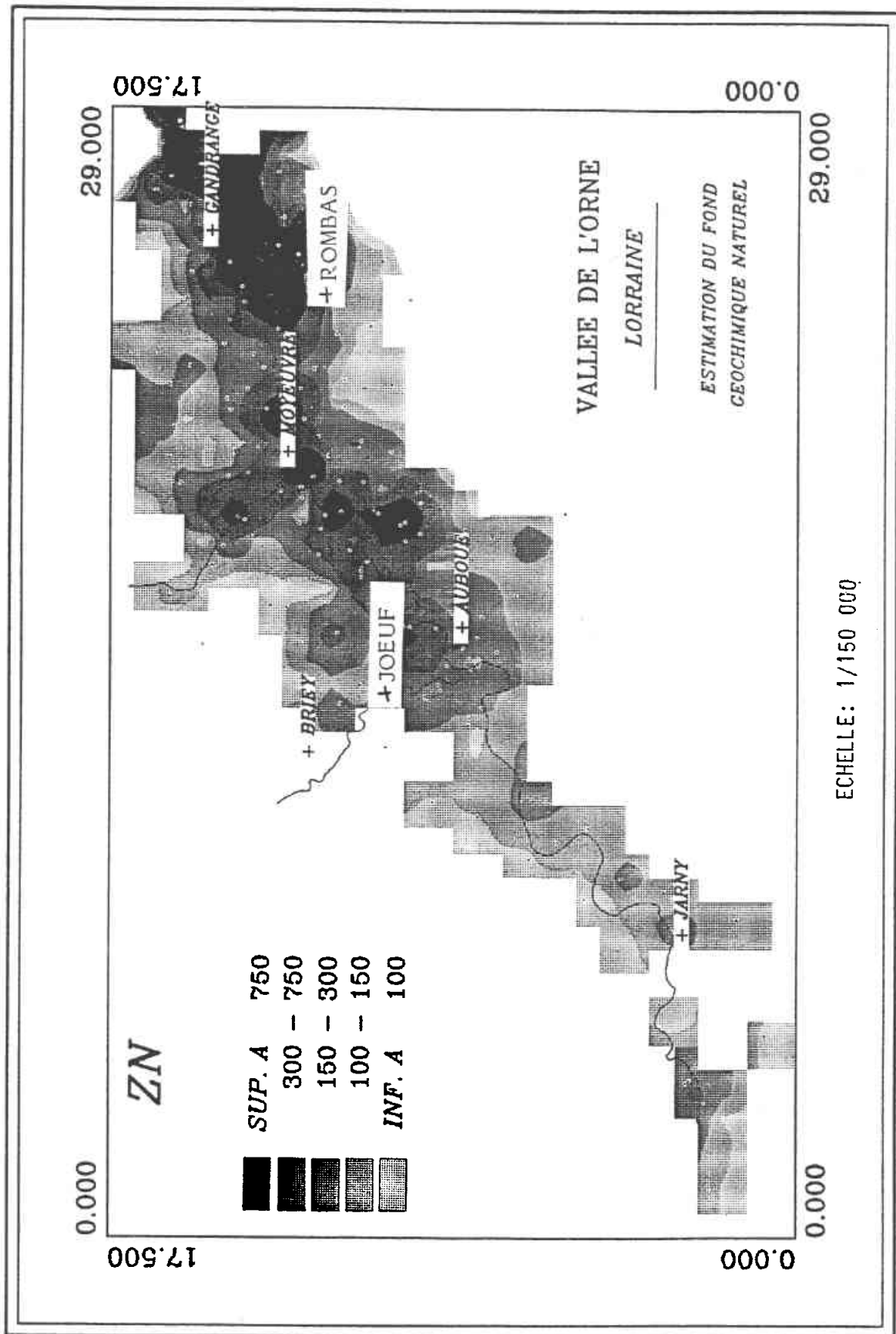


Figure 20

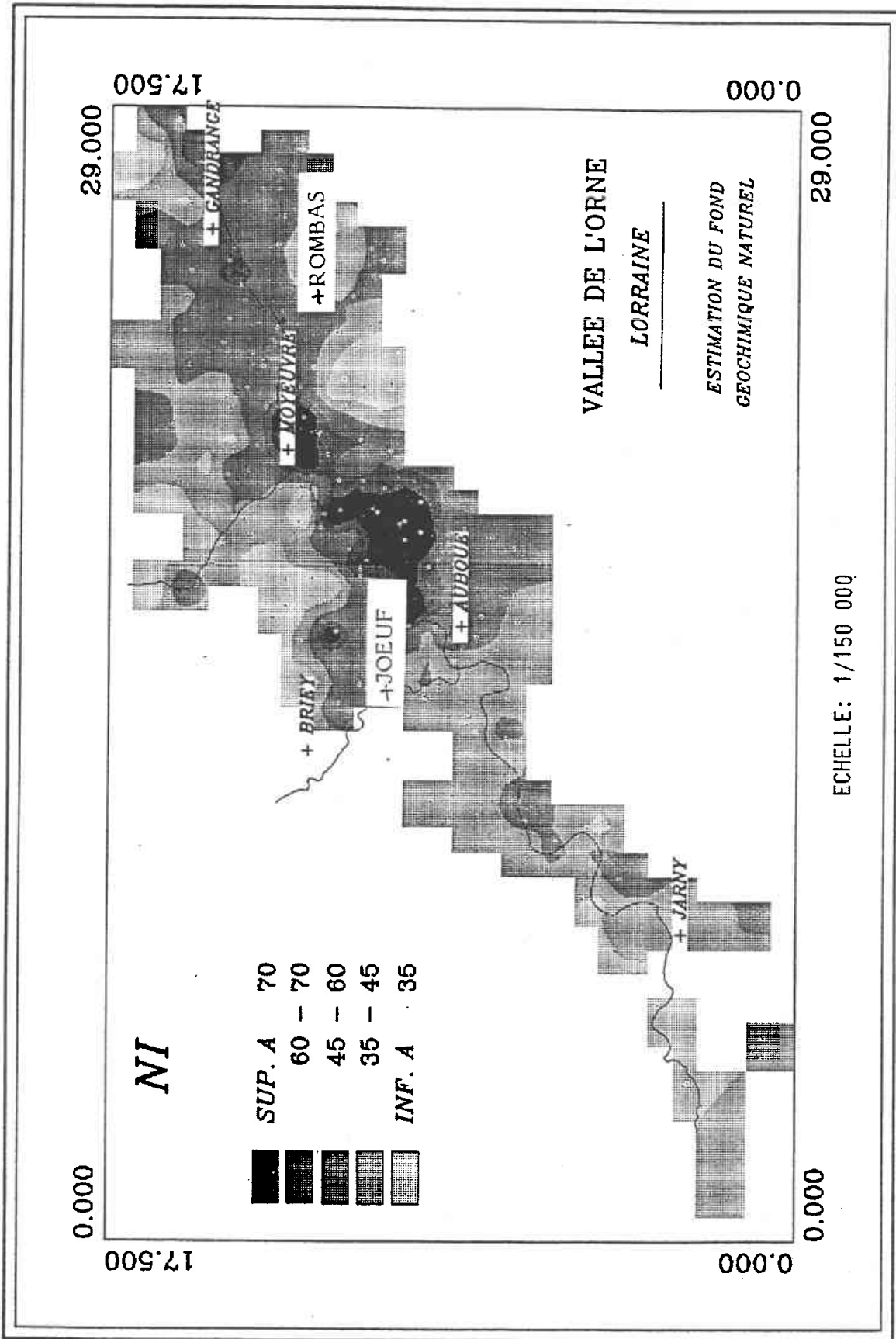


Figure 21

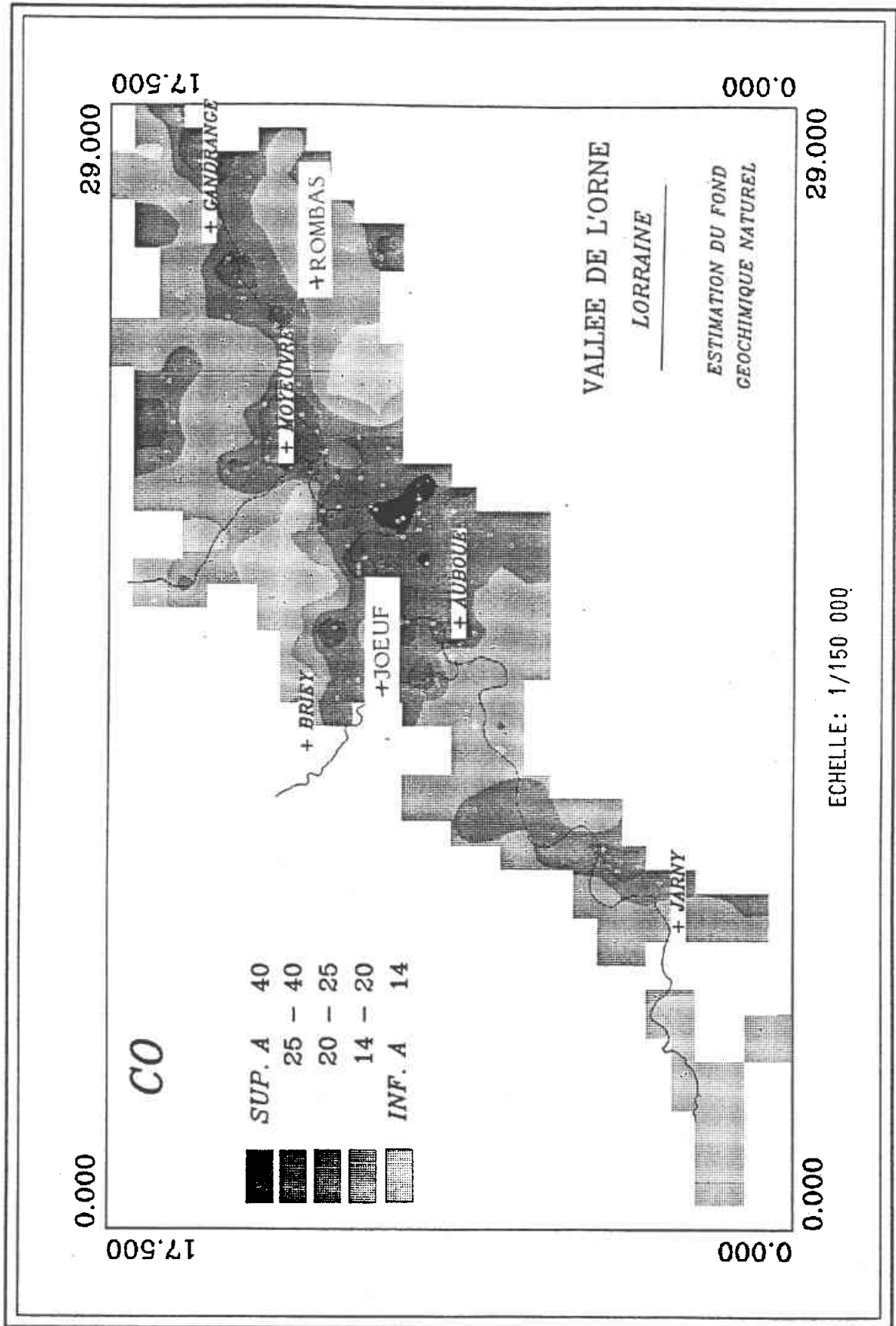


Figure 22

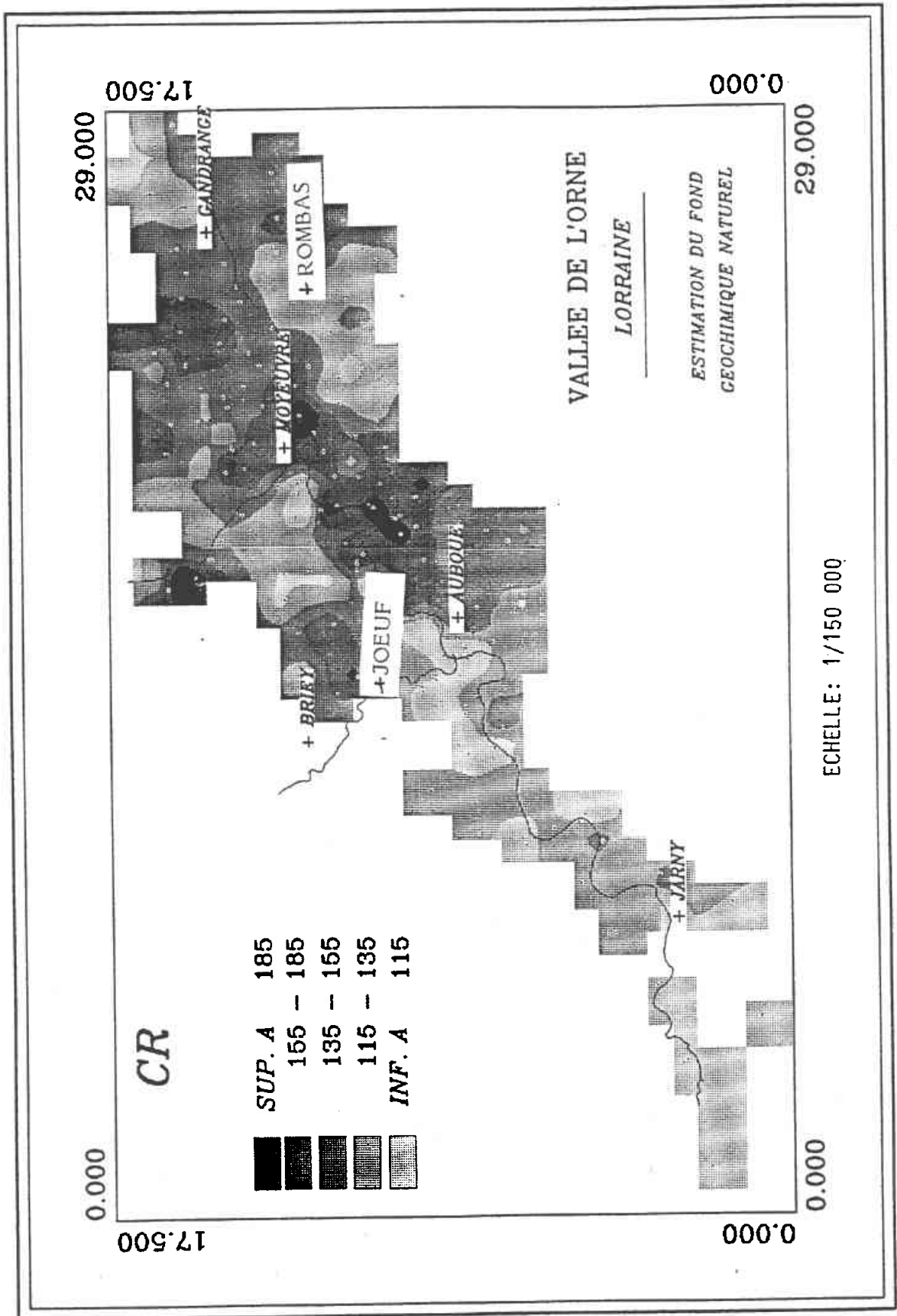


Figure 23

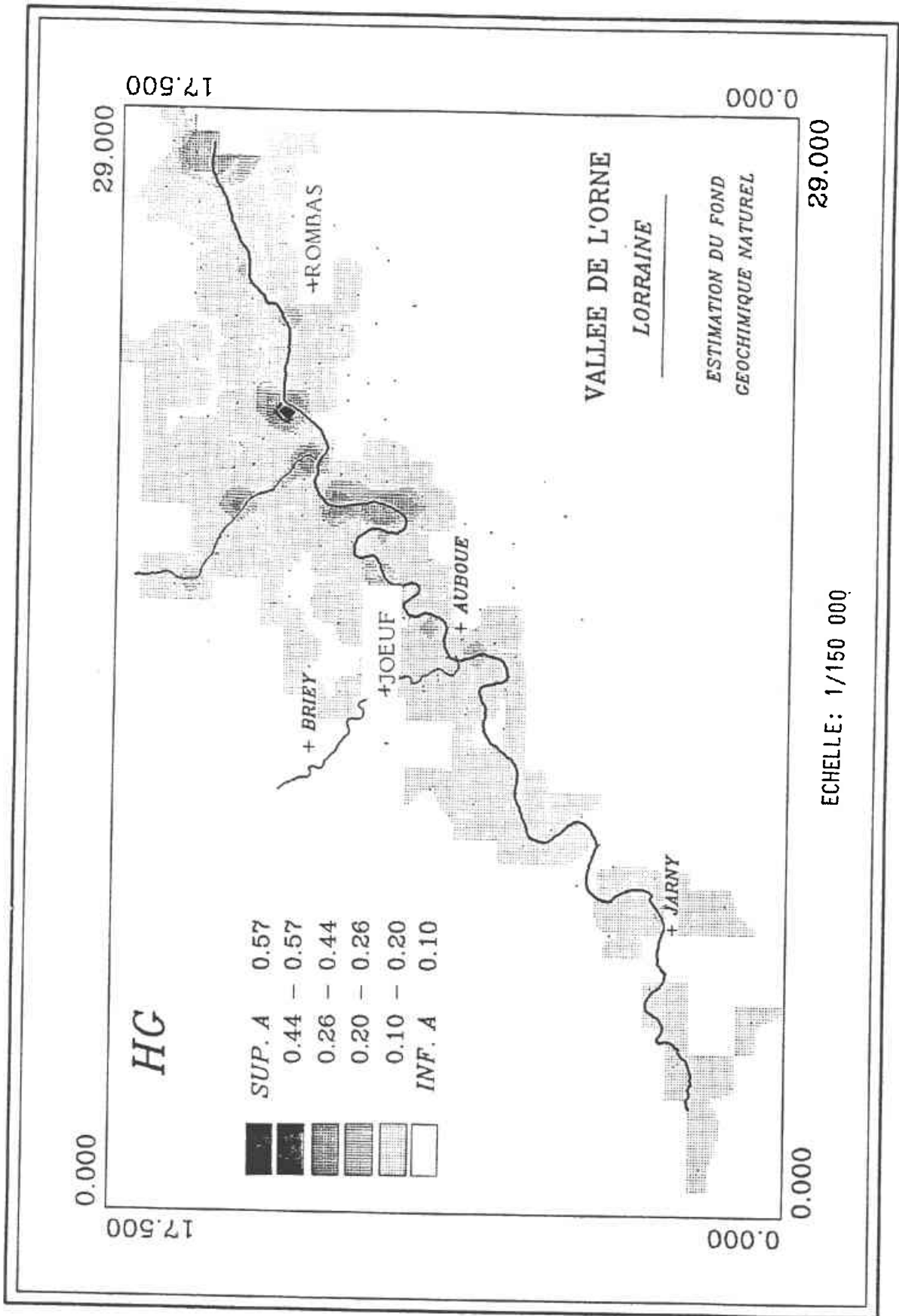


Figure 25

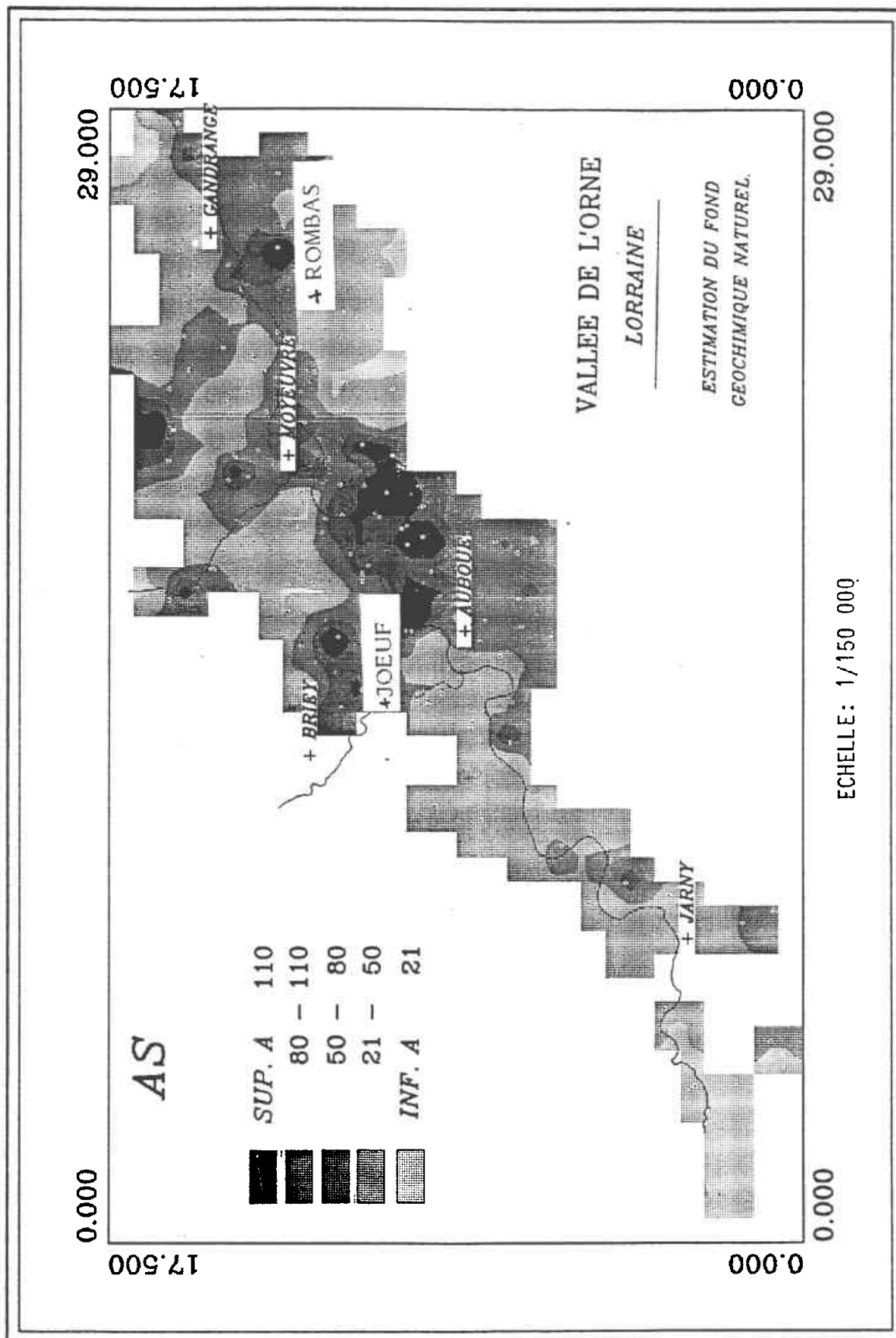


Figure 26

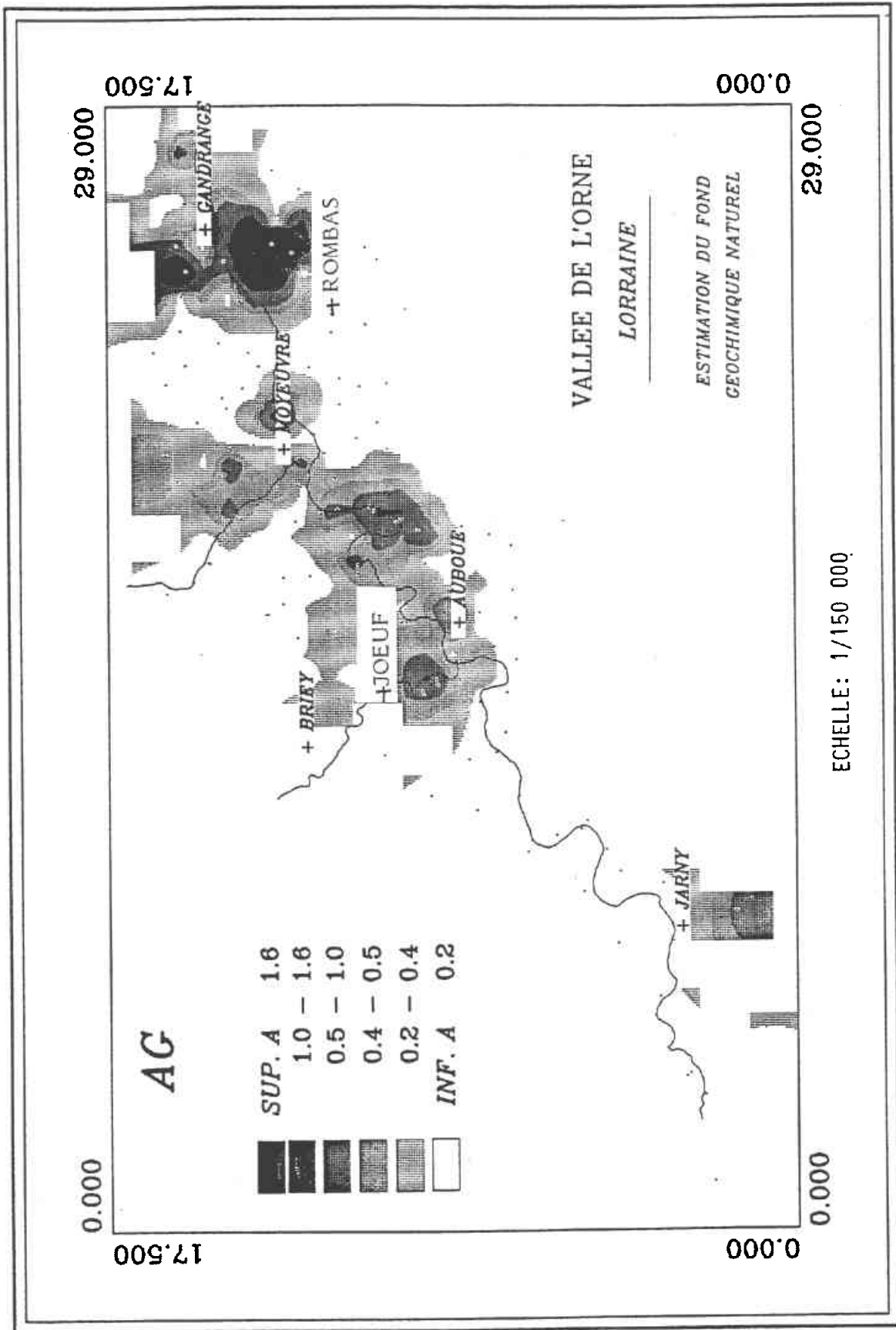


Figure 27

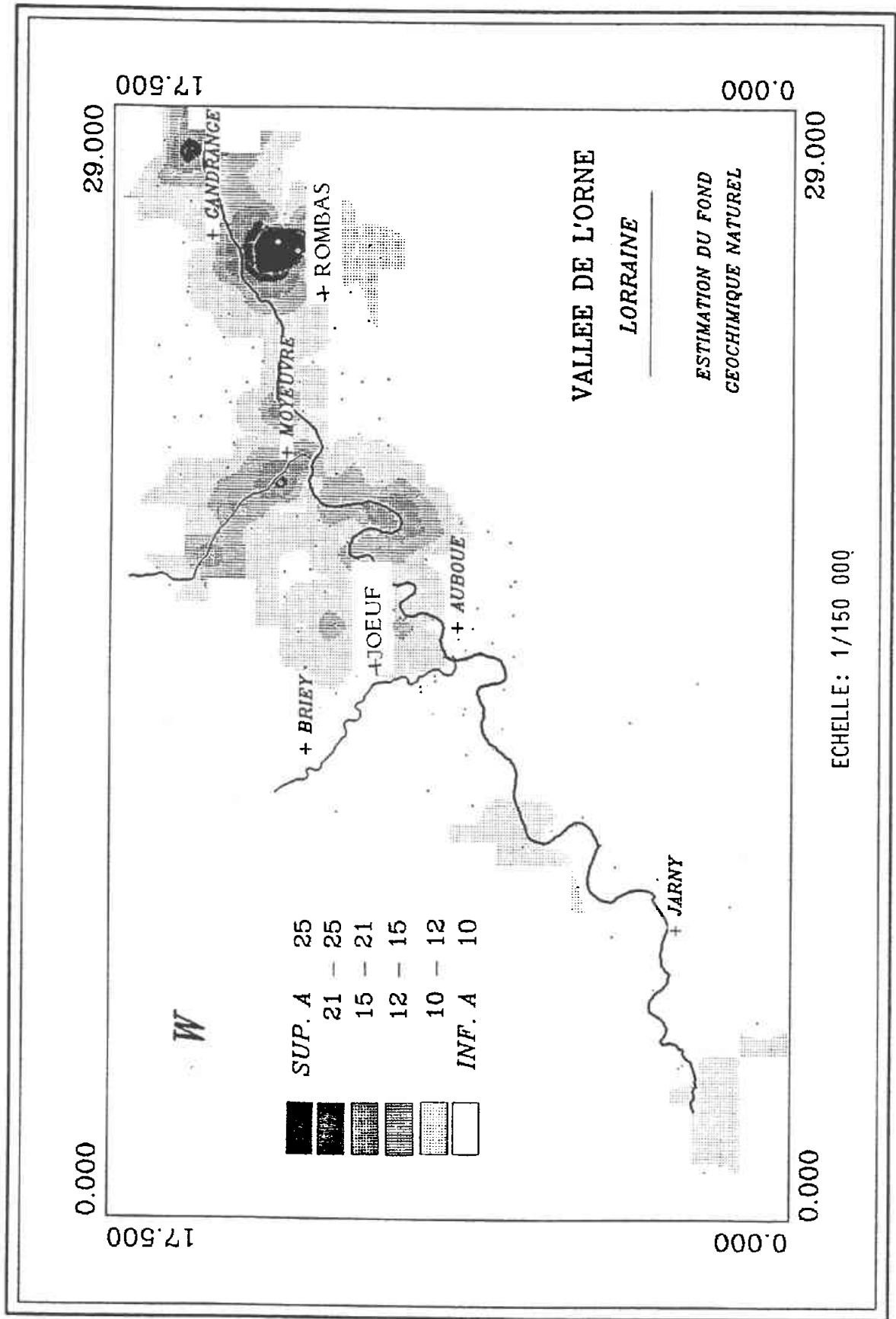
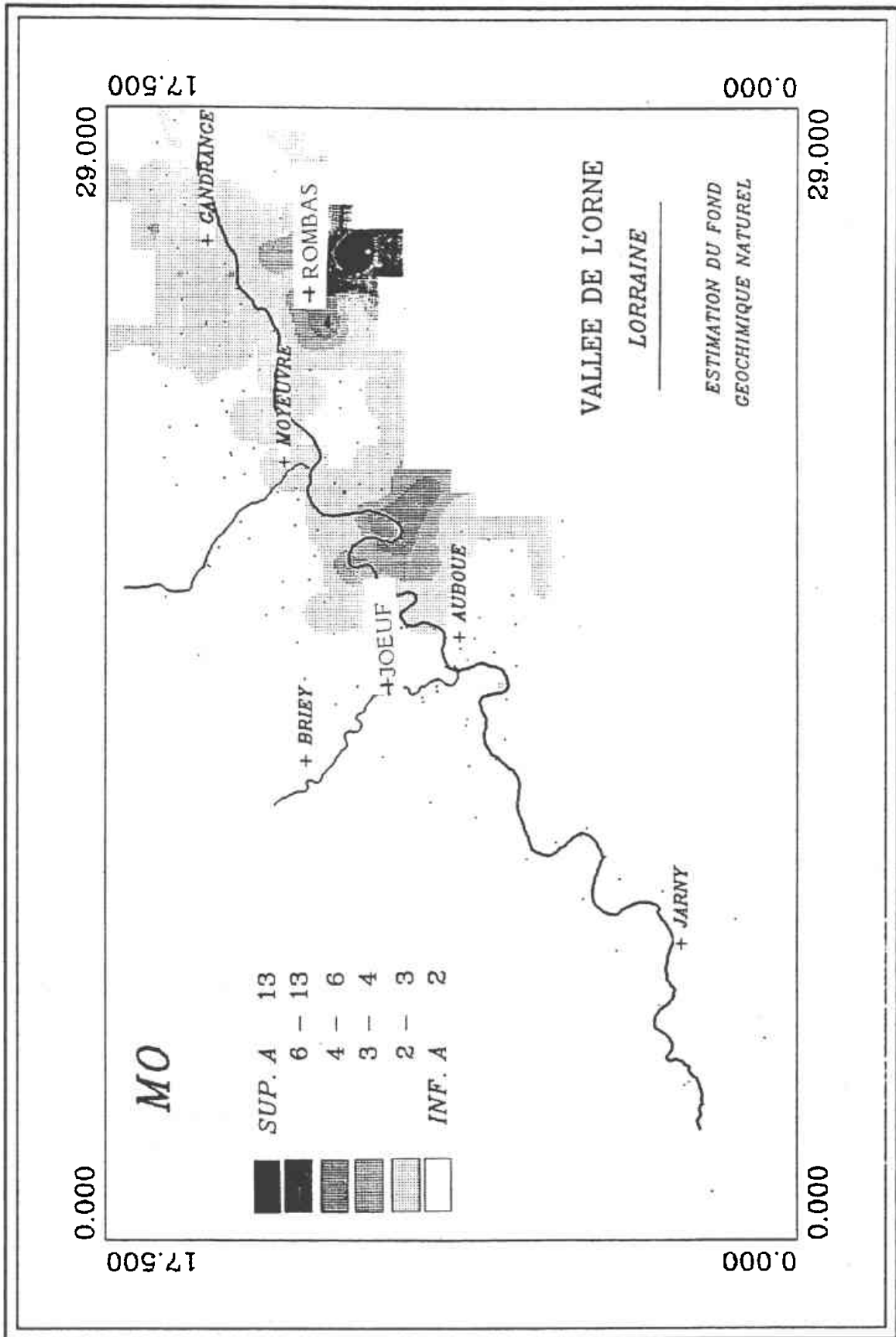


Figure 28



V - CONCLUSIONS

L'utilisation des techniques de prospection géochimique (échantillonnage, analyse multiélémentaire, traitement de données) a permis de préciser l'environnement géochimique de la Vallée de l'Orne.

Deux populations d'échantillons ont pu être différenciées par diverses techniques statistiques et cartographiques. La première classe définit le fond naturel (état zéro) tandis que la deuxième classe traduit l'impact des pollutions qu'elles soient d'origine métallogénique (minéralisations) ou antropogénique (contaminations industrielles, travaux miniers).

La répartition géographique de ces deux classes montre que les versants et la partie amont de l'Orne appartiennent à l'ensemble dit naturel alors que le cours aval de l'Orne recueille les pollutions dont l'origine ne peut être précisée.

Cette étude ponctuelle constitue par ailleurs une bonne illustration des possibilités d'utilisation des techniques habituelles de prospections géochimiques pour cerner des problèmes plus spécifiques d'environnement.

REFERENCES

- BONNEFOY D. (1980) - Essai d'utilisation des résultats de l'Inventaire géochimique pour l'étude des fonds naturels en éléments traces des bassins versants de la Thur et de la Doller (Haut Rhin), Note SGN/GMX n° 586, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans.
- MOUVET C., CORDEBAR P. et BOURG A. (1982) - Répartition du Pb, Cu et Zn entre les fractions dissoute et particulaire dans l'Orne, rivière recevant d'importants rejets sidérurgiques, J. Français Hydrol. 13, 299-309.
- NOURISSON M. (1983) - Répartition et passage des polluants métalliques dans divers compartiments inertes et vivants d'un cours d'eau : l'Orne, Contrat n° 81370, Ministère de l'Urbanisme et du Logement.
- TUREKIAN K.K. et WEDEPOHL K.H. (1961) - Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. Bull. Geol. Soc. Am., 72, 175-192.

B. R. G. M.
SGN/GMX/GCA n° 85

A N N E X E I

TECHNIQUES DE TRAITEMENT
DES DONNEES GEOCHIMIQUES

Division Géochimie appliquée

INTRODUCTION

La prospection géochimique multi-éléments implique, à partir du prélèvement des échantillons jusqu'à la présentation d'un document de synthèse des résultats obtenus, un enchaînement d'opérations diverses

* La première étape concerne l'acquisition, à partir des échantillons récoltés sur le terrain, de l'information géochimique. Celle-ci est obtenue, en regroupant dans un même fichier :

- . les **résultats analytiques** fournis par le laboratoire sous forme de bandes perforées.
- . les **coordonnées** des prélèvements, relevées automatiquement sur les plans d'échantillonnage à l'aide du coordinatographe.
- . les **observations de terrain** (géologie, type de prélèvement) transcrites, après codage, à l'aide de cartes perforées.

Le fichier ainsi constitué est enregistré et stocké sur un support magnétique (bande ou disque). Les résultats sont dès lors disponibles pour tout traitement informatique ultérieur : éditions, calculs statistiques, reports cartographiques, etc...

* Le traitement des données est directement lié au grand nombre de résultats analytiques recueillis ; ils justifient l'utilisation systématique de techniques faisant appel à l'ordinateur, tant au niveau du traitement que pour la présentation des résultats (cartographie).

Nous passerons en revue ci-après, les différentes méthodes d'analyses statistiques couramment utilisées, en précisant leur intérêt et leur contribution à l'interprétation et à la synthèse de l'information géochimique.

L'analyse statistique est une méthode de mesure objective des proximités entre les individus (échantillons) ou entre les variables (éléments). Elle s'appuie essentiellement sur l'étude de la **variabilité**.

Trois grands groupes de méthodes statistiques sont utilisés : le premier concerne le traitement des variables prises une à une (analyse univariée), le deuxième groupe les techniques d'étude des variations concomitantes de deux caractères (analyse bivariée) et enfin le troisième traite toutes les données simultanément (analyse multivariée).

1. ANALYSE STATISTIQUE ELEMENTAIRE

Elle permet de résumer, graphiquement ou par le calcul, les caractéristiques essentielles de la distribution d'un élément.

1.1. Les paramètres caractéristiques de la distribution

Ces paramètres sont calculés automatiquement par un programme informatique et regroupés dans un tableau où sont représentés pour chaque élément :

- . le nombre d'échantillons ;
- . les valeurs extrêmes des teneurs ;
- . la moyenne arithmétique ;
- . l'écart-type ;
- . le coefficient de variation ;
- . la moyenne géométrique ;
- . la déviation géométrique.

Une telle réduction des données à quelques caractéristiques est indispensable pour la comparaison de plusieurs séries d'échantillons.

Les paramètres de distribution sont de deux types :

* **les caractéristiques de tendance centrale** qui représentent l'ordre de grandeur des teneurs d'un élément sur l'ensemble des échantillons. Ce sont :

- la moyenne arithmétique qui représente le quotient de la somme des teneurs d'un élément par le nombre d'échantillons

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ; x_i = \text{teneur de l'élément } i.$$

- la moyenne géométrique G : elle est obtenue en faisant la moyenne des teneurs transformées en valeurs logarithmiques

$$\log G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log x_i.$$

Cette estimation de la moyenne constitue souvent une meilleure estimation de la "teneur de fond" géochimique que la moyenne arithmétique en diminuant l'importance des valeurs fortement anormales.

* **les caractéristiques de dispersion** : elles ont pour but d'apprécier dans quelle mesure les diverses observations d'une série s'écartent les unes des autres et par conséquent de la valeur adoptée.

- Intervalle de variation : c'est la différence entre les valeurs extrêmes de la variable étudiée :

$$I = x_{\max} - x_{\min}$$

- Ecart-type : (déviation standard) : c'est un paramètre de dispersion qui tient compte des écarts de toutes les valeurs observées par rapport à la moyenne :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2}$$

- Coefficient de variation : il est défini à l'aide du rapport de l'écart-type à la moyenne arithmétique :

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

- Déviatiion géométrique (écart géométrique ϵ) : c'est le nombre dont le logarithme correspond à l'écart-type des valeurs logarithmiques des teneurs :

$$\log \epsilon = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\log x_i - \log G)^2}$$

Les paramètres de distribution sont utilisés d'une manière habituelle pour l'estimation des seuils d'anomalies (A) pour les éléments étudiés.

Ainsi, par exemple, le seuil permettant d'isoler 2.5 % des valeurs les plus élevées (valeurs anormales) est calculé par :

- pour une distribution normale : $A = \bar{x} + 2\sigma$
- pour une distribution log-normale : $A' = G\epsilon^2$

1.2. Représentation graphique des distributions

L'histogramme des fréquences d'un élément donné visualise la répartition des effectifs des échantillons dans un certain intervalle de variation des teneurs prises par cet élément. On peut obtenir sur le traceur de courbes ou par sortie sur imprimante un histogramme portant sur la totalité ou une partie des échantillons.

Le nombre de classes est fourni par l'utilisateur. Pour chacune d'elle, la hauteur des rectangles dont la base est égale à l'intervalle de classe est proportionnelle à l'effectif (ou à la fréquence) correspondant.

L'allure générale de la courbe des fréquences permet d'apprécier l'homogénéité ou l'hétérogénéité des données et parfois de mettre en évidence certains types de transformation et de réduction à faire subir aux variables.

Certaines variables présentent une distribution symétrique. Les fréquences décroissent de part et d'autre de la valeur centrale. Leur loi de variation peut être assimilée à celle d'une population normale.

Mais le plus souvent dans le cas des données géochimiques les fréquences décroissent plus rapidement d'un côté du sommet de la courbe que de l'autre, la dispersion des teneurs des éléments étant plus élevée du côté des fortes teneurs. Ces variables suivent alors une loi de distribution expérimentale plus proche de la loi log normale. Dans ce cas, la transformation des valeurs naturelles en valeurs logarithmiques permet une meilleure définition des seuils anomaux.

On observe parfois des courbes de distribution plus complexes, présentant plusieurs sommets (courbes plurimodales) traduisant le mélange d'un certain nombre de populations différenciées au sein de l'échantillonnage.

Une autre méthode graphique dite "de la droite de Henry" permet de vérifier si une distribution observée s'ajuste convenablement à une loi normale et d'estimer éventuellement les paramètres caractéristiques de cette loi.

Ce graphique est obtenu en reportant les fréquences cumulées des différentes classes sur un papier à quadrillage "gausso-arithmétique" pour lequel :

- . l'axe des abscisses sur lequel sont reportées les teneurs, est à graduation arithmétique ou logarithmique (distribution log-normale) ;
- . l'axe des ordonnées est à graduation "normale".

L'approximation de la loi de distribution à une loi normale (ou log-normale) est valable si les points expérimentaux s'alignent correctement.

2. ANALYSE STATISTIQUE BIVARIEE

Elle consiste à analyser les variations simultanées de deux caractères, soit sur un graphique, soit par le calcul du coefficient de corrélation linéaire :

* **le coefficient de corrélation** : c'est un indice numérique, variant entre -1 et +1, dont la valeur absolue marque l'intensité de la liaison entre deux variables. Ce coefficient est positif lorsque les éléments varient dans le même sens et négatif lorsque les fluctuations jouent en sens inverse.

L'ensemble des coefficients calculés entre les différents éléments sont regroupés dans un seul tableau : la matrice des coefficients de corrélation.

* **le diagramme binaire** : une meilleure estimation de l'interdépendance d'une variable "y" par rapport à une variable "x" est obtenue en reportant sur un diagramme de coordonnées rectangulaires, en fonction de "x" et "y", les points correspondants à chaque échantillon ; il existe plusieurs cas de figures possibles :

- . les points peuvent être dispersés au hasard, c'est-à-dire que les variables "x" et "y" sont indépendantes : la corrélation est nulle ;
- . les points de la série peuvent s'aligner sur un segment de droite. Il existe alors une relation fonctionnelle linéaire entre "x" et "y" : l'une des variables est parfaitement déterminée par l'autre : $|r_{xy}| = 1$.

En général, on observe une configuration transitoire entre ces deux cas extrêmes : les points se répartissent suivant un nuage plus ou moins allongé et possédant une forme elliptique. L'allongement du nuage traduit la liaison plus ou moins étroite existant entre les deux variables.

L'hétérogénéité que l'on observe parfois dans la répartition des points sur le graphique, reflète l'existence de plusieurs populations d'échantillons se différenciant par leurs caractères "x" et "y".

Ainsi, l'étude du nuage de points conduit parfois à réviser les conclusions tirées de l'étude des coefficients de corrélations statistiques, soit qu'elle mette en évidence, entre les variables étudiées, une dépendance très étroite mais non linéaire, soit qu'elle fasse apparaître à l'intérieur des différents groupes d'échantillons, des corrélations beaucoup plus étroites que celle qui apparaît au niveau du nuage considéré dans son ensemble.

3. TRAITEMENT STATISTIQUE MULTIVARIABLE

3.1. La régression multiple

La régression multiple, suivie du calcul des résidus, permet de relier les variations d'une variable (dite variable dépendante) aux variations d'une ou plusieurs autres variables (dites variables explicatives).

Elle a pour but essentiel la mise en évidence et l'élimination des contenus métalliques élevés d'origine formationnelle. Ainsi, par exemple, les fortes teneurs en cuivre liées à la présence de roches basiques peuvent être atténuées voire supprimées par l'étude de la répartition de Ni, Co, V,... Par contre, les valeurs anormales réellement significatives persisteront et apparaîtront mieux contrastées.

Très schématiquement, cette technique comprend les étapes suivantes :

* recherche des éléments associés de manière formationnelle au métal en question. Par exemple, pour le cuivre : nickel, cobalt, chrome ;

* calcul des coefficients de l'équation de régression multiple ; pour le même exemple :

$$Cu_{\text{calculé}} = a Ni + b Co + c Cr + C$$

a, b, c = coefficients de l'équation de régression ;
C = constante.

* calcul des teneurs résiduelles, à savoir les différences entre les teneurs observées et les teneurs calculées.

Les valeurs résiduelles positives permettent de définir plus précisément les zones d'intérêt qui pourraient avoir échappé au seul examen des teneurs brutes.

3.2. L'analyse factorielle (d'après A. HERBOCH et P. LAFFITTE)

L'objectif de l'analyse factorielle est d'extraire sous une forme condensée, la plus grande part de l'information contenue dans un lot de données numériques (ici les résultats des analyses géochimiques).

Il s'agit d'expliquer les relations observées entre les fluctuations des teneurs des divers éléments dosés, en termes de relations plus simples et surtout plus fondamentales. Cette synthèse nécessite une série d'opérations mathématiques complexes, qui ont comme point de départ le tableau des coefficients de corrélations entre les variables.

Il en résulte la création d'un petit nombre de variables hypothétiques (les facteurs) rendant compte de la plus grande partie des variations observées. Ces facteurs, dans les cas favorables, pourront refléter les phénomènes qui sont à l'origine de ces variations : aussi cherchera-t-on à identifier chacun d'eux avec une réalité (géologique, minéralogique, etc...), c'est-à-dire à interpréter dans une optique naturaliste le résultat des calculs.

Si par exemple on étudie un ensemble plutonique à partir de données chimiques et que Fe, Mg et Ti soient groupés sur le même facteur, celui-ci pourrait exprimer la variation des teneurs en minéraux ferromagnésiens dans les différents échantillons. Dans le cas de prospections géochimiques, les facteurs pourront illustrer la présence de diverses minéralisations, le contraste entre les principales unités géologiques, les phénomènes pédologiques, etc...

L'influence de chacun des facteurs sur un échantillon particulier peut être évaluée par un chiffre appelé "score" du facteur pour l'échantillon considéré, d'autant plus élevé que l'influence du facteur est plus forte. La cartographie de ces "facteurs-scores" permet ensuite de visualiser l'importance à l'échelle régionale, du phénomène illustré par le facteur en question.

3.3. La classification des échantillons

Cette rubrique englobe différentes techniques, directes ou analogiques, de "tri" ou de classification des échantillons.

Elles facilitent le regroupement d'individus présentant des spectres géochimiques voisins et contribuent ainsi à la mise en évidence d'unités caractéristiques des entités lithologiques ou métallogéniques.

Ces techniques complètent souvent utilement l'information donnée par l'analyse factorielle, tant pour la cartographie que pour la recherche d'anomalies.

4. CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE DES DONNEES A L'AIDE DE LA TABLE TRACANTE

Les données diverses (teneurs, facteurs-scores donnés par l'analyse factorielle, teneurs résiduelles) peuvent être cartographiées de différentes manières :

- report des valeurs brutes des différentes variables ;
- report des valeurs en utilisant des figurés différents pour des seuils choisis ;

- calcul et report des moyennes mobiles : cette méthode de lissage consiste à découper le secteur étudié en cellules élémentaires et à calculer dans chacune d'elles la moyenne des teneurs d'un élément donné. Cette technique permet de définir les tendances régionales de la répartition des teneurs d'un élément. Généralement, les cellules se superposent de moitié, dans le sens vertical et dans le sens horizontal : chaque échantillon intervient ainsi dans quatre cellules ;
 - tracé des courbes d'isoteneurs ;
 - représentation des fluctuations des valeurs lissées d'une variable par le dessin automatique d'une trame régulière de points dont la grosseur est proportionnelle à la valeur prise par la variable.

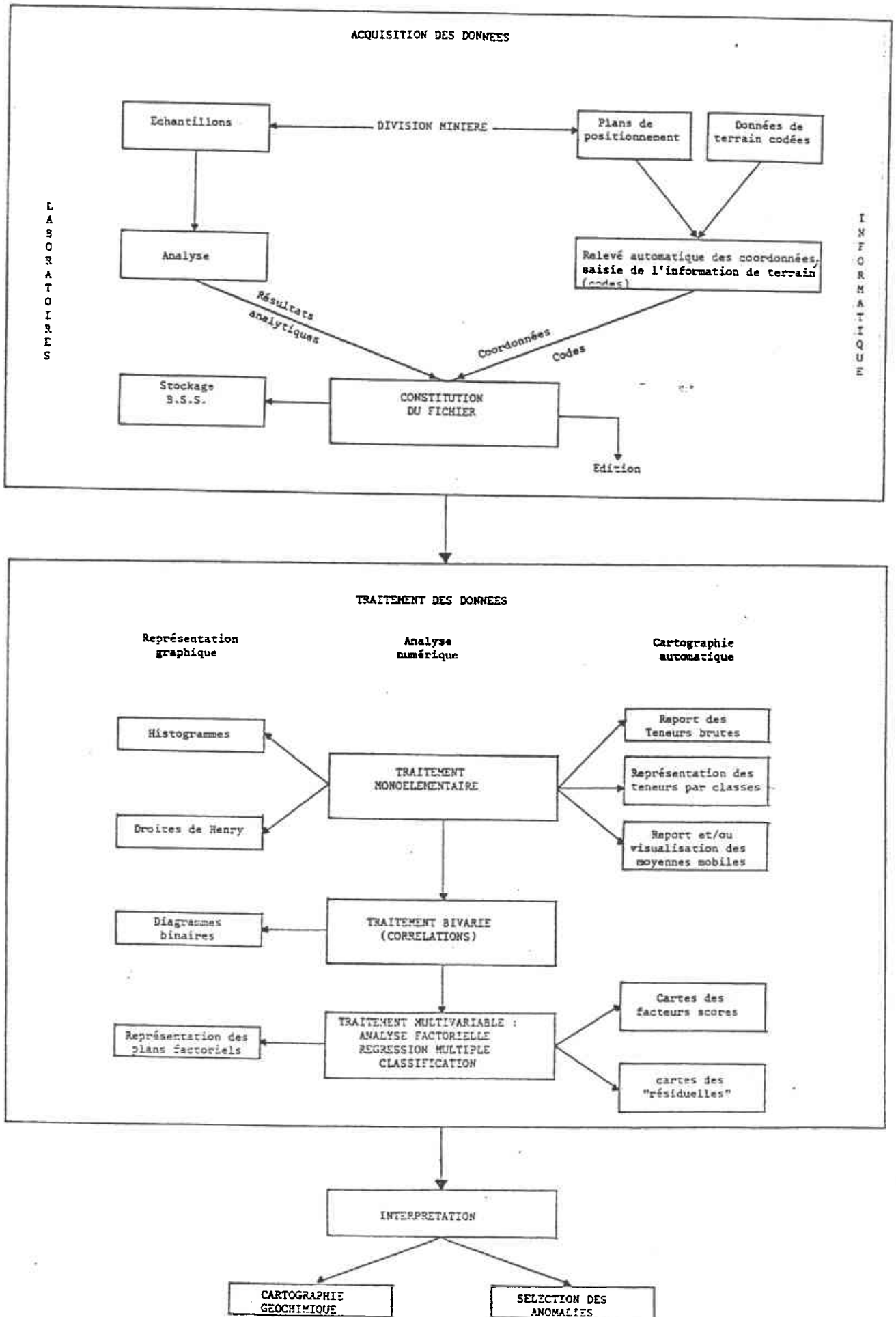


Figure 1

RESULTATS ANALYTIQUES

A.2.1. Seuils de détection (spectrométrie à couplage inductif)

ELEMENTS	LIMITES INFERIEURES DE DOSABILITE	LIMITES SUPERIEURES DE DOSABILITE
SiO ₂	1,00 %	100,00 %
Al ₂ O ₃ (AL2X)	1,00 %	100,00 %
Fe ₂ O ₃ (FE2X)	1,00 %	100,00 %
CaO	1,00 %	100,00 %
MgO	0,20 %	50,00 %
K ₂ O	0,20 %	20,00 %
MnO	0,01 %	20,00 %
TiO ₂	0,01 %	35,00 %
P	100 ppm	80000 ppm
Li	10 ppm	40000 ppm
Be	1 ppm	3500 ppm
B	10 ppm	18000 ppm
V	10 ppm	40000 ppm
Cr	10 ppm	15000 ppm
Co	4 ppm	25000 ppm
Ni	10 ppm	18000 ppm
Cu	5 ppm	8000 ppm
Zn	5 ppm	20000 ppm
As	20 ppm	50000 ppm
Sr	5 ppm	10000 ppm
Y	10 ppm	5000 ppm
Nb	10 ppm	15000 ppm
Mo	2 ppm	7500 ppm
Ag	0,1 ppm	700 ppm
Cd	1 ppm	5000 ppm
Sn	10 ppm	20000 ppm
Sb	5 ppm	25000 ppm
Ba	10 ppm	4000 ppm
La	20 ppm	15000 ppm
Ce	10 ppm	5500 ppm
W	10 ppm	15000 ppm
Pb	1 ppm	6500 ppm
Bi	1 ppm	10000 ppm
Zr	20 ppm	14000 ppm

Remarque :

Une valeur égale à la limite inférieure de dosabilité doit être considérée comme inférieure ou égale à la limite.

Une valeur égale à la limite supérieure de dosabilité doit être considérée comme supérieure ou égale à la limite.

Les concentrations sont déterminées par rapport à un échantillon éventuellement débarrassé de sa matière organique.

Les éléments majeurs sont donnés avec une précision de 5 % relative en milieu de gamme et les éléments traces avec 10 % dans les mêmes conditions.

Toute valeur supérieure à la limite de dosabilité peut entraîner une interférence non contrôlée sur l'un quelconque des autres éléments.

Attention :

l'interprétation de toute valeur située en dehors des seuils fixés par le laboratoire est laissée au jugement du lecteur.

A.2.2. Composition des échantillons

SiO ₂		
Al ₂ O ₃ (Al ₂ X)		
Fe ₂ O ₃ (Fe ₂ X)		
MgO		en %
CaO		
K ₂ O		
MnO		
TiO ₂		

Les autres éléments, y compris le fluor (F2), en ppm.

ECH.	XXXX	YYYY	SI02	AL2X	FE2X	CA0	MGO	K20	MND	TIO2	F	LI	RE	B	V
51	27.340	13.238	64.	11.6	9.5	5.0	0.8	2.4	0.17	0.91	2436.	82.	1.	84.	118.
52	26.845	12.556	59.	15.2	8.7	6.9	1.1	2.4	0.18	1.11	2047.	146.	1.	101.	123.
53	25.815	12.031	23.	14.9	11.9	30.1	5.4	0.2	0.75	0.33	13433.	40.	1.	68.	448.
54	25.973	11.991	76.	6.1	9.5	4.2	0.8	2.7	0.26	0.78	1499.	42.	1.	60.	66.
55	26.162	13.081	63.	10.5	9.5	8.3	1.0	2.3	0.17	0.89	3771.	88.	1.	84.	129.
56	25.430	13.258	58.	10.5	10.6	8.3	1.0	2.3	0.34	0.83	6093.	71.	1.	84.	232.
57	25.200	12.746	24.	13.0	16.9	18.8	3.5	1.7	1.97	0.17	9978.	236.	12.	250.	215.
58	24.368	11.341	69.	19.6	6.8	2.4	0.8	3.3	0.16	0.96	2293.	67.	1.	87.	108.
59	23.368	10.881	71.	19.6	8.5	2.4	0.8	3.3	0.09	0.81	2912.	71.	1.	74.	108.
60	24.223	12.338	72.	11.5	5.4	1.0	0.8	2.0	0.08	1.04	1118.	74.	1.	81.	83.
61	14.349	12.456	79.	8.5	3.5	1.0	0.5	2.0	0.16	1.12	1272.	45.	1.	75.	74.
62	15.288	12.648	73.	8.8	9.4	1.0	0.9	2.6	0.25	0.84	1582.	52.	1.	75.	156.
63	16.176	13.006	78.	8.6	4.2	1.0	0.5	2.1	0.17	1.12	1034.	47.	1.	75.	156.
64	16.313	11.964	75.	8.6	4.2	1.0	0.5	2.0	0.06	1.14	1775.	57.	1.	73.	65.
65	15.513	11.719	33.	7.6	3.7	10.7	1.1	1.6	0.55	0.47	6653.	48.	1.	73.	70.
66	16.901	12.338	80.	8.2	3.8	1.7	1.5	1.2	0.07	1.14	595.	47.	1.	132.	286.
67	17.623	11.411	72.	11.9	10.1	1.7	0.9	2.2	0.56	1.05	1659.	73.	1.	73.	59.
68	16.846	13.016	77.	18.3	4.3	1.0	0.5	2.5	0.12	1.05	866.	45.	1.	99.	126.
69	17.948	13.866	74.	10.8	5.5	1.5	0.7	2.8	0.18	1.05	816.	58.	1.	83.	62.
70	18.956	12.623	69.	6.4	8.8	18.4	0.7	1.4	0.11	0.62	1289.	41.	1.	83.	81.
71	19.243	12.656	51.	6.5	7.0	18.4	0.7	2.0	0.13	0.55	3564.	54.	1.	55.	92.
72	18.301	12.698	63.	8.5	8.3	4.5	0.8	2.8	0.30	0.87	2083.	52.	1.	63.	101.
73	17.518	12.206	53.	8.7	3.9	17.9	1.5	0.2	0.70	0.71	2561.	56.	2.	70.	121.
74	18.139	14.139	36.	8.7	3.1	3.4	0.7	0.2	0.05	0.83	529.	36.	1.	76.	134.
75	17.258	14.921	63.	8.2	8.7	4.0	0.8	2.1	0.16	0.86	985.	60.	1.	81.	134.
76	17.228	14.851	63.	6.3	3.2	12.6	0.7	1.6	0.11	0.62	2738.	46.	1.	80.	140.
77	16.451	15.986	60.	6.3	3.2	12.6	0.6	1.4	0.06	0.71	1462.	49.	1.	64.	82.
78	16.761	15.296	33.	6.2	5.8	23.8	0.7	2.2	0.17	0.50	2344.	54.	1.	100.	254.
79	17.723	14.621	53.	8.7	6.6	16.0	0.7	1.2	0.06	0.69	1282.	75.	1.	65.	105.
80	18.391	14.078	46.	7.4	3.3	12.6	1.0	1.4	0.13	0.56	6925.	60.	1.	103.	217.
81	18.476	14.248	77.	7.8	3.8	12.2	0.7	3.2	0.27	0.82	1503.	42.	1.	77.	116.
82	19.153	13.143	55.	6.1	4.7	2.7	0.7	1.0	0.27	0.63	3441.	47.	1.	79.	153.
83	20.265	13.746	69.	9.4	12.4	2.8	0.8	1.3	0.24	0.89	1948.	54.	1.	94.	155.
84	20.803	15.883	69.	10.8	11.5	1.4	0.7	2.7	0.57	1.01	2767.	70.	1.	96.	149.
85	20.853	15.191	73.	10.9	7.6	1.0	0.5	2.0	0.31	1.06	834.	63.	1.	83.	117.
86	21.850	15.986	75.	10.5	5.0	1.0	0.6	2.0	0.32	1.06	834.	63.	1.	81.	87.
87	22.323	15.493	70.	11.1	10.0	1.3	0.7	2.5	0.47	1.13	1890.	69.	1.	90.	150.
88	22.668	16.303	77.	11.7	17.1	1.1	0.5	1.9	0.18	0.82	1352.	38.	1.	66.	109.
89	23.208	15.601	73.	8.5	9.8	1.4	0.7	2.5	0.21	0.84	2592.	57.	1.	84.	135.
90	23.900	14.621	68.	10.1	6.9	1.8	0.8	2.2	0.10	0.89	1334.	68.	1.	85.	151.
91	25.340	10.879	70.	15.1	6.9	1.8	0.8	2.2	0.10	1.15	2667.	74.	1.	102.	164.
92	25.020	13.979	70.	13.9	7.3	1.0	0.7	2.8	0.20	1.02	741.	81.	1.	106.	102.
93	23.168	11.589	73.	11.7	6.4	1.3	0.7	2.7	0.08	0.93	2707.	89.	1.	88.	95.
94	21.848	10.351	82.	4.3	3.5	1.3	0.2	1.6	0.04	0.76	837.	18.	1.	46.	41.
95	21.775	11.041	78.	4.9	3.8	1.9	0.3	1.5	0.04	0.59	1354.	23.	1.	45.	47.
96	21.985	11.554	74.	8.4	7.8	2.2	0.6	2.3	0.11	0.81	3310.	54.	1.	73.	92.
97	21.313	11.554	74.	8.4	7.8	2.2	0.6	2.3	0.03	0.68	3564.	63.	1.	60.	75.
98	20.820	10.591	75.	10.2	6.0	1.6	0.6	2.2	0.14	0.93	2925.	64.	1.	77.	75.
99	20.425	11.119	56.	10.4	6.6	1.7	0.9	2.2	0.48	0.81	2926.	72.	1.	112.	88.
100	20.135	10.356	63.	12.3	12.6	1.7	0.9	2.2	0.34	0.96	1691.	87.	1.	99.	192.

ECH.	XXXX	YYYY	SI02	AL2X	FE2X	CAD	M60	K20	MNO	TI02	F	LI	RE	B	V
101	19.198	10.506	31.	12.0	13.8	22.4	1.3	1.0	0.14	0.56	1516.	163.	1.	100.	276.
102	19.368	11.064	46.	6.9	14.1	14.8	0.6	1.0	0.33	0.67	2596.	53.	1.	83.	143.
103	19.386	11.684	62.	8.3	18.4	1.9	0.8	2.6	0.30	0.74	3070.	44.	1.	103.	196.
104	20.053	11.946	47.	5.7	19.1	1.9	0.7	1.2	0.26	0.51	3727.	41.	1.	98.	183.
105	20.540	12.201	49.	6.7	23.6	7.7	0.8	1.9	0.36	0.54	4446.	44.	1.	111.	223.
106	20.990	12.571	59.	7.7	23.5	7.7	0.7	2.7	0.33	0.74	3761.	49.	1.	123.	236.
107	21.765	12.668	68.	8.1	14.1	2.8	0.7	2.6	0.23	0.77	2548.	54.	1.	95.	172.
108	22.270	12.323	67.	8.6	9.9	3.4	0.8	3.0	0.13	0.74	7321.	63.	1.	82.	104.
109	22.295	13.616	68.	8.0	9.8	4.1	0.7	2.7	0.13	0.73	2226.	59.	1.	85.	132.
110	21.250	13.541	55.	8.7	9.9	14.9	0.8	1.6	0.21	0.63	5157.	52.	1.	77.	120.
111	17.858	9.979	38.	6.4	35.4	19.9	1.0	1.7	0.40	0.47	6112.	44.	1.	142.	265.
112	18.051	9.596	31.	6.8	23.4	19.4	0.8	1.9	0.41	0.46	4054.	60.	1.	110.	231.
113	18.836	9.594	63.	10.7	14.2	1.4	0.8	2.9	0.28	0.98	2036.	84.	1.	106.	203.
114	17.178	9.376	54.	13.1	13.0	5.2	1.2	3.6	0.20	0.89	1689.	136.	1.	111.	194.
115	13.704	11.651	69.	11.4	12.3	4.4	0.8	3.2	0.40	0.99	2007.	174.	1.	100.	147.
116	14.164	11.116	67.	11.5	10.3	1.1	0.8	2.5	0.26	1.02	1290.	104.	1.	103.	202.
117	14.694	10.361	69.	10.1	10.2	1.2	0.8	2.2	0.24	1.05	2557.	92.	1.	93.	137.
118	15.366	10.284	59.	17.2	4.5	12.9	0.8	0.9	0.09	0.64	7226.	51.	1.	57.	76.
119	15.214	10.746	66.	9.6	8.0	3.2	0.9	2.2	0.33	0.84	2024.	66.	1.	78.	119.
120	15.868	10.189	25.	6.8	41.0	9.5	1.4	0.7	0.34	0.38	7282.	36.	2.	165.	339.
121	14.671	8.896	44.	8.2	7.1	20.4	0.9	0.5	0.29	0.57	2717.	68.	1.	72.	90.
122	15.026	7.654	63.	11.5	12.3	7.3	1.2	2.1	0.20	0.93	1314.	77.	2.	96.	117.
123	15.388	8.151	59.	12.8	13.4	3.5	1.1	2.5	0.22	0.91	2742.	117.	1.	111.	171.
124	16.606	8.674	54.	14.4	13.4	3.6	1.3	2.9	0.19	0.96	1785.	144.	1.	123.	194.
125	18.143	8.469	52.	13.4	10.0	8.9	1.2	1.8	0.13	0.87	2202.	131.	1.	108.	161.
126	17.256	8.724	44.	12.3	11.2	14.3	1.3	1.7	0.09	0.73	2855.	119.	1.	101.	192.
127	17.928	7.784	54.	13.4	12.0	7.1	1.3	2.9	0.22	0.87	2233.	128.	1.	112.	181.
128	17.648	7.224	58.	12.5	11.4	6.3	1.2	2.9	0.16	0.88	3394.	107.	1.	113.	168.
129	16.496	7.194	68.	12.3	9.9	10.9	1.0	3.1	0.11	1.02	2328.	103.	1.	103.	179.
130	15.766	7.122	56.	11.4	7.6	1.9	0.9	2.0	0.23	0.83	1123.	89.	1.	81.	115.
131	15.928	8.027	63.	12.8	9.4	3.2	1.1	2.8	0.17	0.94	1723.	100.	1.	99.	134.
132	15.988	8.724	49.	7.6	10.0	2.3	1.0	0.9	0.26	0.63	2844.	56.	1.	78.	228.
133	15.126	8.514	29.	6.2	18.1	6.4	1.0	2.8	0.23	0.41	3236.	74.	1.	99.	184.
134	14.676	7.104	61.	12.3	7.7	17.2	1.1	1.8	0.13	0.90	1877.	90.	1.	94.	109.
135	13.841	7.349	67.	11.8	8.2	3.0	1.0	2.8	0.15	0.97	1666.	88.	1.	93.	117.
136	12.809	7.382	53.	11.0	13.9	9.3	1.1	3.3	0.21	0.83	3258.	126.	1.	112.	194.
137	13.599	8.029	50.	11.1	19.9	3.2	1.2	1.4	0.13	0.76	4352.	89.	1.	98.	119.
138	12.289	7.622	47.	11.7	8.1	19.1	0.9	0.2	0.08	0.59	2827.	68.	1.	71.	93.
139	13.326	8.346	63.	10.8	8.5	7.5	0.9	2.0	0.20	0.86	1865.	86.	1.	89.	121.
140	13.161	8.379	55.	10.6	6.7	12.2	0.9	1.3	0.13	0.79	1157.	99.	1.	80.	100.
141	12.116	8.299	53.	11.6	6.1	15.8	1.1	2.0	0.09	0.80	2020.	93.	1.	87.	105.
142	11.186	9.271	62.	11.1	6.4	8.1	0.9	2.3	0.10	0.86	1754.	93.	1.	83.	95.
143	10.811	8.124	68.	11.1	5.8	4.3	0.8	2.7	0.16	0.95	1342.	76.	1.	86.	86.
144	11.179	7.057	44.	11.7	12.6	14.2	0.9	1.6	0.12	0.71	3910.	94.	1.	105.	144.
145	9.734	6.839	51.	19.2	15.1	16.1	0.9	1.2	0.09	0.65	706.	81.	1.	70.	76.
146	10.032	6.729	38.	7.3	9.7	23.1	0.9	0.2	0.10	0.49	3173.	62.	1.	70.	98.
147	10.167	6.117	57.	11.8	9.2	7.4	1.0	2.4	0.22	0.86	2342.	100.	1.	91.	136.
148	10.522	5.334	51.	19.0	5.2	17.5	0.8	0.7	0.10	0.69	994.	84.	1.	86.	80.
149	10.314	5.484	48.	14.8	9.6	14.8	1.0	1.0	0.12	0.67	2415.	82.	1.	86.	111.
150	9.794	4.854	54.	13.1	9.5	10.3	1.0	2.0	0.22	0.87	1879.	121.	1.	99.	124.

ECH.	XXXX	YYYY	SI02	AL2X	FE2X	CAO	MGO	K20	MNO	TI02	F	LI	RE	R	V
151	9.227	4.492	34.	6.0	27.7	13.2	1.3	32.5	0.30	0.45	6596.	39.	1.	127.	205.
152	8.917	3.410	60.	13.5	7.6	15.5	1.0	2.8	0.15	0.97	2156.	116.	1.	93.	122.
153	7.869	3.192	48.	12.2	6.4	13.4	1.2	2.6	0.09	0.72	2657.	92.	1.	86.	93.
154	8.704	5.422	72.	10.8	4.6	1.3	0.8	2.7	0.10	1.02	1129.	68.	1.	83.	74.
155	7.389	4.562	52.	11.2	6.7	12.5	0.9	1.5	0.17	0.79	1526.	103.	1.	79.	106.
156	6.014	3.505	62.	8.7	4.5	9.9	0.7	1.4	0.09	0.80	898.	76.	1.	67.	68.
157	8.202	1.557	40.	10.0	12.5	18.0	1.1	1.0	0.18	0.62	3298.	85.	1.	89.	129.
158	5.167	0.815	56.	11.0	5.1	13.3	1.0	1.9	0.07	0.81	1467.	90.	1.	82.	78.
159	3.467	2.357	44.	12.3	5.4	18.8	1.1	1.3	0.04	0.75	1720.	127.	1.	96.	94.
160	4.045	2.732	55.	9.9	5.1	13.6	0.9	1.4	0.08	0.76	2246.	88.	1.	73.	76.
161	3.962	2.847	51.	9.4	4.7	15.7	0.9	1.0	0.07	0.71	2769.	87.	1.	69.	73.
162	1.252	2.142	49.	9.5	4.6	15.6	0.9	0.9	0.05	0.68	1928.	69.	1.	68.	64.

ECH.	CR	CO	NI	CU	ZN	AS	SR	Y	ZR	NB	MO	AB	CD	SN	SE	RA
1	86	21	38	43	288	20	321	35	254	10	2	0.8	1	10	5	421
2	95	18	36	23	114	20	304	19	246	10	2	0.1	1	10	5	242
3	76	19	32	51	197	20	451	25	311	10	2	2	1	10	5	321
4	181	42	61	19	184	83	119	53	522	11	2	0.1	1	10	5	314
5	192	25	44	53	239	27	288	41	278	10	2	0.6	1	10	5	608
6	80	13	32	11	35	20	185	11	216	10	2	0.1	1	10	5	196
7	93	22	41	34	406	21	298	29	262	13	2	0.3	1	21	5	284
8	91	20	38	38	335	24	319	29	251	10	2	0.4	1	10	5	271
9	127	34	73	110	1856	113	262	44	251	14	2	0.5	1	59	5	639
10	138	34	61	58	480	50	282	23	294	13	2	0.8	1	10	5	245
11	138	21	47	16	196	54	128	32	259	17	2	0.1	1	10	5	265
12	183	35	68	34	312	113	111	65	387	24	2	0.1	1	10	5	399
13	126	39	72	60	942	72	262	25	234	18	2	0.9	1	10	5	257
14	207	34	72	128	1749	87	230	30	139	69	2	1.4	1	33	5	415
15	201	24	77	23	282	81	90	34	376	25	14	0.1	1	10	5	298
16	165	61	116	133	2545	137	242	17	132	20	9	2.0	1	20	5	233
17	161	27	63	34	314	83	149	44	298	20	9	0.1	1	10	5	295
18	158	44	87	85	1529	92	257	25	238	23	25	1.8	1	11	5	259
19	246	47	109	54	633	111	101	35	363	44	5	0.4	1	10	5	319
20	243	36	86	32	457	106	88	41	332	27	3	0.1	1	10	5	322
21	159	42	88	83	2242	108	271	28	180	20	3	1.1	1	15	5	278
22	156	39	79	91	2268	114	264	27	203	21	3	0.6	1	11	5	288
23	187	41	84	31	441	92	127	40	345	24	2	0.1	1	10	5	339
24	160	38	82	17	2515	106	87	44	185	22	2	1.4	1	30	5	301
25	142	18	43	17	170	32	87	44	366	12	2	0.1	1	10	5	395
26	98	9	22	8	58	20	91	21	510	10	2	0.1	1	10	5	361
27	191	27	56	17	146	113	81	63	319	25	2	0.5	1	10	5	388
28	123	17	33	16	109	30	92	41	504	15	2	0.4	1	10	5	396
29	195	27	56	20	156	132	124	60	331	27	2	0.7	1	10	5	354
30	120	16	31	16	83	20	99	54	521	13	2	0.1	1	10	5	418
31	165	26	57	70	745	85	301	46	215	22	2	0.4	1	10	5	451
32	157	22	52	21	253	58	108	28	337	16	2	0.1	1	10	5	374
33	134	15	35	13	113	32	108	31	468	15	2	0.1	1	10	5	355
34	128	16	39	14	161	37	80	38	400	13	2	0.1	1	10	5	396
35	131	29	62	61	1085	60	214	26	254	14	2	0.2	1	10	5	332
36	149	17	45	18	185	38	90	28	356	16	2	0.1	1	10	5	386
37	148	21	50	32	172	32	103	37	378	14	2	0.1	1	10	5	421
38	167	20	57	35	183	65	113	36	312	10	3	0.1	1	10	5	436
39	146	19	73	68	1699	85	244	33	233	18	3	0.5	1	10	5	361
40	141	25	46	36	166	24	106	39	464	18	3	0.1	1	10	5	429
41	141	25	53	29	106	44	178	45	448	10	3	0.1	1	10	5	405
42	141	17	51	32	152	26	107	37	440	10	3	2.1	1	10	5	431
43	157	13	40	21	97	33	161	26	356	16	2	0.1	1	10	5	263
44	117	12	32	21	93	20	98	36	535	11	2	0.1	1	10	5	420
45	142	30	68	73	1619	69	220	27	213	10	2	0.3	1	10	5	367
46	110	16	29	22	99	20	99	31	530	10	2	0.1	1	10	5	457
47	115	12	29	22	85	20	102	33	634	10	2	0.1	1	10	5	420
48	154	30	68	62	4271	90	293	33	223	14	2	0.6	1	12	5	353
49	130	18	45	31	139	20	114	38	437	10	2	0.1	1	10	5	491
50	130	25	61	51	1365	61	248	28	201	10	2	0.1	1	10	5	357

ECH.	CR	CO	NI	CU	ZN	AS	SR	Y	ZR	NR	MD	AG	CD	SN	SR	BA
51	142.	17.	48.	29.	158.	62.	117.	45.	414.	13.	2.	0.1	1.	10.	5.	436.
52	136.	23.	53.	27.	217.	55.	138.	26.	227.	10.	2.	0.1	1.	10.	5.	405.
53	288.	17.	42.	41.	298.	20.	167.	19.	122.	50.	2.	0.4	1.	10.	5.	171.
54	89.	13.	23.	13.	114.	20.	101.	23.	440.	13.	2.	0.1	1.	10.	5.	502.
55	149.	16.	50.	34.	216.	45.	114.	43.	409.	13.	2.	0.1	1.	10.	5.	464.
56	174.	17.	47.	35.	221.	49.	148.	47.	389.	24.	2.	0.1	1.	10.	5.	426.
57	111.	18.	45.	45.	11628.	192.	455.	30.	64.	12.	4.	6.3	7.	36.	5.	1075.
58	132.	15.	46.	30.	134.	27.	112.	41.	402.	11.	2.	0.1	1.	10.	5.	482.
59	140.	15.	42.	14.	102.	24.	94.	35.	379.	12.	2.	0.1	1.	10.	5.	431.
60	123.	14.	34.	21.	87.	20.	92.	29.	439.	10.	2.	0.1	1.	10.	5.	499.
61	117.	9.	22.	15.	62.	20.	98.	42.	584.	14.	2.	0.1	1.	10.	5.	411.
62	157.	14.	39.	16.	120.	59.	85.	64.	397.	16.	2.	0.1	1.	10.	5.	408.
63	110.	11.	21.	12.	92.	20.	97.	39.	565.	13.	2.	0.1	1.	10.	5.	410.
64	108.	11.	21.	14.	81.	20.	90.	31.	500.	13.	2.	0.1	1.	10.	5.	370.
65	184.	36.	84.	22.	444.	163.	168.	97.	246.	32.	2.	0.4	1.	10.	5.	303.
66	112.	21.	55.	12.	52.	20.	91.	34.	605.	15.	2.	0.1	1.	10.	5.	380.
67	154.	21.	55.	22.	216.	111.	105.	94.	477.	14.	2.	0.1	1.	10.	5.	461.
68	112.	11.	25.	13.	91.	20.	92.	33.	568.	13.	2.	0.1	1.	10.	5.	395.
69	123.	14.	36.	18.	107.	30.	93.	51.	517.	13.	2.	0.1	1.	10.	5.	406.
70	110.	19.	29.	16.	134.	21.	94.	29.	317.	11.	2.	0.1	1.	10.	5.	332.
71	105.	12.	37.	35.	189.	20.	207.	18.	330.	12.	2.	0.1	1.	10.	5.	366.
72	126.	15.	39.	48.	224.	21.	131.	55.	410.	16.	2.	0.1	1.	10.	5.	439.
73	124.	13.	41.	25.	170.	30.	227.	62.	342.	15.	2.	0.1	1.	10.	5.	466.
74	69.	4.	40.	11.	38.	20.	271.	21.	276.	10.	2.	0.1	1.	10.	5.	178.
75	163.	17.	37.	17.	135.	80.	215.	29.	360.	16.	2.	0.1	1.	10.	5.	386.
76	132.	17.	37.	17.	135.	33.	215.	29.	415.	17.	2.	0.1	1.	10.	5.	314.
77	117.	9.	27.	14.	101.	20.	202.	28.	592.	12.	2.	0.1	1.	10.	5.	316.
78	264.	23.	62.	15.	118.	130.	133.	29.	372.	33.	2.	0.1	1.	17.	5.	229.
79	116.	11.	31.	13.	79.	21.	141.	33.	345.	12.	2.	0.1	1.	10.	5.	304.
80	149.	22.	57.	44.	2196.	90.	246.	37.	322.	25.	2.	1.1	1.	84.	5.	378.
81	146.	13.	34.	16.	139.	46.	92.	48.	434.	17.	2.	0.1	1.	10.	5.	409.
82	136.	21.	51.	33.	779.	48.	227.	32.	475.	20.	2.	0.5	1.	10.	5.	356.
83	178.	21.	51.	21.	183.	71.	100.	44.	459.	19.	2.	0.1	1.	10.	5.	427.
84	153.	29.	54.	24.	287.	139.	98.	109.	451.	19.	2.	0.1	1.	10.	5.	460.
85	141.	18.	38.	19.	93.	44.	83.	56.	473.	12.	2.	0.1	1.	10.	5.	356.
86	123.	19.	35.	17.	94.	23.	95.	47.	503.	11.	2.	0.1	1.	10.	5.	410.
87	161.	25.	52.	23.	186.	72.	95.	100.	463.	17.	2.	0.1	1.	10.	5.	421.
88	159.	14.	38.	14.	125.	29.	76.	40.	482.	14.	2.	0.1	1.	10.	5.	377.
89	169.	18.	48.	18.	132.	51.	87.	41.	434.	15.	2.	0.1	1.	10.	5.	397.
90	185.	18.	53.	18.	126.	67.	94.	42.	444.	16.	2.	0.1	1.	10.	5.	403.
91	128.	13.	38.	19.	145.	48.	152.	21.	280.	12.	2.	0.1	1.	10.	5.	523.
92	134.	27.	59.	36.	104.	20.	119.	36.	380.	10.	10.	0.1	1.	10.	5.	607.
93	130.	17.	49.	30.	139.	31.	103.	32.	367.	10.	6.	0.1	1.	10.	5.	513.
94	129.	7.	19.	7.	43.	20.	84.	19.	696.	10.	2.	0.1	1.	10.	5.	404.
95	199.	6.	20.	8.	199.	20.	98.	23.	436.	10.	2.	0.1	1.	10.	5.	411.
96	132.	14.	35.	21.	130.	20.	106.	34.	455.	12.	2.	0.1	1.	10.	5.	469.
97	113.	13.	28.	17.	82.	20.	115.	37.	355.	10.	2.	0.1	1.	10.	5.	472.
98	125.	14.	37.	19.	96.	20.	80.	39.	433.	10.	2.	0.1	1.	10.	5.	379.
99	155.	26.	62.	31.	309.	125.	140.	79.	323.	16.	2.	0.1	1.	10.	5.	403.
100	168.	26.	57.	22.	261.	122.	103.	90.	385.	19.	2.	0.1	1.	10.	5.	417.

ECH	CR	CO	NI	CU	ZN	AS	SR	Y	ZR	NB	MO	AB	CD	SN	SR	BA
101	171	30	63	15	90	173	216	43	144	21	2	0.4	1	10	5	301
102	127	23	52	24	254	67	171	55	345	20	2	0.1	1	10	5	348
103	172	24	61	41	297	73	83	59	343	24	2	0.1	1	10	5	282
105	184	28	73	47	347	75	121	45	286	26	2	0.1	1	10	5	297
106	237	30	73	47	347	75	117	45	275	26	2	0.2	1	10	5	375
107	189	22	59	25	332	82	90	38	406	29	2	0.1	1	10	5	368
108	135	22	43	38	223	64	139	41	327	23	2	0.1	1	10	5	540
109	145	17	47	19	178	48	106	23	385	16	2	0.1	1	10	5	376
110	149	16	46	67	413	41	224	30	333	16	2	0.1	1	10	5	577
111	203	40	105	41	810	115	118	26	213	33	5	0.5	1	10	5	336
112	160	33	76	33	527	150	167	56	216	27	5	0.8	1	10	5	256
113	192	47	65	25	243	104	89	61	398	15	5	0.1	1	10	5	353
114	180	43	64	24	126	85	124	39	297	10	4	0.1	1	10	5	342
115	153	23	50	24	193	111	123	83	458	15	2	0.3	1	10	5	439
116	195	24	51	17	110	119	86	60	419	23	2	0.1	1	10	5	347
117	152	19	41	19	115	61	181	32	441	18	2	0.1	1	10	5	316
118	101	8	30	13	65	20	181	41	366	10	2	0.1	1	10	5	276
119	136	15	42	23	199	41	133	53	349	14	2	0.1	1	10	5	440
120	184	39	76	15	224	243	173	45	178	37	2	0.1	1	10	5	242
121	99	12	34	43	186	20	313	28	258	10	2	0.1	1	10	5	280
122	125	15	37	26	226	44	179	71	427	10	2	0.1	1	10	5	465
123	157	22	54	32	206	79	118	42	461	12	2	0.1	1	10	5	372
124	160	24	56	24	178	104	116	42	359	11	2	0.1	1	10	5	329
125	135	19	47	23	142	55	151	25	247	14	2	0.1	1	10	5	309
126	133	20	48	27	142	62	200	37	202	14	2	0.1	1	10	5	287
127	143	20	50	27	121	84	145	37	292	14	2	0.1	1	10	5	375
128	134	21	49	32	193	87	236	41	306	15	2	0.1	1	10	5	380
129	153	20	45	21	134	87	98	33	409	18	2	0.1	1	10	5	387
130	111	20	42	16	109	58	110	33	316	12	2	0.1	1	10	5	377
131	141	18	48	25	211	57	112	39	367	15	2	0.1	1	10	5	406
132	177	33	53	47	260	41	121	37	1025	18	2	0.9	1	10	5	315
133	140	41	65	43	522	70	185	27	563	15	2	0.6	1	10	5	240
134	126	16	45	25	122	52	137	35	365	11	2	0.1	1	10	5	372
135	135	17	42	26	136	50	113	41	420	15	2	0.1	1	10	5	385
136	158	21	50	28	147	114	166	43	309	18	2	0.1	1	10	5	323
137	121	16	44	35	212	40	249	28	274	13	2	0.1	1	10	5	328
138	98	12	35	42	144	20	303	28	290	13	2	0.1	1	10	5	280
139	133	16	39	22	134	54	141	42	396	15	2	0.1	1	10	5	353
140	116	13	34	18	82	26	160	33	331	10	2	0.1	1	10	5	300
141	111	20	41	17	95	31	227	29	304	10	2	0.1	1	10	5	301
142	131	18	37	21	97	32	148	35	359	11	2	0.1	1	10	5	314
143	130	22	41	23	87	27	121	42	446	10	2	0.1	1	10	5	369
144	128	25	56	33	185	38	258	24	270	14	2	0.1	1	10	5	295
145	92	16	33	14	59	21	354	27	232	14	2	0.1	1	10	5	210
146	135	18	38	27	128	21	147	46	341	14	2	0.1	1	10	5	354
147	135	25	50	30	127	78	147	30	296	10	2	0.1	1	10	5	327
148	98	15	31	17	113	28	199	30	279	10	2	0.1	1	10	5	274
149	111	19	41	26	137	28	239	30	296	10	2	0.1	1	10	5	266
150	145	27	47	27	103	61	177	47	307	12	2	0.1	1	10	5	300

ECH.	CR	CD	NI	CU	ZN	AS	SR	Y	ZR	NB	MO	AG	CD	SN	SR	RA
151	129.	30.	56.	21.	187.	101.	294.	43.	301.	26.	2.	0.1	1.	10.	5.	216.
152	146.	22.	43.	25.	88.	20.	136.	40.	331.	12.	2.	0.1	1.	10.	5.	306.
153	107.	14.	39.	44.	217.	20.	266.	28.	236.	10.	2.	0.1	1.	10.	5.	317.
154	119.	14.	33.	20.	74.	20.	99.	36.	543.	11.	2.	0.1	1.	10.	5.	389.
155	128.	19.	36.	20.	74.	37.	214.	37.	306.	11.	2.	0.1	1.	10.	5.	276.
156	106.	13.	28.	16.	54.	20.	189.	26.	462.	11.	2.	0.1	1.	10.	5.	288.
157	109.	20.	46.	36.	138.	62.	284.	33.	196.	14.	2.	0.7	1.	10.	5.	245.
158	109.	13.	36.	22.	81.	20.	214.	28.	326.	10.	2.	0.1	1.	10.	5.	286.
159	102.	13.	38.	19.	96.	21.	308.	19.	223.	10.	2.	0.1	1.	10.	5.	215.
160	98.	11.	34.	36.	331.	20.	238.	27.	329.	11.	2.	0.1	1.	10.	5.	293.
161	92.	9.	31.	32.	358.	20.	267.	25.	346.	11.	2.	0.1	1.	10.	5.	281.
162	91.	9.	37.	22.	97.	20.	260.	21.	267.	10.	2.	0.1	1.	10.	5.	233.

ECH.	LA	CE	W	FR	RI	HG	F2
1	30.	75.	10.	93.	1.	0.30	850.00
2	18.	49.	10.	31.	1.	0.30	850.00
3	22.	56.	10.	91.	1.	0.10	745.00
4	49.	140.	10.	59.	1.	0.46	675.00
5	30.	85.	10.	119.	1.	0.26	595.00
6	10.	24.	10.	4.	1.	0.10	550.00
7	22.	66.	10.	157.	1.	0.10	860.00
8	23.	64.	10.	125.	1.	0.11	525.00
9	31.	85.	18.	501.	1.	0.53	490.00
10	19.	57.	11.	150.	1.	0.11	905.00
11	25.	73.	10.	49.	1.	0.61	580.00
12	51.	147.	10.	96.	1.	0.80	455.00
13	22.	59.	15.	318.	1.	0.10	575.00
14	19.	54.	22.	356.	1.	0.46	660.00
15	22.	70.	11.	62.	1.	0.80	720.00
16	15.	45.	24.	701.	1.	0.10	280.00
17	42.	101.	13.	71.	1.	0.15	405.00
18	21.	58.	21.	428.	1.	0.11	425.00
19	28.	81.	16.	114.	1.	0.15	720.00
20	28.	98.	10.	197.	1.	0.46	660.00
21	13.	57.	19.	671.	1.	0.80	720.00
22	12.	55.	19.	554.	1.	0.10	280.00
23	19.	80.	10.	134.	1.	0.15	425.00
24	16.	61.	20.	725.	1.	0.10	625.00
25	33.	104.	10.	44.	1.	0.26	675.00
26	17.	49.	10.	15.	1.	0.10	480.00
27	65.	164.	10.	60.	1.	0.10	510.00
28	37.	94.	10.	53.	1.	0.10	590.00
29	67.	168.	10.	49.	1.	0.10	330.00
30	37.	114.	10.	21.	1.	0.26	675.00
31	31.	86.	12.	255.	1.	0.10	480.00
32	18.	66.	10.	71.	1.	0.10	625.00
33	22.	76.	10.	30.	1.	0.10	480.00
34	31.	102.	10.	44.	1.	0.10	510.00
35	14.	59.	12.	255.	1.	0.10	330.00
36	14.	67.	10.	48.	1.	0.10	480.00
37	23.	91.	10.	43.	1.	0.10	480.00
38	29.	91.	10.	57.	1.	0.10	620.00
39	19.	66.	17.	446.	1.	0.23	730.00
40	25.	93.	10.	49.	1.	0.10	510.00
41	33.	124.	10.	21.	1.	0.10	510.00
42	18.	82.	10.	36.	1.	0.10	590.00
43	18.	60.	10.	24.	1.	0.10	330.00
44	17.	75.	10.	22.	1.	0.26	675.00
45	17.	62.	12.	405.	1.	0.10	480.00
46	14.	73.	10.	38.	1.	0.10	315.00
47	13.	72.	10.	15.	1.	0.46	660.00
48	22.	79.	27.	934.	1.	0.10	330.00
49	31.	98.	10.	40.	1.	0.10	480.00
50	17.	64.	11.	326.	1.	0.10	330.00

ECH.	LA	CE	W	PR	RI	HG	F2
51	39.	106.	10.	49.	1.	***	***
52	26.	67.	10.	75.	1.	0.10	605.00
53	15.	42.	13.	91.	1.	***	***
54	11.	56.	10.	42.	1.	0.10	250.00
55	34.	99.	10.	58.	1.	***	***
56	40.	112.	10.	68.	1.	0.10	625.00
57	29.	82.	61.	3882.	1.	***	***
58	26.	90.	10.	38.	1.	0.10	570.00
59	22.	83.	10.	23.	1.	***	***
60	14.	70.	10.	15.	1.	0.10	655.00
61	20.	86.	10.	8.	1.	***	***
62	52.	133.	10.	21.	1.	0.10	770.00
63	18.	85.	10.	24.	1.	***	***
64	14.	69.	10.	19.	1.	0.10	385.00
65	69.	193.	14.	106.	1.	***	***
66	17.	74.	10.	12.	1.	0.10	450.00
67	71.	183.	10.	87.	1.	***	***
68	20.	77.	10.	31.	1.	0.10	365.00
69	40.	111.	10.	37.	1.	***	***
70	20.	73.	10.	26.	1.	0.10	790.00
71	16.	44.	10.	58.	1.	***	***
72	44.	121.	10.	87.	1.	0.10	590.00
73	43.	116.	10.	57.	1.	***	***
74	23.	51.	10.	8.	1.	0.10	695.00
75	20.	66.	10.	34.	1.	***	***
76	10.	58.	29.	23.	1.	0.10	410.00
77	13.	63.	10.	19.	1.	***	***
78	22.	70.	10.	8.	1.	0.26	600.00
79	24.	81.	10.	17.	1.	***	***
80	21.	76.	21.	749.	1.	0.53	630.00
81	35.	115.	10.	31.	1.	***	***
82	19.	65.	25.	295.	1.	0.23	465.00
83	34.	107.	10.	51.	1.	***	***
84	78.	220.	10.	68.	1.	0.10	430.00
85	37.	149.	10.	24.	1.	***	***
86	32.	125.	10.	25.	1.	0.15	350.00
87	72.	202.	10.	79.	1.	***	***
88	25.	95.	10.	30.	1.	0.10	650.00
89	25.	97.	10.	33.	1.	***	***
90	31.	103.	10.	23.	1.	0.10	620.00
91	21.	67.	10.	45.	1.	***	***
92	26.	94.	11.	18.	1.	0.10	625.00
93	19.	75.	10.	36.	1.	***	***
94	10.	39.	10.	1.	1.	0.10	390.00
95	10.	43.	10.	1.	1.	***	***
96	10.	68.	10.	37.	1.	0.10	400.00
97	12.	81.	10.	1.	1.	***	***
98	25.	103.	10.	20.	1.	0.10	725.00
99	53.	152.	10.	130.	1.	***	***
100	63.	176.	10.	47.	1.	0.10	535.00

ECH.	LA	CE	M	PR	RI	HG	F2
101	40.	106.	11.	24.	1.	****	****
102	45.	117.	12.	74.	1.	0.10	400.00
103	53.	144.	10.	65.	1.	****	****
104	23.	64.	10.	61.	1.	0.10	665.00
105	36.	101.	11.	79.	1.	****	****
106	29.	89.	10.	66.	1.	0.10	620.00
107	29.	93.	10.	55.	1.	****	****
108	25.	84.	10.	148.	1.	0.10	505.00
109	14.	57.	10.	52.	1.	****	****
110	22.	67.	10.	135.	1.	0.26	605.00
111	15.	51.	17.	147.	1.	****	****
112	45.	119.	15.	121.	1.	0.10	445.00
113	55.	160.	10.	61.	1.	****	****
114	43.	128.	10.	46.	1.	0.10	820.00
115	65.	169.	10.	80.	1.	****	****
116	45.	154.	10.	33.	1.	0.10	720.00
117	29.	121.	10.	43.	1.	****	****
118	19.	71.	10.	8.	1.	0.10	740.00
119	36.	118.	10.	35.	1.	****	****
120	13.	78.	10.	21.	1.	0.10	765.00
121	19.	65.	10.	52.	1.	0.15	620.00
122	47.	145.	10.	49.	1.	0.10	670.00
123	34.	117.	10.	61.	1.	****	****
124	43.	140.	10.	47.	1.	0.10	840.00
125	40.	120.	10.	50.	1.	****	****
126	22.	73.	10.	42.	1.	0.10	795.00
127	38.	131.	10.	36.	1.	****	****
128	40.	131.	10.	50.	1.	0.10	645.00
129	33.	103.	10.	27.	1.	****	****
130	39.	124.	10.	27.	1.	0.10	615.00
131	33.	103.	10.	57.	1.	****	****
132	38.	97.	10.	77.	1.	0.10	725.00
133	23.	60.	10.	179.	1.	****	****
134	36.	97.	10.	48.	1.	0.10	685.00
135	32.	114.	10.	44.	1.	****	****
136	36.	113.	10.	50.	1.	0.10	840.00
137	30.	81.	10.	73.	1.	0.19	665.00
138	27.	72.	10.	48.	1.	0.10	485.00
139	36.	107.	10.	37.	1.	****	****
140	30.	98.	10.	18.	1.	0.10	530.00
141	28.	85.	10.	30.	1.	****	****
142	33.	99.	10.	30.	1.	0.10	545.00
143	36.	104.	10.	29.	1.	****	****
144	30.	80.	10.	45.	1.	0.19	665.00
145	25.	73.	10.	16.	1.	****	****
146	24.	67.	12.	50.	1.	0.19	540.00
147	39.	128.	10.	36.	1.	****	****
148	28.	88.	10.	21.	1.	0.10	535.00
149	23.	80.	10.	30.	1.	0.10	625.00
150	49.	143.	10.	31.	1.	0.10	665.00

```

=====
ECH.  LA  CE  W  FR  RI  HG  F2
=====
151  17.  78.  10.  24.  1.  *****
152  41.  121.  10.  28.  1.  0.10 675.00
153  23.  71.  10.  62.  1.  0.26 650.00
154  22.  87.  10.  17.  1.  0.10 525.00
155  37.  112.  10.  23.  1.  *****
156  24.  81.  10.  12.  1.  0.10 480.00
157  32.  80.  10.  47.  1.  *****
158  28.  72.  10.  20.  1.  0.10 605.00
159  25.  77.  10.  35.  1.  0.10 690.00
160  23.  70.  10.  114.  1.  0.19 575.00
161  23.  62.  10.  21.  1.  *****
162  23.  62.  10.  21.  1.  0.10 530.00
=====

```

A N N E X E 3

PLANCHE n° 1 : Plan de positionnement des échantillons



VALLÉE DE L'ORNE LORRAINE

ESTIMATION DU FOND GEOCHIMIQUE NATUREL

PLAN DE POSITIONNEMENT DES ÉCHANTILLONS

ECHELLE: 1/50 000

SGN/GMX

84 SGN 169 GDX

