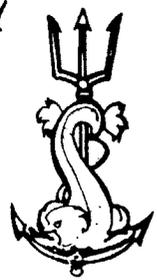


P 502/1

16 MARS 1978



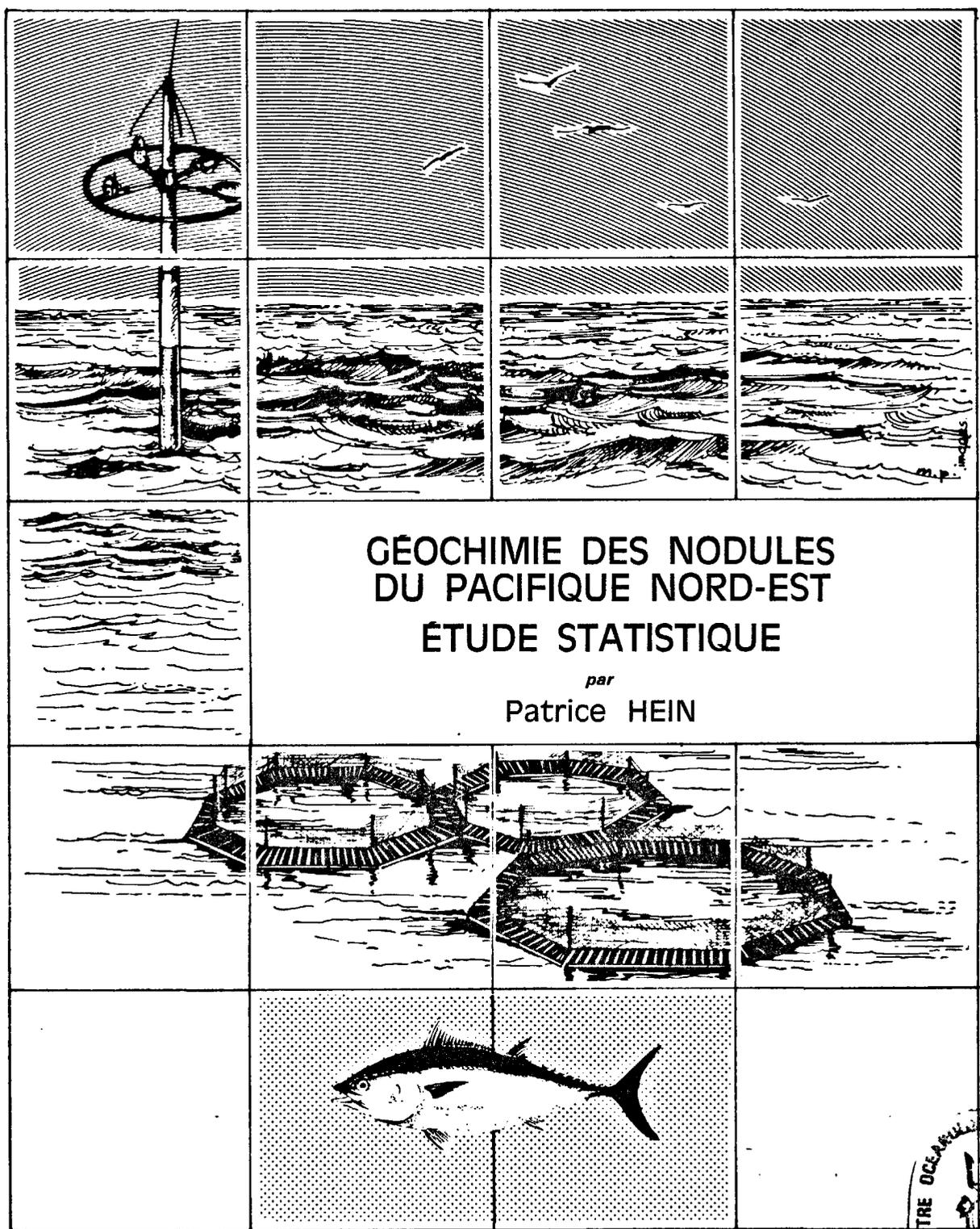
EXCLU DU PRÊT

Publications du

CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCEANS

Découvrez plus de documents
accessibles gratuitement dans [Archimer](#)

 **Rapports scientifiques et techniques n° 35 - 1977**



SECTION DE GÉOLOGIE APPLIQUÉE
CENTRE OCÉANOLOGIQUE DE BRETAGNE



- Les Publications Scientifiques et Techniques du Centre National pour l'Exploitation des Océans (CNEXO) comportent les séries suivantes :

The Scientific and Technical Publications of Centre National pour l'Exploitation des Océans (CNEXO) contain the following serials :

- Rapports Scientifiques et Techniques - ISSN 0339-2899. 1971
- Rapports Economiques et Juridiques - ISSN 0339-2910. 1973
- Recueil des Travaux du Centre Océanologique de Bretagne - ISSN 0336-3112. 1972
- Résultats des Campagnes à la Mer - ISSN 0339-2902. 1971
- Actes de Colloques - ISSN 0335-8259. 1971

- Les travaux publiés dans ces séries sont analysés par :

The works published in these serials are analysed by :

- Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts
- Bibliographie Géographique Internationale
- Biological Abstracts
- Bulletin Signalétique du C.N.R.S. - Informascience
- Chemical Abstracts
- Norois - Chronique Océanographique
- Hydrographische Bibliographie
- Oceanic Abstracts
- Oceanographic Abstracts and bibliography - Deep Sea Research
- Pollution Abstracts
- Underwater Information Bulletin
- Zoological Record

- Les demandes d'information et les commandes concernant toutes les publications scientifiques et techniques du CNEXO doivent être adressées à :

The inquiries and orders which concern the whole of CNEXO scientific and technical publications have to be mailed to :

SECTION DOCUMENTATION
CENTRE OcéANOLOGIQUE DE BRETAGNE
B.P. 337
29273 BREST CEDEX

Les publications envoyées en échange doivent être expédiées à cette même adresse.

The publications sent in exchange have to be forwarded to the same address.

**PUBLICATIONS DU
CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCEANS
(CNEXO)**

Rapports Scientifiques et Techniques N° 35

**GEOCHIMIE DES NODULES DU PACIFIQUE NORD-EST
ETUDE STATISTIQUE**

préparé

par

Patrice HEIN

**Section de Géologie Appliquée
Centre Océanologique de Bretagne
Boîte Postale 337
29200 BREST**

SECTION DE GEOLOGIE APPLIQUEE

Centre Océanologique de Bretagne

Cette équipe opérationnelle a pour missions, au sein du C.N.E.X.O., la recherche et l'étude de toutes accumulations minérales marines, tels nodules, sables et graviers, phosphorites,... et la mise au point des méthodologies nécessaires à leur réalisation.

Ces études, résultat d'un travail d'équipe, seront publiées sous un sigle commun.

Jacques LEMAIRE

Responsable de la Section de Géologie Appliquée

Ingénieurs Géologues : Serge BERNE, Alain-Philippe CRESSARD,
Jean-Laurent D'OZOUVILLE, Bernard GERARD, Patrice HEIN,
Raymond LE SUAVE, Yann MOREL, Serge ROBERT, Michel VOISSET

Ingénieur Système : Jean BRAC

Techniciens Electroniciens : Yves DUPONT, Jean-Pierre LE FORMAL, Henri PELLE

Techniciens Géologues : Claude AUGRIS, Jean GUILLAUME, Philippe SAGET

Techniciens Logistiques : Lucien COURTOIS, Jean RAGUENES

Documentaliste : Evelyne QUEMENEUR
Dessinatrice : Jocelyne EQUER
Secrétaire : Monique LE MENN

TABLE DES MATIERES

	Pages
INTRODUCTION	1
- LES PRELEVEMENTS	2
- PRECISION DES ANALYSES CHIMIQUES	2
- LES DONNEES ETUDIEES	2
PREMIERE PARTIE : ETUDE STATISTIQUE DE LA GEOCHIMIE DES NODULES	3
I - CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES DES NODULES	5
1 - TENEUR MOYENNE	5
2 - EXISTENCE DE PLUSIEURS POPULATIONS DE TENEURS	5
II - ETUDE DES CORRELATIONS INTER-ELEMENTS	15
1 - COEFFICIENTS DE CORRELATION	15
2 - DIAGRAMMES DE CORRELATION	19
1 - COMPARAISON INTRA-GROUPE	19
2 - COMPARAISON INTER-GROUPE	24
3 - DIAGRAMMES TRIANGULAIRES	30
III - ANALYSES MULTIVARIEES DE LA GEOCHIMIE	35
1 - VARIATIONS SIGNIFICATIVES DE LA GEOCHIMIE DES NODULES	35
2 - CLASSES GEOCHIMIQUES ET FACIES NODULES	37
1 - CLASSIFICATION DES NODULES D'APRES LEUR GEOCHIMIE	37
2 - FORMES FORTES ET FACIES PHOTOGRAPHIQUES NODULES	48
DEUXIEME PARTIE : GEOCHIMIE, MINERALOGIE ET FACIES NODULES	59
I - PROBLEMES POSES PAR LA GEOCHIMIE ET LA MINERALOGIE DES NODULES	61
II - SPECULATIONS SUR LES NODULES ETUDIES	62
1 - LA PARTIE STERILE	62
2 - LA PHASE FERROMANGANESIFERE	62
CONCLUSION	65
BIBLIOGRAPHIE	67
TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX	73

RESUME

L'étude statistique de la géochimie d'un grand nombre d'échantillons de nodules, prélevés sur une surface de $2.25 \cdot 10^6$ km² entre les zones de fractures de Clarion et Clipperton a permis de préciser les relations qui existent entre 14 éléments chimiques contenus dans les nodules. Ces échantillons ont été séparés en plusieurs groupes d'après leur géochimie. Chaque groupe correspond à un "faciès nodules" différent, dans lequel la minéralogie de la phase manganésifère semble s'exprimer de manière particulière. La silice et les éléments qui lui sont liés semblent avoir une influence sur la formation des nodules.

ABSTRACT

The statistical analysis of the geochemistry on a great number of manganese nodules samples (collected on an area of $2.25 \cdot 10^6$ square kilometers, between the Clarion and Clipperton fractures zones) allowed us to precise the relationships existing between 14 contained chemical elements. These samples have been divided in several groups in regard of their geochemistry. Each group indicates a different manganese nodules facies, in which the mineralogy of the manganeseiferous phasis seems to have a particular comportment. The silice and the associated elements seems to have an influence on the manganese nodules formation and growth.

INTRODUCTION

Une reconnaissance systématique de la région comprise entre les zones de fractures de Clarion et Clipperton a été effectuée, depuis 1975, par la Section de GEOLOGIE APPLIQUEE du CENTRE OCEANOLOGIQUE DE BRETAGNE (CNEXO), pour le compte de l'ASSOCIATION FRANCAISE POUR L'ETUDE ET LA RECHERCHE DES NODULES (AFERNOD).

Cette reconnaissance s'est faite aux noeuds d'une maille carrée de 50 milles marins de côté. Ces lieux de prélèvements sont appelés *localités*. A l'issue de cette phase d'exploration, près de 300 localités avaient été effectuées ; ce qui a permis de couvrir une surface de $2.25 \cdot 10^6$ km², pour des profondeurs allant de 4 000 m à 5 500 m.

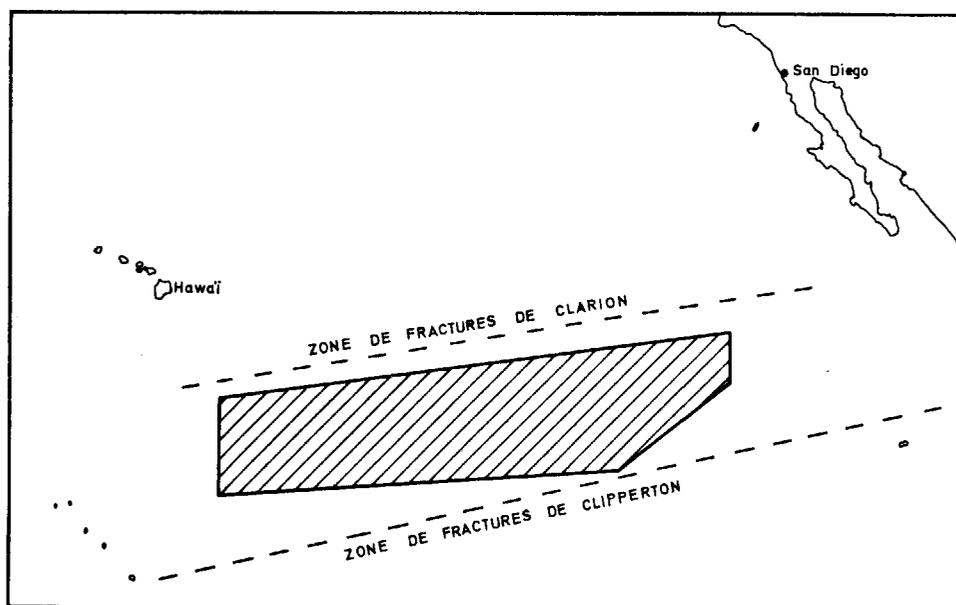


Figure 1. Zone de Prospection

Chaque localité est composée, sur une distance de 1 à 2 milles, d'une série de sept engins libres constituant chacun une station. Ces stations sont sensiblement équidistantes. Chaque engin remonte une photographie du fond, un prélèvement de nodules et un prélèvement de sédiments. La bathymétrie à la localité, et entre les localités, est enregistrée.

L'ensemble de ces échantillons fait l'objet de descriptions et d'études spécialisées. Toutes ces informations sont archivées dans une banque de données.

La présente étude portera essentiellement sur les analyses chimiques effectuées sur les nodules. Par une approche statistique nous préciserons le comportement des éléments chimiques contenus dans les nodules.

LES PRELEVEMENTS

Les prélèvements de nodules se font sur une surface approximative de 0.18 m². L'échantillon remonté est séparé en deux parties identiques, représentatives des caractères morphologiques et granulométriques des nodules. L'une de ces deux parties est totalement broyée et analysée. Les résultats d'analyses correspondent donc à des valeurs moyennes à la station ; on ne s'intéressera pas aux variations des teneurs que l'on peut rencontrer d'un nodule à l'autre, ou à l'intérieur d'un même nodule.

PRECISION DES ANALYSES CHIMIQUES

Les échantillons de nodules sont analysés par fluorescence X, après avoir été séchés à 105° C, pendant 36 heures, et broyés, de façon à obtenir une poudre de granulométrie inférieure à 125 microns. Les résultats sont exprimés en pourcentage par rapport au poids sec de l'échantillon à 105° C.

Le tableau suivant donne la précision en pourcentage relatif des analyses :

Eléments	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Ca	SiO ₂	Al	Mg	Na	K	Pb	Zn	Ti	H ₂ O ⁺ *
Précision en % relatif	2	2	2	2	2	5	4	2	5	3	3	10	3	2	5

* H₂O⁺ est la perte en poids après chauffage à 1 000° C.

LES DONNEES ETUDIEES

Les sept premiers éléments du tableau ont été analysés pour chaque station de chaque localité, tandis que seulement une station par localité a fait l'objet d'une analyse pour l'ensemble des éléments.

Nous avons donc deux ensembles de données : l'un constitué par l'ensemble des stations caractérisées par Mn, Fe, Ni, Co, Cu, Ca, SiO₂ (1 257 stations) ; l'autre, qui est un sous-ensemble du précédent, caractérisé par la totalité des éléments et la perte au feu à 1 000° C (235 stations).

PREMIERE PARTIE

Etude Statistique de la Géochimie des Nodules

I - CARACTERISTIQUES GEOCHIMIQUES DES NODULES

1 - TENEURS MOYENNES

On trouvera dans le *tableau 1* les paramètres statistiques concernant les éléments étudiés. Les valeurs des indices d'asymétrie (skewness) et d'hétérométrie (kurtosis) soulignent l'hétérogénéité des données ; hétérogénéité que nous allons analyser à l'aide des histogrammes.

2 - EXISTENCES DE PLUSIEURS POPULATIONS DE TENEURS

L'observation des histogrammes suggère l'existence de plusieurs populations de teneurs. Dans le *tableau 2*, nous avons regroupé les éléments présentant des histogrammes semblables. Pour chacun d'eux, nous avons essayé de déterminer les limites des diverses populations possibles et probables, et nous avons tenté de mettre en correspondance des limites, en tenant compte de la forme des histogrammes.

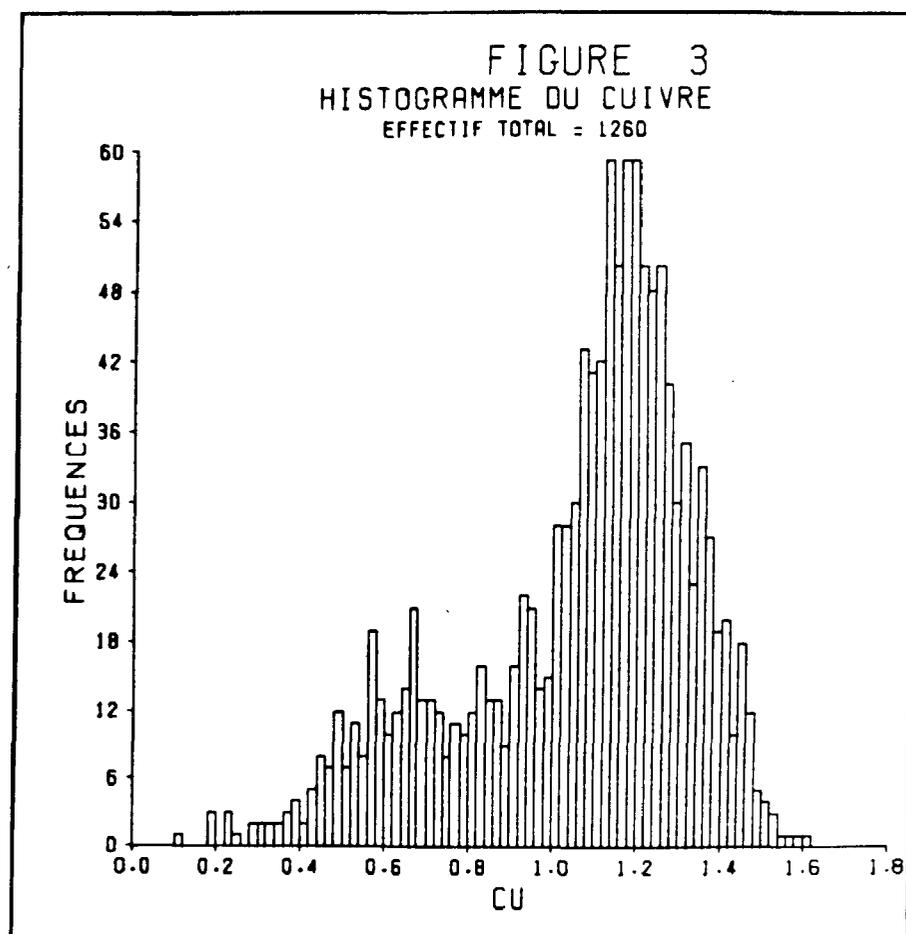
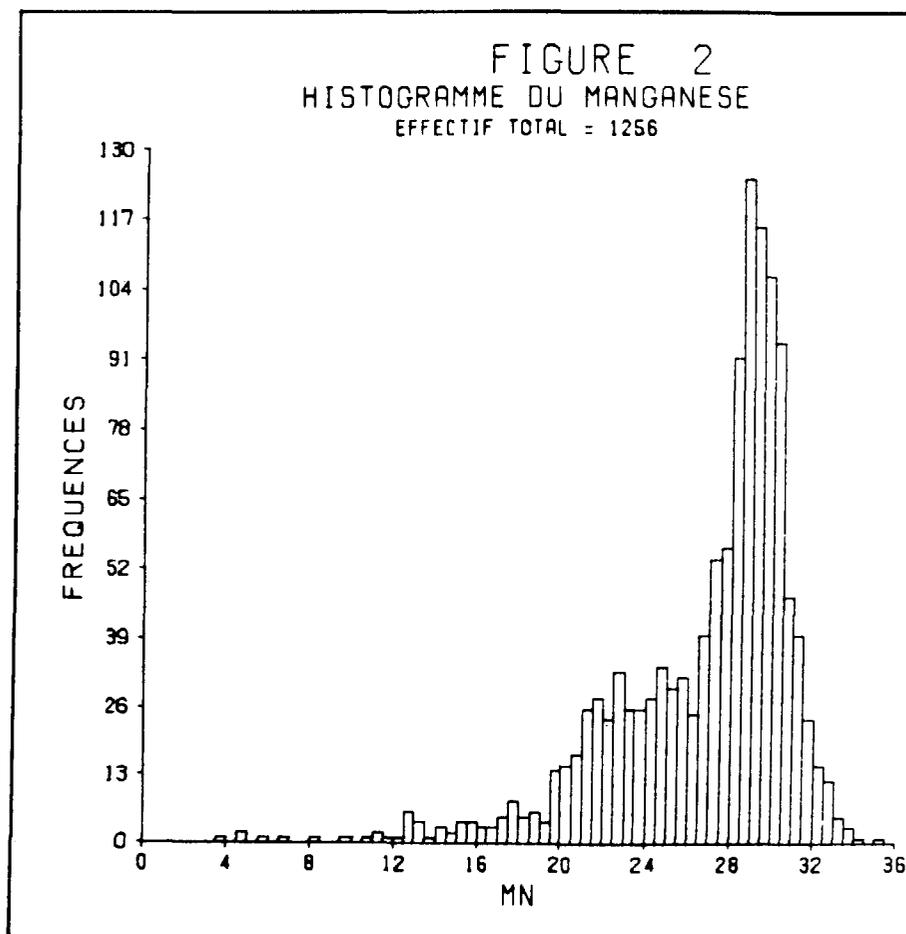
Tableau 2 - Résultats donnés par les histogrammes

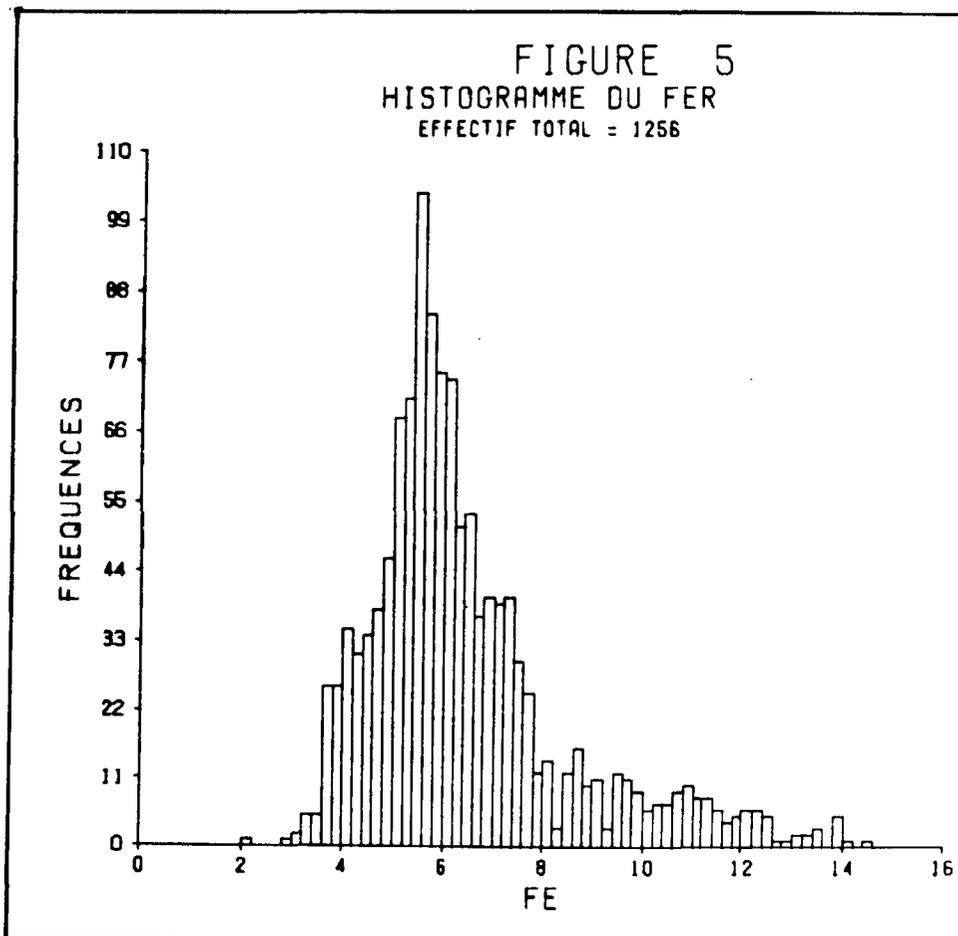
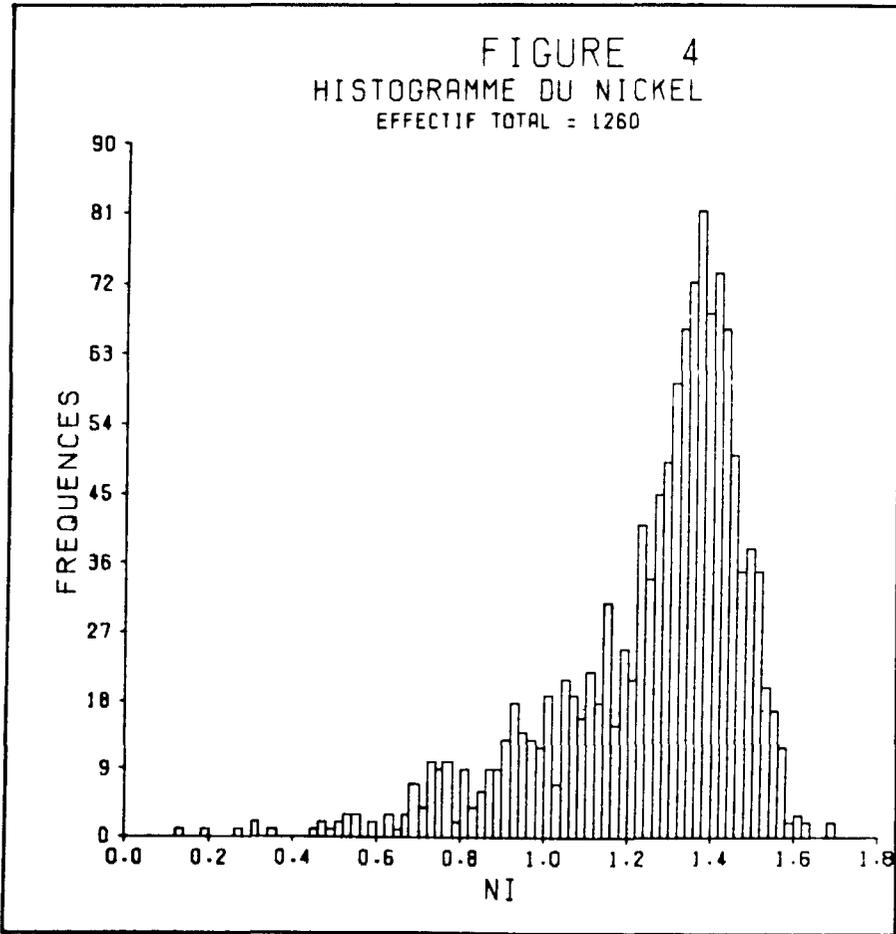
FIGURES N° (1)	ELEMENTS	LIMITES APPROXIMATIVES SEPARANT LES POPULATIONS				REMARQUES
2	Mn	19.50	26.00			Forte dispersion de la population à teneur basse
3	Cu	0.75	0.98			
4	Ni	0.82	1.20			
13	Zn		0.12	0.18		
16	H ₂ O ⁺	14.00	16.00	(2)		Hétérogénéité
5	Fe	8.20	6.60	(3)	4.40 (2)	Forte dispersion de la population à teneur forte
6	Ti	0.54	0.38		0.27 (2)	
7	Al	3.80	3.00			
8	K	1.06	0.91	(3)	0.70 (2)	
9	SiO ₂	24.26	19.00			
10	Ca	2.05	1.75	(3)	1.20 (3)	
12	Pb	0.90				
11	Co	0.34			0.14 (2)	
14	Na					Une population
15	Mg					Une population

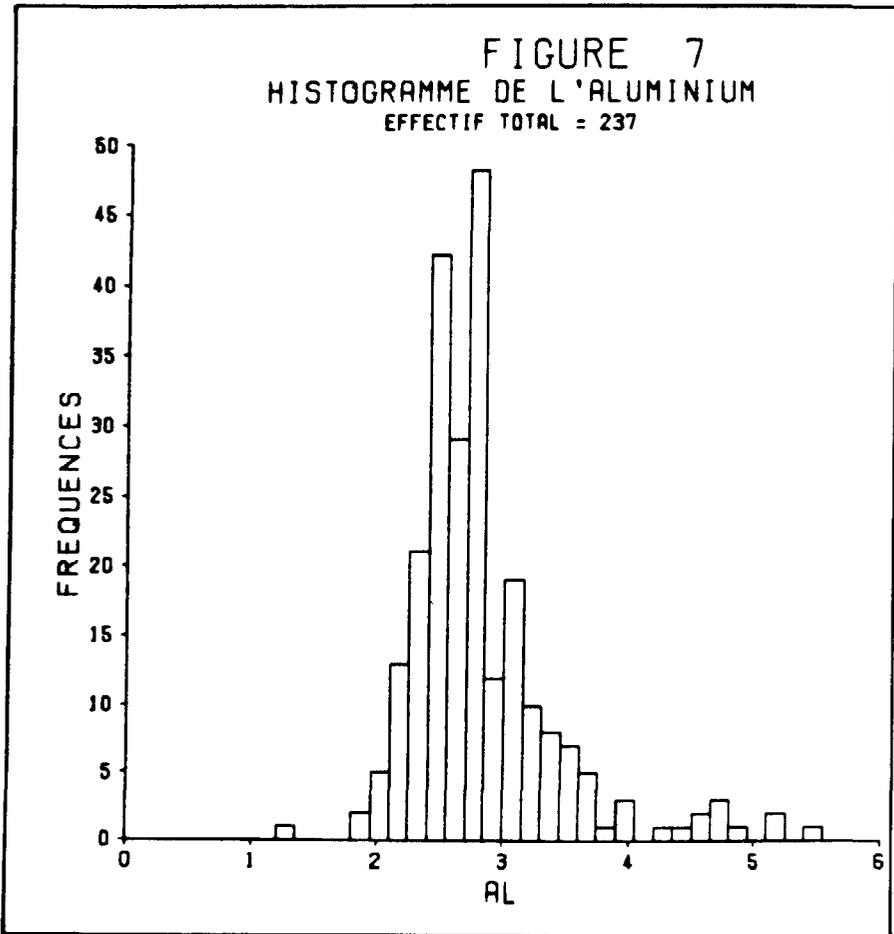
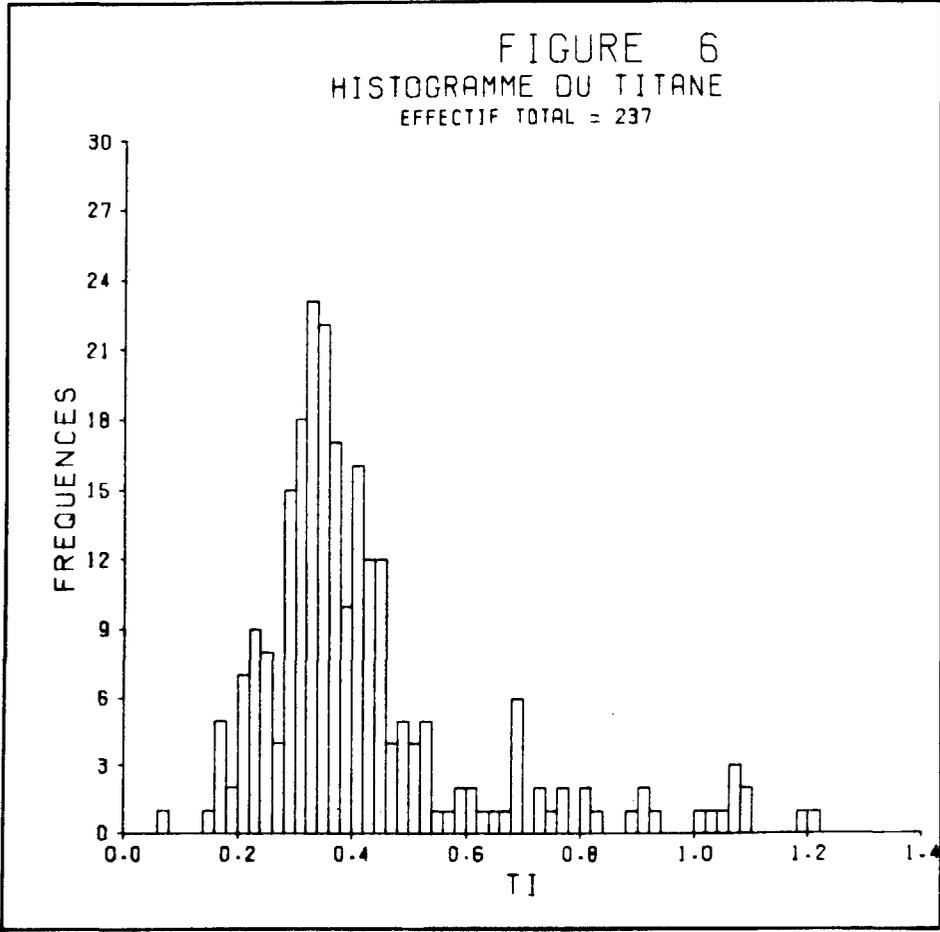
(1) Voir figures p. 6 à p. 13 (2) Limite suspectée (3) Limite possible

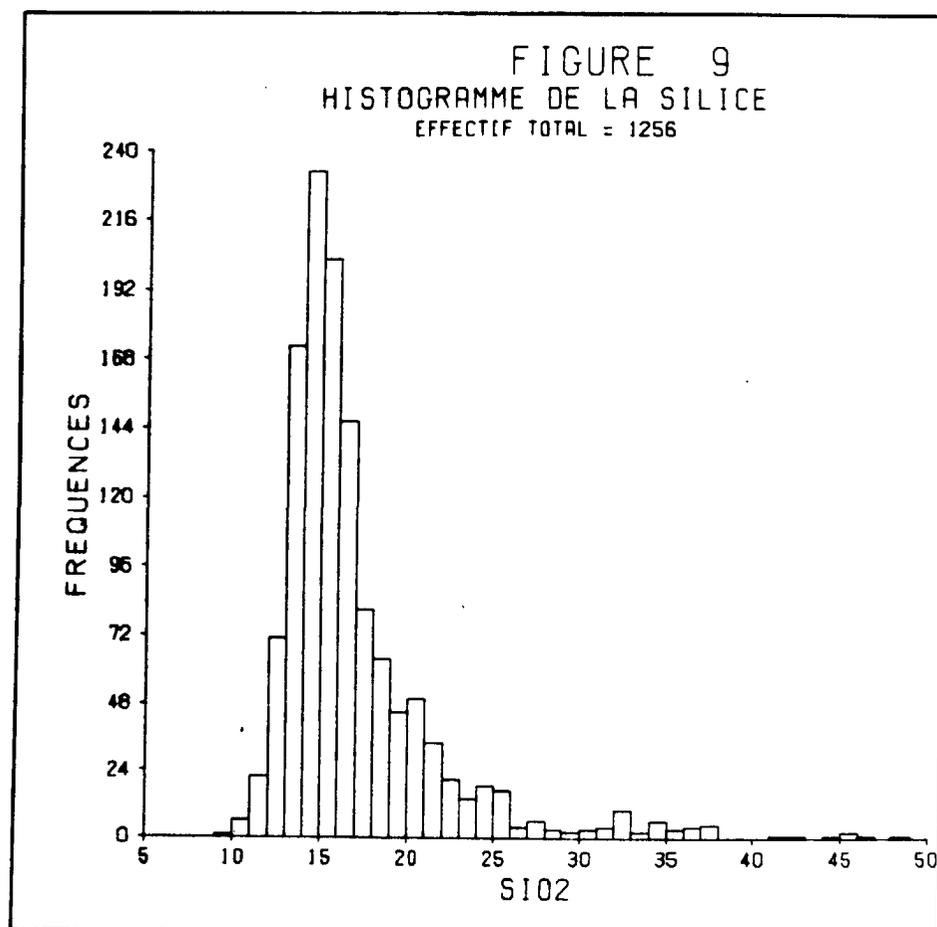
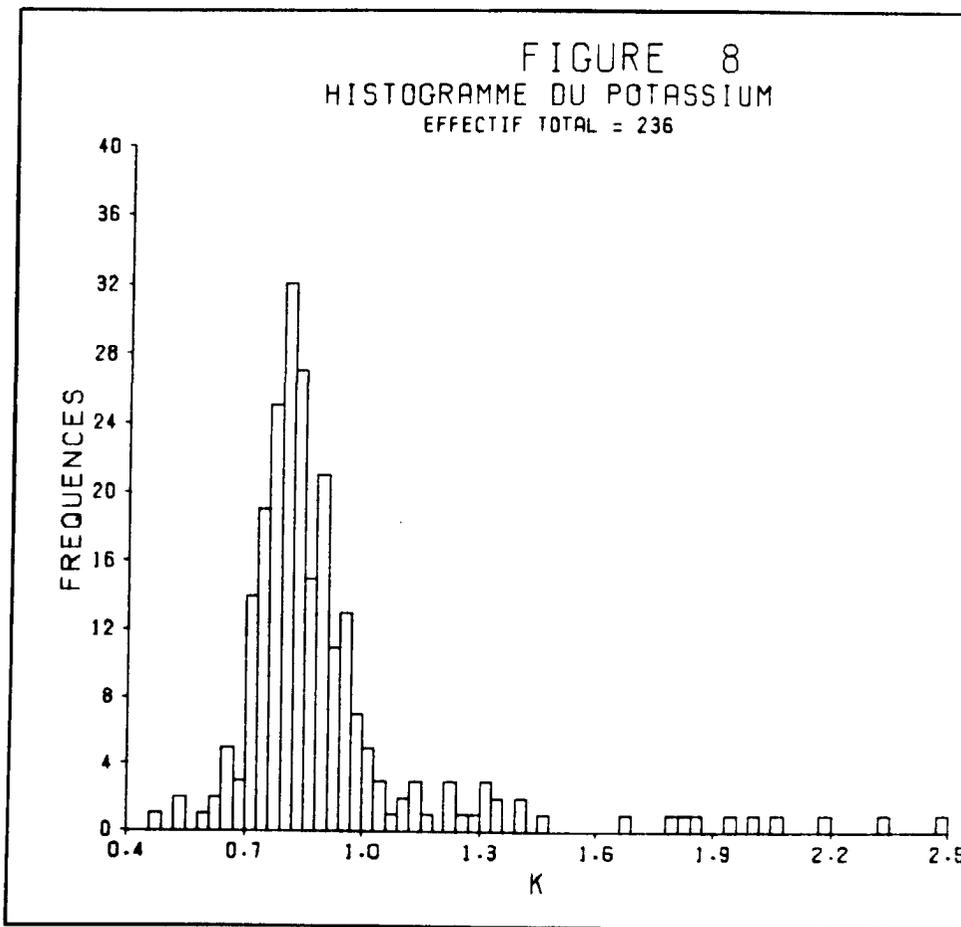
Tableau 1 - Composition chimique des nodules du Pacifique Nord-Est

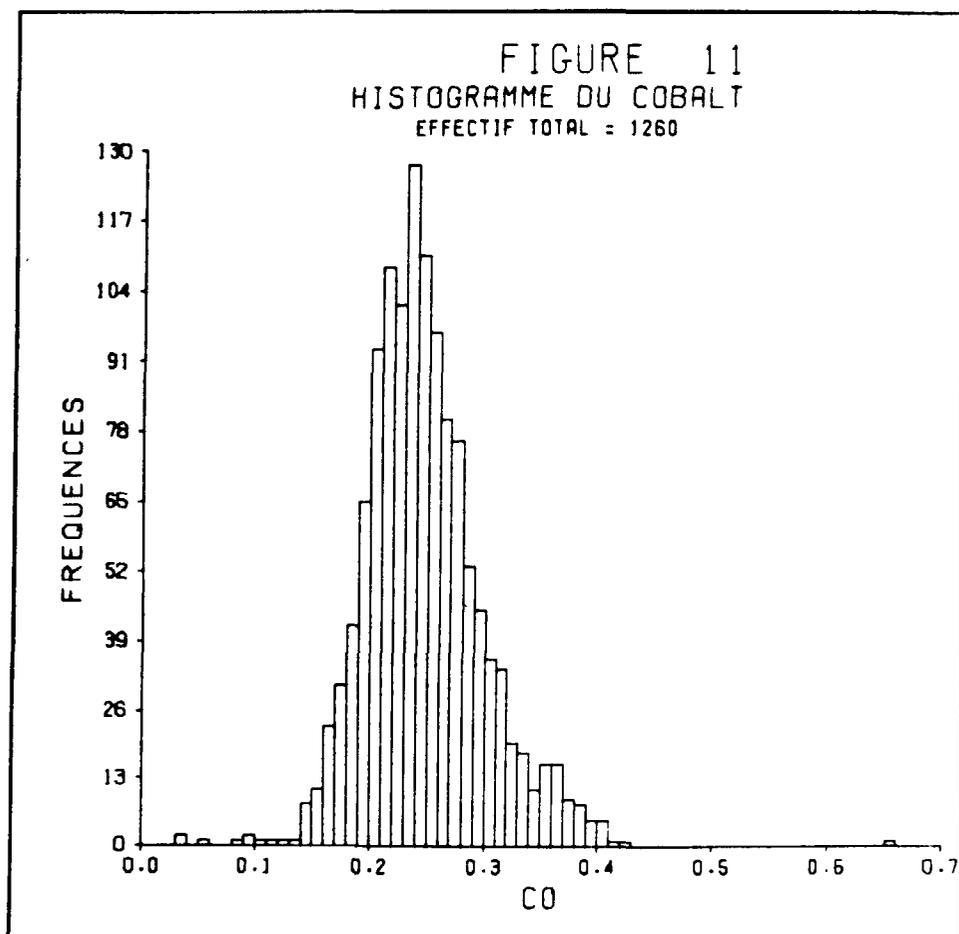
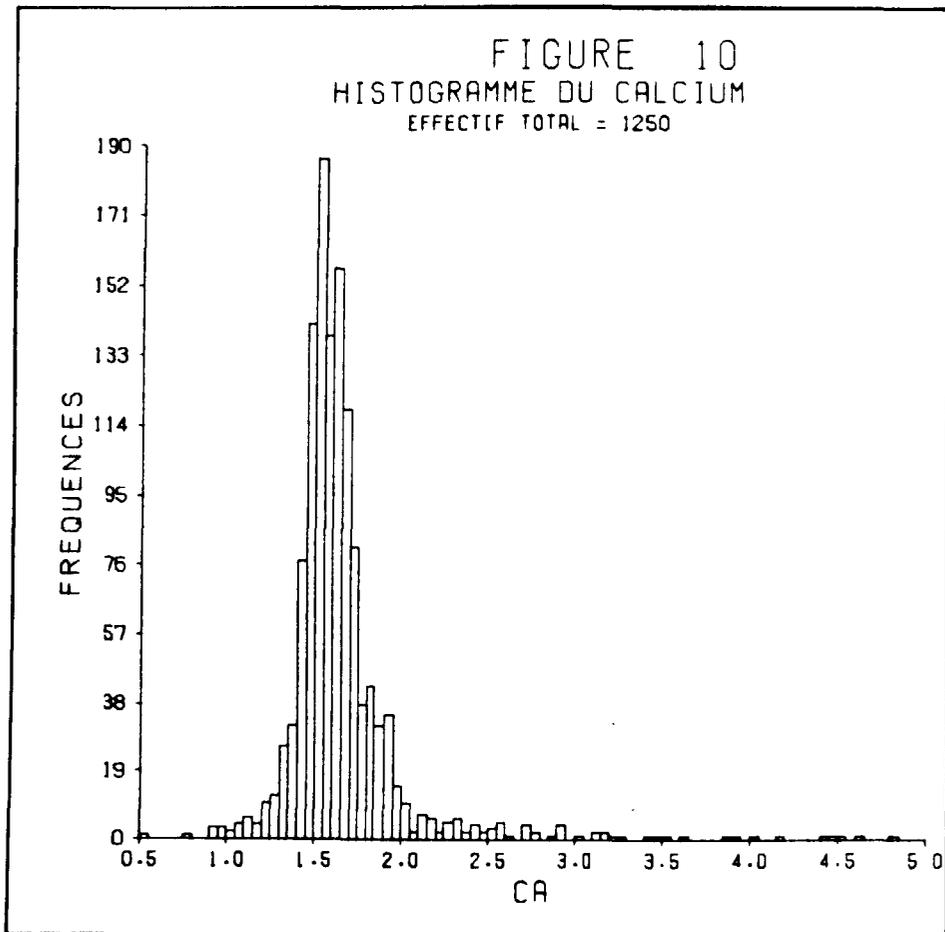
Eléments	Nombre observations	Moyenne (m)	Ecart-type σ	σ/m	Asymétrie	Hétérométrie	Minimum	Maximum
H ₂ O ⁺	235	15.49	1.14	0.07	- 1.40	3.03	10.60	17.60
Mn	1257	26.74	4.34	0.16	- 1.62	3.64	3.50	35.20
Fe	1257	6.40	2.05	0.32	1.33	1.80	0.90	14.40
Ni	1261	1.25	0.23	0.18	- 1.39	2.21	0.13	1.69
Co	1261	0.24	0.05	0.21	0.70	3.42	0.03	0.65
Cu	1261	1.05	0.28	0.27	- 0.85	0.11	0.11	1.61
Na	236	2.06	0.32	0.16	- 0.81	0.48	1.14	2.90
Mg	237	2.13	0.48	0.23	0.46	0.04	0.35	3.20
K	236	0.91	0.28	0.31	2.99	10.53	0.48	2.48
Ca	1257	1.70	0.87	0.51	19.01	489.23	0.53	25.90
SiO ₂	1257	16.75	4.85	0.29	2.57	8.78	9.00	48.10
Al	237	2.80	0.60	0.21	1.69	4.01	1.20	5.40
Ti	237	0.42	0.20	0.48	1.81	3.32	0.06	1.21
Zn	236	0.13	0.03	0.23	- 0.47	0.23	0.01	0.21
Pb	236	0.05	0.02	0.40	1.46	2.43	0.02	0.12

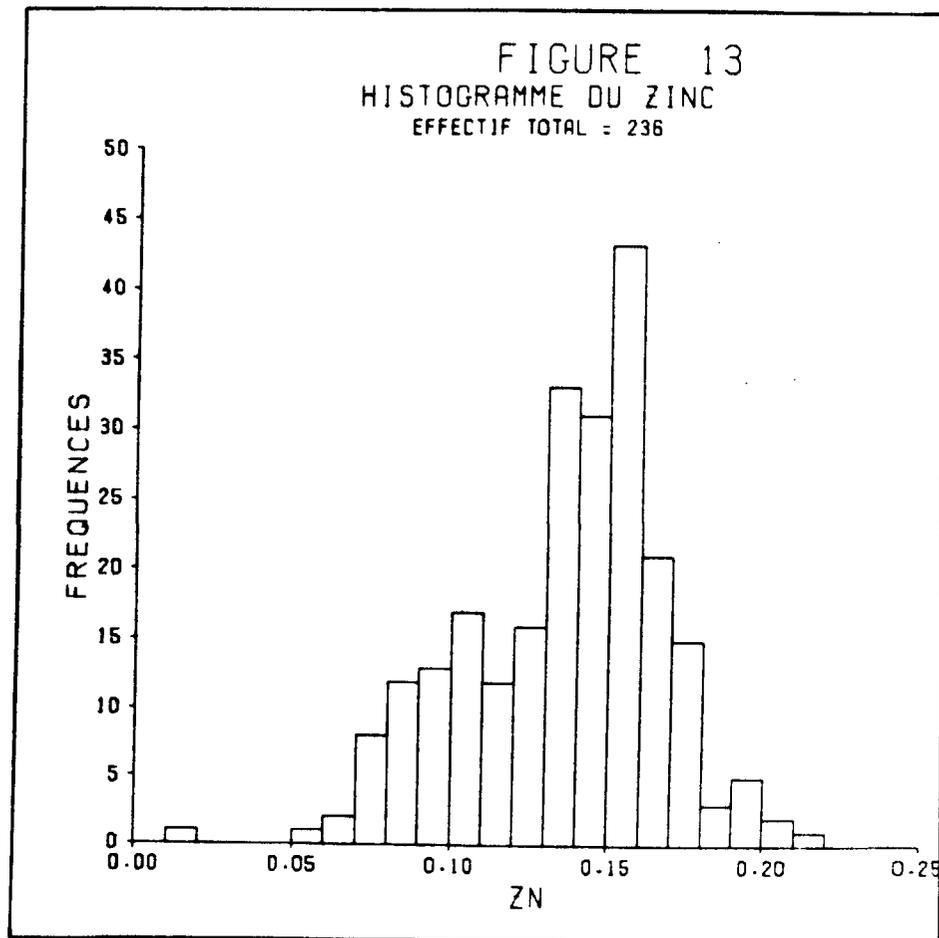
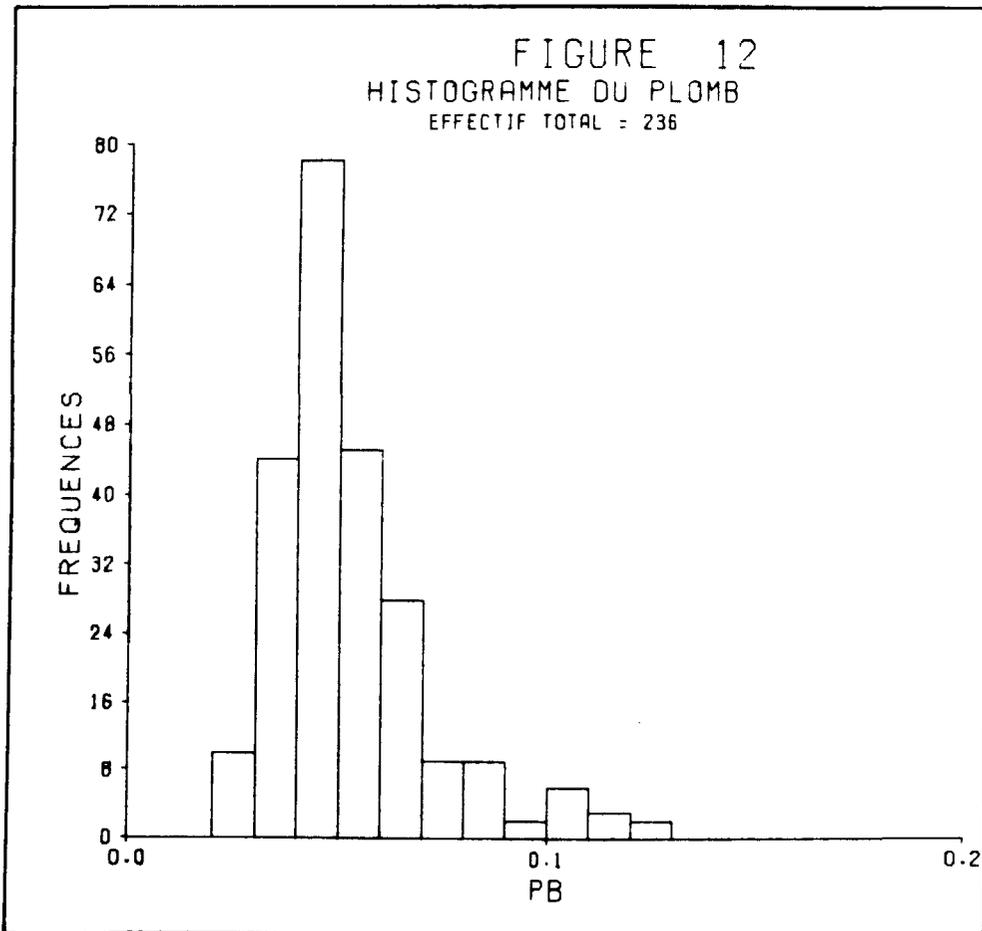












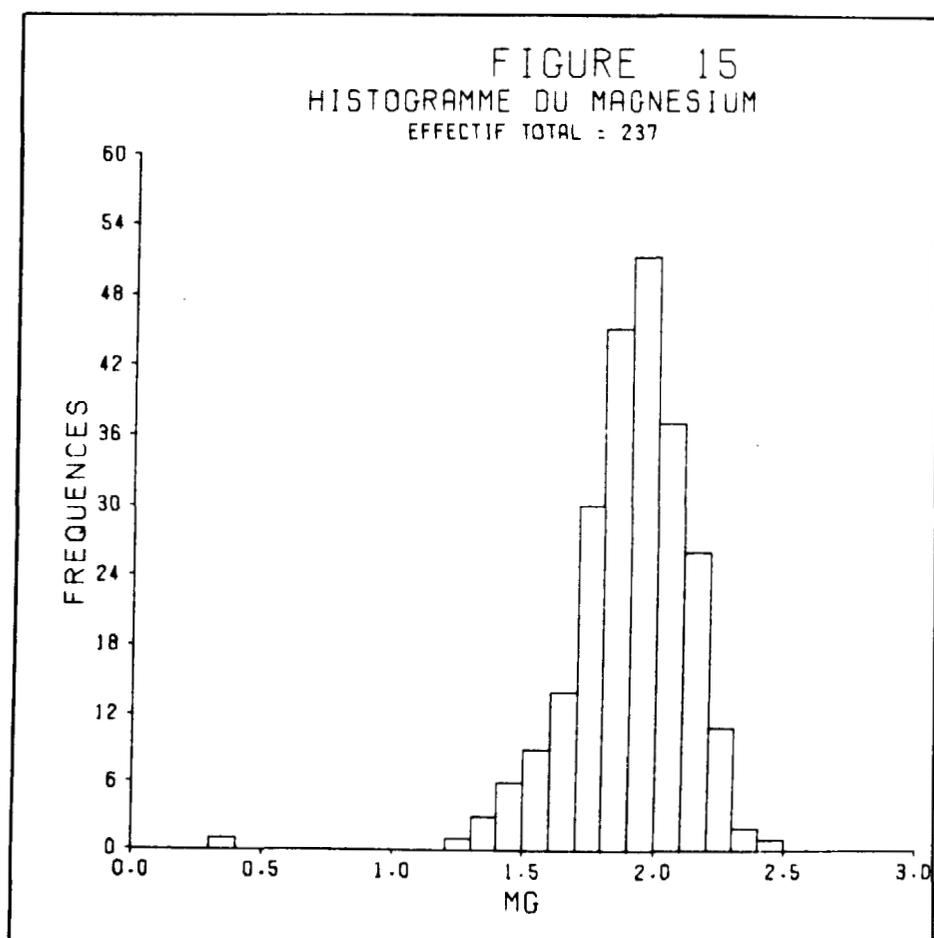
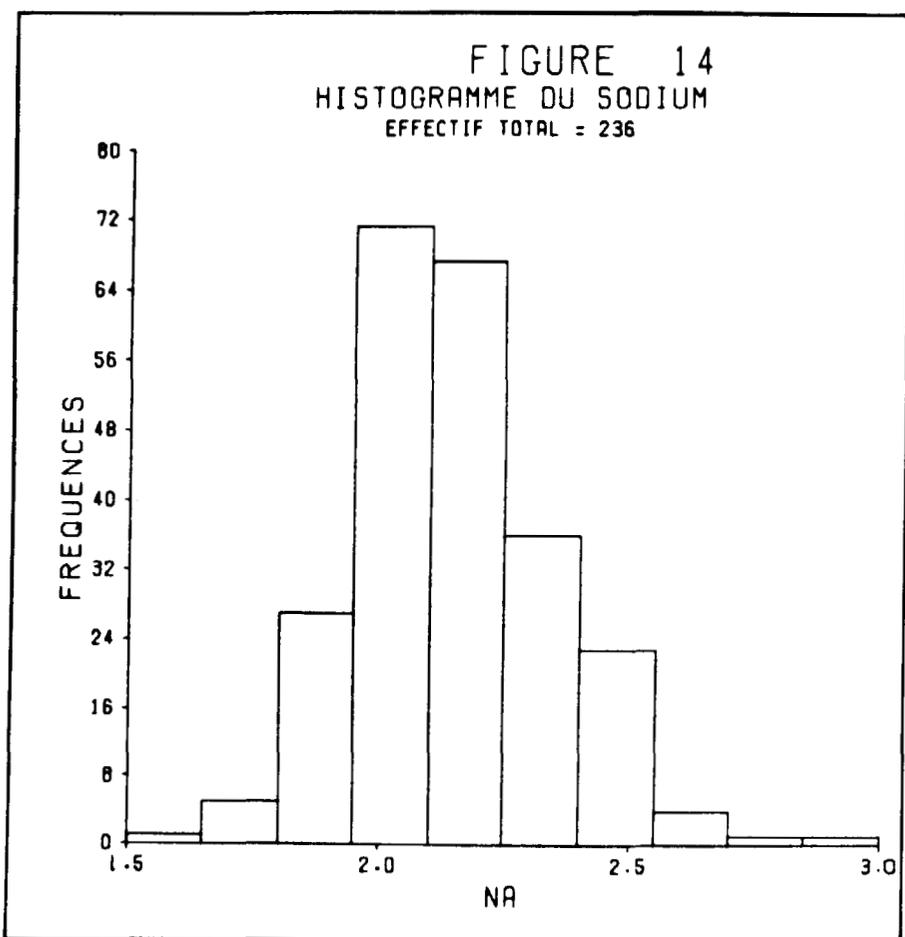
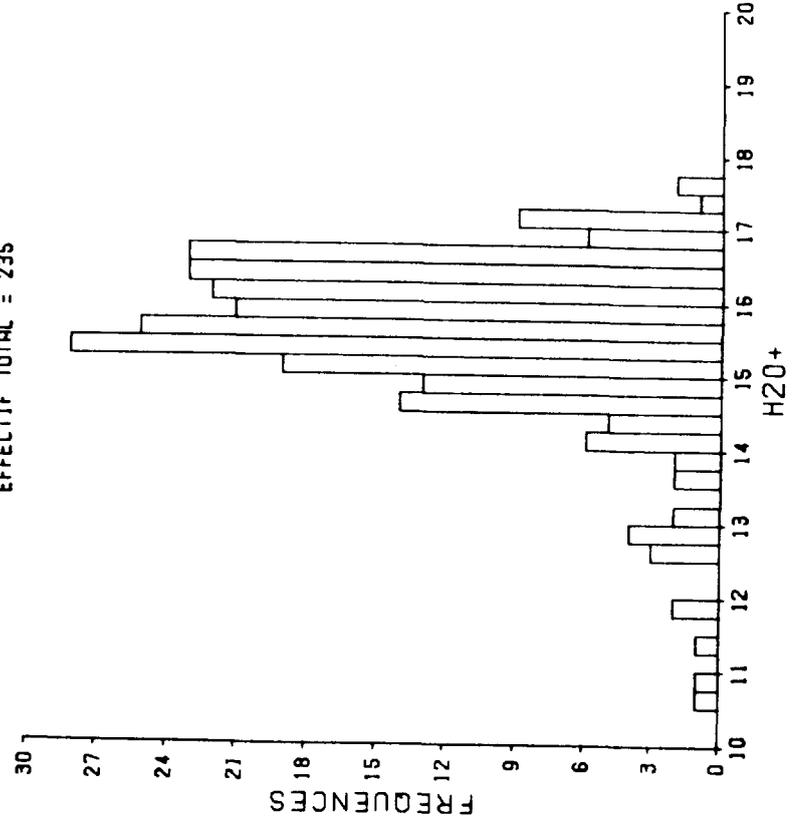


FIGURE 16
HISTOGRAMME DE LA PERTE AU FEU A 1000 DEGRES CENTIGRADES
EFFECTIF TOTAL = 235



Il semble donc que l'on ne soit pas en présence d'une seule famille géochimique de nodules, mais de plusieurs types de nodules présentant des caractéristiques différentes. Certains auteurs l'ont déjà montré : ainsi HALBACH et al. (1975) distinguent plusieurs familles de nodules d'après l'aspect de leur surface et d'après leur teneur en Fe. Les deux types principaux, appelés A et B, sont séparés par la valeur 8 à 9 % Fe, qui correspond à la limite basse que nous avons déterminée pour Fe (Fig. 5).

Les limites de populations pour Mn, Fe, Cu, Zn sont semblables à celles que l'on peut définir sur les histogrammes présentés par FRIEDRIECH et al. (1974), qui séparent les polynodules des mononodules. On notera cependant que ces auteurs ont analysés des nodules isolés et non le broyat de plusieurs nodules, comme nous l'avons fait.

La complexité des histogrammes ne permet pas d'effectuer les séparations. Pour ce faire, il faut utiliser des méthodes d'analyse multivariée, ce que nous tenterons au chapitre 3. Au préalable, nous étudierons les corrélations existantes entre les éléments.

II - ETUDE DES CORRELATIONS INTER-ELEMENTS

Pour étudier les corrélations qui existent entre les éléments chimiques sur l'ensemble des nodules analysés, nous disposons de :

- Tableaux de coefficients de corrélation inter-éléments
- Diagrammes de corrélation entre éléments deux à deux
- Diagrammes triangulaires.

1 - COEFFICIENTS DE CORRELATION

Le *tableau 3* présente les coefficients de corrélation pour l'ensemble des 1 257 stations où ont été analysés Mn, Fe, Ni, Co, Cu, Ca, SiO₂.

Le *tableau 4* présente ceux du second ensemble, soit 235 stations, où la totalité des éléments et H₂O⁺ ont été analysés.

Les moyennes et écarts types de Mn, Fe, Ni, Co, Cu, SiO₂, pour ces deux tableaux, montrent que le deuxième ensemble est une extraction représentative du premier. Seul le Calcium présente une différence. En effet, quelques fortes valeurs du Calcium n'apparaissent pas dans le second ensemble, nous verrons que ceci n'altère pas la comparaison, ces fortes valeurs correspondent à la présence d'inclusions de sédiments et d'organismes calcaires dans les nodules.

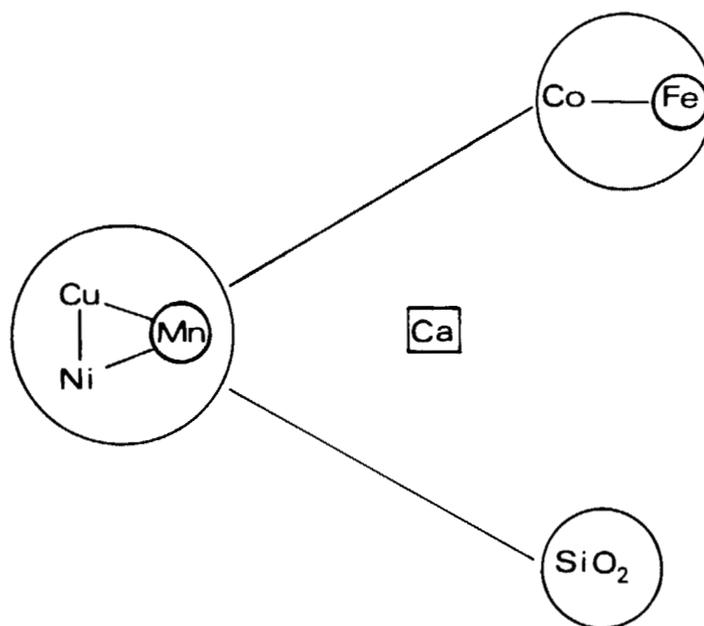
Tableau 3 - Coefficients de corrélations pour la totalité des échantillons

	Mn	Fe	Ni	Co	Cu	Ca	SiO ₂
Mn	1.00						
Fe	- 0.57	1.00					
Ni	0.83	- 0.64	1.00				
Co	- 0.06	0.67	- 0.19	1.00			
Cu	0.82	- 0.81	0.82	- 0.35	1.00		
Ca	- 0.23	- 0.04	- 0.21	- 0.12	- 0.11	1.00	
SiO ₂	- 0.77	0.09	- 0.57	- 0.30	- 0.50	- 0.06	1.00
Moyenne m	26.75	6.40	1.25	0.24	1.05	1.70	16.75
Ecart-type σ	4.34	2.05	0.23	0.05	0.26	0.87	4.85
σ/m	0.16	0.32	0.18	0.21	0.25	0.51	0.29

Tableau 4 - Coefficients de corrélations des 235 échantillons

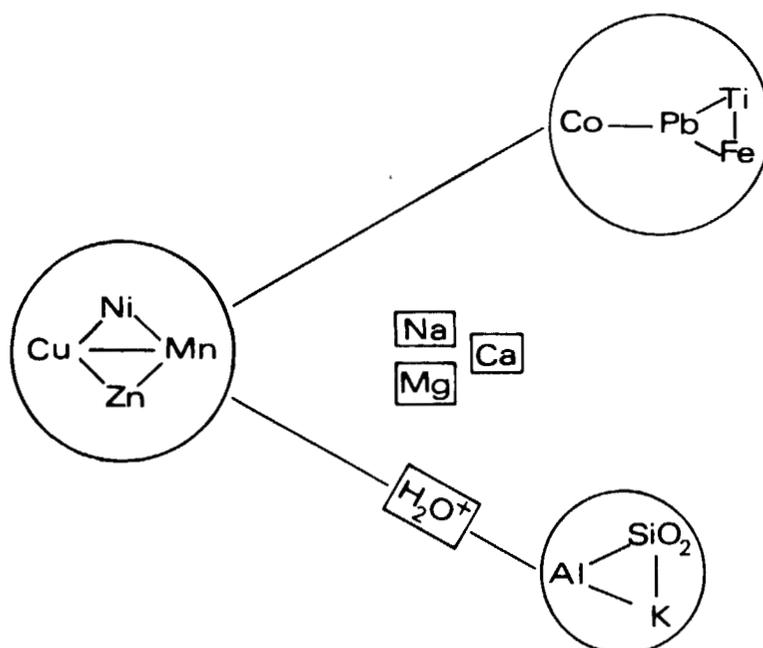
	H ₂ O ⁺	Mn	Fe	Ni	Co	Cu	Na	Mg	K	Ca	SiO ₂	Al	Ti	Zn	Pb
H ₂ O ⁺	1.00														
Mn	0.59	1.00													
Fe	- 0.12	- 0.64	1.00												
Ni	0.43	0.80	- 0.73	1.00											
Co	0.08	- 0.29	0.78	- 0.40	1.00										
Cu	0.34	0.80	- 0.82	0.82	- 0.49	1.00									
Na	0.05	0.36	- 0.50	0.32	- 0.33	0.33	1.00								
Mg	0.28	0.18	- 0.21	0.28	- 0.08	0.19	0.28	1.00							
K	- 0.65	- 0.66	0.10	- 0.49	- 0.12	- 0.48	0.08	0.00	1.00						
Ca	- 0.10	- 0.08	0.03	- 0.10	- 0.03	0.00	- 0.05	0.31	- 0.22	1.00					
SiO ₂	- 0.76	- 0.74	0.08	- 0.50	- 0.19	- 0.46	- 0.03	- 0.05	0.86	- 0.10	1.00				
Al	- 0.59	- 0.75	0.16	- 0.47	- 0.12	- 0.51	- 0.20	0.00	- 0.80	- 0.12	0.87	1.00			
Ti	- 0.03	- 0.58	0.92	- 0.67	0.68	- 0.79	- 0.56	- 0.35	0.01	0.11	0.02	0.17	1.00		
Zn	0.45	0.84	- 0.74	0.76	- 0.47	0.84	0.48	0.31	- 0.52	- 0.01	- 0.55	- 0.59	- 0.70	1.00	
Pb	0.16	- 0.42	0.88	0.50	0.84	- 0.67	- 0.38	- 0.06	- 0.11	0.04	- 0.17	- 0.03	0.83	- 0.52	1.00
Moyenne m	15.49	26.00	6.45	1.26	0.24	1.04	2.06	2.14	0.90	1.66	16.40	2.80	0.42	0.13	0.05
Ecart-type σ	1.14	4.09	2.13	0.22	0.05	0.27	0.32	0.46	0.27	0.43	4.50	0.58	0.20	0.03	0.02
σ/m	0.07	0.15	0.33	0.17	0.21	0.26	0.16	0.21	0.30	0.26	0.27	0.21	0.48	0.23	0.40

En groupant les éléments présentant des coefficients de corrélation positifs supérieurs à + 0,8 pour Mn, Ni, Cu, et + 0,65 pour Co et Fe, on peut synthétiser les résultats du premier tableau par le schéma suivant :



De même, on peut regrouper les éléments dont les coefficients de corrélation sont supérieurs à :

- . 0.80 pour K, SiO₂, Al
- . 0.76 pour Mn, Ni, Cu, Zn
- . 0.68 pour Fe, Ti, Pb, Co



On retrouve donc une partie des analogies définies sur les histogrammes, en les précisant. Trois pôles principaux apparaissent :

- le pôle Mn auquel il faut rattacher Zn, Cu, Ni et dans une certaine mesure H_2O^+
- le pôle Fe auquel s'ajoute Ti, Pb, Co
- le pôle SiO_2 auquel sont liés K et Al.

En dehors de ces trois pôles, certains éléments apparaissent comme indépendants avec des coefficients proches de zéro, ce sont Ca, Mg, Na. Notons cependant une légère corrélation positive de Na et Mn. On remarquera que si le pôle Mn s'oppose aux deux autres, il semble qu'il y ait une certaine indépendance entre le pôle SiO_2 et le pôle Fe.

L'essentiel de ces résultats a déjà été souligné par de nombreux auteurs, tels GOLDBERG 1954, BURNS et FUERSTENAU 1966, PRICE et CALVERT 1970, ESTEP 1973. Tous ces travaux semblent montrer que ces résultats sont indépendants de l'échelle d'observation. En effet, que l'on considère des couches d'oxydes, des nodules isolés, ou un ensemble de nodules comme nous l'avons fait, les affinités entre éléments sont les mêmes.

Le coefficient de corrélation, défini par régression linéaire, doit être utilisé avec prudence pour l'étude de la géochimie des nodules. En effet, certaines relations inter-éléments ne sont pas linéaires, mais semblent être d'un degré supérieur, par exemple Mn - Zn (Fig. 19) ou Ni - Cu (Fig. 22). On rencontre également des inversions d'affinité, tel que pour Mn - Co (Fig. 33). Le coefficient de corrélation n'a plus alors de signification statistique. Il se trouve que pour les données étudiées, lorsque le comportement de 2 éléments est à tendance parabolique, nous avons tout de même des informations qualitatives mais qui n'ont aucune valeur quantitative. Si l'on veut prédire la teneur des éléments mineurs à partir de Mn, comme l'ont fait RANCITELLI et PERKINS (1973), ce n'est pas un modèle linéaire qu'il faut utiliser.

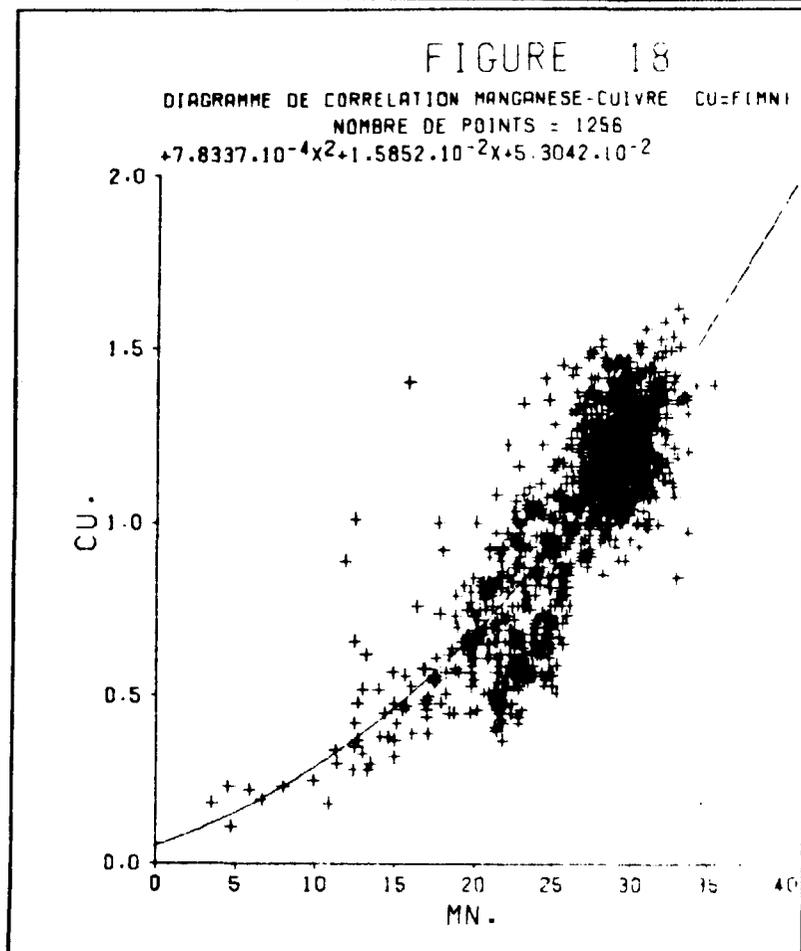
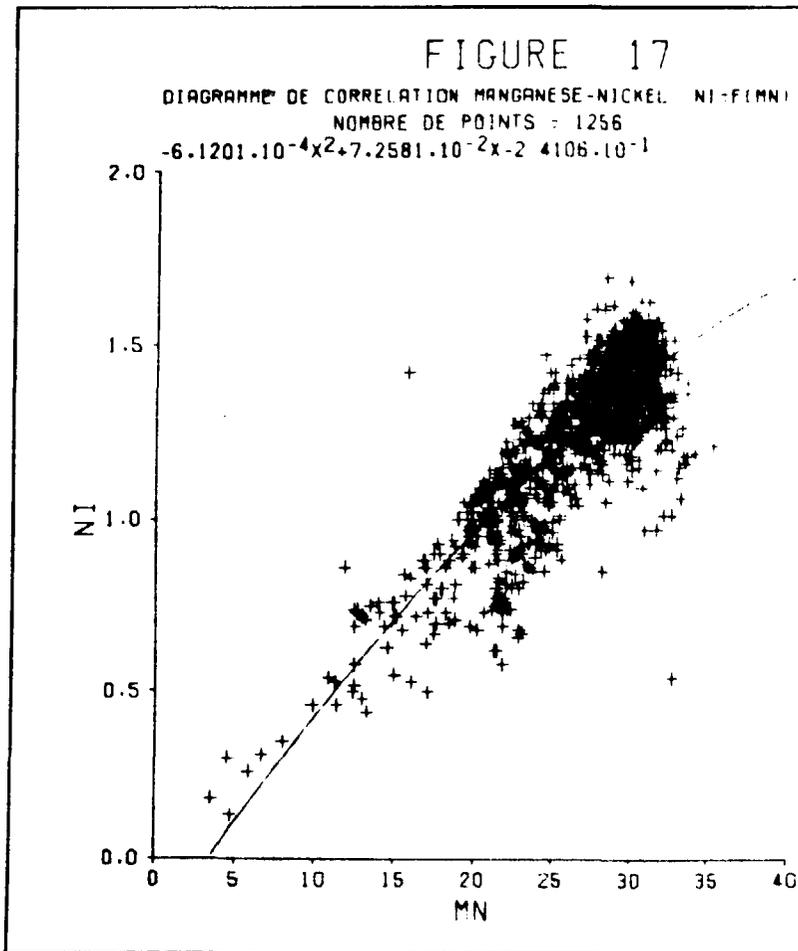
2 - DIAGRAMMES DE CORRELATION

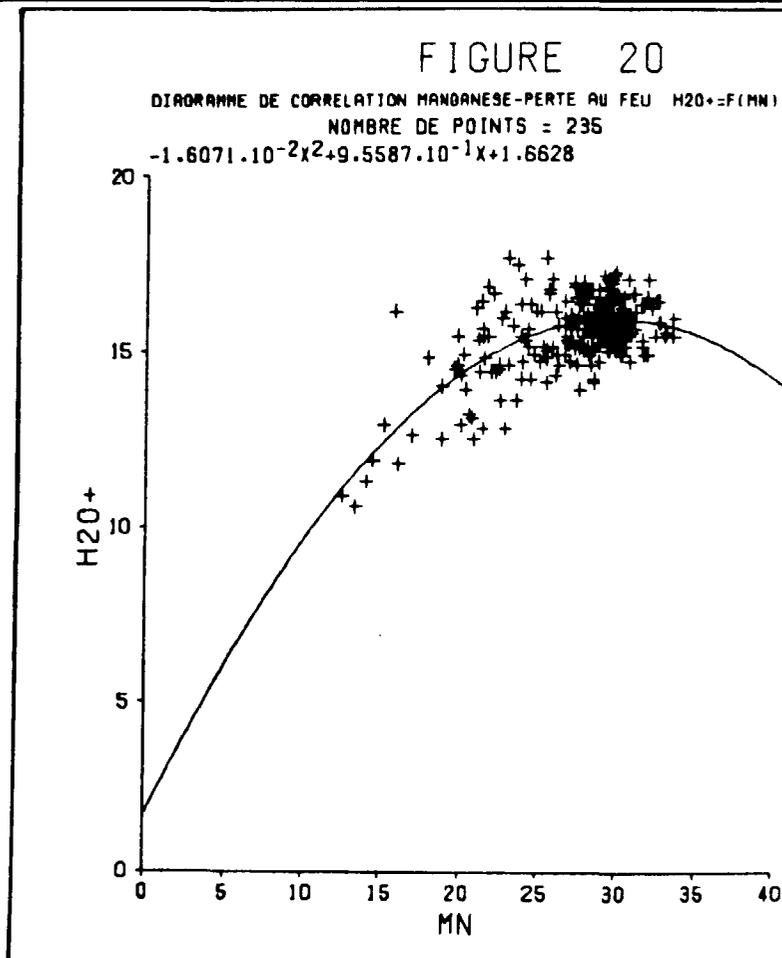
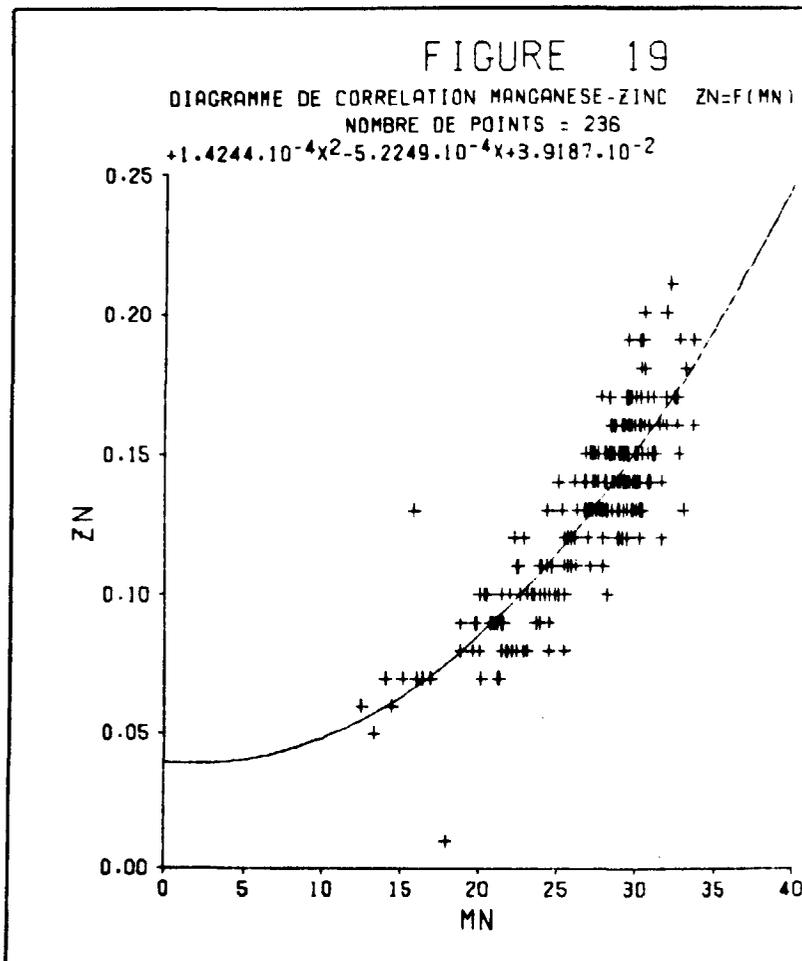
Pour un certain nombre d'éléments pris deux à deux on a établi des diagrammes de corrélation et tracé les droites de régression des nuages de points ainsi obtenus. Nous étudierons tout d'abord les diagrammes entre les éléments à l'intérieur de chaque groupe d'éléments déterminé précédemment, puis d'un groupe à l'autre.

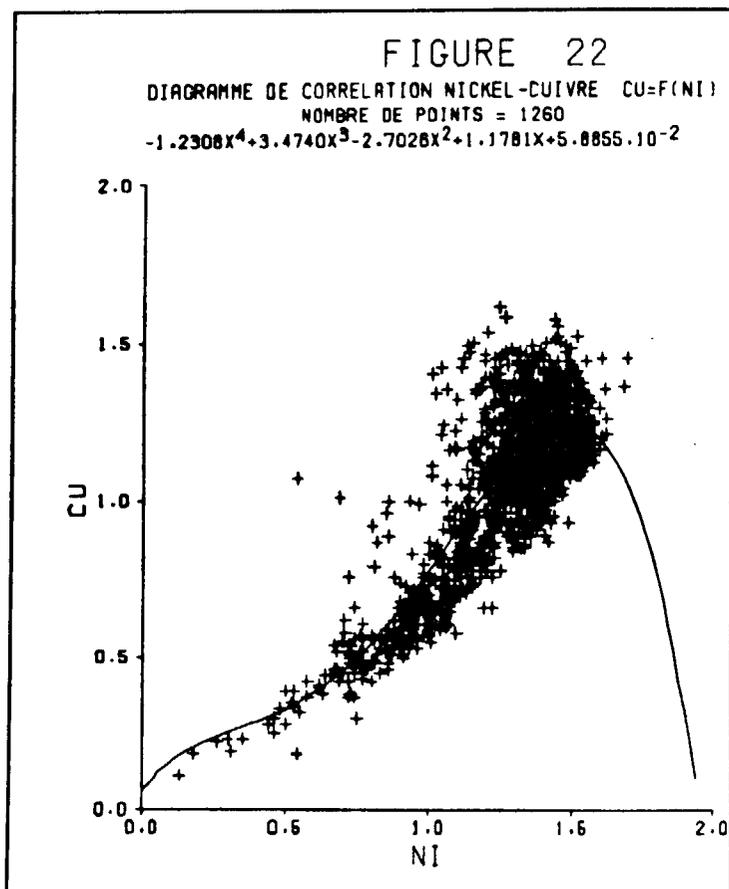
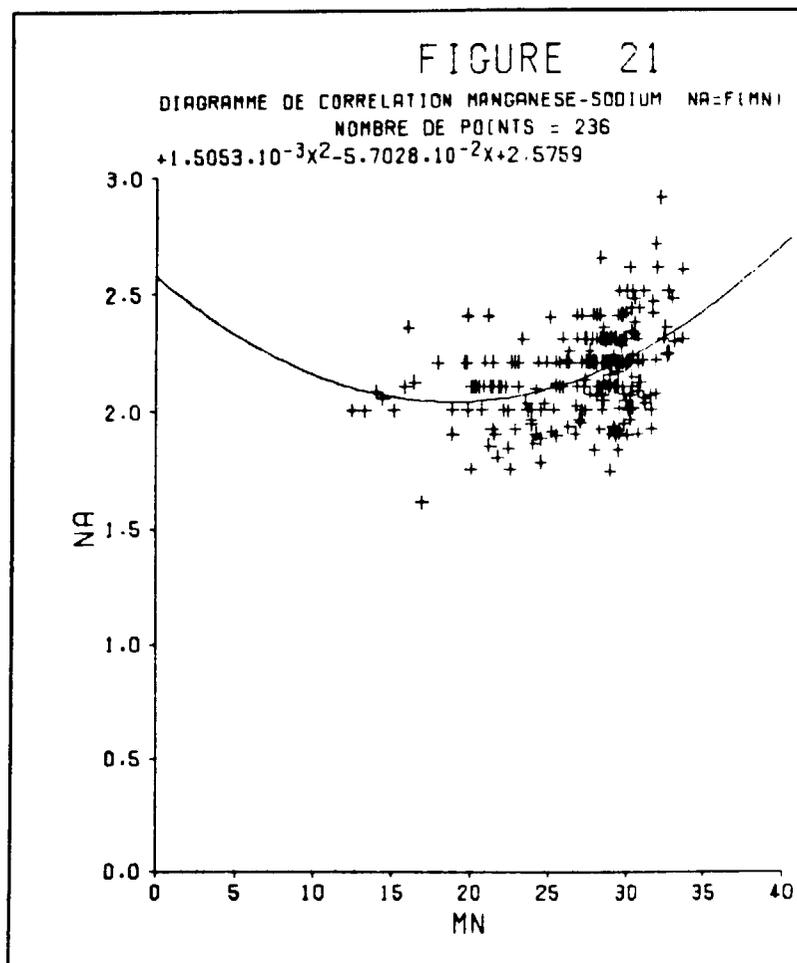
2.1. - COMPARAISON INTRAGROUPE

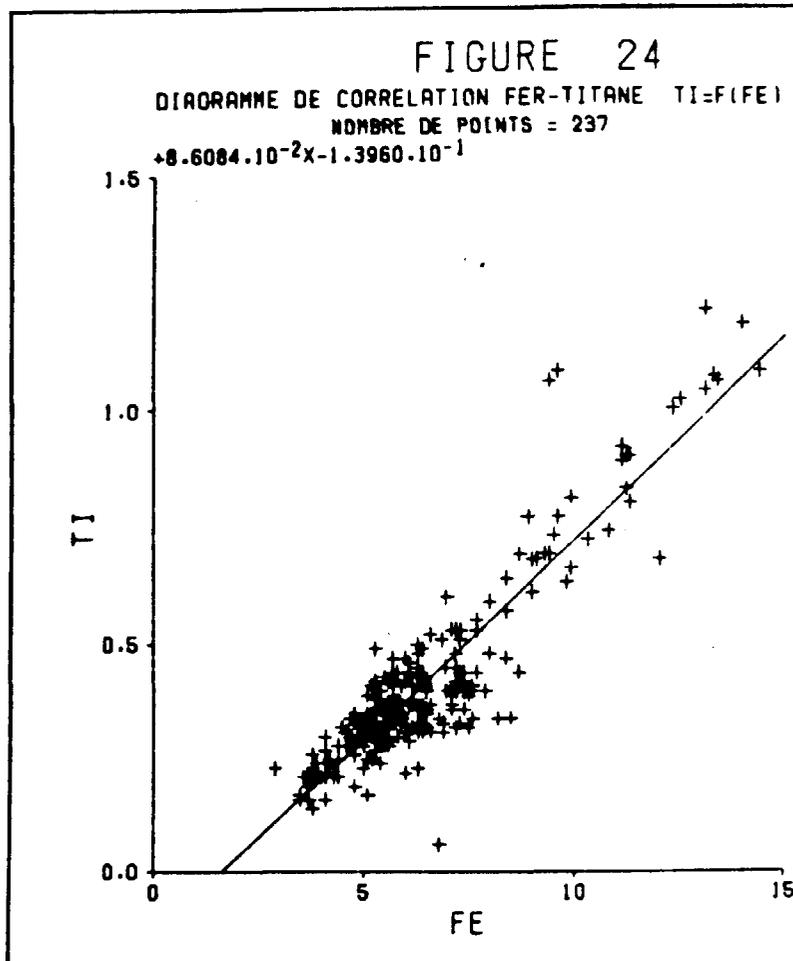
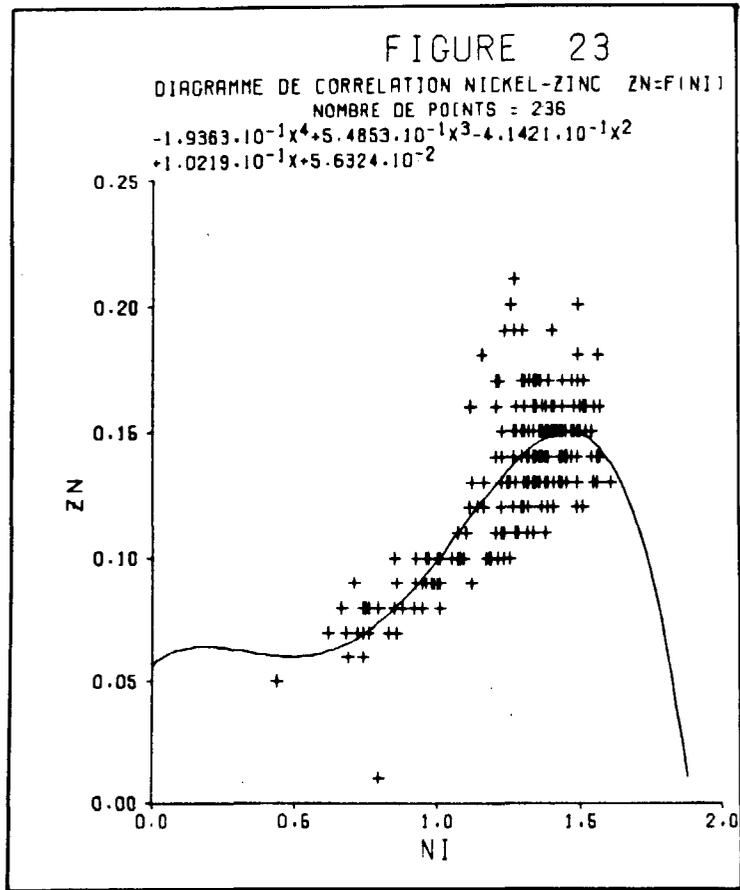
Groupe Mn, Ni, Cu, Zn, H_2O^+ , Na Fig. 17 à 23

On remarquera la tendance progressivement croissante de Cu et Zn par rapport à Mn (Fig. 18 et 19) et à Ni (Fig. 22 et 23). Les nuages de points semblent pouvoir admettre des régressions paraboliques ou exponentielles. Par contre, Mn et Ni (Fig. 17) sont corrélés linéairement, bien qu'une dispersion importante apparaisse pour les fortes valeurs.









Sur la figure 22 on peut isoler quatre groupes d'échantillons séparés par les teneurs en Ni 0.4 %, 0.8 %, et 1.1 %. Jusqu'à 0.8 % Ni, Ni croît plus vite que Cu, après cette valeur on observe le phénomène inverse. Il semble que pour les fortes valeurs il y ait saturation en Ni, alors que Cu continue à croître. De même, le nuage de la figure 23 peut être séparé en deux parties par la limite 1.1 % Ni. Après cette valeur une importante dispersion du Zn se produit.

Quant à H_2O^+ et Na, les figures 20 et 21 n'illustrent qu'une très faible corrélation avec Mn. On voit donc apparaître à l'intérieur du groupe du manganèse deux sous-groupes, dont les comportements géochimiques sont différenciés.

- le sous-groupe Mn - Ni
- le sous-groupe Cu - Zn

Groupe Fe, Ti, Pb, Co *Fig. 24 à 26*

La figure 24 illustre l'excellente corrélation linéaire (+ 0.92) existant entre Fe et Ti. Bien qu'avec une dispersion plus grande Pb semble lui aussi corrélé linéairement avec Fe (Fig. 25). Par contre on remarquera, la médiocre corrélation Fe - Co (Fig. 26). Si une régression linéaire peut être statistiquement retenue, de nombreux échantillons présentent cependant des comportements anormaux.

Groupe SiO_2 , Al, K *Fig. 27 et 28*

Les corrélations linéaires observables entre ces éléments semblent souligner leur appartenance à des silicates alumino-potassiques d'origine volcanique.

2.2. - COMPARAISON INTER-GROUPE

Pour faire cette comparaison nous avons surtout considéré les éléments prépondérants de chaque groupe, mais nous avons également étudié quelques cas particuliers.

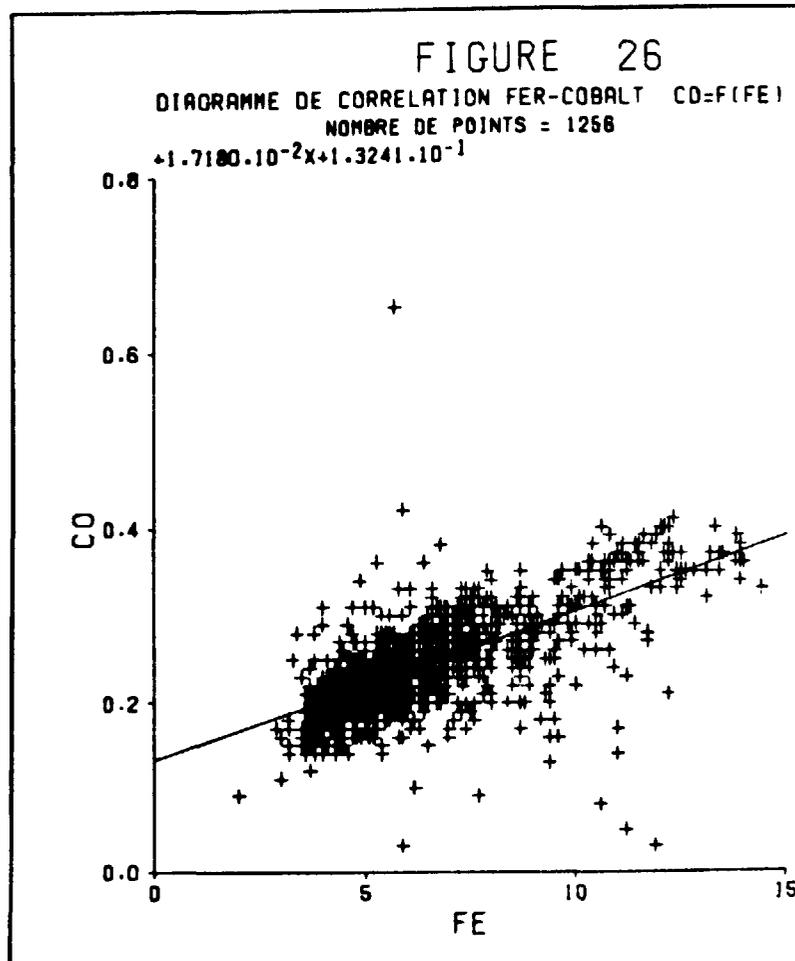
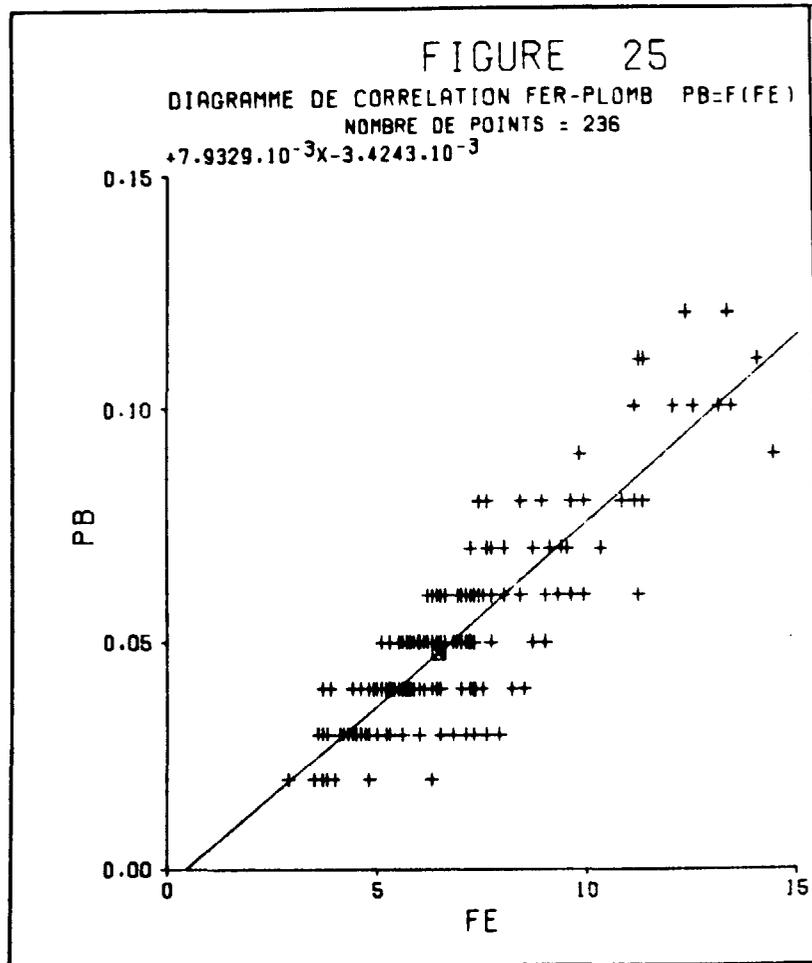
LA SILICE ET LES AUTRES GROUPE

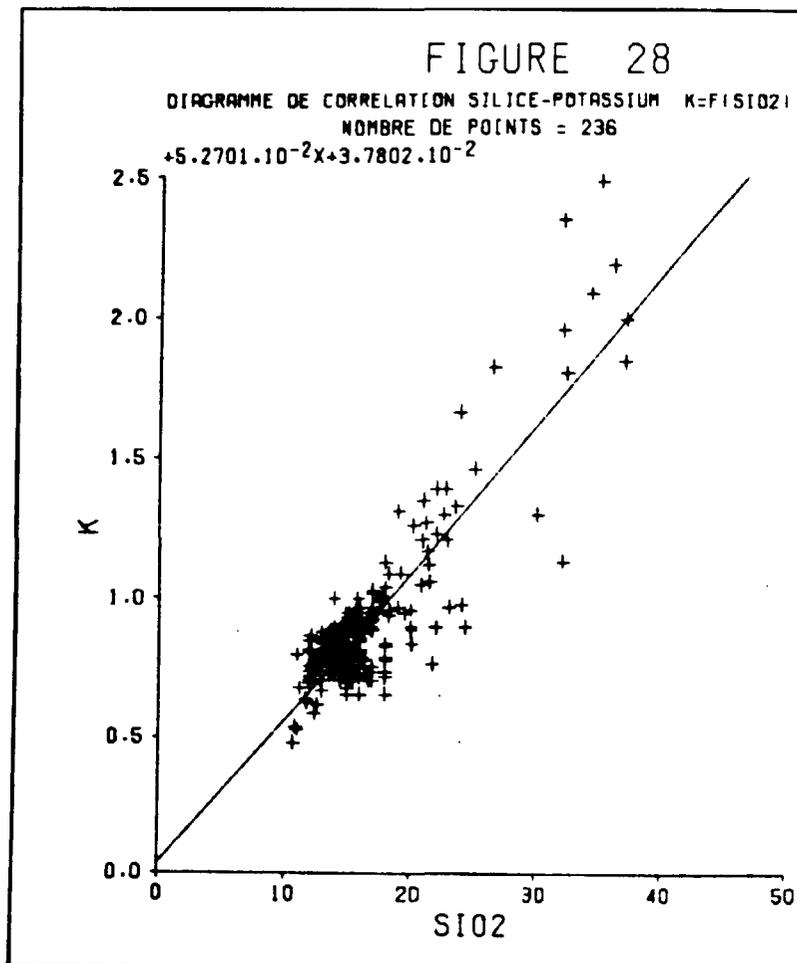
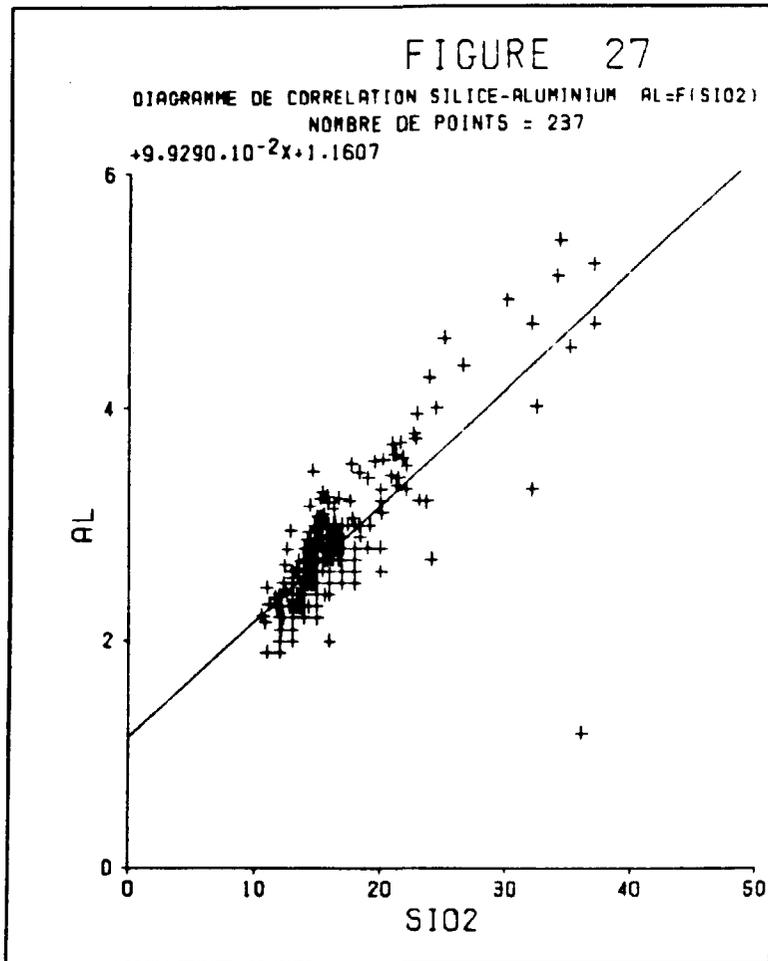
Les figures 29 et 30 représentent les relations entre SiO_2 et Fe d'une part, et entre SiO_2 et Mn d'autre part. La figure 29 montre l'indépendance de Fe vis à vis de SiO_2 , la figure 30 la corrélation négative qui lie Mn à SiO_2 .

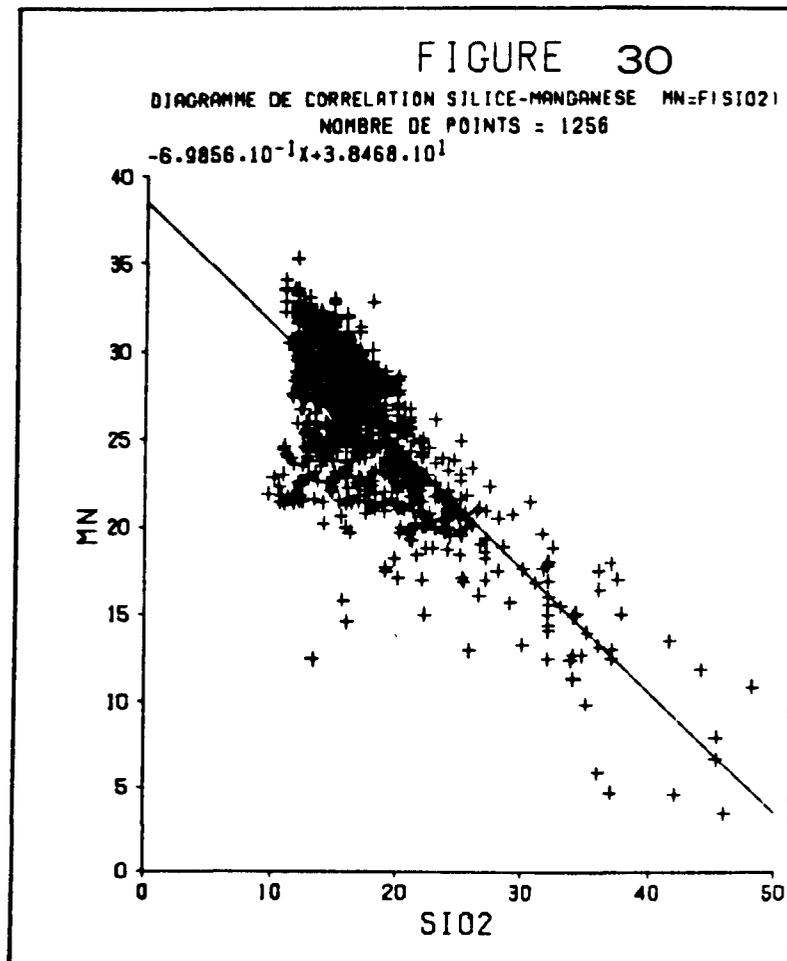
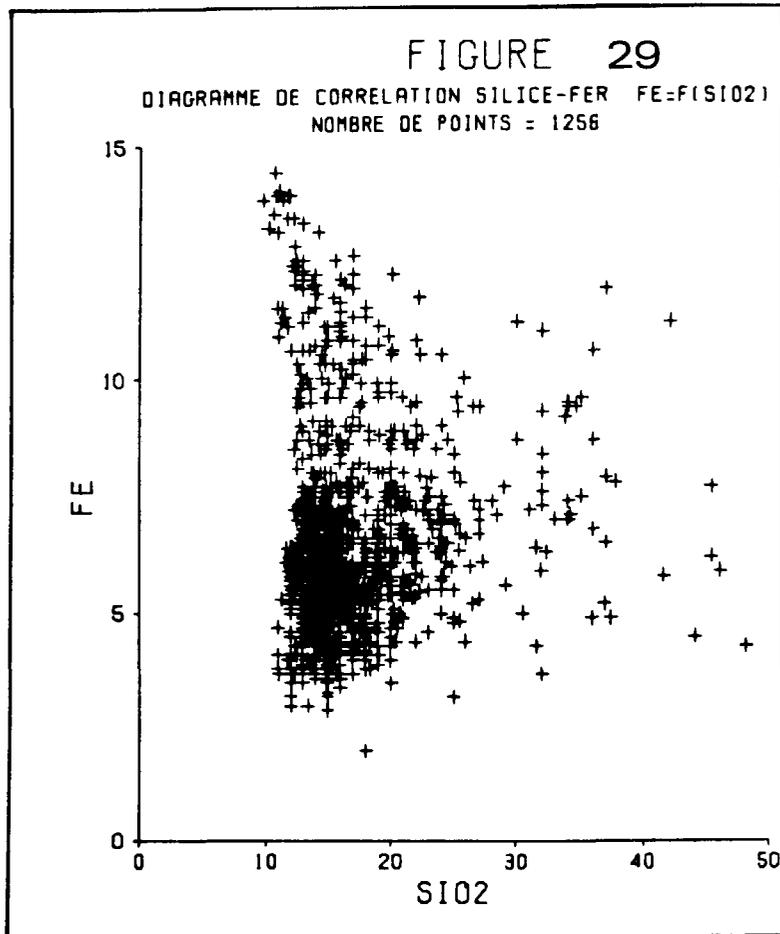
Ces deux figures mettent en évidence l'existence d'un pourcentage minimal de silice dans les nodules. La figure 31 qui représente les relations entre SiO_2 et Mn de 696 échantillons de nodules du Pacifique Sud, présente la même caractéristique.

Remarquons que les nuages des figures 29 et 31 ont une pente moyenne identique, et même une ordonnée à l'origine semblable.

Il y a donc un taux minimal de SiO_2 dans les nodules de l'Océan Pacifique qui se situe vers 10 %.







PROJET NOUVELS - DONNEES BRUTES (ADDRES SEULS)

PLOT SIO2 MN

MISSING DATA IS IGNORED

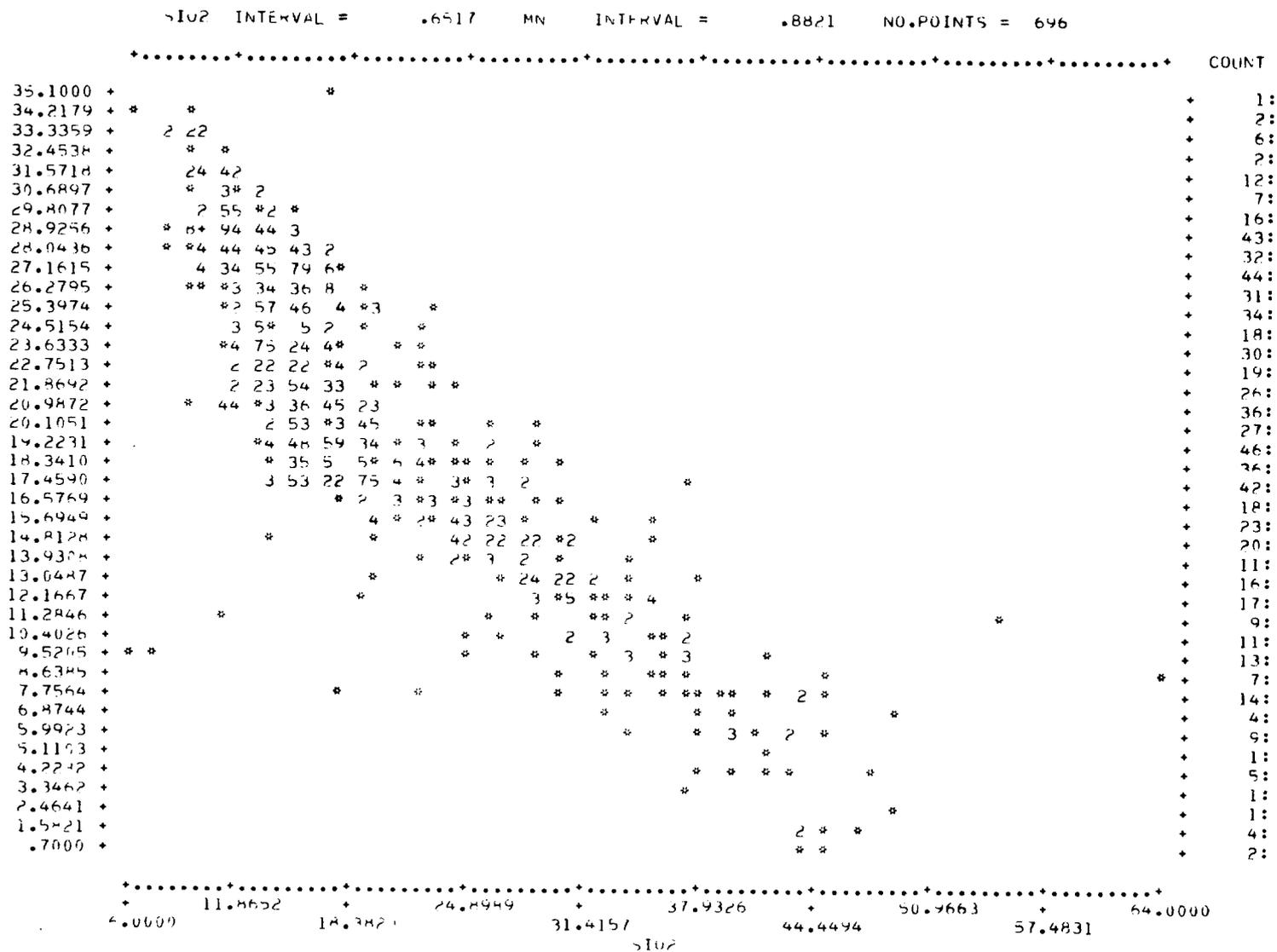
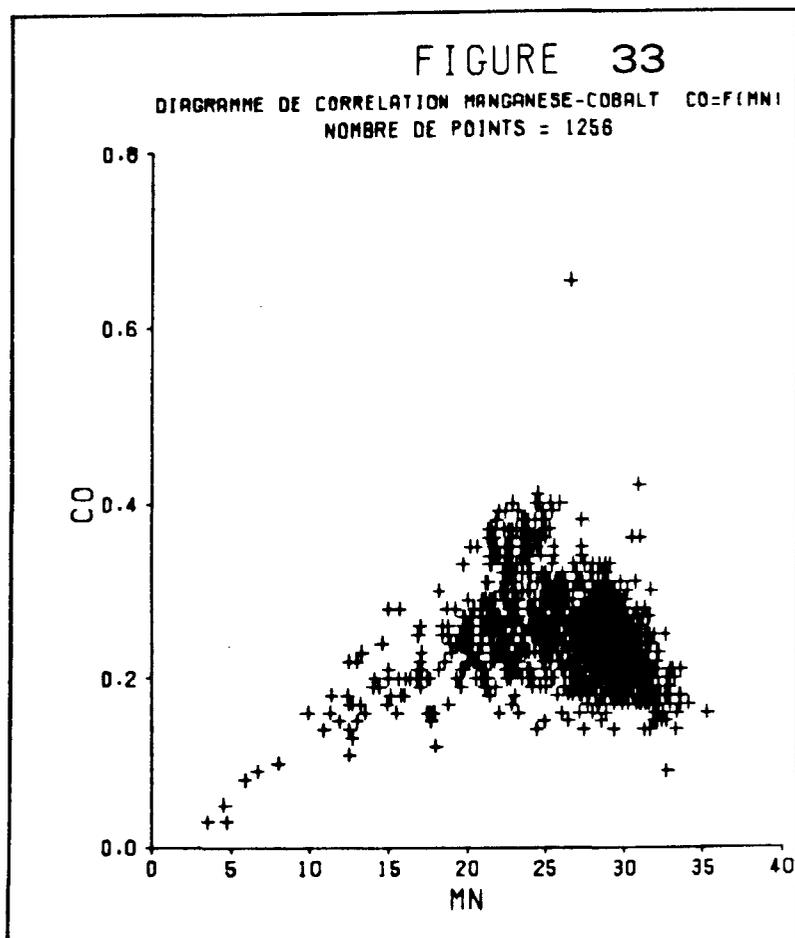
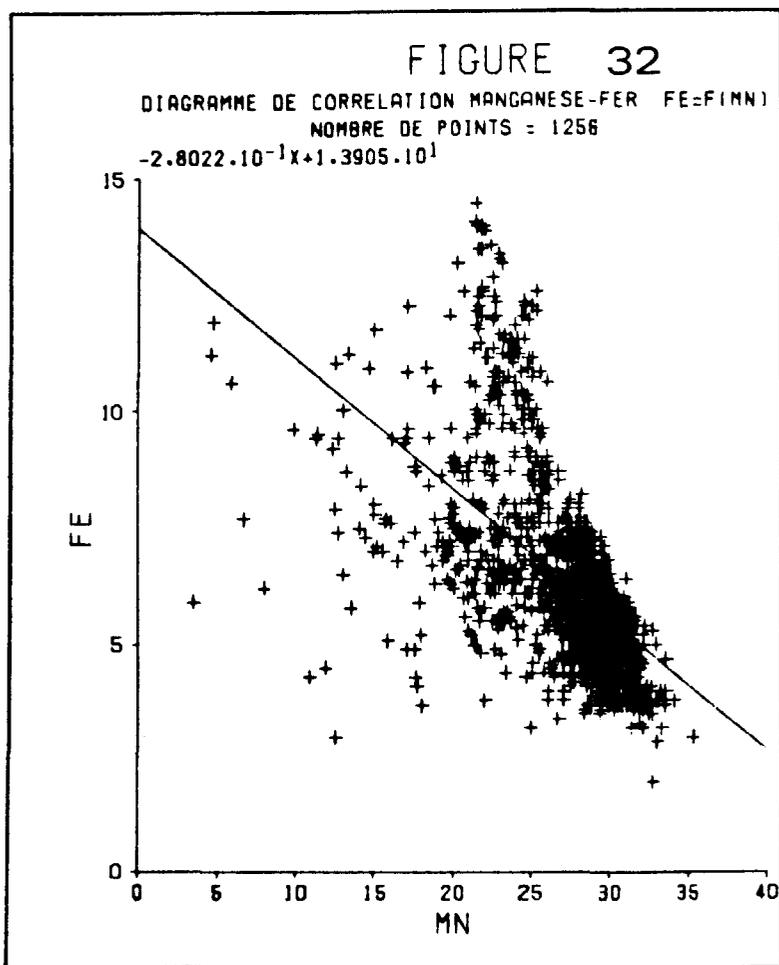


FIGURE 31.



LE MANGANESE ET LE GROUPE DU FER

Sur la figure 32, qui présente les relations entre Mn et Fe, nous notons la tendance à une corrélation négative entre ces deux éléments mais, en fait, leur comportement est beaucoup plus complexe.

Jusqu'à la valeur 19 % Mn, il y a indépendance entre le fer et le manganèse ; de 19 à 26 % cette indépendance tend vers une corrélation négative lorsque le manganèse augmente ; au delà de 26 % il y a une corrélation négative marquée.

La figure 33, qui montre les relations entre Mn et Co, met en évidence trois comportements : jusqu'à 20 % Mn il y a une corrélation entre ces deux éléments ; de 20 à 26 % il y a une relative indépendance, et au delà de 26 % Mn, il y a tendance à une corrélation négative.

3 - DIAGRAMMES TRIANGULAIRES

Nous avons tracé des diagrammes triangulaires afin de visualiser le comportement d'un élément par rapport à deux autres. Dans ces relations nous avons retenu les éléments les plus significatifs et ceux qui ont attiré notre attention au paragraphe précédent. Nous utiliserons plus particulièrement les pôles Mn et Fe, qui sont les phases porteuses des éléments mineurs. Nous nous attacherons surtout au comportement moyen des nuages et nous négligerons les points isolés dans l'interprétation.

Fe, Mn, 10 Co *Fig. 34*

Nous pouvons distinguer trois comportements de Co en fonction de Mn et Fe. Lorsque Mn croît et Fe décroît, on observe successivement une augmentation de Co, puis une légère décroissance et enfin une diminution prononcée.

Fe, Mn, 10 Cu *Fig. 35*

Un petit nombre d'échantillons à faible teneur en Cu sont indépendants des variations de Mn et Fe, ils correspondent aux plus fortes valeurs de Fe. La grande majorité des échantillons présente un accroissement en Cu, qui semble linéaire lorsque Fe diminue et Mn augmente.

Fe, Mn, 10 Ni *Fig. 36*

Nous retrouvons également quelques échantillons à faible teneur en Ni, qui semblent être indépendants des variations en Fe et Mn.

Lorsque Fe diminue et Mn augmente, nous observons plusieurs comportements de Ni, tout d'abord une croissance linéaire précède un ensemble plus confus où l'on peut déceler deux nuages de points enchevêtrés : le premier traduit une croissance linéaire en Ni différente de la précédente, le second indique une saturation en Ni vis à vis de Mn et Fe.

Ni, Cu, Mn *Fig. 37*

Les échantillons sont triés suivant l'axe Mn. Lorsque Mn décroît, Ni et Cu augmentent linéairement mais cette augmentation se fait en deux étapes, suivant deux pentes différentes. Nous observons, en premier lieu, une croissance en Ni supérieure à celle de Cu (environ 3 Ni pour 2 Cu), puis une croissance supérieure de Cu à celle de Ni jusqu'à avoir un rapport Ni/Cu = 1.

Ni, Cu, 10 Co *Fig. 38*

Nous avons une figure semblable à la précédente. Lorsque Co décroît, Ni et Cu augmentent suivant les mêmes pentes que précédemment.

Au total, compte tenu des réserves indiquées au paragraphe II de la première partie, nous pouvons tout de même tirer les enseignements suivants :

- les éléments étudiés peuvent être classés en trois groupes principaux qui sont :

- a) Mn, Ni, Zn, Cu, (H_2O^+ , Na)
- b) SiO_2 , Al, K
- c) Fe, Ti, Pb, (Co)

Ca et Mg semblent indépendants.

- les échantillons peuvent être classés, en trois principales familles, suivant leur teneur en Mn :

- a) De 0 à 19-20 % Mn

Dans cette famille, lorsque Mn augmente, Ni croît plus vite que Cu, Fe est indépendant et Co augmente.

- b) De 19-20 à 26 % Mn

Lorsque Mn augmente, Cu croît plus vite que Ni, Fe tend à diminuer et Co semble indépendant.

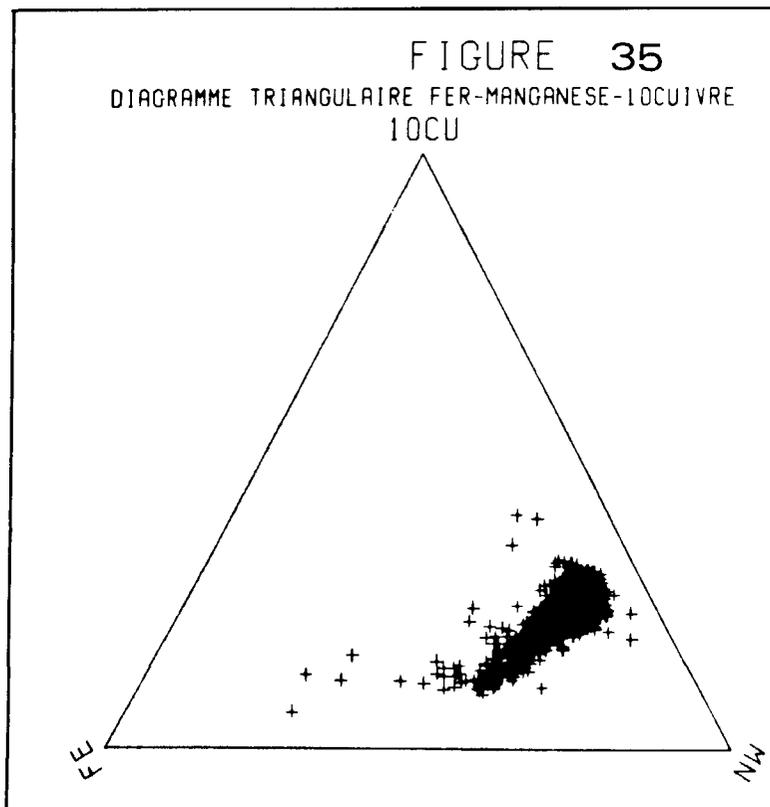
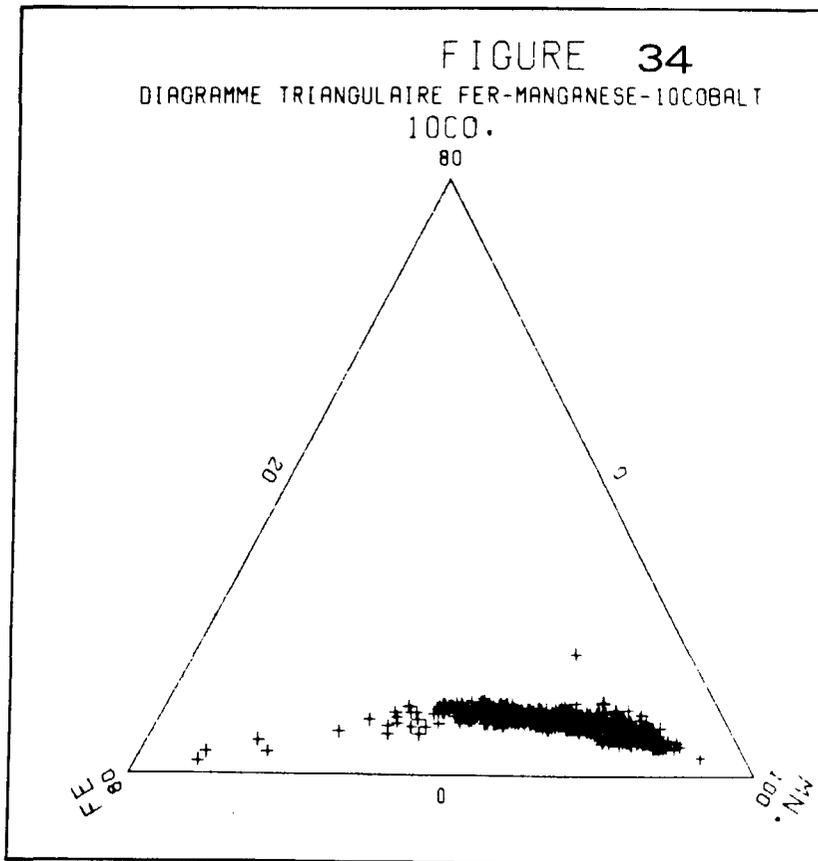
- c) Au delà de 26 % Mn

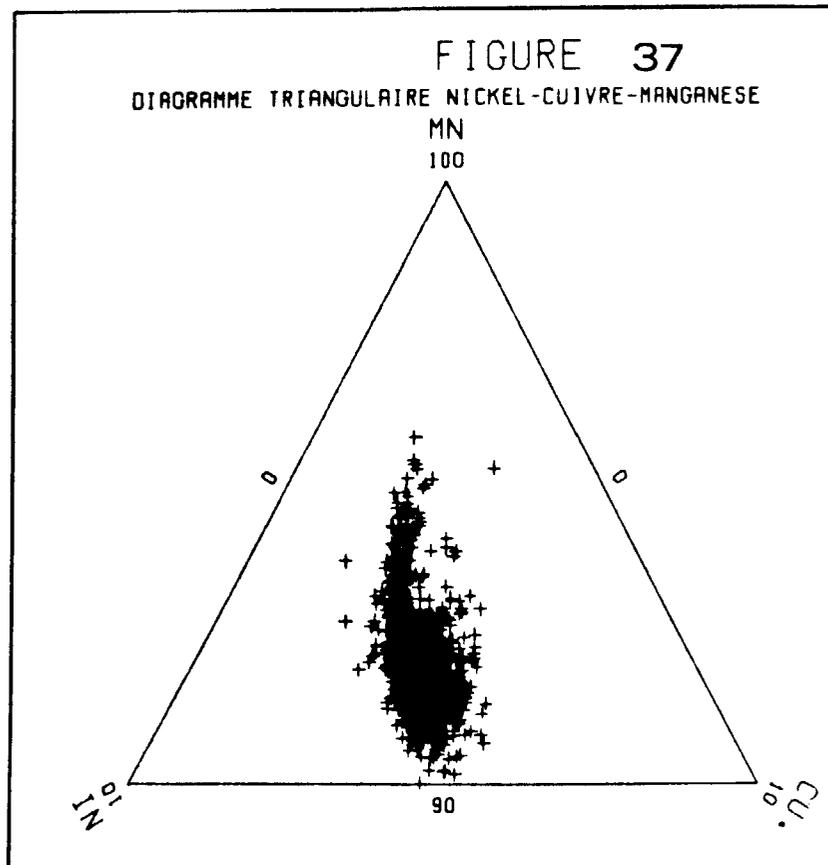
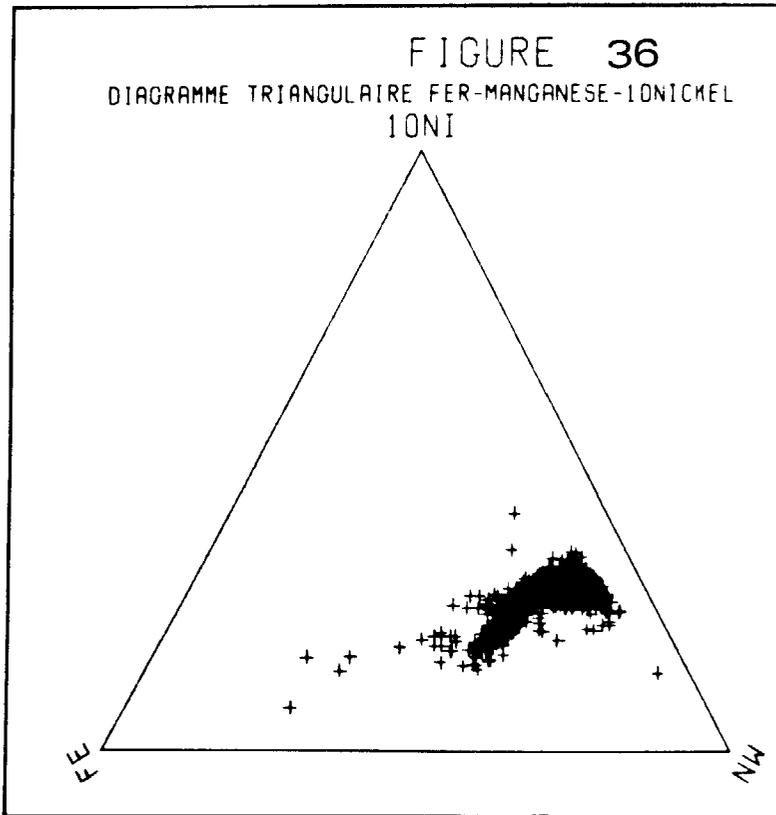
Lorsque Mn augmente, Cu croît encore plus vite que Ni tandis que Fe et Co diminuent.

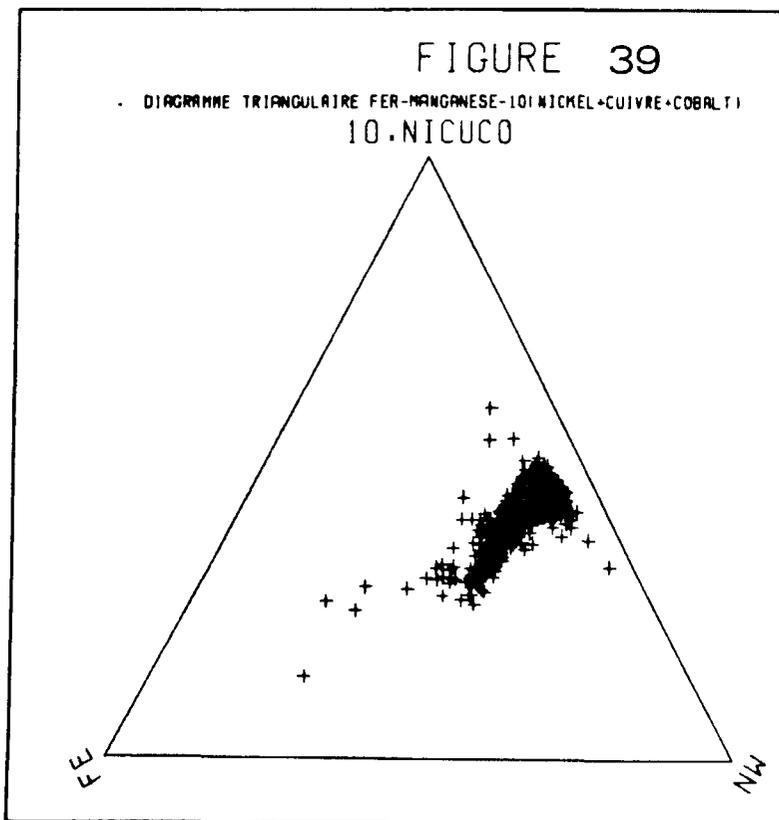
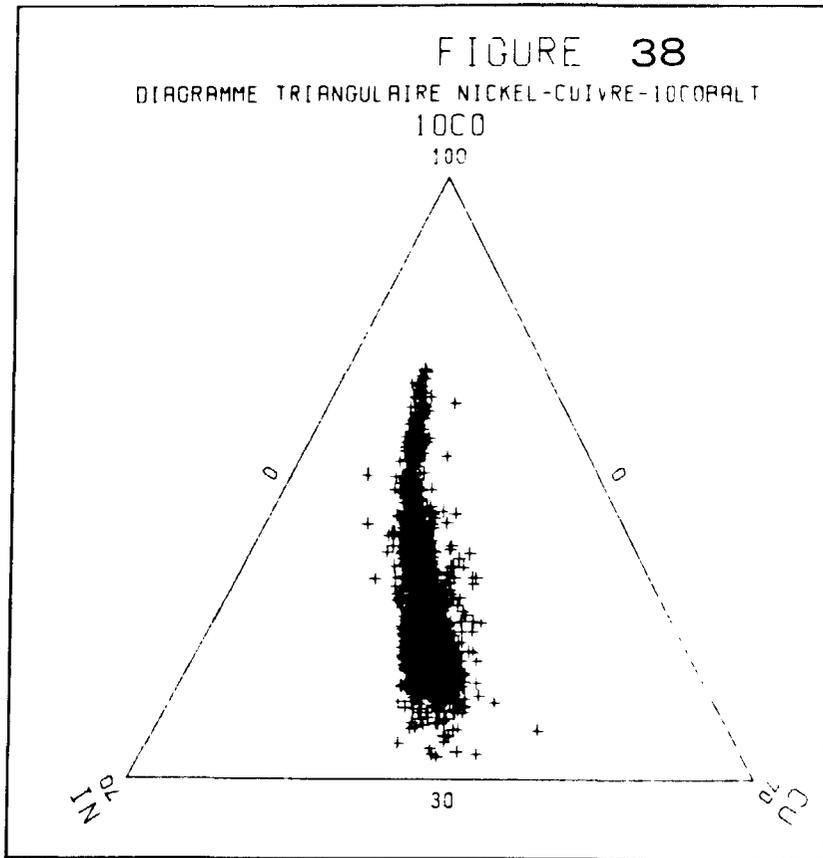
Il y a donc des comportements différents d'un même élément vis à vis de Mn. Si l'on ajoute à cette remarque celles que l'on a faites à propos des figures 34 à 38, nous devinons l'existence d'une compétition entre Ni, Cu, Co, pour remplacer Mn dans les nodules (nous verrons dans la deuxième partie qu'il faut sans doute lier ce phénomène à la minéralogie de la phase manganésifère).

Les éléments Ni, Cu et Co ayant des comportements différents suivant les valeurs de Mn et Fe, il n'est pas judicieux d'utiliser leur somme pour comparer les nodules, comme l'ont fait BONATTI et al (1972). Sur la figure 39 c'est le comportement de Ni qui est surtout observé. Ceci était à prévoir puisque, par rapport à Mn et Fe (Fig. 37), Ni est le plus variant, de plus, des trois, c'est l'élément mineur le plus abondant, tandis que Cu a un comportement à peu près constant (Fig. 35) et que les variations de Co (Fig. 34) sont lissées du fait de ses faibles valeurs. Donc, le diagramme de BONATTI pourrait se ramener à un diagramme Fe, Mn, 10 Ni.

Les résultats apportés par la statistique classique nous permettent de décrire la géochimie des nodules, mais l'enchevêtrement des différentes populations de nodules limite l'interprétation. C'est pourquoi, nous utiliserons des méthodes d'analyse multivariée.







III - ANALYSES MULTIVARIEES DE LA GEOCHIMIE

1 - VARIATIONS SIGNIFICATIVES DE LA GEOCHIMIE DES NODULES

L'analyse des correspondances, méthode que nous avons utilisée, s'apparente à l'analyse factorielle classique. La théorie et les règles d'interprétation des résultats sont développées dans les ouvrages publiés par le laboratoire de statistiques mathématiques de M. BENZECRI à l'Université de PARIS VI.

Les résultats de l'analyse, pour l'ensemble des 235 stations, décrits par Mn, Ni, Cu, Co, Na, Mg, K, Ca, SiO₂, Fe, Al, Ti, Zn, Pb et H₂O⁺, sont portés dans le *tableau n° 5*. Nous pouvons interpréter les différents axes factoriels.

Tableau 5 - Résultats de l'analyse des correspondances

Variables	1er facteur			2ème facteur			3ème facteur		
	Coord.	C.A.	C.R.	Coord.	C.A.	C.R.	Coord.	C.A.	C.R.
H ₂ O ⁺	61	551	30	- 34	180	20	6	3	3
Mn	161	968	320	22	20	14	8	8	14
Fe	- 154	207	80	- 300	785	638	14	2	10
Ni	138	616	12	63	128	5	7	8	0
Co	- 23	13	0	- 177	671	8	21	10	1
Cu	199	593	21	123	228	17	- 21	7	4
Na	38	183	2	17	34	1	- 8	10	1
Mg	16	22	0	20	34	1	14	18	3
K	- 225	638	24	90	101	8	46	27	16
Ca	16	3	0	- 41	25	3	- 264	967	945
SiO ₂	- 232	832	460	103	164	191	0	0	0
Al	- 163	736	39	45	54	6	7	2	1
Ti	- 193	158	8	- 415	730	79	- 19	2	1
Zn	200	677	3	86	122	1	- 12	3	0
Pb	- 85	44	0	- 371	813	7	18	2	0

Coord. : Coordonnées

C.A. : Contribution absolue

C.R. : Contribution relative

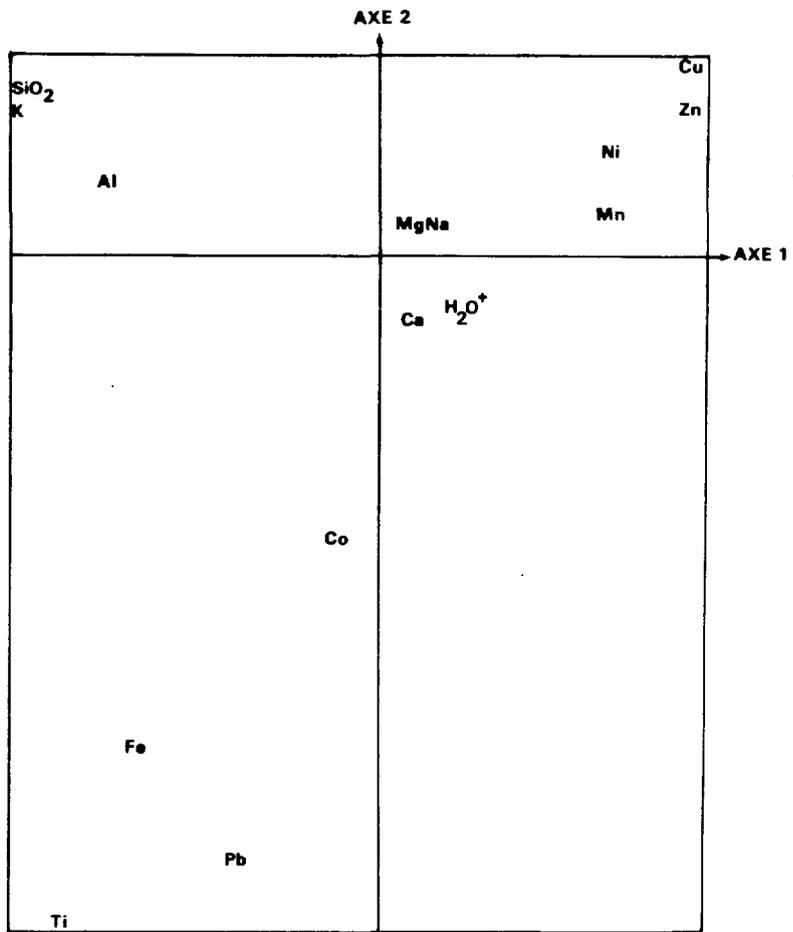


Figure 40.

Analyse des correspondances de la geochemie des nodules

Plan des axes 1-2

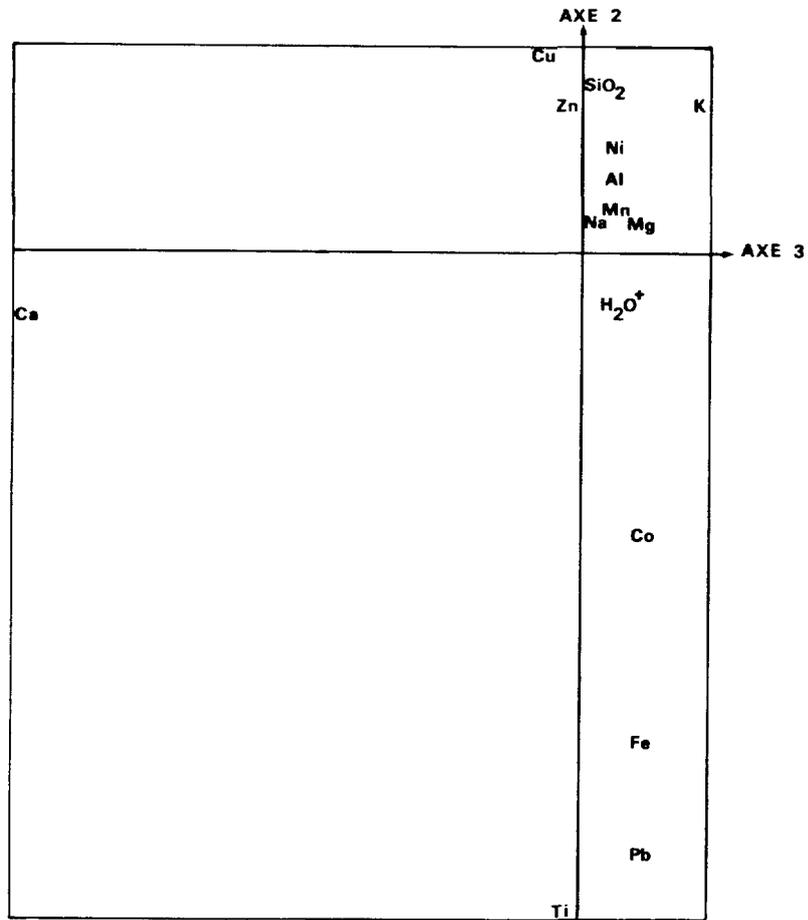


Figure 41.

Analyse des correspondances de la geochemie des nodules

Plan des axes 2-3

Le premier axe qui explique 61,65 % de la variance totale du nuage oppose la famille de la Silice (SiO_2 , K, Al) et de manière moins importante celle du Fe (Fe, Ti, Pb) à la famille de Mn (Mn, Ni, Zn, Cu).

En effet, le premier axe est expliqué pour 46 % par SiO_2 , pour 32 % par Mn, pour 8 % par Fe, pour 3,9 % par Al, pour 3 % par H_2O^+ , pour 2,4 % par K, pour 2,1 % par Cu, pour 1,2 % par Ni, pour 0,8 % par Ti, pour 0,3 % par Zn et pour 0,2 % par Na.

Le deuxième axe explique 29,31 % de la variance. Il montre l'opposition de SiO_2 à Fe, Ti et H_2O^+ . Ces éléments contribuent respectivement pour 63,8 % ; 19,1 % ; 7,9 % et 2,0 % au dégagement de cet axe.

Ces deux premiers axes (Fig. 40) expliquent 90,96 % de la variance totale. Il n'est pas prudent de vouloir interpréter les autres axes du fait qu'une partie de la variance résiduelle provient de l'erreur analytique, d'autant plus que le troisième axe (3,94 %) (Fig. 41) est expliqué, à 94,5 %, par Ca seul et ceci est dû en grande partie aux quelques échantillons ayant de fortes teneurs en Ca (supérieures à 2,0 % - Fig. 10).

Donc, la variation de la quantité de *stérile** dans les nodules est le facteur prépondérant que met en évidence cette méthode, ce qui caractérise les oxydes et hydroxydes métalliques est la proportion relative des phases ferrifère (famille Fe) et manganésifère (famille Mn).

La présence d'échantillons présentant des anomalies en Ca est montrée par le troisième facteur (Fig. 41), nous attribuons ces anomalies à des "pollutions" par du Ca biogène. En effet, il existe une certaine corrélation entre les fortes valeurs de Ca provenant des nodules et les fortes valeurs de Ca des sédiments associés provenant en majeure partie de la phase biogène. (WIRRMAN et al, 1976).

Nous avons donc réduit les 15 variables étudiées à trois facteurs significatifs que nous avons quantifiés. Nous aurions pu faire de même avec les échantillons, mais l'interprétation devient fastidieuse du fait de leur nombre élevé, c'est pourquoi nous avons utilisé une méthode de classification automatique.

2 - CLASSES GEOCHIMIQUES ET FACIES NODULES

2.1. - CLASSIFICATION DES NODULES D'APRES LEUR GEOCHIMIE

La méthode de classification automatique que nous avons employée, appelée classification par les nuées dynamiques, a été mise au point par E. DIDAY (1972).

Il s'agit d'effectuer une classification à partir d'un ensemble de données sur lequel on ne demande pas nécessairement de faire d'hypothèses a priori.

Cette classification doit remplir au mieux les conditions suivantes :

- les individus de chaque classe se ressemblent le plus possible.
- les individus de deux classes différentes se ressemblent le moins possible.

* Nous utiliserons le terme de *stérile* pour qualifier les éléments de la famille de la Silice, par opposition à ceux présentant un intérêt économique, tels que Ni, Cu, Co, Mn.

Si l'on effectue plusieurs classifications, en changeant à chaque fois les centres de classe initiaux ; on peut affirmer que les données sont *classifiables*, si l'on obtient à peu près les mêmes groupes. Les individus, qui suivant les classifications changent de classes, seront appelés *formes faibles*. Un groupe de la partition sera appelé *forme forte*, s'il est composé d'individus ayant toujours appartenu à la même classe, quel que soit la classification, donc quels que soient les centres de classe initiaux.

Bien que les histogrammes et les diagrammes de corrélation nous suggèrent l'existence de trois ou peut être quatre classes, nous avons demandé une classification en cinq classes, afin que les particularités géochimiques soient bien mises en évidence.

Le *tableau 6* nous donne les caractéristiques de la classification retenue, le *tableau 7* les caractéristiques des sept formes fortes obtenues après avoir effectué dix classifications différentes.

Nous voyons que les classes 2, 3 et 5 sont bien individualisées car elles correspondent, d'après leurs profils moyens, respectivement aux formes fortes 6, 1 et 3. Les formes fortes, 2 et 5 d'une part, et 4 et 7 d'autre part, divisent respectivement les classes 4 et 1 d'une façon peu significative, les profils moyens des formes fortes correspondantes étant semblables.

Nous avons donc atteint notre but, c'est-à-dire séparer en groupes distincts les échantillons étudiés, ce qui n'était pas possible en utilisant la statistique classique.

Notons que trois FF* se singularisent :

- La FF 3 est celle où les échantillons contiennent le plus de SiO_2 et où la variation des éléments chimiques (σ/m) est la plus élevée. La somme des moyennes des éléments est la plus élevée : 82,79 %.

- La FF 7 est celle où la variation des éléments chimiques est la plus faible, c'est donc la plus homogène.

- La FF 1 se distingue par une faible valeur en SiO_2 pour un rapport Mn/Fe semblable à la FF 3 qui a la plus forte valeur de SiO_2 . C'est celle où la somme des moyennes des éléments est la plus basse. Il y a vraisemblablement un ou plusieurs éléments que nous n'avons pas dosés et qui sont présents dans les nodules de cette famille.

Les sept groupes d'échantillons de nodules que sont les FF ont été formés à partir de leur composition chimique. Nous avons donc réduit les 235 échantillons initiaux en 7 échantillons fictifs représentatifs des variations géochimiques des nodules. A partir des profils moyens de ces 7 groupes nous allons pouvoir analyser le comportement des éléments chimiques par rapport aux trois éléments majeurs : SiO_2 , Fe, Mn, et au rapport Mn/Fe (Fig. 42 à 45).

Ces figures nous confirment la composition marginale des nodules de la FF 1, c'est pourquoi nous l'avons écartée de l'étude du comportement général des éléments.

* Dans la suite du texte FF signifiera forme forte.

Tableau 6 - Profils moyens des 5 classes d'échantillons, obtenus par classification automatique

	Effectifs	H ₂ O ⁺	Mn	Fe	Ni	Co	Cu	Na	Mg	K	Ca	SiO ₂	Al	Ti	Zn	Pb	Somme des éléments
Classe 1	109	15.83	28.08	6.12	1.34	0.24	1.12	2.16	1.99	0.84	1.59	15.57	2.76	0.37	0.14	0.05	78.20
Classe 2	64	15.76	30.66	4.68	1.38	0.21	1.24	2.25	1.81	0.79	1.73	13.89	2.36	0.28	0.16	0.03	77.23
Classe 3	22	15.93	23.00	11.50	0.89	0.33	0.59	1.99	1.59	0.76	1.84	13.74	2.55	0.90	0.09	0.09	75.79
Classe 4	31	14.32	21.72	7.30	1.11	0.25	0.82	2.10	1.92	1.15	1.65	21.41	3.51	0.49	0.10	0.05	77.90
Classe 5	9	12.31	15.43	7.71	0.73	0.20	0.49	2.02	1.86	1.88	1.50	33.49	4.60	0.47	0.06	0.04	82.79

Tableau 7 - Profils moyens des formes fortes

			H ₂ O ⁺	Mn	Fe	Ni	Co	Cu	Na	Mg	K	Ca	SiO ₂	Al	Ti	Zn	Pb	Somme des éléments
F	m		15.98	23.08	11.57	0.89	0.34	0.58	1.99	1.58	0.75	1.85	13.55	2.52	0.91	0.09	0.09	75.77
F	σ	21	1.03	1.49	1.58	0.16	0.03	0.12	0.13	0.17	0.16	0.12	2.15	0.29	0.18	0.01	0.02	
1	σ/m		0.06	0.06	0.14	0.18	0.09	0.21	0.07	0.11	0.21	0.06	0.16	0.12	0.20	0.11	0.22	
F	m		13.83	20.46	7.72	1.00	0.24	0.71	2.07	1.86	1.28	1.60	22.99	3.68	0.53	0.09	0.05	78.11
F	σ	15	0.97	0.97	1.20	0.11	0.03	0.12	0.19	0.15	0.25	0.27	1.63	0.50	0.13	0.01	0.01	
2	σ/m		0.07	0.05	0.16	0.11	0.13	0.17	0.09	0.08	0.20	0.17	0.07	0.14	0.25	0.11	0.20	
F	m		12.31	15.43	7.71	0.73	0.20	0.49	2.02	1.86	1.88	1.50	33.49	4.60	0.47	0.06	0.04	82.79
F	σ	9	1.41	2.13	1.72	0.12	0.03	0.11	0.20	0.24	0.44	0.82	2.42	0.63	0.19	0.02	0.01	
3	σ/m		0.11	0.14	0.22	0.16	0.15	0.22	0.10	0.13	0.23	0.55	0.07	0.14	0.40	0.33	0.25	
F	m		15.55	27.23	6.27	1.31	0.24	1.09	2.15	1.94	0.87	1.62	16.49	2.82	0.38	0.13	0.05	78.14
F	σ	52	0.73	1.08	1.07	0.11	0.04	0.14	0.15	0.14	0.10	0.23	1.43	0.23	0.10	0.02	0.01	
4	σ/m		0.05	0.04	0.17	0.08	0.17	0.13	0.07	0.07	0.11	0.14	0.09	0.08	0.26	0.15	0.20	
F	m		14.52	23.72	6.70	1.22	0.25	0.93	2.11	1.98	1.04	1.74	20.54	3.35	0.43	0.11	0.05	78.69
F	σ	13	0.74	0.97	0.95	0.08	0.05	0.13	0.15	0.13	0.18	0.36	1.02	0.28	0.07	0.01	0.01	
5	σ/m		0.05	0.04	0.14	0.07	0.20	0.14	0.07	0.07	0.17	0.21	0.05	0.08	0.16	0.09	0.20	
F	m		15.78	30.77	4.71	1.39	0.21	1.24	2.25	1.82	0.80	1.62	13.91	2.37	0.28	0.16	0.03	77.34
F	σ	62	0.58	1.23	0.73	0.11	0.03	0.13	0.21	0.17	0.06	0.24	1.33	0.18	0.06	0.02	0.01	
6	σ/m		0.04	0.04	0.15	0.08	0.14	0.10	0.09	0.09	0.08	0.15	0.10	0.08	0.21	0.13	0.33	
F	m		16.15	28.88	6.04	1.37	0.24	1.14	2.17	2.04	0.82	1.57	14.71	2.71	0.37	0.14	0.05	78.40
F	σ	51	0.61	0.67	0.78	0.08	0.04	0.12	0.16	0.14	0.06	0.20	1.17	0.24	0.06	0.01	0.01	
7	σ/m		0.04	0.02	0.13	0.06	0.17	0.11	0.07	0.07	0.07	0.13	0.08	0.09	0.16	0.07	0.20	

Comportement par rapport à SiO_2 (Fig. 42)

Les éléments qui suivent SiO_2 sont bien Al et K comme nous l'avions montré précédemment. La famille Mn est anti-corrélée à la famille SiO_2 . Fe et Ti, qui ont un comportement semblable, suivent légèrement SiO_2 jusqu'à FF 2, puis semblent relativement indépendants de SiO_2 . Par contre, Pb et Co présentent une corrélation positive lorsque l'on passe de FF 6 à FF 7, une relative indépendance de FF 7 à FF 2 et enfin une corrélation négative de FF 2 à FF 3.

Ca et Mg ont un comportement chaotique.

Comportement par rapport à Fe (Fig. 43)

Sur cette figure, la FF 3 semble avoir un comportement anormal. Ceci est vraisemblablement dû à sa très forte teneur en stériles (SiO_2 , Al, K) qui provoque une translation vers le bas des éléments liés à la phase ferromanganésifère par effet de bilan, car les données sont en pourcentages. Seul Mg n'en est pas affecté. Nous retrouvons la bonne corrélation entre Ti et Fe, les affinités Pb, Co envers Fe et l'anti-corrélation avec la famille Mn.

Comportement par rapport à Mn (Fig. 44)

En dehors de la FF 1, que nous avons écartée, les courbes présentées sur cette figure sont régulières. Notons, cependant, une accentuation des comportements de certains éléments vis à vis de Mn pour la FF 6, c'est-à-dire une diminution plus forte de Fe, Ti, Pb, Co, une augmentation plus forte de Na, Zn, Cu alors que d'autres comportements sont temporisés (Ni, K, SiO_2) et que d'autres sont inversés (Mg, Ca, H_2O^+).

Comportement par rapport à Mn/Fe (Fig. 45)

Le comportement des éléments par rapport à Mn/Fe est semblable à celui par rapport à Mn, sauf pour la FF 1, en effet les FF se présentent suivant le même ordre sur l'axe Mn/Fe.

Cette figure nous montre qu'à l'aide du rapport Mn/Fe et en utilisant un modèle non linéaire, nous pourrions prédire, avec une assez bonne précision, la quantité d'éléments mineurs contenus dans les nodules du Pacifique N.E., sauf vers $23 \% \text{ Mn} \pm 1.5 \% \text{ Mn}$.

Les figures 46 à 48 présentent les relations entre Ni, Cu, Co et Mn/Fe pour l'ensemble des échantillons. La comparaison de ces figures à la figure 45 nous montre l'intérêt de l'utilisation des FF. En effet, la FF 1 n'apparaît qu'avec Co. Donc, dans certains cas nous ne pouvons pas utiliser Mn/Fe comme seul critère de comparaison des nodules. Il faut tenir compte également de la variation du taux de stérile et d'un enrichissement possible en tel ou tel élément (fonction de la proximité de la source de cet élément ?).

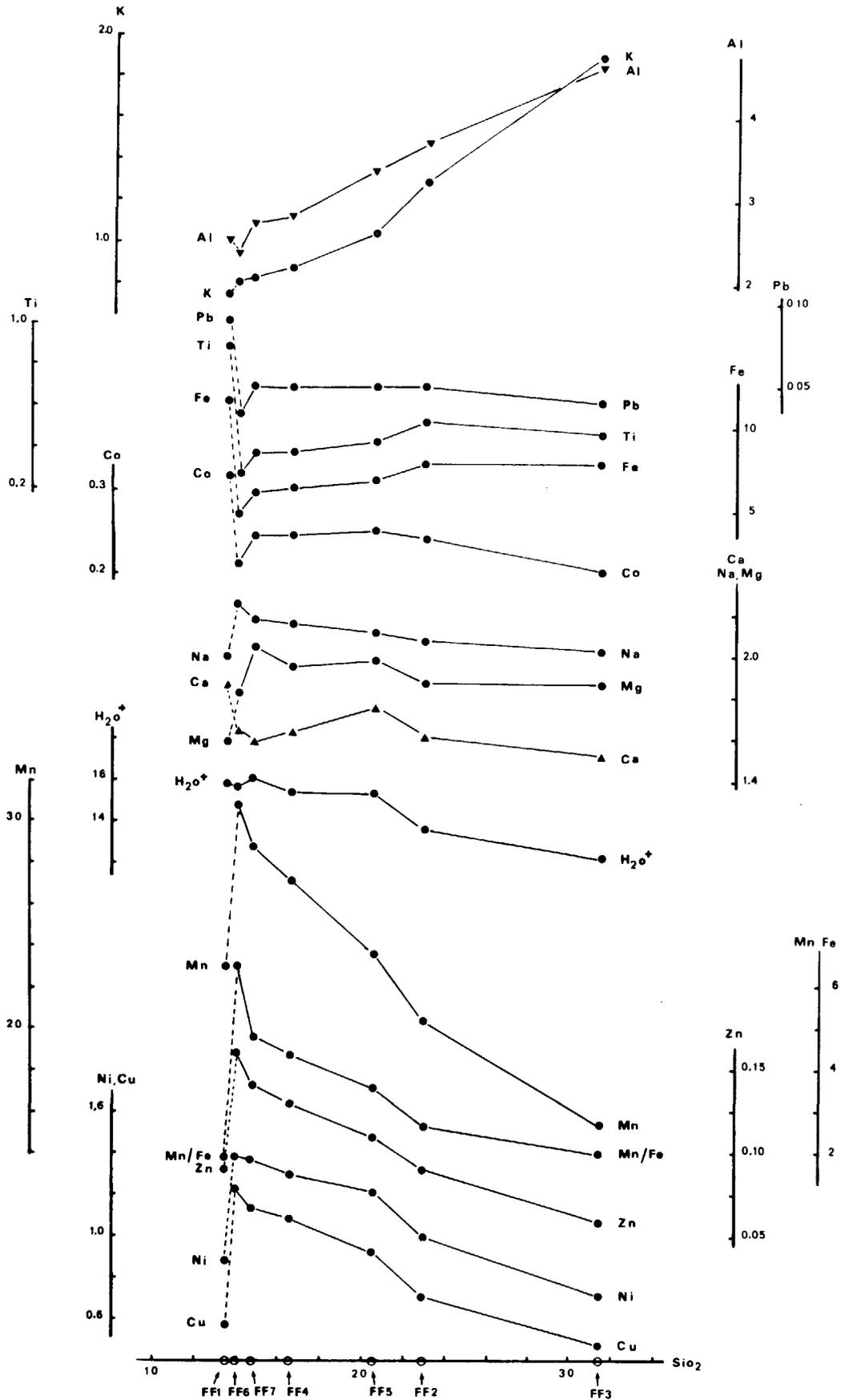


Figure 42.

Comparaison des profils moyens des formes fortes par rapport à SiO₂.

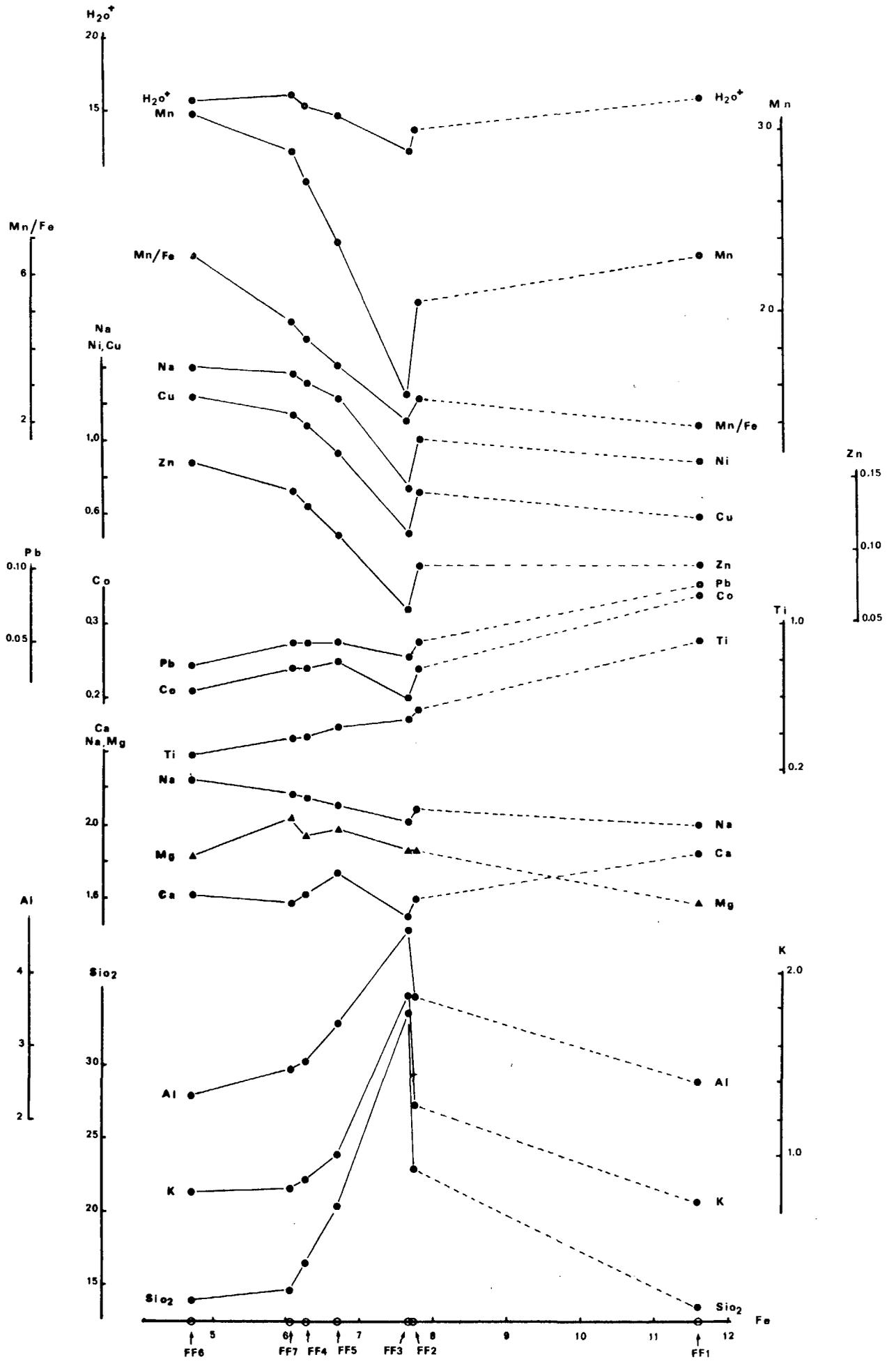


Figure 43.

Comparaison des profils moyens des formes fortes par rapport à Fe.

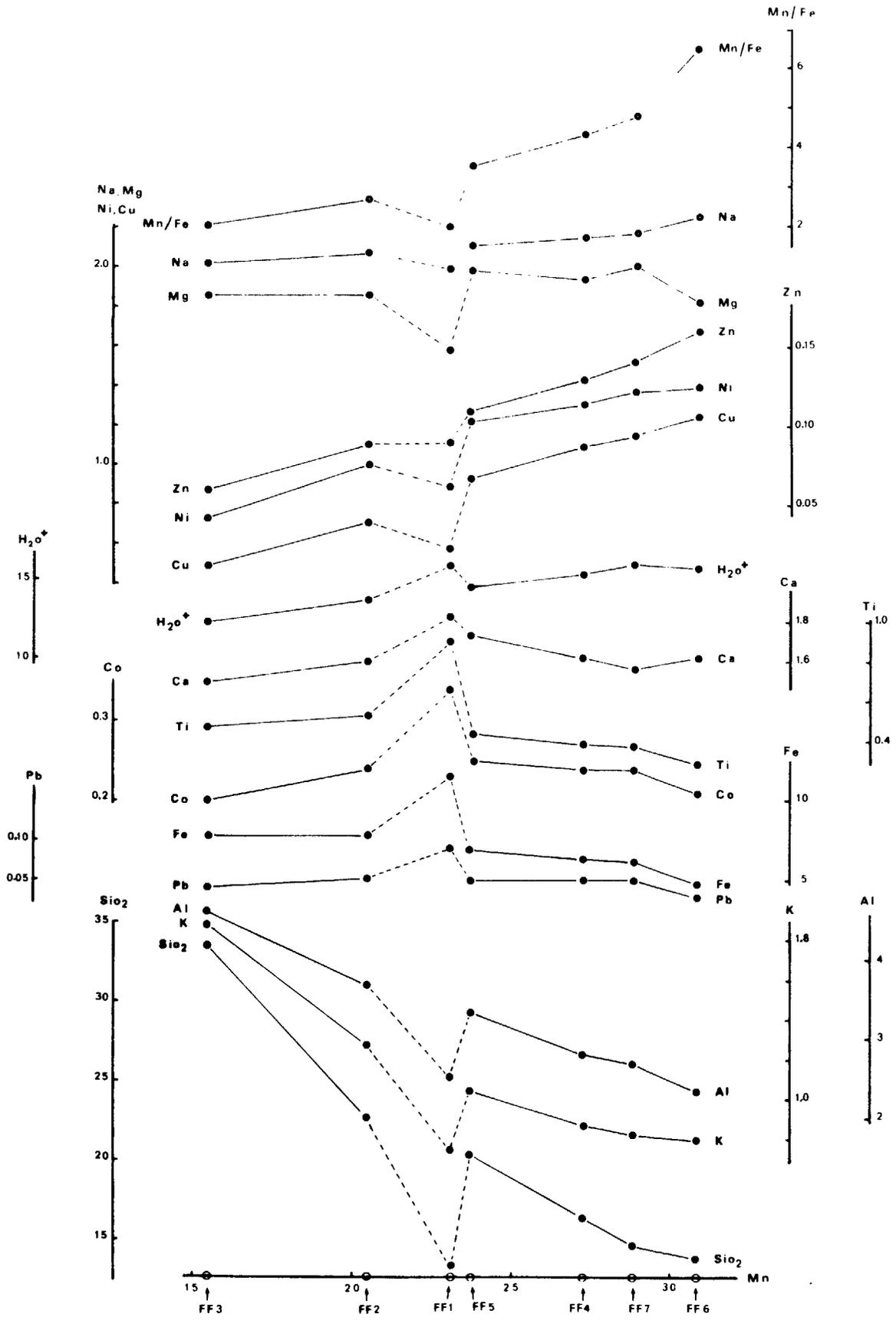


Figure 44.

Comparaison des profils moyens des formes fortes par rapport a Mn.

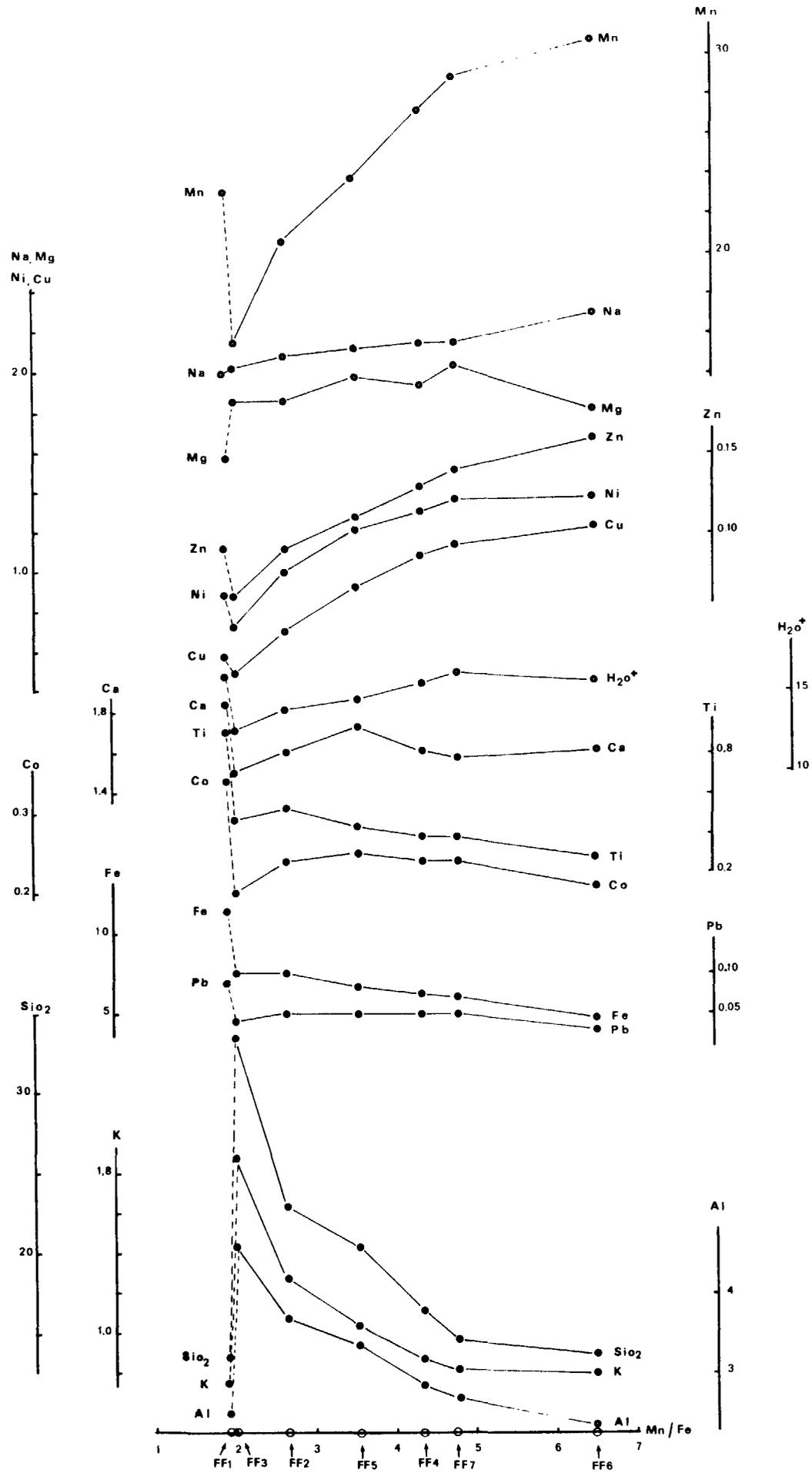
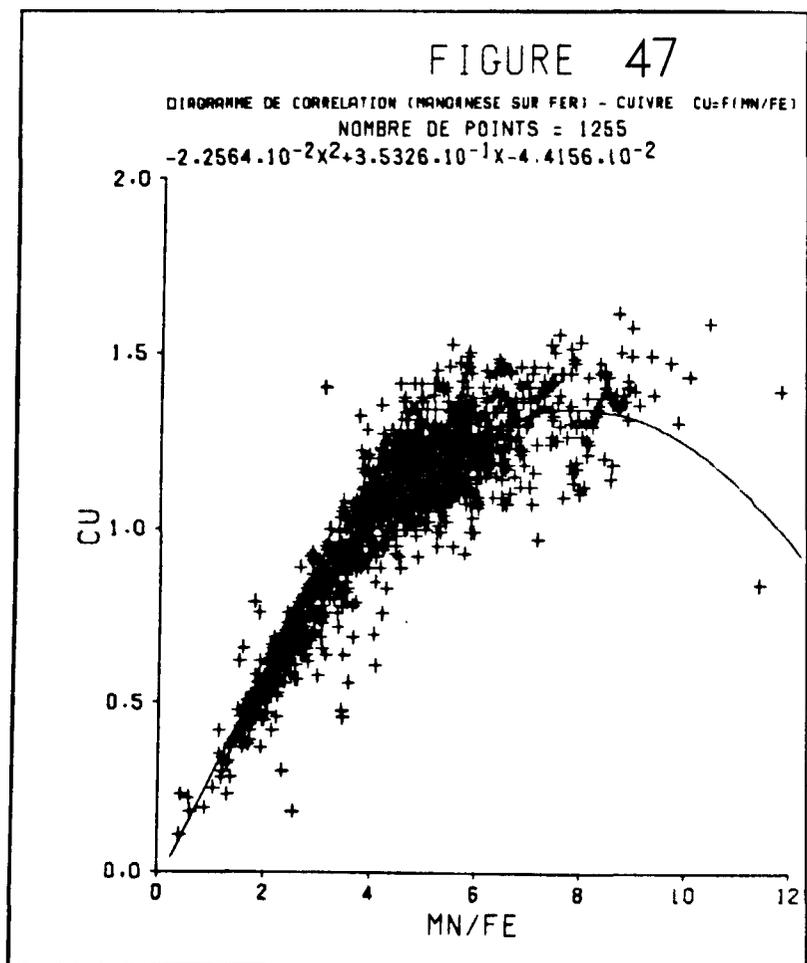
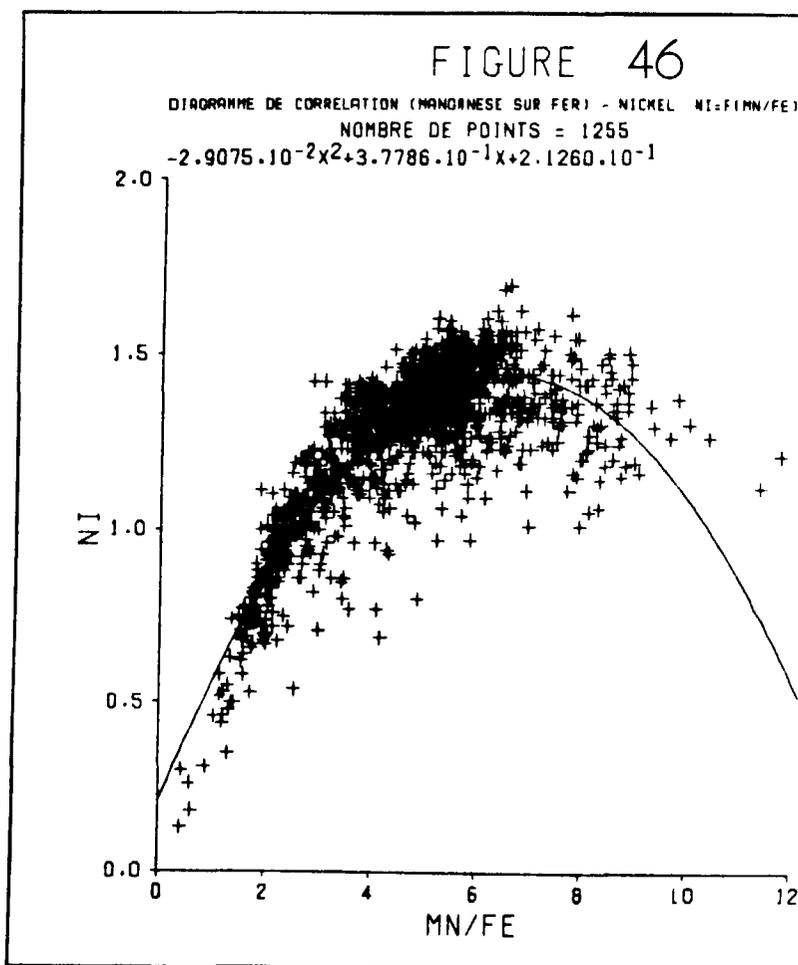
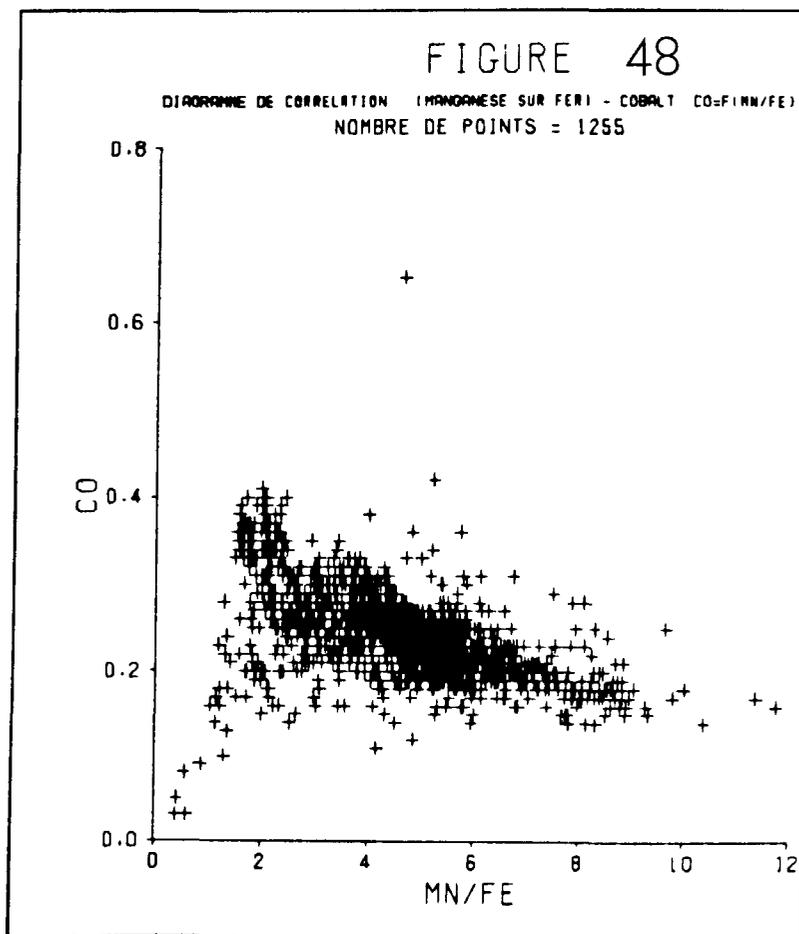


Figure 45.

Comparaison des profils moyens des formes fortes par rapport à Mn/Fe.





2.2. - FORMES FORTES ET FACIES PHOTOGRAPHIQUES NODULES

Le faciès photographique des nodules est constitué par l'ensemble des caractères morphologiques des nodules ainsi que par la nature et l'aspect du substrat sur lequel ils reposent. Par extension, nous parlerons de faciès nodules en tenant compte :

- des descriptions et études faites sur les nodules ramenés à la surface ; c'est-à-dire : mesures des paramètres granulomorphologiques, aspect de surface, description des sections polies, analyses chimiques, etc...
- de la nature et des propriétés physico-chimiques du substrat lorsqu'il y a eu prélèvement ; c'est-à-dire composition chimique, teneur en eau, granulométrie, fraction biogène, etc...
- des variations de la topographie à l'échelle locale et régionale.

La notion de faciès nodules a déjà été utilisée par RAAB (1972), MEYER (1973), FRIEDRICH et PLUGER (1974 et 1976), HALBACH et al (1975), ANDREWS (1976), MEYLAN (1976).

Une étude approfondie est en cours au sein de la Section de GEOLOGIE APPLIQUEE du CENTRE OCEANOLOGIQUE DE BRETAGNE, cette étude intégrant l'ensemble des paramètres cités plus haut.

Nous avons comparé les photos* des stations dont nous avons étudié la composition chimique et il semble que les groupes de stations, que sont les formes fortes, correspondent à des faciès photographiques nodules relativement bien différenciés.

Deux groupes principaux de faciès se distinguent aisément, ce sont les polynodules et les mononodules.

LES POLYNODULES

A ce groupe nous avons rattachés les FF 3, 2, 1 et 5.

Forme forte 3 - faciès A1 : *Photos 1, 2, 3, 4*

Dans cet ensemble nous avons des polynodules qui accompagnent des débris ou des affleurements de roches volcaniques plus ou moins altérées. Ceci nous explique l'abondance des éléments SiO_2 , Al et K.

Forme forte 2 - faciès A2 : *Photos 5, 6, 7, 8*

Les nodules qui entrent dans ce groupe sont de tout petits polynodules.

Forme forte 1 - faciès A3 : *Photos 9, 10, 11, 12*

La majorité des photos de ce groupe montre l'existence de deux populations granulométriques de nodules. Ce sont des polynodules. La population à petit diamètre est constituée de nodules accolés tandis que celle à fort diamètre est surtout composée de nodules coalescents.

Forme forte 5 - faciès A4 : *Photos 13, 14, 15, 16*

Une forte proportion des photos présente des nodules de forme particulière. Ils ne sont pas de forme subsphérique et dans ce cas, le terme de nodule perd de son sens. Ils res-

* Les photos que nous présentons correspondent approximativement à une surface de 1 m² prise sous un angle de 30° à 1,60 m du fond.

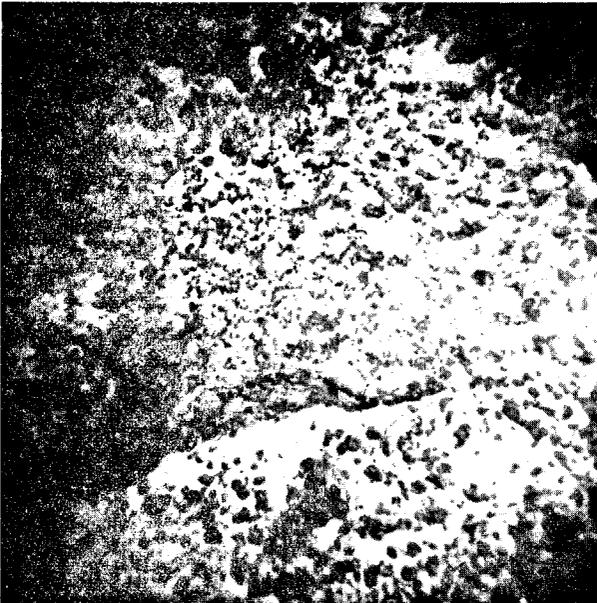


Photo 1

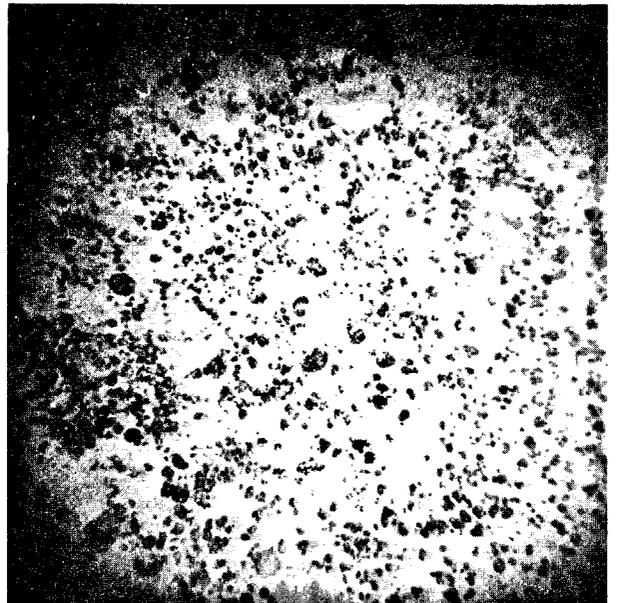


Photo 2

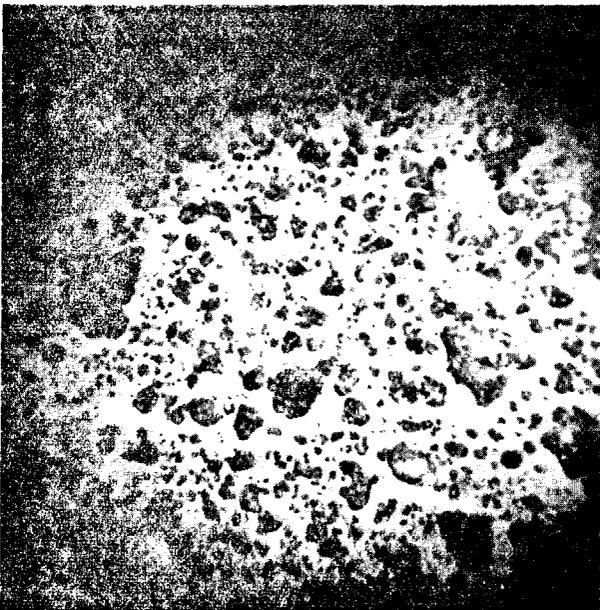


Photo 3

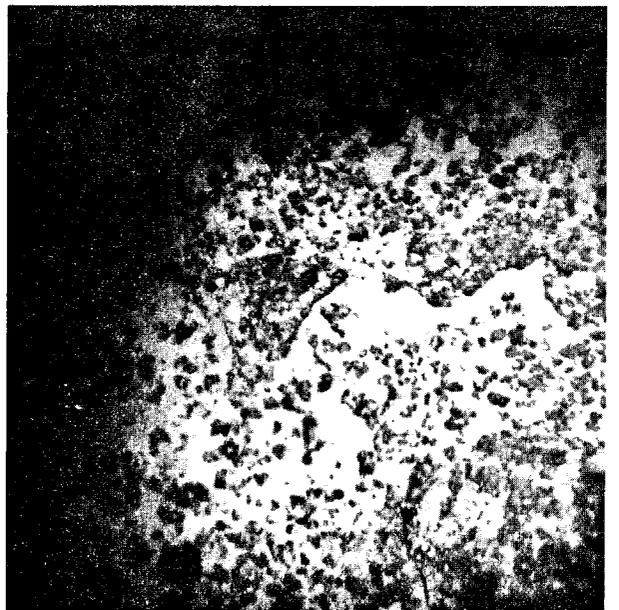


Photo 4

FACIES A1

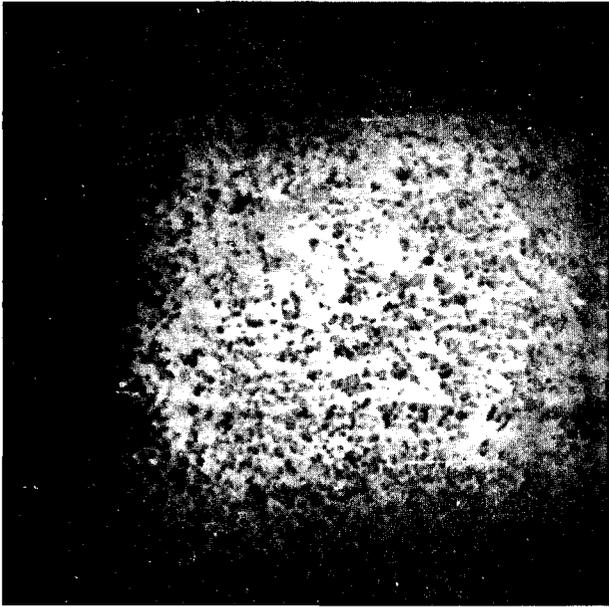


Photo 5

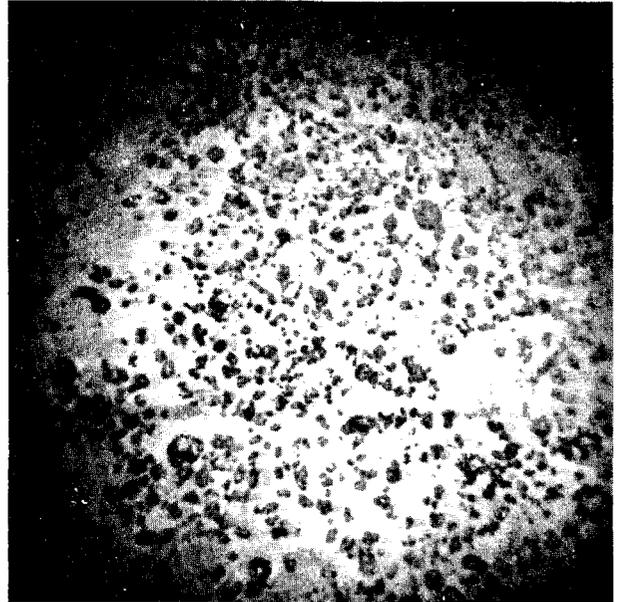


Photo 6

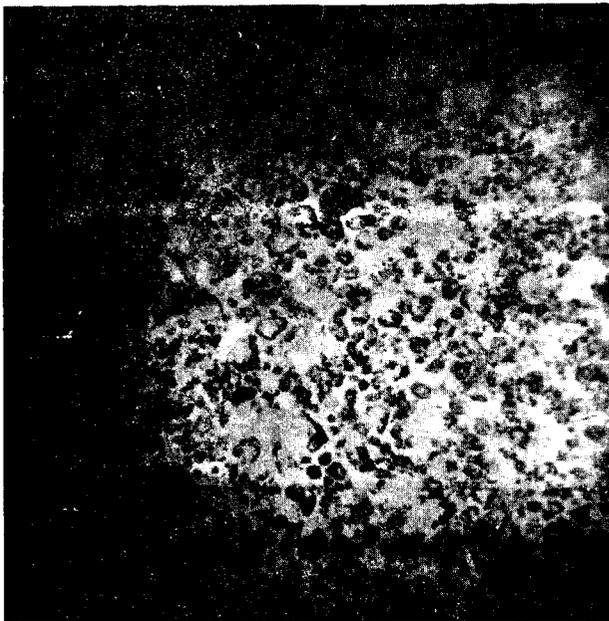


Photo 7

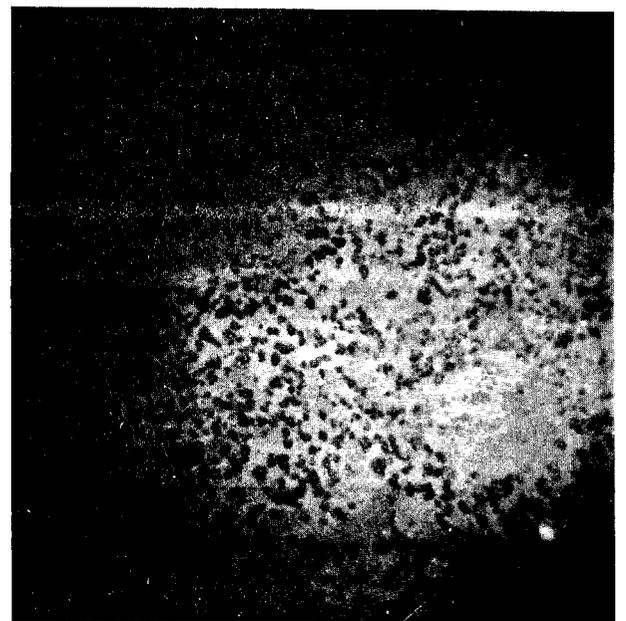


Photo 8

FACIES A2

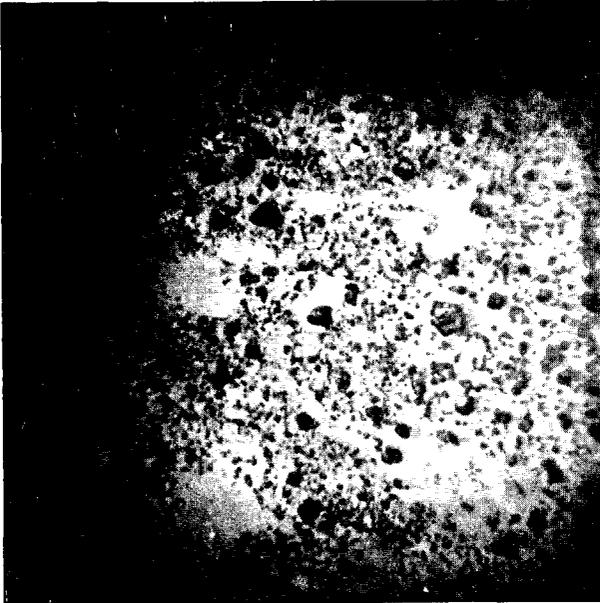


Photo 9

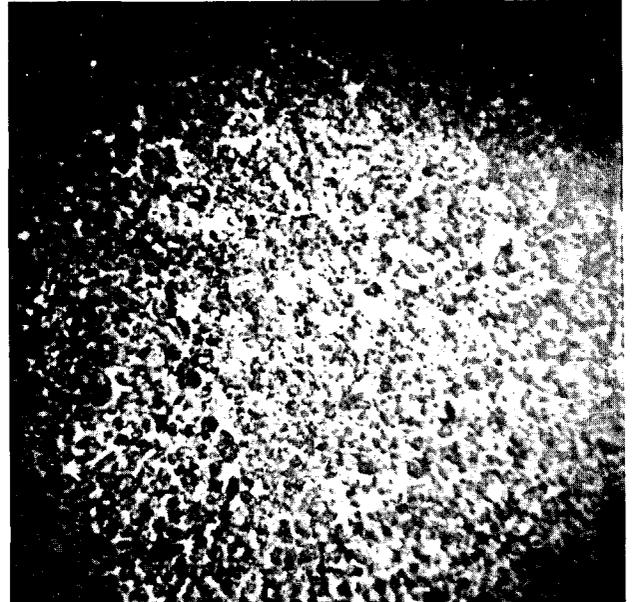


Photo 10

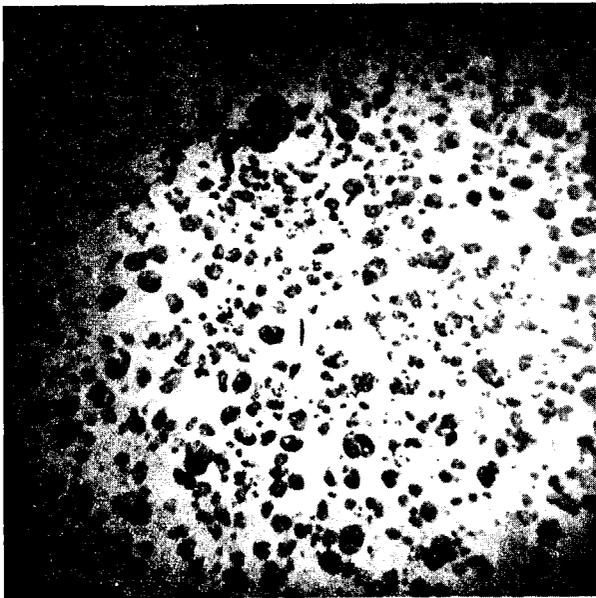


Photo 11

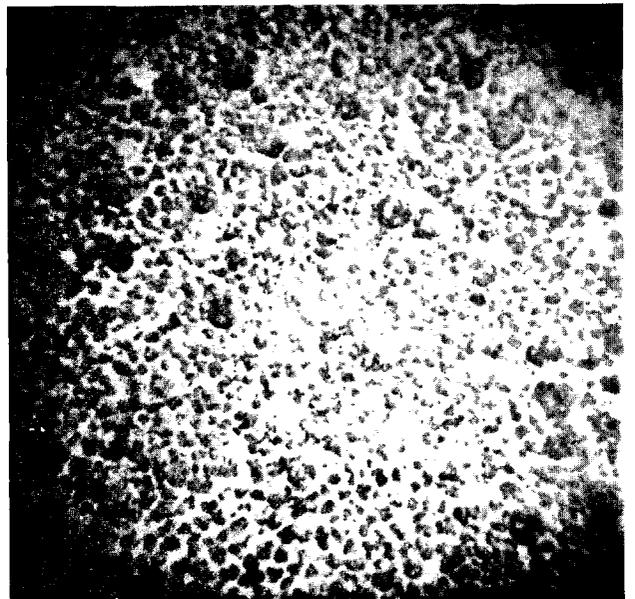


Photo 12

FACIES A3

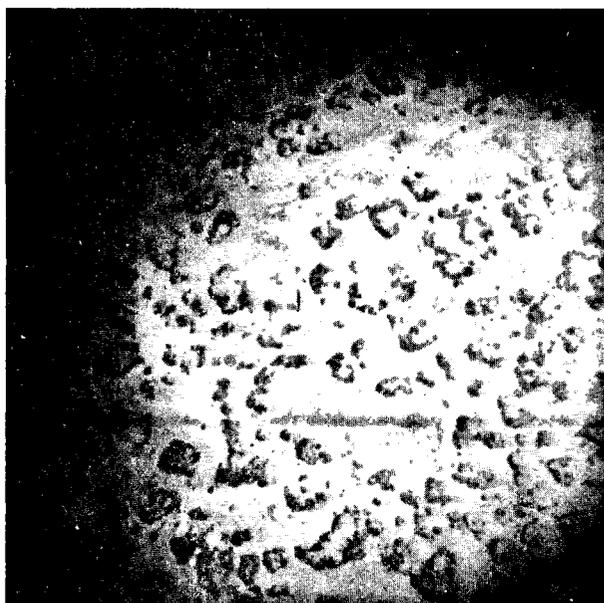


Photo 13

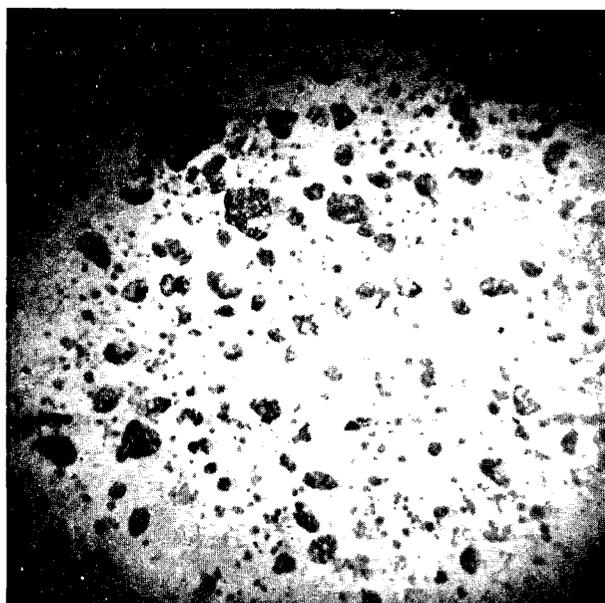


Photo 14

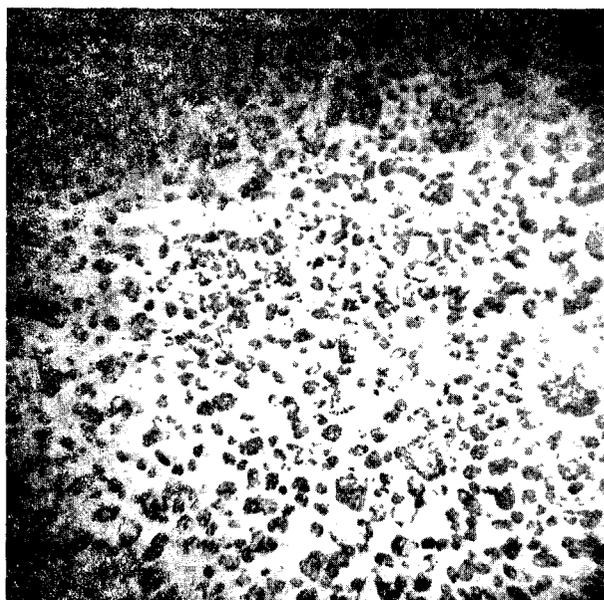


Photo 15

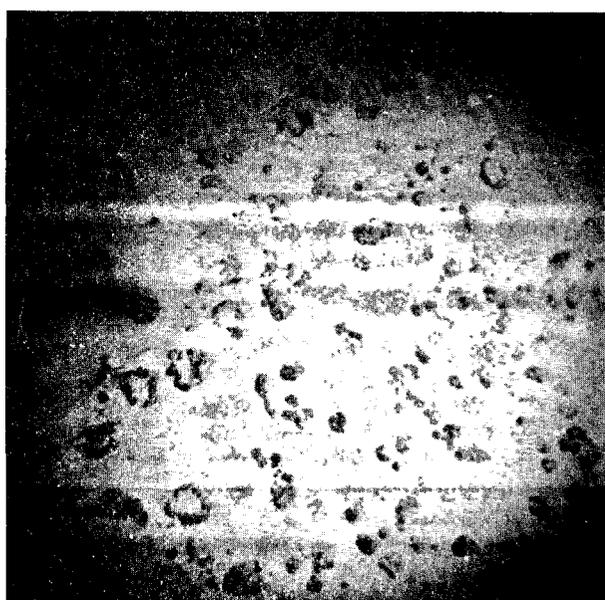


Photo 16

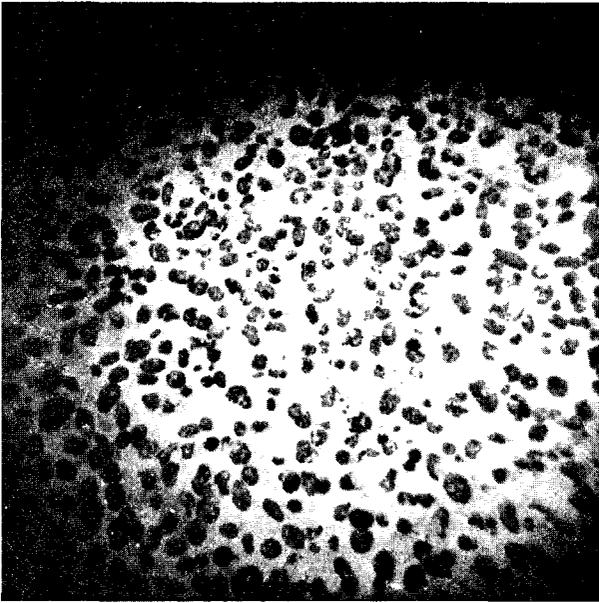


Photo 17

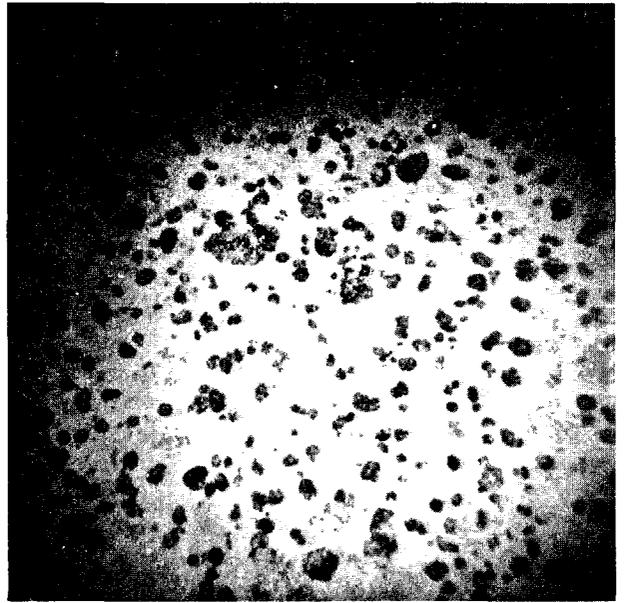


Photo 18

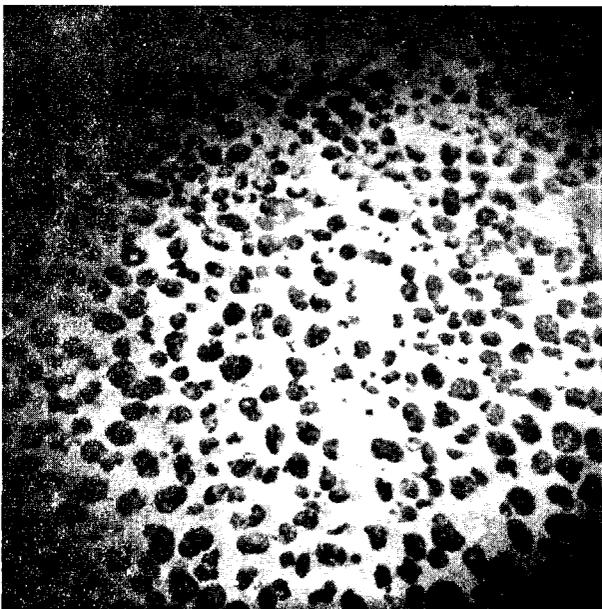


Photo 19

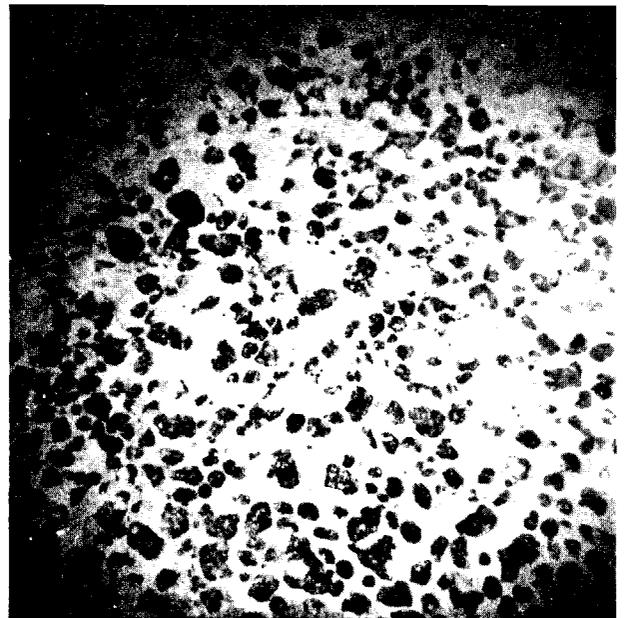


Photo 20

FACIES B1

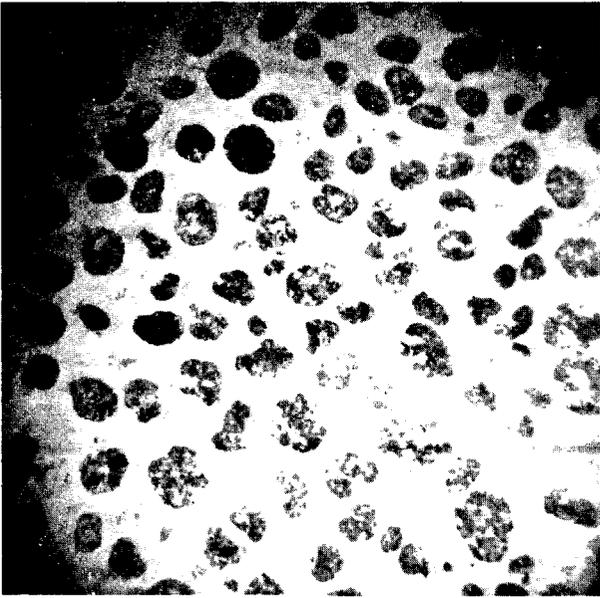


Photo 21

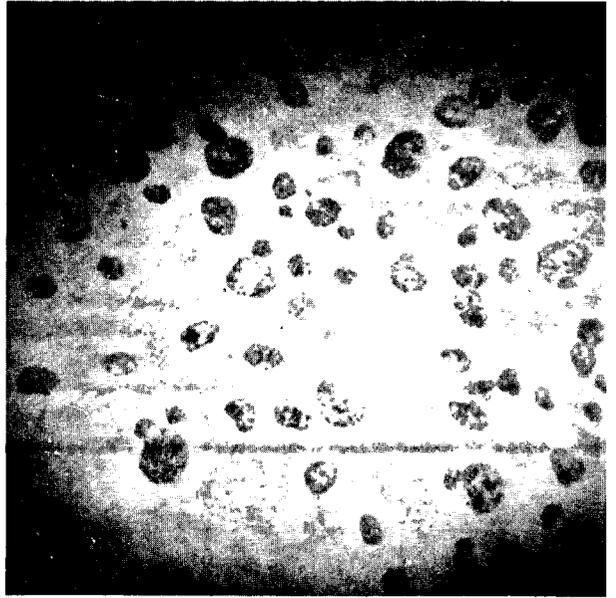


Photo 22

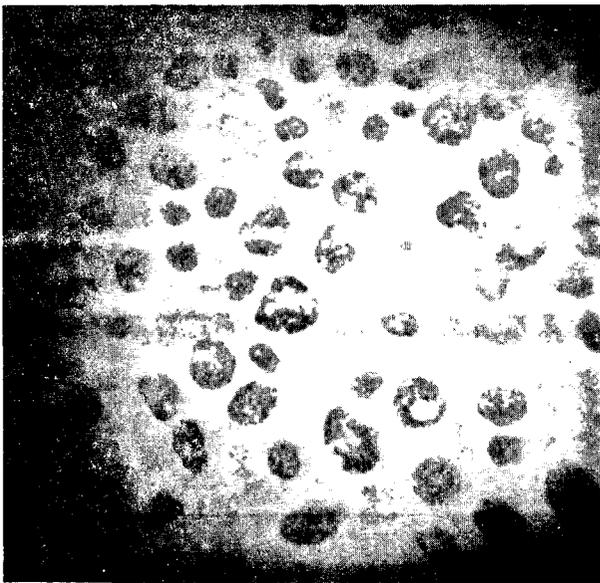


Photo 23

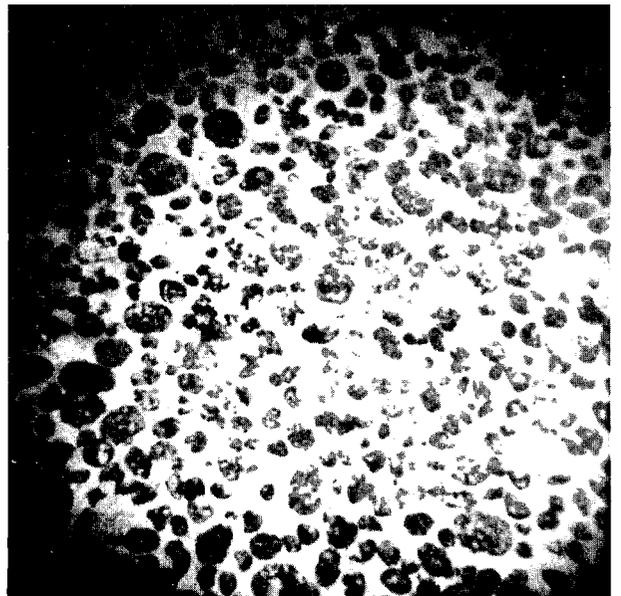


Photo 24

FACIES B2

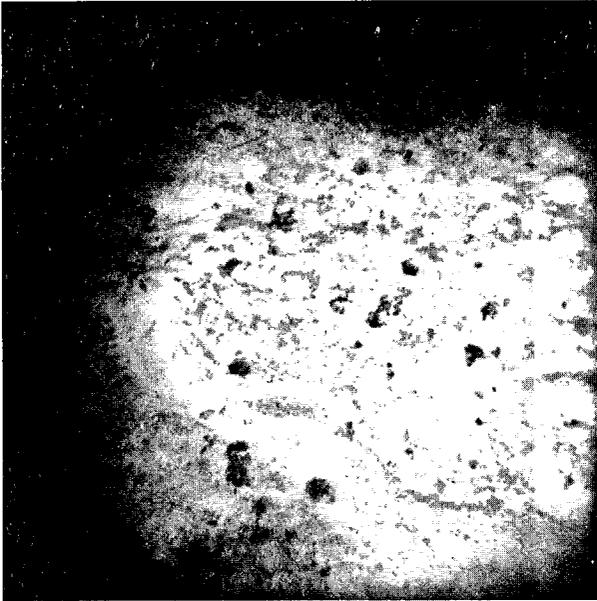


Photo 25

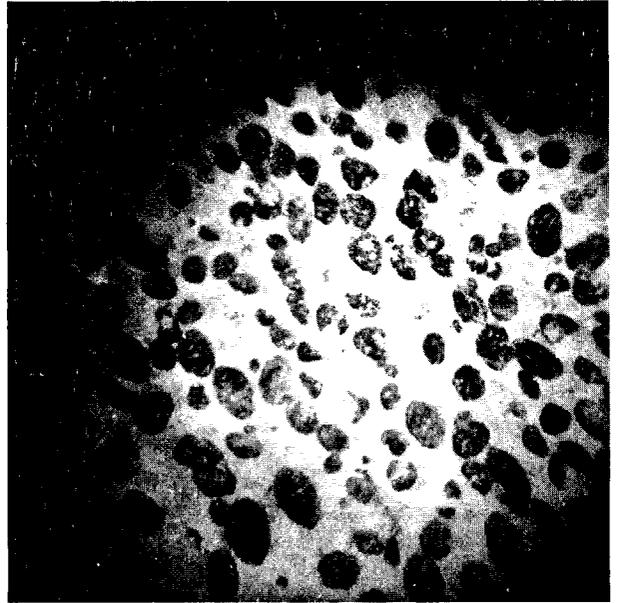


Photo 26

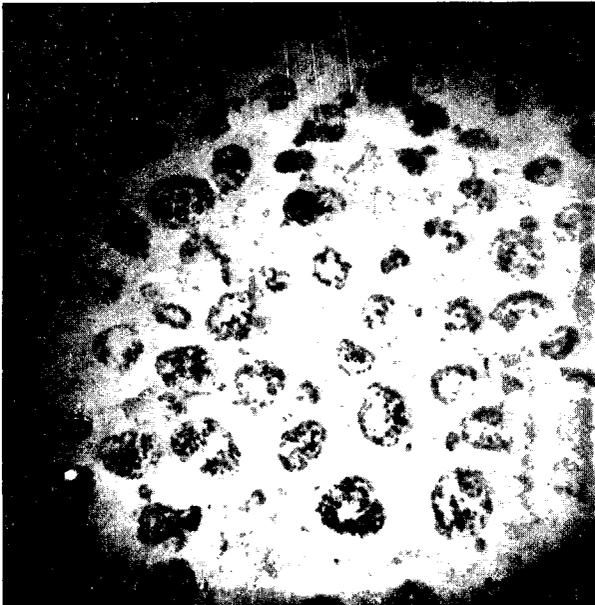


Photo 27

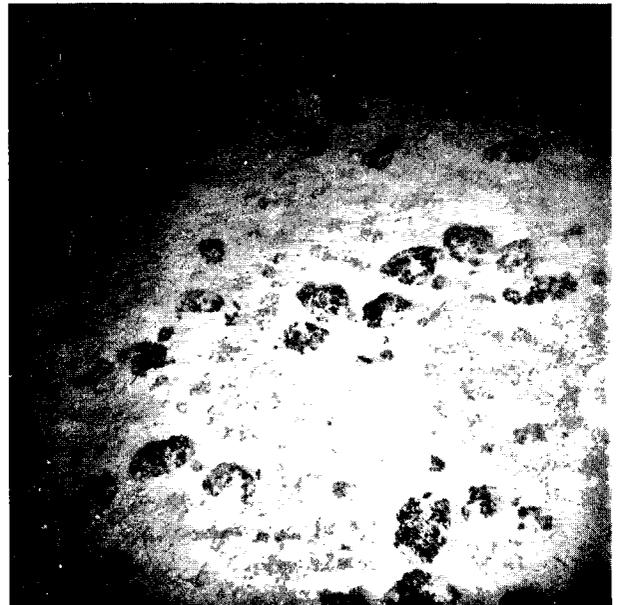


Photo 28

FACIES C

semblent à des beignets biconcaves, qui ont la périphérie plurilobées et sont en partie recouverts de sédiments.

LES MONONODULES

Les FF 4, 7 et 6 entrent dans ce groupe.

Forme forte 4 - faciès B1 : *Photos 17, 18, 19, 20*

Les nodules de ce groupe sont en général de taille moyenne. Ils dépassent rarement 45 mm. Il peut y avoir plusieurs types de nodules pour un même prélèvement : des polynodules et des mononodules. Les mononodules qui sont les plus nombreux peuvent avoir un noyau composé d'un débris d'ancien mononodule, ou quelquefois, d'ancien polynodule. L'aspect de surface est lisse à légèrement mammelonné.

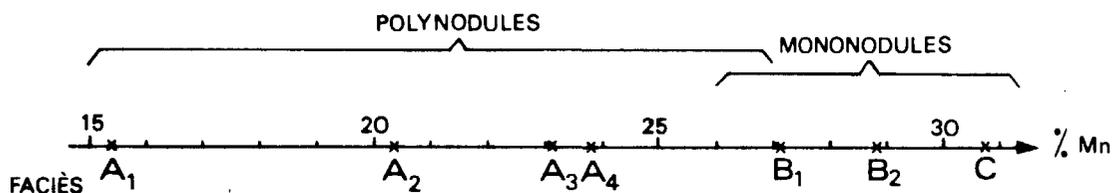
Forme forte 7 - faciès B2 : *Photos 21, 22, 23, 24*

Ce sont des nodules qui présentent une forme relativement régulière sur les photographies, et qui sont souvent accompagnés de nodules brisés. En fait, certains présentent une asymétrie : la partie supérieure étant généralement subplane tandis que la partie inférieure est arrondie. (Notons que l'inverse a été rencontré). Ils ont fréquemment un bord équatorial bien exprimé et leur noyau peut être un débris d'ancien nodule du même type. L'aspect de surface est plus ou moins mammelonné, lisse pour la partie supérieure et rugueux pour la partie inférieure.

Forme forte 6 - faciès C : *Photos 25, 26, 27, 28*

Dans ce groupe, il y a deux types de mononodules. De petits nodules grenus qui sont à rapprocher du type "framboise" décrit par FRIEDRICH et PLUGER (1974) (photo 25) et de gros nodules mammelonnés rugueux. Ces derniers, présentent quelquefois un axe d'allongement et il arrive que l'on observe une orientation préférentielle de ces nodules (photo 26). Faut-il, dans ce cas, envisager la présence de courants ? Les nodules de ce groupe sont très souvent envasés.

Nous distinguons donc deux faciès principaux de nodules qui correspondent à deux types morphologiquement et géochimiquement différents. Nous avons reporté sur l'axe Mn les différents types de nodules mis en évidence.



Les polynodules sont liés aux éléments stériles, donc à un substrat particulier, et sont généralement localisés aux sommets de reliefs plus ou moins élevés. Ceci a déjà été signalé par PRICE et CALVERT (1970), FRIEDRICH et al (1973, 1976), par ANDREWS (1976). Une grande proportion des sites de prélèvements de ces nodules est à mettre en relation avec la zone de fractures de Clarion.

Les mononodules sont généralement localisés dans des zones où les variations de la topographie sont de faibles amplitudes et où la couverture sédimentaire est plus importante. Certains nodules peuvent présenter plusieurs générations de dépôts ferromanganésifères puisqu'ils ont un noyau composé d'un débris d'anciens nodules, ce fait a été signalé par FRIEDRICH et al (1973), HALBACH et al (1975) et MEYLAN (1976).

Il semble exister une relation entre la teneur en eau des sédiments et les nodules. Lorsque la teneur en eau des sédiments augmente, la taille des nodules et leur teneur en Mn augmentent. Elle croît lorsque nous passons du faciès A au faciès B puis au faciès C. (Données sédimentologiques de WIRRMAN et al). Ainsi, les nodules du faciès C, qui sont les plus gros, reposent sur un sédiment riche en eau. Ils sont plus ou moins enfouis dans le sédiment. Doit-on penser à une influence prépondérante du sédiment sur leur formation ? D'autant plus que certains nodules de ce type présentent, sur leur face inférieure, une calotte de sédiment enrichie en micronodules et de couleur beaucoup plus foncée que le sédiment environnant. Ce sédiment possède une odeur particulière qui fait penser à l'existence de matière organique.

Nous pouvons donc relier la géochimie des nodules à des faciès photographiques, traduisant leurs caractères granulomorphologiques. Entre ces deux échelles d'observation, il s'en intercale une troisième : la nature minéralogique des nodules. C'est pourquoi nous avons essayé de mettre en parallèle ces trois échelles d'observation dans le chapitre suivant.

DEUXIEME PARTIE

Géochimie, Minéralogie et Facies Nodules

D'une analyse des travaux antérieurs, nous dégagons les problèmes posés par la géochimie et la minéralogie des nodules. Nous essaierons de résoudre quelques uns de ces problèmes à l'aide de nos résultats et nous ferons quelques spéculations sur la minéralogie des nodules étudiés.

I - PROBLEMES POSES PAR LA GEOCHIMIE ET LA MINERALOGIE DES NODULES

Quelle est la nature minéralogique de la phase ferromanganésifère ?

Quelles sont les relations entre les éléments chimiques entrant dans cette phase ?

Les variations de la composition chimique des nodules sont liées à deux paramètres, dépendants eux-mêmes de l'environnement bio-physico-chimique des nodules, ce sont :

- la proportion d'éléments étrangers à la phase ferromanganésifère tels que : noyau de roche volcanique altérée ou inclusion de sédiments.

- la nature minéralogique des oxydes et hydroxydes de Mn et Fe.

NATURE MINERALOGIQUE DE LA PHASE Mn - Fe

D'après BUSER et GRUTER (1956), le manganèse est présent sous trois phases minérales qui sont : δ MnO₂, *manganite* à 7 Å et *manganite* à 10 Å ; ces deux dernières phases sont définies respectivement comme *birmessite* par JONES et MILNE (1956) et *todorokite* par STRACZECK et al (1960).

BARNES (1967) sépare les nodules en 3 classes en fonction de la proportion de chacune de ces phases : les nodules contenant uniquement δ MnO₂, ceux contenant les trois phases et ceux contenant δ MnO₂ et la *manganite* à 10 Å.

BRICKER (1965) suggère que la *manganite* 7 Å et δ MnO₂ sont une phase unique qui présenterait, en fait, des particules de taille différente. Dans la suite de notre exposé nous ne retiendrons que deux phases : δ MnO₂ et *todorokite*.

A chacune de ces phases minérales correspond une tendance chimique différente.

La phase δ MnO₂ est accompagnée de la phase Fe. Elle est plus riche en Ca, Co, Fe, Ti que la *todorokite* d'après BURNS et FUERSTENAU (1966), BARNES (1967), CRONAN (1967).

La *todorokite* est plus riche en Ni, Cu, Zn, K, Mg que δ MnO₂ d'après BURNS et FUERSTENAU (1966). STACZECK et al (1960) montrent la présence de Na, Ca dans la *todorokite*.

Le fer est sous forme de composés α et γ FeO OH, seuls ou combinés avec des oxydes de Fe et Mn d'après JOHNSON et GLASBY (1969), Ti est lié à la phase Fe d'après OSTWALD et FRAZER (1973).

Co et Ca sont liés aux variations de Fe d'après BURNS et FUERSTENAU (1966), aux variations de Mn d'après ESTEP (1973), OSTWALD et FRAZER (1973), aux variations de Fe et Mn d'après VAN DER WEIJDEN (1976). Les contradictions entre ces auteurs montrent l'intérêt de mieux définir le comportement des éléments chimiques contenus dans les nodules, c'est ce que nous essaierons de faire à l'aide des résultats obtenus au paragraphe II de la première partie, tout en faisant quelques spéculations sur la minéralogie des phases Mn, puisqu'aucune donnée minéralogique n'est encore en notre possession.

II - SPECULATIONS SUR LES NODULES ETUDIES

Nous avons vu que les éléments chimiques des nodules pouvaient être séparés en deux groupes principaux : ceux liés à la matrice d'hydroxydes ferromanganésifères et ceux liés à ce que nous avons appelé la partie stérile, dont le principal constituant est SiO_2 .

2.1. - LA PARTIE STERILE

Nous avons montré qu'il y avait toujours au moins 10 % de SiO_2 dans les nodules. Est-ce que SiO_2 est indispensable à la formation des nodules ? Si oui, sous quelle forme ? Nous pouvons rapprocher cette observation des travaux de certains auteurs. GREENSLATE (1975) suggère que la croissance des nodules est liée à l'activité biologique existante à la surface des nodules, les animaux qui vivent sur les nodules, aussi petits soient-ils, se protègent dans des "maisons" construites en grains de silicate. Il y aurait par la suite remplissage des cavités ainsi formées par des oxydes de Mn. EHRLICH (1972) pense que l'activité bactériologique peut jouer un rôle dans la précipitation de la phase ferromanganésifère. LALOU et BRICHET (1976) ont trouvé une charpente, de même composition que le noyau des nodules, qui supporte les couches ferromanganésifères. KARPOFF (1976) a trouvé des plaquettes siliceuses, qui semblent correspondre à des remplissages de fissures dans un matériel sédimentaire. Ces plaquettes dégagées de leur contexte de formation sont recouvertes postérieurement d'hydroxydes métalliques, qui se déposent en deux étapes. Un premier épisode de dépôt forme parfois des hydroxydes de Fe contenant Ti et très peu de Mn ; on y trouve des traces d'aluminosilicates. En dernier, se dépose Mn associé à un peu de Fe et à la totalité des éléments traces Ni, Co, Cu. GOLDBERG et ARRHENIUS (1958) avaient déjà signalé que les dépôts d'oxydes de Mn pouvaient être précédés par ceux d'oxydes de Fer. GLASBY (1972) pense que Fe se dépose sous forme colloïdale et que c'est un phénomène autocatalytique qui est responsable des dépôts de Mn et Fe. De tels processus catalytiques ont déjà été proposés par MORGENSTEIN et FLESHER (1971). Ces auteurs proposent un modèle où Fe qui proviendrait de la décomposition de matériel volcanique, serait l'agent catalyseur. Alors que pour KRAUSKOPF (1975) Mn serait son propre catalyseur.

2.2. - LA PHASE FERROMANGESIFERE

Pour étudier les relations inter-éléments et leur liaison avec la minéralogie nous utiliserons le rapport Mn/Fe comme MEYLAN et GOODELL (1976), CALVERT et PRICE (1977) qui déterminent les variations du rapport *todorokite*/ δMnO_2 dans les nodules à l'aide du rapport Mn/Fe. (δMnO_2 étant pris au sens de BRICKER).

Sur les figures 51 et 52, le comportement des éléments par rapport à Mn ou Mn/Fe est identique, sauf pour le faciès A3 qui n'a pas la même position sur les abscisses.

Compte tenu des données bibliographiques, nous pensons que les faciès A1 et A2 regroupent des nodules où la phase Mn est δMnO_2 . C'est surtout la quantité de stériles qui les différencie. Dans ces nodules Fe est constant, or tous les éléments non liés à la silice augmentent lorsque Mn augmente, ce qui indique que c'est la *phase manganésifère* qui est porteuse de ces éléments.

Le faciès A3 est composé de deux populations de nodules, et, par manque d'informations spécifiques à chacune d'elle, nous ne pouvons que constater qu'elle correspond à une diminution importante de la famille de la silice, à laquelle nous devons rattacher, dans ce cas précis, Mg et une faible proportion de Na (Fig. 52). L'appartenance d'une partie plus ou moins importante de Mg à la phase stérile, peut expliquer le comportement chaotique de cet élément par rapport à Mn/Fe ou Mn seul. Si l'on compare les éléments chimiques de ce faciès à Mn (Fig. 51), nous voyons qu'il y a enrichissement en Fe, Ti, Pb, Co, Ca, H_2O^+ et un appauvrissement en Ni, Cu et Zn.

Dans les nodules des faciès A4 et B1, Mn se présenterait sous forme de δMnO_2 et de todorokite. Dans les nodules du faciès A4, il y aurait plus de δMnO_2 que de todorokite, ceci étant traduit par l'augmentation de Co et Ca lorsque Mn augmente. Il y a vraisemblablement un léger enrichissement en stérile puisque Mg augmente et que Al et SiO_2 diminuent plus lentement. Une partie du Ca provient également de la phase non ferromanganésifère car quelques échantillons de ce groupe ont des valeurs supérieures à 2 % Ca, ce qui implique que dans l'avenir il faudrait séparer le Ca biogène du Ca de la phase ferromanganésifère. Dans les nodules du faciès B1, il y aurait plus de todorokite que de δMnO_2 , Co et Ca diminuent lorsque Mn augmente.

Les nodules du faciès B2 seraient surtout composés de todorokite, il y a moins de δMnO_2 . Ce groupe est composé dans une proportion importante de nodules asymétriques, la partie supérieure est lisse et subplane, la partie inférieure est rugueuse et arrondie. Ces nodules ont été très bien décrits par RAAB (1972), qui a montré un enrichissement en Fe, Co, Pb de la partie supérieure, tandis que la partie inférieure était enrichie en Mn, Ni, Cu, Zn. CALVERT et PRICE (1977) reprenant les données de RAAB pensent que ces différences doivent être attribuées à la source des métaux, qui serait différente. La partie supérieure subirait surtout une précipitation venant de l'eau de mer tandis que la partie inférieure subirait les effets de la diagénèse. Faut-il envisager une minéralogie différente de la phase Mn pour les deux faces des nodules ?

Les nodules du faciès C seraient essentiellement composés de todorokite. Nous devons remarquer une augmentation de Na, Ca et Zn par rapport à Mn, une diminution de Mg et H_2O^+ , la baisse de Ti, Co, Fe, Pb est accentuée, la baisse de K et SiO_2 se stabilise. Est-ce dû à un *taux de cristallinité différent* ? Est-ce dû à la disparition progressive de la phase ferrifère ?

Toutes ces questions prouvent la nécessité d'étudier la minéralogie de ces nodules à l'aide de techniques appropriées. En particulier, il faut démontrer que les éléments mineurs peuvent, ou ne peuvent pas, entrer dans la phase Mn et que la corrélation apparente qui lie Ti, Pb et Co à Fe n'est pas due en partie au fait que ces éléments ont un comportement identique envers Mn (comportement qui serait une anticorrélation envers Mn), ce qui ne signifierait pas qu'ils soient *uniquement* liés à la phase Fe. Il faudrait quantifier également la proportion de Fe qui peut entrer dans la phase Mn.

Les figures 37 et 38 nous ont apporté plusieurs renseignements : Ni et Cu présentent deux comportements vis à vis de Mn. Lorsque Mn ou Cu augmentent nous avons tout d'abord plus de Ni que de Cu. Nous serions surtout en présence de δMnO_2 puis dans un deuxième temps Cu tend à rattraper Ni, nous serions surtout en présence de todorokite : sur les diagrammes de corrélation qui comparent Mn aux autres éléments (Fig. 17 à 21, 30, 32 et 33) nous avons établi trois groupes

en découpant l'axe Mn par les valeurs 19-20 % et 26 %. Le premier groupe correspondrait à des échantillons contenant surtout δMnO_2 , le second à un mélange δMnO_2 + todorokite et le troisième à une prépondérance de la todorokite.

En résumé, nous proposons le modèle théorique suivant :

Phase Fe	importante et \pm constante					diminution		continue \longrightarrow		
Phase Mn	δMnO_2	δMnO_2	δMnO_2 (PRÉPONDE) + todorokite		todorokite (PRÉPONDE) + δMnO_2		Todorokite			
Stérile	très abondant		abondant		abondant		présent		existence d'un seuil	
FACIÈS	A ₁		A ₂		A ₃ A ₄		B ₁ B ₂		C	

CONCLUSION

La reconnaissance systématique de la région comprise entre les zones de fractures de Clarion et Clipperton a permis d'acquérir de nombreuses données sur les nodules de cette région. L'étude statistique de leur géochimie nous a apporté les résultats suivants :

- Les éléments chimiques contenus dans les nodules peuvent être répartis en trois pôles principaux qui sont :

- . le pôle de la silice auquel sont corrélés Al et K
- . le pôle du manganèse auquel se rattachent Zn, Cu et Ni, la corrélation liant ces éléments n'est pas linéaire.
- . le pôle du fer auquel sont corrélés Ti et Pb.

Le cobalt semble devoir être relié à la fois au pôle Fe et au pôle Mn.

- Les variations de la composition chimique des nodules, donc de la proportion des trois pôles définis précédemment, permettent de définir plusieurs groupes de nodules. Chacun de ces groupes est caractéristique d'un faciès particulier de nodule, donc d'un environnement biophysico-chimique particulier. Nous pouvons les rassembler en deux ensembles principaux : les polynodules et les mononodules.

Les nodules de ces faciès présentent des caractères granulomorphologiques différents et, pour chaque faciès, la minéralogie de la phase manganésifère s'exprime d'une manière différente. Ceci se traduit par un comportement différent des éléments Zn, Cu, Ni, Co envers Mn suivant la nature de la phase manganésifère et son état de cristallisation.

Les éléments SiO_2 , Al, K semblent avoir une influence sur la formation des nodules, puisque leur proportion ne descend pas au-dessous d'un certain seuil.

Les relations entre la géochimie et la minéralogie des nodules étant très complexes, le matériel étudié doit recouvrir l'ensemble du "phénomène nodule" ; pour cela il faut des échantillons couvrant de grandes zones géographiques, afin de ne pas bâtir de théorie sur un cas particulier et il faut acquérir le maximum de données caractérisant l'environnement des nodules.

Certains sujets demandent à être étudiés d'une manière plus approfondie. En particulier, nous devons mieux définir la nature du substrat, sur lequel reposent les nodules, et déterminer son influence sur leur croissance. Il faut également mieux définir la nature de la phase ferromanganésifère. Enfin, il est indispensable de s'assurer de la possibilité de réalisation des réactions chimiques aux conditions de *pression* et de *température* rencontrées dans les grands fonds océaniques. Nous n'arriverons à traiter ces sujets, donc à mieux comprendre la formation des nodules, qu'en associant intimement les travaux de géologues, de minéralogistes et de chimistes, les uns pouvant confirmer ou infirmer les hypothèses émises par les autres.

BIBLIOGRAPHIE

- AHRENS, L.G., WILLIS, J.P. and OOSTHUIZEN, C.O., 1967.
Further observations on the composition of manganese nodules with particular reference to some rarer elements. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 31 : 2169-2180.
- ARRHENIUS, G. and BONATTI, E., 1965.
Neptunism and volcanism in the ocean. In : M. SEARS (Editor), *Progress in Oceanography*. Pergamon, New York, N.Y., 3 : 7-22.
- ARRHENIUS, G., MERO, J.L. and KORKISCH, J., 1964.
Origin of oceanic manganese nodules. *Sci.*, N.Y. 144 : 170-173.
- ANDREWS, J.E., 1976.
Aspects of the geologic setting of manganese nodule deposits. *Tech. Bull. 2. CCOP/SOPAC*. GLASBY and KATZ (Editors) New Zealand.
- BARNES, S.S., 1967.
Minor element composition of ferromanganese nodules. *Sci.*, N.Y. 157 : 63-66.
- BENZECRI, J.P., 1973.
L'analyse des données (2 vol.) Dunod. Paris.
- BONATTI, E., KRAEMER, T., RYDELL, H., 1972.
Classification and genesis of submarine ironmanganese deposits. pp. 149-66 in Horn, D.R. (Ed.) "Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor". N.S.F., Washington, D.C. 293 pp.
- BRICKER, O., 1965.
Some stability relations in the system $Mn-O_2-H_2O$ at 25° and one atmosphere total pressure. *Am. Miner.* 50 : 1296-1351.
- BURNS, R.G., 1965.
Formation of cobalt-III in the amorphous Fe (OOH) MnH_2O phase of manganese nodules, *Nature*, 205 : 999.
- BURNS, R.G. and BROWN, B.A., 1972.
Nucleation and mineralogical controls on the composition of manganese nodules. In Horn D.R. (Ed.) "Ferromanganese deposits on the ocean floor". N.S.F., Washington, D.C. pp 51-62.
- BURNS, R.G., FUERSTENAU, D.W., 1966.
Electroprobe determinations of inter-element relationships in manganese nodules. *Am. Miner.* 51 : 895-902.
- BUSER, W. and GRÜTTER, A., 1956.
Über die Natur der Manganknollen. *Schweiz. Mineral. Petrog. Mitt.*, 36 : 49-62.
- CALVERT, S.E. and PRICE, N.B., 1970.
Composition of manganese nodules and manganese carbonates from Loch Fyne, Scotland. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 29 : 215-233.
- CALVERT, S.E. and PRICE, N.B., 1977.
Geochemical variation in ferromanganese nodules and associated sediments from the Pacific Ocean. *Mar. Chem.*, 5 : 43-74.

- CAZES, P., 1970.
Thèse de 3ème cycle. Application de l'analyse des données au traitement des problèmes géologiques. Lab. Stat. Math., Univ. Paris VI.
- CHESTER, R., JOHNSON, L.R., MESSIHA-HANNA, R.G. and PADGHAM, R.C., 1973.
Similarities between Mn, Ni and Co contents of deep-sea clays and manganese nodules from the South-West region of the North Atlantic. Mar. Geol. 14 : M15-M20.
- CRONAN, D.S., 1967.
The geochemistry of some manganese nodules and associated pelagic sediments. Unpubl. Ph. D. thesis (Univ. London).
- CRONAN, D.S., 1972.
Regional geochemistry of ferromanganese nodules in the world ocean. pp. 19-30 in Horn, D.R. (Ed.) Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor. N.S.F., Washington, D.C. 293 pp.
- CRONAN, D.S. and TOOMS, J.S., 1968.
A microscopic and electron-probe study of manganese nodules from the north-west Indian Ocean. Deep-Sea Res., 15 : 215-233.
- CRONAN, D.S., TOOMS, J.S., 1969.
The geochemistry of manganese nodules and associated pelagic deposits from the Pacific and Indian Oceans. Deep-Sea Res. 16 : 335-359.
- DIDAY, E., 1972.
Thèse de doctorat. Nouvelles méthodes et nouveaux concepts en classification automatique et reconnaissance des formes. Lab. Stat. Math., Univ. Paris VI.
- EHRlich, H.L., 1972.
The role of microbes in manganese nodule genesis and degradation. In Papers from a Conference on Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor, ed. D.R. Horn, The Office for the International Decade of Ocean Exploration, N.S.F., Wash., D.C., 63-70.
- ESTEP, P.A., 1973.
Infrared micro-analysis for deducing the formation history of ferromanganese deposits. Inter-university program of research on ferromanganese deposits of the ocean floor. Phase I Report. Seabed assessment program IDOE, N.S.F., Washington, D.C. 45-75 (unpub.).
- FEIN, C.D. and MORGENSTEIN, M., 1973.
Microprobe analysis of manganese crusts from the hawaiian archipelago. Inter-university program of research on ferromanganese deposits of the ocean floor. Phase I Report. Seabed assessment program IDOE, N.S.F. Washington, D.C. 85-92 (unpub.).
- FRIEDRICH, G.H., KUNZENDORF, H. and PLÜGER, W.L., 1973.
Geochemical Investigation of deep sea manganese nodules from the Pacific on board R/V Valdivia. An application of the EDX-technique. In : M. MORGENSTEIN (Editor). Papers on the origin and distribution of manganese nodules in the Pacific and prospects for exploration, Honolulu, Hawaii, 31-44.
- FRIEDRICH, G. and PLÜGER, W., 1974.
Die Verteilung von Mangan, Eisen, Kobalt, Nickel, Kupfer und Zink in Manganknollen verschiedener Felder. Meerestechnik, 5 : 203-206.
- FRIEDRICH, G., PLÜGER, W.L. et KUNZENDORF, H., 1976.
Geochemisch-lagerstättenkundliche Untersuchungen von Manganknollen - Vorkommen in einem Gebiet mit stark unterschiedlicher submariner Topographie (Zentral - Pazifik). Erzmetall, Bd. 29. H 10.
- FRIEDRICH, G., ROSNER, B. and DEMIRSOY, S., 1969.
Erzmikroskopische und mikroanalytische Untersuchungen an manganer-konkretionen aus dem pazifischen Ozean. Mineral, Deposita, 4 : 298-307.
- GLASBY, G.P., 1972.
The nature of the iron oxide phase of marine manganese nodules. N.Z. J1 Sci. : June 1972, 232-239.

- GLASBY, G.P., 1972.
The geochemistry of manganese nodules from the north-west Indian Ocean. in Horn, D.R. (Ed.). "Ferromanganese deposits on the ocean floor". N.S.F. Washington, D.C. pp. 93-104.
- GLASBY, G.P., 1972.
The mineralogy of manganese nodules from a range of marine environments. Mar. Geol. 13 : 57-72.
- GOLDBERG, E.D., 1954.
Marine geochemistry, 1. Chemical scavengers of the sea. J. Geol., 62 : 249-265.
- GOLDBERG, E. and ARRHENIUS, G., 1958.
Chemistry of Pacific pelagic sediments. Geochim. Cosmochim. Acta 13 : 153-212.
- GREENSLATE, J.L., FRAZER, J.Z. and ARRHENIUS, G., 1973.
Origin and deposition of selected transition elements in the Seabed. In : M. MORGENSTEIN (Editor), Papers on the Origin and Distribution of Manganese Nodules in the Pacific and Prospects for Exploration. Honolulu, Hawaii, 45-69.
- GREENSLATE, J.L., 1975.
Manganese - Biota associations in north-eastern equatorial pacific sediments. Ph. Thesis. University of California. San Diego. Pp 244.
- HALBACH, P., ÖZKARA, M. et HENSE, J., 1975.
The influence of metal contents on the physical and mineralogical properties of pelagic manganese nodules. Mineral. Deposita (Berl.) 10, 397-411.
- HORN, D.R., HORN, B.M. and DELACH, M.N., 1972.
Ferromanganese deposits of the North Pacific. Tech. Rep. No. 1, N.S.F. - GX 33616, N.S.F., Washington, D.C. 78 pp.
- HORN, D.R., HORN, B.M. and DELACH, M.N., 1973.
Copper and nickel content of ocean ferromanganese deposits and their relation to properties of the substrate. In : M. MORGENSTEIN (Editor). Papers on the Origin and Distribution of Manganese Nodules in the Pacific and Prospects for Exploration, Honolulu, Hawaii, 77-83.
- JOHNSON, C.E. and GLASBY, G.P., 1969.
Mössbauer effect determination of particle size in microcrystalline iron-manganese nodules. Nature, London 222 : 376-7.
- JONES, L.H.P. and MILNE, A.A., 1956.
Birnessite, a new manganese mineral from Aberdeenshire, Scotland, Mineral. Mag. 31 : 238-288.
- KARPOFF, A.M., 1976.
Présence de silice en forme de plaquettes associées aux concrétions polymétalliques des sédiments du Pacifique Nord. Rapport interne du Centre de Sédimentologie et Géochimie de la Surface, Strasbourg (France).
- KRAUSKOPF, K.B., 1957.
Separation of manganese from iron in sedimentary processes. Geochim. Cosmochim. Acta, 12 : 61-84.
- LALOU, C. et BRICHET, E., 1976.
On some relationships between the oxide layers and the cores of deep sea manganese nodules. Mineral. Deposita (Berl.).
- LYNN, D.C. and BONATTI, E., 1965.
Mobility of manganese in the diagenesis of deep-sea sediments. Mar. Geol., 3 : 457-474.
- MERO, J.L., 1962.
Ocean-floor manganese nodules. Econ. Geol. 57 : 747-767.
- MERO, J.L., 1965.
Mineral Resources of the Sea. Elsevier, Amsterdam. 312 pp.

- MEYER, K., 1973.
Surface sediment and manganese nodule facies, encountered on R/V Valdivia Cruises 1972/73. In : M. MORGENSTEIN (Editor). Papers on the origin and distribution of manganese nodules in the Pacific and prospects for exploration, Honolulu, Hawaii, 125-136.
- MEYLAN, M.A., 1968.
The mineralogy and geochemistry of manganese nodules from the Southern Ocean. Contr. No.22, Sediment. Res. Lab. Fla. State Univ. 22 : 177 pp.
- MEYLAN, M.A., 1976.
A comparison of the morphology and mineralogy of manganese nodules from the South-Western Pacific basin and North-Eastern Equatorial Pacific. Tech. Bull. 2. CCOP/SOPAC. GLASBY and KATZ (Editors) New Zealand.
- MEYLAN, M.A. and GOODELL, H.G., 1976.
Chemical composition of manganese nodules from the Pacific-Antarctic Ocean, Drake passage and Scotia Sea : Relation to ferromanganese oxide mineralogy and nucleus type. Tech. Bull. 2. CCOP/SOPAC. GLASBY and KATZ (Editors). New Zealand.
- MICHARD, G., 1975.
Chimie du manganèse à l'interface eau sédiment. Mineral. Deposita (Berl.) 10, 315-322.
- MORGAN, C.L. and MOORE, J.R., 1975.
Role of the nucleus information of ferromanganese nodules : processing guidelines for the marine miner. Off. Tech. Conf. Dallas.
- MORGENSTEIN, M., 1973.
Sedimentary diagenesis and rates of manganese accretion on the Waho shelf, Kawai channel, Hawaii. Inter-university program of research on ferromanganese deposits of the ocean floor. Phase I Report. Seabed assessment program IDOE N.S.F. Washington, D.C. 121-135. (unpub.).
- MORGENSTEIN, M. and FELSHER, M., 1971.
The origin of manganese nodules : A combined theory with special reference to palagonitization. Pacif. Sci., Vol. 25, 301-307.
- OSTWALD, J. and FRAZER, F.W., 1973.
Chemical and mineralogical investigations on deep sea manganese nodules from the Southern Ocean. Mineral. Deposita (Berl.) 8, 303-311.
- PICARD, J., 1972.
Utilisation des méthodes d'analyse de données dans l'étude de courbes expérimentales. Thèse de 3ème cycle. Lab. Stat. Math., Univ. Paris VI.
- PRICE, N.B., CALVERT, S.E., 1970.
Compositional variation in Pacific Ocean ferromanganese nodules and its relationship to sediment accumulation rates. Mar. Geol. 9 : 145-171.
- RAAB, W., 1972.
Physical and chemical features of Pacific deep sea manganese nodules and their implications to the genesis of nodules. In : D.R., HORN (Editor). Papers Conf. Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor. N.S.F., Washington, D.C., pp. 31-49.
- RANCITELLI, L.A. and PERKINS, R.W., 1973.
Major and minor elemental composition of manganese nodules. Inter-university program of research on ferromanganese deposits of the ocean floor. Phase I Report. Seabed assessment program IDOE N.S.F., Washington, D.C. 1-5 (unpub.).
- SKORNYAKOVA, N.S., ANDRUSHCHENKO, P.F., 1974.
Iron-manganese concretions in the Pacific Ocean. Int. Geol. Rev. 16 : 863-919.
- SOREM, R.K. and FOSTER, A.R., 1972.
Internal structure of manganese nodules and implications in beneficiation. In : D.R., HORN (Editor). Papers Conf. Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor. N.S.F., Washington, D.C., pp. 167-179.
- STRACZEK, J.A., HOREN, A., ROSS, M. and WARSHAW, C.W., 1960.
Studies on manganese oxides. IV. Todorokite. Am. Miner., 45 : 1174-1184.

VAN DER WEIJDEN, C.H., 1976.

Some geochemical controls on Ni and Co concentrations in marine ferromanganese deposits. Chem. Geol., 18 : 65-80.

WILLIS, J.P. and AHRENS, L.H., 1962.

Some investigations of the composition of manganese nodules with particular reference to certain trace elements. Geochim. Cosmochim. Acta, 26 : 751-764.

WIRRMANN, D., HOFFERT, M., SCHAAF, A. et KARPOFF, A.M., 1975-1976.

Données sédimentologiques, minéralogiques et micropaléontologiques obtenues sur les sédiments de surface des campagnes COR 75.01 à NOR 76.03. Centre de Sédimentologie et Géochimie de la Surface. Strasbourg. France (non publiés).

TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

FIGURES

- N° 1 - Zone de prospection
- N° 2 - Histogramme du Manganèse
- N° 3 - Histogramme du Cuivre
- N° 4 - Histogramme du Nickel
- N° 5 - Histogramme du Fer
- N° 6 - Histogramme du Titane
- N° 7 - Histogramme de l'Aluminium
- N° 8 - Histogramme du Potassium
- N° 9 - Histogramme de la Silice
- N° 10 - Histogramme du Calcium
- N° 11 - Histogramme du Cobalt
- N° 12 - Histogramme du Plomb
- N° 13 - Histogramme du Zinc
- N° 14 - Histogramme du Sodium
- N° 15 - Histogramme du Magnésium
- N° 16 - Histogramme de la perte au feu à 1000°C = H₂O⁺
- N° 17 - Diagramme de corrélation Mn-Ni
- N° 18 - Diagramme de corrélation Mn-Cu
- N° 19 - Diagramme de corrélation Mn-Zn
- N° 20 - Diagramme de corrélation Mn-H₂O⁺
- N° 21 - Diagramme de corrélation Mn-Na
- N° 22 - Diagramme de corrélation Ni-Cu
- N° 23 - Diagramme de corrélation Ni-Zn
- N° 24 - Diagramme de corrélation Fe-Ti
- N° 25 - Diagramme de corrélation Fe-Pb
- N° 26 - Diagramme de corrélation Fe-Co
- N° 27 - Diagramme de corrélation SiO₂-Al
- N° 28 - Diagramme de corrélation SiO₂-K
- N° 29 - Diagramme de corrélation SiO₂-Fe
- N° 30 - Diagramme de corrélation SiO₂-Mn
- N° 31 - Diagramme de corrélation SiO₂-Mn (Pacifique Sud)
- N° 32 - Diagramme de corrélation Mn-Fe
- N° 33 - Diagramme de corrélation Mn-Co
- N° 34 - Diagramme triangulaire Fe, Mn, 10 Co
- N° 35 - Diagramme triangulaire Fe, Mn, 10 Cu
- N° 36 - Diagramme triangulaire Fe, Mn, 10 Ni
- N° 37 - Diagramme triangulaire Ni, Cu, Mn
- N° 38 - Diagramme triangulaire Ni, Cu, 10 Co

- N° 39 - Diagramme triangulaire Fe, Mn, 10 (Ni + Cu + Co)
- N° 40 - Analyse des correspondances - projection sur le plan des axes 1 - 2
- N° 41 - Analyse des correspondances - projection sur le plan des axes 1 - 3
- N° 42 - Comparaison des profils moyens des formes fortes par rapport à SiO₂
- N° 43 - Comparaison des profils moyens des formes fortes par rapport à Fe
- N° 44 - Comparaison des profils moyens des formes fortes par rapport à Mn
- N° 45 - Comparaison des profils moyens des formes fortes par rapport à Mn/Fe
- N° 46 - Diagramme de corrélation Ni - Mn/Fe
- N° 47 - Diagramme de corrélation Cu - Mn/Fe
- N° 48 - Diagramme de corrélation Co - Mn/Fe

TABLEAUX

- N° 1 - Composition chimique des nodules du Pacifique Nord-Est
- N° 2 - Résultats donnés par les histogrammes
- N° 3 - Coefficients de corrélation pour la totalité des échantillons
- N° 4 - Coefficients de corrélation pour 235 échantillons
- N° 5 - Résultats de l'analyse des correspondances
- N° 6 - Profils moyens des 5 classes d'échantillons, obtenues par classification automatique
- N° 7 - Profils moyens des formes fortes

Imprimé par
INSTAPRINT - Tours

Juillet 1977