



HAL
open science

Géologie du Précambrien terminal (III) et traitement statistique des données géochimiques de prospection, dans la boutonnière de Bou Azzer - El Graara (Anti-Atlas, Maroc)

Moulay Azizi Samir

► **To cite this version:**

Moulay Azizi Samir. Géologie du Précambrien terminal (III) et traitement statistique des données géochimiques de prospection, dans la boutonnière de Bou Azzer - El Graara (Anti-Atlas, Maroc). Géochimie. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1990. Français. NNT: . tel-00708240v2

HAL Id: tel-00708240

<https://theses.hal.science/tel-00708240v2>

Submitted on 3 Sep 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



GRENOBLE 1
INSTITUT DE GÉOLOGIE
DOCUMENTATION
15, RUE MAURICE GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TÉL. (33) 76 83 59 66
FAX. (33) 76 87 82 43

AZIZI SAMIR
(M.R)

THESE

22 MARS 1994

présentée à

L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER, GRENOBLE I

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

spécialité : **GEOLOGIE - GEOCHIMIE MINIERE**

par

Moulay Rachid AZIZI SAMIR

**Géologie du Précambrien Terminal (III) et
Traitement Statistique des Données Géochimiques de Prospection,
dans la boutonnière de Bou Azzer - El Graara (Anti-Atlas, Maroc).**

soutenue le 21. 12. 1990, devant le jury :

- | | | |
|-------------------|------------------------|--|
| Jean Fabre | (Président-Rapporteur) | Directeur de Recherche, CNRS, UJF, Grenoble |
| Georges Buffet | (Rapporteur) | Chargé de Recherche, CNRS, INRIA, Nice, Sophia-Antipolis |
| Jeffrey A. Karson | (Rapporteur) | Professeur, Duke University, Durham, USA |
| Marc Leblanc | | Directeur de Recherche, CNRS, USTL, Montpellier |
| Michel Piboule | | Professeur, UJF, Grenoble |
| Ingrid Reuber | | Chargée de Recherche, CNRS, UJF, Grenoble |
| Jean Louis Tane | | Maître de Conférence, UJF, Grenoble |

tel-00708240, version 1 - 14 Jun 2012

THESE

présentée à

22 MARS 1994

**L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER,
GRENOBLE I**

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

spécialité : **GEOLOGIE - GEOCHIMIE MINIERE**

par

Moulay Rachid AZIZI SAMIR

**Géologie du Précambrien Terminal (III) et
Traitement Statistique des Données Géochimiques de Prospection,
dans la boutonnière de Bou Azzer - El Graara (Anti-Atlas, Maroc).**

soutenue le 21. 12. 1990, devant le jury :

Jean Fabre	(Président-Rapporteur)	Directeur de Recherche, CNRS, UJF, Grenoble
Georges Buffet	(Rapporteur)	Chargé de Recherche, CNRS, INRIA, Nice, Sophia-Antipolis
Jeffrey A. Karson	(Rapporteur)	Professeur, Duke University, Durham, USA
Marc Leblanc		Directeur de Recherche, CNRS, USTL, Montpellier
Michel Piboule		Professeur, UJF, Grenoble
Ingrid Reuber		Chargée de Recherche, CNRS, UJF, Grenoble
Jean Louis Tane		Maître de Conférence, UJF, Grenoble

NNB 10100907

à mes parents

à mes amis ...

"The most incomprehensible fact about Nature,
is that it is comprehensible".

Einstein.

AVANT-PROPOS:

C'est un devoir agréable, que celui de rendre hommage à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail:

Ce travail n'aurait pu avoir lieu sans les facilités que j'ai eu auprès de la Faculté des Sciences de Marrakech, grâce à sa direction et notamment Monsieur le Recteur de l'Université de Marrakech M. Knidiri, que je prie d'accepter mes vifs remerciements pour l'intérêt bienveillant qu'il a accordé au développement des recherches en collaboration avec le secteur économique et industriel.

Le sujet de ce travail a été défini en collaboration avec l'Omnium Nord Africain qui a mis à ma disposition les analyses géochimiques et a pris en charge la logistique des missions de terrain effectuées dans le cadre de ce travail, que la direction de cette compagnie trouve ici l'expression de ma reconnaissance, notamment les Responsables des Départements Mines et Géologie, messieurs Cherif, Bensari, Traki, Billaud et Bouabi, ainsi que les responsables de la Mine de Bleïda, dont l'accueil a toujours été agréable et efficace.

Mes remerciements s'adressent particulièrement aux membres du jury:

- M. Jean Fabre, Directeur de Recherche à l'Université Joseph Fourier, qui m'a fait l'honneur de présider le jury et a accepté de donner, en tant que rapporteur, son point de vue de spécialiste de la géologie africaine. Je ne saurais oublier la grande valeur scientifique et humaine des précieuses discussions qui ont été pour moi autant d'occasions de bénéficier de ses connaissances.

- Mlle Ingrid Reuber, Chargé de Recherche à l'UJF, qui par son expérience de la géologie de l'Anti-Atlas, par l'intérêt qu'elle a manifesté à l'égard de mon travail et par son soutien actif et amical, est pour beaucoup dans l'aboutissement de cette étude. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude et de mon amitié.

- M. Georges Buffet, Chargé de Recherche à l'Institut National de Recherche en Informatique et Automatique (INRIA) de Sophia-Antipolis, je lui suis reconnaissant de m'avoir mis en contact avec l'INRIA et de m'avoir initié aux traitements statistiques des données. Je le remercie pour son accueil amical, pour l'intérêt constant qu'il m'a manifesté et pour avoir accepté, en tant que rapporteur de juger mon travail.

- M. Jeffrey A. Karson, Professeur à Duke University, qui dans le cadre de son intérêt pour la géologie de l'Anti-Atlas et de sa collaboration avec l'Université de Marrakech, a accepté de juger ce travail en tant que rapporteur, qu'il trouve ici mes vifs remerciements.

- M. Jean Louis Tane, Maître de Conférence à l'UJF à Grenoble, Responsable de l'Action de Coopération entre la Faculté des Sciences de Marrakech et l'Université Grenoble I, a dirigé la réalisation de ce travail. Il m'a facilité la tâche tant par les moyens qu'il a toujours mis à ma disposition que par l'amitié et l'intérêt qu'il a constamment prêté à mon travail.

- M. Marc Leblanc, Directeur de Recherche à l'USTL à Montpellier, m'a fait bénéficier sur le terrain, de ses grandes connaissances de la géologie de Bou Azzer-El Graara et m'a fait l'honneur de participer à mon jury.

- M. Michel Piboule, Professeur à l'UJF à Grenoble, qui apporte à ce travail la caution du géochimiste et spécialiste des applications mathématiques en géologie.

Mes remerciements s'adressent également au Professeur Pierre Leymarie qui m'a accueilli au sein de son laboratoire de l'INRIA à Sophia-Antipolis et m'a fait bénéficier de son grand savoir en traitement des données géochimiques.

Ma reconnaissance va aussi à M. Jean Ferrandini, qui m'a accompagné avec grand intérêt sur le terrain et dont l'amitié et la collaboration m'ont bien initié à cette étude.

Je remercie également la direction et le personnel de l'Institut Dolomieu de Géologie et de l'URA 69 (CNRS) à Grenoble, notamment M. C. Kerckhove et M. G. Mascle, pour l'accueil et les moyens qu'ils ont mis à ma disposition pour la réalisation de ma thèse.

Au centre Inter-Universitaire de Calcul de Grenoble (CICG), j'ai trouvé aide et ambiance amicale, j'en remercie toutes les personnes que j'y ai connu, notamment M. J. Guilloux; M. J. Trinquart; M. B. Rapacchi et M. M. Rey.

Je n'oublierai pas mes amis, étudiants et chercheurs de l'AGID avec qui j'ai partagé une belle expérience et d'agréables moments, Wolf, Thierry, Hassan, Abdel, Zaboun ..., je suis en particulier redevable envers ceux qui m'ont aidé le jour de la soutenance, Hervé, Isma, Fouzia et Fouad, à tous un grand merci.

Enfin, j'aimerais dire plus intimement à mes parents qui ont fait de durs sacrifices pour me soutenir pendant toutes ces années d'études, à ma soeur Fatim-Zohra qui m'a activement soutenu dans les moments difficiles, que ce travail est également le leur.

RESUME:

Cette étude est effectuée dans la zone de suture panafricaine de Bou Azzer-El Graara (Anti-Atlas, Maroc). Elle s'articule en deux volets: d'une part, l'étude géologique et géodynamique du Précambrien Terminal (III) qui sert de support aux traitements statistiques de l'information géochimique de prospection récoltée dans le district de Tamdrost-Ambed d'autre part.

I) Un découpage lithostratigraphique des formations volcaniques du PIII est obtenu grâce à: la cartographie détaillée au 1/4000e du district de Tamdrost-Ambed et aux coupes géologiques levées en d'autres points de la boutonnière. Ceci a permis d'établir une coupe synthétique et des corrélations lithostratigraphiques.

L'étude pétrographique des roches volcaniques à prédominance pyroclastique de cette série montre leur rattachement à un magmatisme calco-alcalin, d'âge compris entre 580 et 560 Ma, dont la signification est discutée dans le cadre géodynamique régional.

L'analyse structurale des formations volcaniques et volcano-sédimentaires du Précambrien III, conduit à la mise en évidence de déformations synvolcaniques en régime distensif (NW-SE) et à la détermination des paléochamps de contraintes associés aux déformations observées. Le modèle d'extension proposé implique des mouvements de coulissement senestres le long de grands décrochements régionaux parallèles à la suture, entre le craton ouest-africain et le domaine panafricain "mobile".

II) Le traitement des données géochimiques (13000 analyses de 10 éléments majeurs et 24 éléments en traces par Spectrométrie d'émission) aboutit à la mise en évidence d'anomalies élémentaires et multiélémentaires significatives d'indices miniers, indépendants de la lithologie. Ce résultat passe par l'étude de la qualité des données géochimiques qui a conduit à l'évaluation de la précision et à l'application d'une correction empirique de l'erreur analytique.

L'analyse statistique des données de prospection est effectuée en plusieurs étapes:

- l'utilisation de la technique non conventionnelle "box and whiskers" pour la détermination des seuils anomaux, toutes lithologies confondues;
- la diversité lithologique est simplifiée par analyse factorielle en composantes principales sur les médianes pour aboutir à quatre groupes lithologiques au lieu des 32 distingués sur le terrain;
- une analyse discriminante sur ces quatre groupes, désormais connus, aboutit à un modèle factoriel du fond géochimique qui explique mieux les variations liées à la lithologie;
- Le fond géochimique modélisé est retranché par régression factorielle pour faire apparaître les anomalies discordantes.

Des cartes de synthèse des anomalies multiélémentaires sont établies dans le but d'orienter les campagnes de sondage.

Mots clés: Précambrien Terminal; Panafricain; Bou Azzer; Anti-Atlas; Maroc; volcanisme pyroclastique; calco-alcalin; géochimie; traitement de données; prospection; anomalie; indices miniers; statistiques; analyse factorielle; analyse discriminante.



tel-00708240, version 1 - 14 Jun 2012

ABSTRACT:

This study was performed in the Bou Azzer-El Graara panafrikan suture zone (Anti-Atlas, Morocco). This work is divided in two parts: on one hand, the geological and geodynamical study of the late Precambrian (PIII) as support for the statistic processing of prospecting geochemical data from the Tamdrost-Ambed district on the other hand.

I) The definition of the lithological groups is based on detailed geological map of Tamdrost-Ambed district on 1/4000e scale and columnar sections from whole the inlier lead to a synthetic columnar section and lithostratigraphic correlations.

The Precambrian III predominantly pyroclastic rocks' petrography, reveals a calc-alkaline affinity for the 580 to 560 Ma old magmatism event, whose geodynamic significance is discussed.

The structural analysis of the Precambrian III formations has revealed syn-volcanic deformations in a NW-SE extensional regime and has led to determine the principal stress directions .

The extensional model proposed suggests a left-lateral strike-slip parallel to the panafrikan suture, between the W-african craton and a "mobile" panafrikan area.

II) The statistical data processing of 13000 spectrometry analysis of 10 major elements and 24 trace elements, leads to establish significant elementary and multi-elementary geochemical anomalies which are independant of the lithology.

Study of the geochemical data quality leads to the analytical precision evaluation and consequently allows empirical correction of the analytical error.

The statistic analysis of prospecting geochemical data was realised in several steps:

- the non conventional method "box and whiskers" for the threshold determination on all lithologies.
- the lithological complexity is simplified by factor analysis on medianes to define 4 lithological groups instead of the 32 recognized during field work.
- a discriminant analysis on those 4 defined groups, leads to geochemical background factorial modeling, which gives better explanation of geochemical variations related to lithology.
- factorial regression based on this model reveals unconformable anomalous component of the geochemical variation.

Synthetic multi-elementary anomalie maps are produced to direct prospecting legs.

Key words: Late Precambrian; Panafrikan; Bou Azzer; Anti-Atlas; Morocco; pyroclastic volcanism; calc-alkaline; geochemistry; data processing; prospecting; anomalie; mining; statistics; factor analysis; discriminant analysis.



SOMMAIRE :

Avant propos	7
Résumé	9
Abstract	11
Sommaire	13
Liste des figures	19
Liste des tableaux	21
 INTRODUCTION GENERALE	 23

Première Partie

Géologie du Précambrien III dans la boutonnière de Bou Azzer - el Graara

Chapitre I : Introduction

I.1. Contexte général	27
I.1.1. Cadre géographique	28
I.1.2. Cadre géologique et structural	28
I.1.2.1. Lignes structurales du Maroc	28
I.1.2.2. Situation structurale de l'Anti-Atlas	29
I.1.2.3. Evolution des idées sur la géologie de l'Anti-Atlas	30
I.2. Contexte local	32
I.2.1. Cadre géographique	32
a. Réseau routier	33
b. Climat et réseau hydrographique	33
c. Morphologie	33
I.2.2. Cadre géologique	33
I.2.2.1. La boutonnière de Bou Azzer - El Graara dans l'Anti-Atlas	33
A. Repères géochronologiques	35
B. Situation paléogéographique	35
I.2.2.2. Situation géologique locale	37
A. Le socle	37
B. La couverture	38
I.2.3. Cadre minier	38
I.2.3.1. Historique	38
I.2.3.2. Le district de Bou Azzer	38
a. Travaux géologiques	38
b. Activité minière	39
I.2.3.3. Le district de Bleida	39
a. Travaux géologiques	39
b. Activité minière	39

Chapitre II : Cartographie et lithostratigraphie

II.1. Cartographie du secteur étudié	43
II.1.1. Introduction	43
II.1.2. Matériel utilisé	43
II.1.3. Présentation de la carte réalisée	43
II.1.4. Coupes géologiques	43
II.1.5. Apports de la carte réalisée	44
II.2. Lithostratigraphie de la série volcanique d'Ouarzazate	44
II.2.1. La série volcanique d'Ouarzazate dans l'Anti-Atlas	44

II.2.2. La série volcanique d'Ouarzazate dans le secteur étudié	44
II.2.2.1. Découpage lithostratigraphique	45
II.2.2.2. Description de la coupe lithologique du secteur Tamdrost-Ambed	45
II.2.3. Autres coupes dans la boutonnière de Bou Azzer - El Graara	48
II.2.3.1. Coupe dans le Jbel Bou Derga	48
II.2.3.2. Coupe dans le secteur de Bou Offroh Sud	49
II.2.3.3. Coupe dans le secteur de Guelb Tassaount	50
II.2.4. Rapports entre les différentes coupes	51
II.2.5. Conclusions	52

Chapitre III: Etude pétrographique

III.1. Introduction	55
III.2. Caractères généraux	55
III.3. Les roches acides	55
III.3.1. Les ignimbrites	57
a. La mésostase	57
b. Les phénocristaux	57
c. Les enclaves	61
III.3.2. Les pyroclastites	61
III.4. Les roches basiques	63
III.4.1. Les coulées andésitiques	63
a. Le faisceau B	63
b. Le faisceau F	63
III.4.2. Les dykes de porphyrite andésitique	63
III.5. Caractères géochimiques	65
III.6. Situation dans le cadre géodynamique régional	67
III.7. Conclusion	68

Deuxième partie

**Analyse structurale du PIII de Bou Azzer - El Graara
et interprétation géotectonique régionale**

Introduction	71
--------------------	----

Chapitre IV: Analyse de la déformation de la série PIII dans la boutonnière de Bou Azzer - El Graara

IV.1. Evolution tectonique de la région	75
IV.2. Analyse statistique de la fracturation	75
IV.2.1. Méthode	75
IV.2.2. Origine des données	77
IV.2.3. La fracturation de la boutonnière de Bou Azzer - El Graara	77
IV.2.4. La fracturation dans le secteur Tamdrost-Ambed	77
IV.3. Analyse de la déformation de la série volcanique PIII	78
IV.3.1. Aspects cartographiques	78
IV.3.1.1. Les failles normales	79
IV.3.1.2. Les grabens et hémi-grabens	79
a. Echelle métrique	79
b. Echelle décamétrique	81
c. Echelle hectométrique	83
IV.3.1.3. Les structures de glissement	83
a. Les glissements banc sur banc	83
b. Les loupes de glissement sur faille	83
IV.3.1.4. Les dykes de porphyrite andésitique	85

IV.3.2. Aspects microtectoniques	85
IV.3.3. Conclusion	86

Chapitre V: Paléochamps de contraintes et modèle géotectonique

V.1. Détermination du paléochamps des contraintes	89
V.1.1. Méthode	89
a. Hypothèse de départ	89
b. Interprétation géologique	90
V.1.2. Origine et nature des données	90
V.1.3. Les failles normales précoces	90
V.1.4. Les autres plans de failles	92
V.1.5. Conclusion	92
V.2. Aspect régional de la distension PIII et interprétation géodynamique	93
V.2.1. Aspect régional	93
V.2.2. Interprétation de la tectonique étudiée	94
V.3. Modèle géotectonique	95
V.4. Conclusion	97

Troisième partie :

**Traitement des données géochimiques de prospection
et exploration du signal anomal**

Chapitre VI: Généralités sur le traitement des données géochimiques des prospection

VI.1. Introduction	103
VI.2. Historique	103
VI.3. L'information géochimique	104
VI.3.1. Définition	104
VI.3.1.1. Aspect structural	104
a. Relation entre variables quantitatives	104
b. Relation entre variables quantitatives et qualitatives	105
c. Relation entre variables qualitatives	105
VI.3.1.2. Aspect génétique	105
VI.3.2. Acquisition	105
VI.3.2.1. Echantillonnage	105
VI.3.2.2. Préparation des échantillons	105
VI.3.2.3. Analyse	105
VI.4. Méthodes de traitement des données géochimiques	106
VI.4.1. Méthode d'exploration de la distribution des données	106
VI.4.2. Analyse statistique descriptive classique	108
VI.4.2.1. Caractéristiques de la distribution des teneurs en un élément	108
VI.4.2.2. Description des relations entre variables quantitatives	108
a. L'analyse factorielle	109
b. La régression linéaire	111
c. La classification	113
VI.4.2.3. Description des relations entre variables qualitatives et variables quantitatives	114
a. L'analyse de variance	114
b. L'analyse discriminante	115
VI.4.2.4. Description des relations entre variables qualitatives	115
VI.5. Représentation et analyse spatiale de l'information géochimique	116

VI.5.1. Représentation spatiale de l'information géochimique	116
VI.5.2. Représentation spatiale du signal géochimique de prospection	117

Chapitre VII: Etude de la précision des données géochimiques de Bou Azzer et méthode de correction

VII.1. Origine et préparation des données	123
VII.1.1. Echantillonnage	123
VII.1.2. Analyses géochimiques	123
VII.1.2.1. Préparation des échantillons	123
VII.1.2.2. Méthode d'analyse géochimique	123
a. Principes de la méthode	123
b. Appareil de mesure	124
VII.1.3. Préparation des données	125
VII.1.3.1. Choix de la maille utilisée	125
VII.1.3.2. Informations tirées de la carte géologique	125
VII.2. Etude de la précision des analyses	125
VII.2.1. Introduction	125
VII.2.2. Distributions statistiques des données témoins	126
VII.2.3. Estimation de la précision à partir des analyses témoins	132
VII.2.3.1. Principe	132
VII.2.3.2. Définition	132
VII.2.4. Evolution de la précision en fonction du niveau de teneur	141
VII.2.5. Evolution de la précision en fonction du temps	142
VII.2.6. Etude des corrélations sur les données témoins	143
VII.2.6.1. Matrices de corrélation	143
a. Résultats	143
b. Interprétation	143
VII.2.6.2. Analyse factorielle sur les données témoins	146
a. Résultats	146
b. Interprétation	146
VII.2.6.3. Conclusion	149
VII.2.7. Evolution du niveau de teneur en fonction du temps	149
VII.2.7.1. Analyse de la relation $C = f(t)$	149
VII.2.7.2. Conclusion	157
VII.2.8. Méthode de correction des analyses géochimiques	157
VII.2.8.1. Principe	157
VII.2.8.2. Méthode	157
a. Régression linéaire sur les teneurs mesurées des analyses témoins	157
b. Correction de la teneur en un élément A d'un échantillon quelconque	158
VII.2.9. Conclusion	160

Chapitre VIII: Analyse statistique des données géochimiques de prospection et sélection de la composante anormale

VIII.1. Introduction	163
VIII.2. Corrections des données géochimiques	163
VIII.3. Analyse exploratoire des données géochimiques de prospection	163
VIII.3.1. Analyse des distributions élémentaires	168
VIII.3.2. Cartographie géochimique	172
VIII.3.2.1. Cartes géochimiques élémentaires.....	172
VIII.3.2.2. Cartes des linéaments géochimiques.....	173
VIII.3.2.3. Compilation des anomalies positives.....	173
VIII.3.3. Conclusion.....	178
VIII.4. Traitement statistique conventionnel des données géochimiques de prospection.....	179
VIII.4.1. Statistiques élémentaires.....	179
VIII.4.2. Cartographie géochimique des teneurs brutes.....	184
VIII.4.3. Etude de l'influence de la lithologie sur les variations des teneurs.....	184

VIII.4.4. Conclusion.....	188
VIII.5. Modélisation de l'influence de la lithologie sur la variation des teneurs.....	189
VIII.5.1. Analyse discriminante.....	189
VIII.5.1.1. Résultats avant rotation.....	189
VIII.5.1.2. Résultats après rotation.....	190
VIII.5.2. Cartes des facteurs scores avant et après rotation.....	192
VIII.6. Sélection du signal géochimique anomal	195
VIII.6.1. Régression factorielle linéaire.....	195
VIII.6.2. Comparaison des composantes de variation des teneurs.....	195
VIII.6.3. Cartes géochimiques des teneurs estimées et des teneurs résiduelles.....	196
VIII.7. Conclusion.....	198

Chapitre IX: CONCLUSION GENERALE	199
--	-----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	205
-----------------------------------	-----

ANNEXES

Annexe 1: Tectonique et volcanisme tardi-panafricains... <i>Journ. African Earth Sci. 10, p. 549-563</i>	223
Annexe 2: Cartes géochimiques mono-élémentaires des classes de teneur distinguées par les "box and whiskers"	241
Annexe 3: Cartes géochimiques mono-élémentaires des teneurs brutes	257
Annexe 4: Cartes des scores des facteurs F_i	267
Annexe 5: Comparaison des différentes composantes de la variation des teneurs	273
Annexe 6: Cartes des teneurs estimées et des teneurs résiduelles	281

LISTE DES FIGURES

première partie

CHAPITRE : I

Figure 1: Localisation de la zone étudiée	27
Figure 2: Situation géographique de l'Anti-Atlas	28
Figure 3: Les domaines structuraux du Maroc	29
Figure 4: Répartition des terrains du Précambrien dans l'Anti-Atlas	30
Figure 5: situation géographique et réseau routier dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara	32
Figure 6: Les ensembles géologiques de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara	34
Figure 7: Situation paléogéographique du Protérozoïque supérieur dans l'Anti-Atlas central, d'après Billaud 1977	36
Figure 8: Schéma paléogéographique de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara au Précambrien II inférieur (d'après A. SAQUAQUE et al., 1989)	36
Figure 9: Schéma géologique du district de Tamdrost-Ambed	37

CHAPITRE : II

Figure 10: Carte de répartition des affleurements de la série PIII et de ses variations d'épaisseur dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara	45
Figure 11: Colonne lithostratigraphique du secteur Tamdrost-Ambed	47
Figure 12: Colonne lithostratigraphique du secteur du Jbel Bou Derga	48
Figure 13: Colonne lithostratigraphique du secteur du Bou Offroh	49
Figure 14: Colonne lithostratigraphique du secteur du Guelb Tassaout	50
Figure 15: Corrélation entre les différentes colonnes lithostratigraphiques établies	51
Figure 16: Classification granulométrique des roches pyroclastiques, d'après R. SCHMID (1981)	56

CHAPITRE : III

Figure 17: Diagramme K ₂ O vs SiO ₂ (d'après PECCERILLO et TAYLOR, 1976)	65
Figure 18: Diagrammes de variation de SiO ₂ , de FeO et de TiO ₂ en fonction de FeO/MgO (A. MIYASHIRO, 1974; A. MIYASHIRO et F. SHIDO, 1975)	66
Figure 19: diagrammes de variation pour les éléments traces, (A. MIYASHIRO ET F. SHIDO, 1975)	67

Deuxième Partie

Figure 20: Schéma structural de l'Anti-Atlas et sa position par rapport à la ceinture panafricaine.....	71
---	----

CHAPITRE : IV

Figure 21: Chronologie et styles de déformation dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara	76
Figure 22: Rosaces des directions de fracturation	77
Figure 23: Schéma structural du district Tamdrost-Ambed	78
Figure 24: Structure distensive en microhorsts et micrograbens, observée à Ambed	79
Figure 25: Projection stéréographique des plans de failles normales de la structure (figure 24)	80
Figure 26: Microstructure distensive en hémigraben, observée à l'ouest d'Ambed	80
Figure 27: Stéréogramme des plans de failles précoces de la structure de la figure 26	81
Figure 28: Structure distensive précoce, observée à l'Est de Tamdrost,	81
Figure 29: Stéréogramme des plan de failles de la structure ci-dessus (figure 28)	82
Figure 30: Hémigraben scellé par l'assise E2, observé dans la zone d'Arouli n'azouguar	82
Figure 31: Le demigraben d'El Marghe, à regard NW, présentant des discordances progressives	83
Figure 32: Reconstitution cinématique du glissement précoce de matériau volcanique	84
Figure 33: Stéréogramme des failles normales précoces, associées à la structure observée au Azib	84
Figure 34: Rosace des directions des dykes de porphyrite andésitique.....	85
Figure 35: Morphologie et mécanisme (interprétatif) de formation des structures précoces en «rouleaux», observées à Arouli n'azouguar	85

CHAPITRE : V

Figure 36: Dièdres droits d'extension (E) et de compression (C)	89
Figure 37: Mécanisme d'un jeu de faille	90
Figure 38: Stéréogramme des plans de failles normales précoces du secteur Tamdrost-Ambed	91

Figure 39: Axes principaux des contraintes correspondant à la distension synvolcanique 91
 Figure 40: Axes principaux des contraintes correspondant aux décrochement-extension sénestre 92
 Figure 41: Schéma interprétatif du lien entre les décrochements-extension sénestres et la distension 93
 Figure 42: Rapports compression-extension, (d'après J. L. MERCIER, 1984) 94
 Figure 43: Modèle interprétatif du coulissement-extension sénestre au P III 95
 Figure 44: Modèle schématique de la situation géotectonique dans le NW africain au PIII 96

Troisième Partie

CHAPITRE : VI

Figure 44 bis: A: Définition graphique des cinq paramètres du "boxplot" définition du seuil d'anomalie.. 107
 Figure 45: Représentation d'un tableau de données 108

CHAPITRE : VII

Figure 46: Représentation schématique des échantillons références et des analyses témoins 126
 Figure 47: Histogrammes et droites d'Henri pour les deux lots de témoins I et K 127
 Figure 48: Histogrammes et droites d'Henri pour les deux lots de témoins I et K (suite) 128
 Figure 49: Histogrammes et droites d'Henri pour les deux lots de témoins I et K (suite) 129
 Figure 50: Histogrammes et droites d'Henri pour les deux lots de témoins I et K (suite) 130
 Figure 51: Histogrammes et droites d'Henri pour les deux lots de témoins I et K (suite) 131
 Figure 52: Diagrammes binaires de la Précision en fonction de la teneur moyenne par lot de témoins 137
 Figure 53: Diagrammes binaires de la Précision en fonction de la teneur moyenne par lot de témoins (suite) 138
 Figure 54: Diagrammes binaires de la Précision en fonction de la teneur moyenne par lot de témoins (suite) 139
 Figure 55: Diagrammes binaires de la Précision en fonction de la teneur moyenne par lot de témoins (suite) 140
 Figure 56: Diagrammes binaires de la Précision en fonction de la teneur moyenne par lot de témoins (suite) 141
 Figure 57: Associations géochimiques déduites de la matrice de corrélation 143
 Figure 58: Analyse en composantes principales sur le groupe de témoins I 147
 Figure 59: Analyse en composantes principales sur le groupe de témoins K 148
 Figure 60: Evolution du niveau de teneur en fonction du temps pour le groupe de témoins I 150
 Figure 61: Evolution du niveau de teneur en fonction du temps pour le groupe de témoins I (suite) 151
 Figure 62: Evolution du niveau de teneur en fonction du temps pour le groupe de témoins I (suite) 152
 Figure 63: Evolution du niveau de teneur en fonction du temps pour le groupe de témoins K 153
 Figure 64: Evolution du niveau de teneur en fonction du temps pour le groupe de témoins K (suite) 154
 Figure 65: Evolution du niveau de teneur en fonction du temps pour le groupe de témoins K (suite) 155
 Figure 66: Régression linéaire sur les teneurs mesurées en un élément "A" des témoins issus d'un même échantillon référence 158

CHAPITRE : VIII

Figure 67: Diagrammes binaires des teneurs mesurées en fonction des teneurs corrigées 164
 Figure 68: Diagrammes binaires des teneurs mesurées en fonction des teneurs corrigées (suite) 165
 Figure 69: Diagrammes binaires des teneurs mesurées en fonction des écarts entre teneurs mesurées et teneurs corrigées 166
 Figure 70: Diagrammes binaires des teneurs mesurées en fonction des écarts entre teneurs mesurées et teneurs corrigées (suite) 167
 Figure 71: Distributions statistiques élémentaires représentées par le "boxplot" de la méthode des "box and whiskers" 169
 Figure 72: Distributions statistiques élémentaires représentées par le "boxplot" de la méthode des "box and whiskers" (suite) 170
 Figure 73: Distributions statistiques élémentaires représentées par le "boxplot" de la méthode des "box and whiskers" (suite) 171
 Figure 74: Symboles utilisés pour la cartographie des classes de teneur définies par les paramètres de Tukey 172
 Figure 75: Carte des linéaments géochimiques 174
 Figure 76: Carte des anomalies géochimiques positives des éléments Cr, Ni et Co 175
 Figure 77: Carte des anomalies géochimiques positives des éléments Pb, Zn et Cu 176
 Figure 78: Carte des anomalies géochimiques positives des éléments As, Sr et Ba 177

Figure 79: Histogrammes et courbes de fréquence cumulée des teneurs brutes, barre pleine: teneurs naturelles; barres vides: logarithme des teneurs. 180
 Figure 80: Histogrammes et courbes de fréquence cumulée des teneurs brutes, barre pleine: teneurs naturelles; barres vides: logarithme des teneurs. (suite) 181
 Figure 81: Histogrammes et courbes de fréquence cumulée des teneurs brutes, barre pleine: teneurs naturelles; barres vides: logarithme des teneurs. (suite) 182
 Figure 82: Associations géochimiques déduites de la matrice de corrélation; r= coefficient de corrélation 179
 Figure 83: Carte synthétique des linéaments géochimiques, compilés à partir des cartes de teneurs brutes. 185
 Figure 84: Analyse en composantes principales sur les médianes des teneurs des entités lithologiques. 188
 Figure 85: Projection des échantillons dans le plan F1-F2 de l'analyse discriminante, avant rotation. 191
 Figure 86: Projection des échantillons dans le plan F1-F2 de l'analyse discriminante, après rotation. 193
 Figure 87: Cartes des facteurs scores de l'analyse discriminant, avant et après rotation. 194
 Figure 88: Cartes géochimiques des teneurs estimées et des teneurs résiduelles, regroupées. 197

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Historique de l'interprétation des terrains Précambriens dans l'Anti-Atlas 31
 Tableau 2: Description sommaire des constituants de la série de Ouarzazate dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara 46
 Tableau 2 bis: Eléments chimiques dosés à Bou Azzer par Spectrométrie d'émission. 124
 Tableau 3: Distribution statistique des analyses témoins en fonction de la matrice. 126
 Tableau 4: Paramètres statistiques élémentaires calculés pour les lots de témoins I1, I2 et I3, (matrice alumino-silicatée). 133
 Tableau 5: Paramètres statistiques élémentaires calculés pour les lots de témoins J1, J2 et J3, (matrice alumino-silicatée). 134
 Tableau 6: Paramètres statistiques élémentaires calculés pour les lots de témoins K1, K2 et K3, (matrice carbonatée). 135
 Tableau 7: Etendue de variation et précision moyenne globale, calculée sur l'ensemble des témoins. 136
 Tableau 8: Matrice de corrélation pour le groupe de témoins I. 144
 Tableau 9: Matrice de corrélation pour le groupe de témoins K. 145
 Tableau 10: Associations géochimiques et taux de variance expliquée par le premier facteur de l'analyse en composantes principales pour les groupes I et K. 146
 Tableau 11: Tendances générales des relations P=f(m) et C=f(t), pour chaque élément. 156
 Tableau 12: Facteur de correction pour chaque élément et pour chacune des deux matrices étudiées I et K. 159
 Tableau 13: Paramètres statistiques de Tukey, calculés par la méthode "box and whiskers" sur l'ensemble des données. 168
 Tableau 14: Paramètres statistiques élémentaires calculés après exclusion des échantillons à teneurs extrêmes (>m+3σ). 183
 Tableau 15: Matrice de corrélation des éléments après transformation logarithmique des teneurs. 183
 Tableau 16: Médianes des teneurs par entité lithologique distinguée sur le terrain. 186
 Tableau 16: (suite) 187
 Tableau 17: Matrice de corrélation entre les facteurs et les variables. 189
 Tableau 18: Coordonnées du barycentre (moyenne) de chaque groupe dans l'espace F1-F2-F3. 190
 Tableau 19: Comparaison de la classification par analyse discriminante avec la classification initiale de terrain. 190
 Tableau 20: Matrice de rotation Varimax. 192
 Tableau 21: Matrice de corrélation entre facteurs et éléments après rotation. 192

INTRODUCTION GENERALE:

La chaîne de l'Anti-Atlas marque la bordure nord-ouest du craton Ouest-africain. Elle résulte de la superposition de phénomènes orogéniques Précambriens et post-Précambriens. Elle s'étend dans le sud du Maroc, sur une longueur de 700 Km depuis l'océan Atlantique, à l'WSW, jusqu'à la Hammada du Guir, à l'ENE, parallèlement à la chaîne alpine du Haut-Atlas.

Le dispositif structural y est caractérisé par la présence d'une couverture faiblement déformée, d'âge Protérozoïque terminal à Paléozoïque supérieur et d'un socle Précambrien à tectonique complexe. Ce socle y affleure sous forme de multiples "boutonniers" antifformes constituées de plusieurs unités d'âge Précambrien.

La boutonnière de Bou Azzer-El Graara, lieu de ce travail, est l'une des plus remarquables de ces boutonnières; située dans l'Anti-Atlas central, elle tient une place clef dans l'histoire des connaissances géologiques et géodynamiques sur l'Anti-Atlas et un rôle économique et minier privilégié, grâce à ses gisements de Co-Ni à Bou Azzer et de Cu à Bleïda.

Les besoins de l'exploitation minière et d'exploration de nouvelles réserves ont favorisé une intense activité de recherches géologiques et minières faisant appel à diverses techniques d'investigation.

C'est dans ce contexte que m'a été confié le présent travail, qui s'articule autour de l'exploitation de données géochimiques de prospection dans une zone de couverture infracambrienne. Le but fixé était l'élaboration d'une méthode de traitement statistique, adaptée à la nature des données géochimiques de surface disponibles, qui pouvait être utilisée comme technique d'investigation d'éventuels gisements.

Le souci d'intégrer les connaissances géologiques, comme moyen de contrôle de l'analyse statistique de l'information géochimique, m'a amené à effectuer un travail géologique préalable de cartographie, lithostratigraphie, pétrographie et tectonique. Les résultats de ce travail géologique m'ont permis, au delà du but initial, de traiter de leurs implications géodynamiques régionales.

Cette démarche se répercute sur l'organisation du présent mémoire, ainsi:

- La première partie est consacrée à l'étude des matériaux rencontrés, avec un chapitre introductif situant le contexte géographique, géologique et minier (chapitre I), suivie d'une présentation de la carte et des coupes géologiques réalisées, et d'une étude lithostratigraphique de la série d'Ouarzazate permettant de proposer une coupe synthétique et des corrélations à l'échelle de la boutonnière (chapitre II). Le chapitre III de cette partie est consacré à l'étude pétrographique de la série d'Ouarzazate, qui a permis son rattachement à un magmatisme calcoalcalin; ce résultat est discuté par rapport au contexte géodynamique régional.

- La deuxième partie concerne l'étude structurale du Précambrien III dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara, avec dans le chapitre IV, l'analyse de la déformation observée et dans le chapitre V, la détermination du paléochamps de contrainte à partir des mesures microtectoniques récoltées sur le terrain. Cette partie aboutit à un modèle de coulissement-extension pendant le Précambrien III.

- La troisième partie est consacrée au traitement statistique des données géochimiques de prospection (13000 analyses de 34 éléments). L'analyse de cette information, en vue de déterminer la composante anormale de variation, est effectuée en élaborant une méthodologie adaptée à la nature des données lithogéochimiques de surface.

Des généralités sur l'histoire et les techniques statistiques de traitement des données géochimiques de prospection sont exposées dans le chapitre VI.

Une analyse critique de la qualité (précision) des données disponibles (chapitre VII), abouti à l'élaboration d'une méthode de correction visant l'élimination de la part de variation due aux erreurs analytiques. Ces corrections et leur impact sont discutés au début du chapitre VIII.

Une première étape du traitement statistique de l'information géochimique (chapitre VIII) est abordée par la technique non conventionnelle des "box and whiskers". Elle abouti à une description

rapide de la structure des données, élément par élément. Les notions de tendance centrale ("box") et de seuil anomal ("thresholds") que prête cette technique ont permis l'élaboration des cartes de variation géochimique mono-élémentaire et la détermination de zones anormales positives préliminaires.

Une deuxième étape est effectuée à l'aide des méthodes statistiques classiques. L'influence du facteur lithologique sur la variation des teneurs est étudiée par analyse factorielle sur les médianes des teneurs des 32 entités géologiques distinguées sur le terrain, qui seront ensuite réparties en 4 groupes lithologiques.

Une analyse discriminante est alors effectuée sur l'ensemble des données mais en tenant compte des 4 groupes lithologiques définis par l'analyse en composantes principales sur les médianes, dans le but d'extraire le modèle factoriel qui explique au mieux les variations de teneur liées à la lithologie. Les teneurs sont ensuite corrigées par régression factorielle.

La cartographie géochimique des teneurs estimées et des teneurs résiduelles permet alors de repérer la composante anormale du signal géochimique débarrassée de l'erreur analytique et de l'influence de la lithologie. Ces anomalies sont comparées avec celles obtenues par les "box and whiskers", ces résultats sont compilés sur une carte de synthèse pour les éléments les plus importants en prospection.

La conclusion générale retrace les principaux résultats et les discute dans le contexte géodynamique et minier régional.

Première Partie

Géologie du Précambrien III

dans la boutonnière de Bou Azzer - El Graara

Chapitre I :

Introduction

I.1. Contexte général	27
I.1.1. Cadre géographique	28
I.1.2. Cadre géologique et structural	28
I.1.2.1. Lignes structurales du Maroc	28
I.1.2.2. Situation structurale de l'Anti-Atlas	29
I.1.2.3. Evolution des idées sur la géologie de l'Anti-Atlas	30
I.2. Contexte local	32
I.2.1. Cadre géographique	32
a. Réseau routier	33
b. Climat et réseau hydrographique	33
c. Morphologie	33
I.2.2. Cadre géologique	33
I.2.2.1. La boutonnière de Bou Azzer - El Graara dans l'Anti-Atlas	33
A. Repères géochronologiques	35
B. Situation paléogéographique	35
I.2.2.2. Situation géologique locale	37
A. Le socle	37
B. La couverture	38
I.2.3. Cadre minier	38
I.2.3.1. Historique	38
I.2.3.2. Le district de Bou Azzer	38
a. Travaux géologiques	38
b. Activité minière	39
I.2.3.3. Le district de Bleida	39
a. Travaux géologiques	39
b. Activité minière	39

Première partie

**GEOLOGIE DU PRECAMBRIEN III DANS LA BOUTONNIERE
DE BOU AZZER-EL GRAARA**

Chapitre I: INTRODUCTION.

I.1. CONTEXTE GENERAL:

Situé à l'extrémité occidentale de l'Afrique du Nord, le Maroc forme l'avant-pays du craton Ouest-africain. Toutes les époques géologiques y sont représentées, depuis les terrains récents de la région rifaine au Nord, jusqu'aux formations du Précambrien ancien de la chaîne anti-atlasique. C'est dans cette dernière région que se situe la boutonnière de Bou Azzer El Graara (figure 1), dans laquelle a été réalisé ce travail.

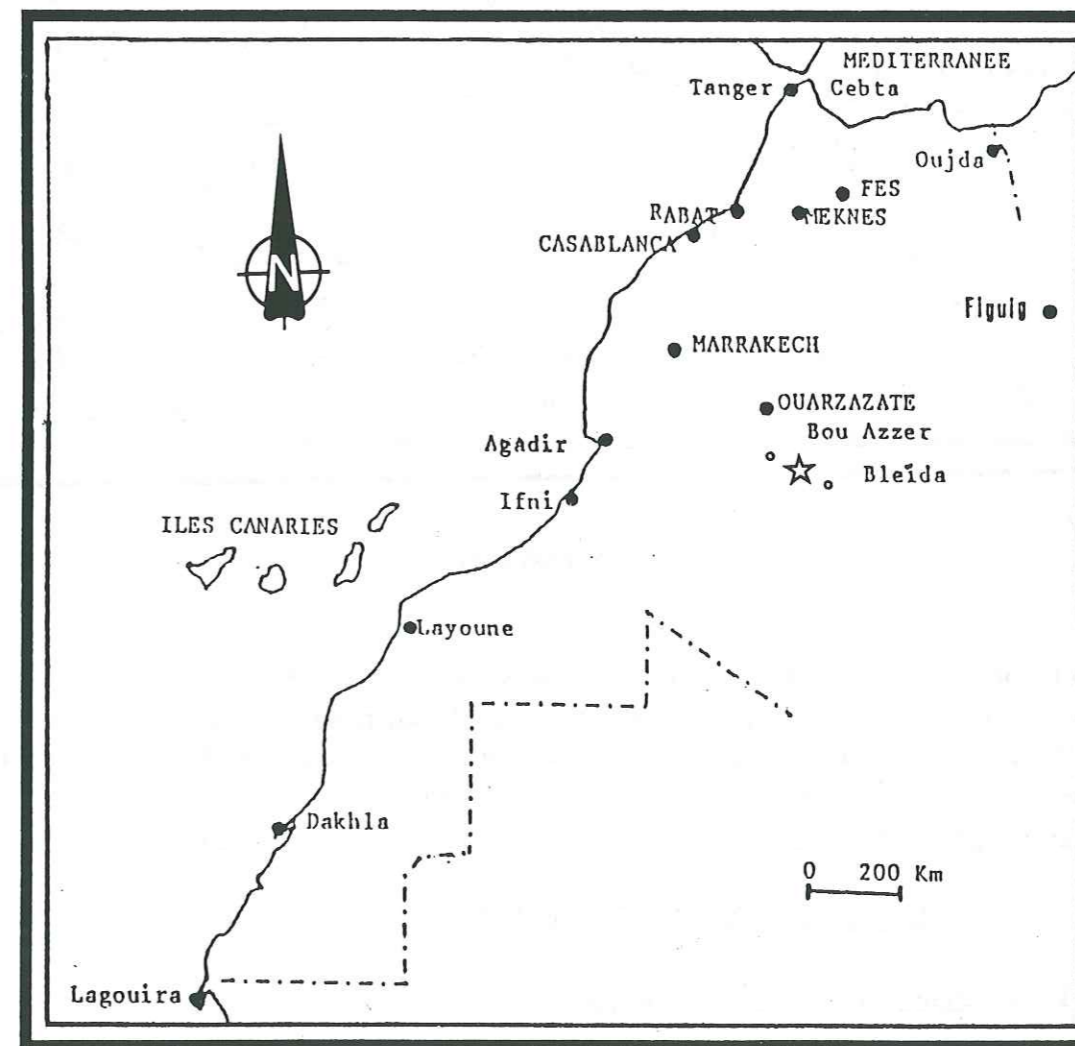


Figure 1: Localisation de la zone étudiée.

I.1.1. CADRE GEOGRAPHIQUE:

L'Anti-Atlas (figure 2) est une chaîne qui s'étend du pied du Haut-Atlas aux premières falaises des Hammadas du Draa; ce domaine est limité à l'Est par les Hammadas du Guir et de Kem-Kem, et à l'Ouest par l'océan Atlantique. Le Jbel Siroua, massif volcanique récent plio-quadernaire qui atteint 3300m d'altitude est le plus haut sommet de la chaîne.

Deux unités orographiques s'y distinguent: d'une part un coeur formé essentiellement des termes résistants du Précambrien qui constitue un relief continu culminant entre 2500 et 2700 m; d'autre part l'enveloppe paléozoïque caractérisée par un relief de type appalachien qui s'explique par une résistance différentielle des matériaux constitutifs (calcaires, grès, quartzites, schistes...) aux différents cycles d'érosion.

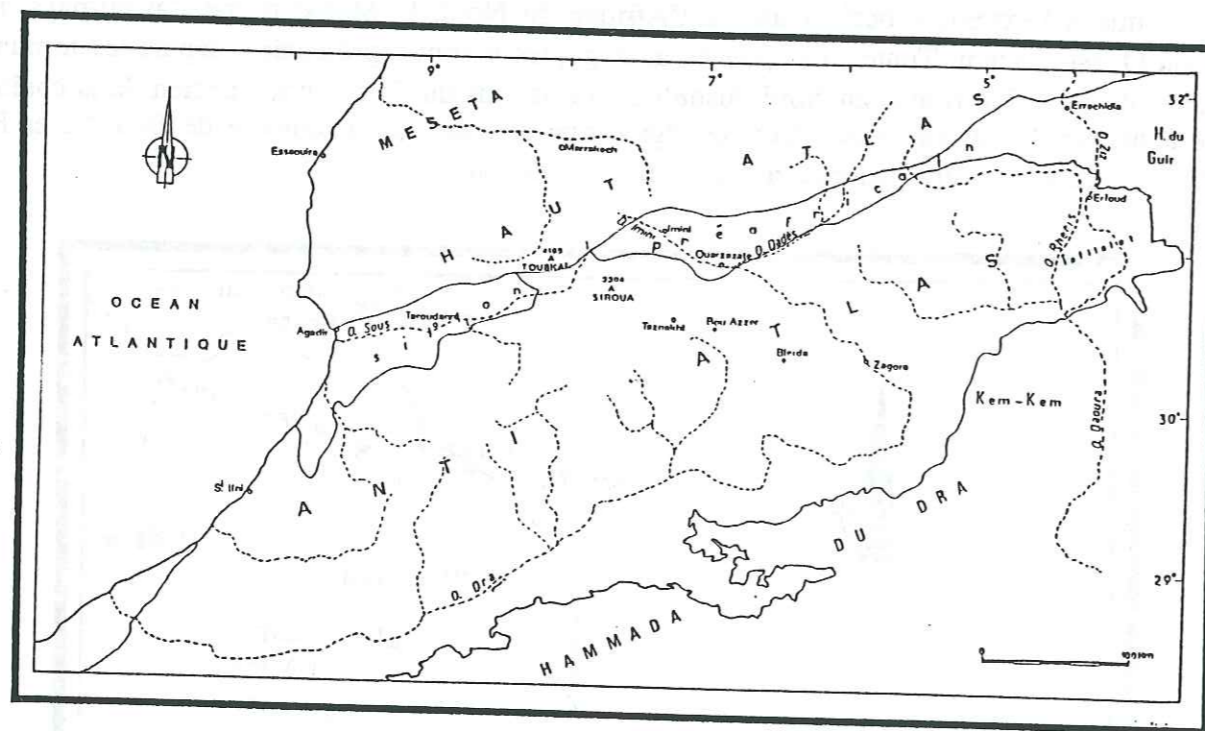


Figure 2: Situation géographique de l'Anti-Atlas.

Du point de vue hydrographique (figure 2), les oueds les plus importants de l'Anti-Atlas prennent leurs sources dans le Haut-Atlas: Le Draa, résultat de la confluence du Dadès et de l'Imini, et le Sous qui retrace partiellement la limite entre le Haut-Atlas au nord et l'Anti-Atlas au sud, ont un régime exoréique et aboutissent dans l'Atlantique. Le Ziz et le Rhéris convergent dans la Daoura de régime endoréique qui se perd au Nord de l'erg Ignidi.

I.1.2. CADRE GEOLOGIQUE ET STRUCTURAL:

I.1.2.1. Lignes structurales du Maroc:

Trois grandes unités structurales (figure 3) sont distinguées au Maroc (G. CHOUBERT et J. MARCAIS, 1956), on cite du sud au nord:

a) Le domaine de l'Anti-Atlas, essentiellement composé d'un substratum précambrien et d'une couverture paléozoïque peu affectée par les orogénèses hercynienne et atlasique.

b) Le domaine Atlasique (ou domaine hercynien) est constitué de trois unités structurales majeures: la Méséta, l'ensemble Jbilet, Moyen-Atlas, Maroc oriental, et la chaîne du Haut-Atlas, ce domaine présente des traits communs avec l'Anti-Atlas dans ses constituants paléozoïques.

c) Le domaine Rifain, paléogéographiquement marin jusqu'à la fin du tertiaire (A. MICHARD, 1976), présente un style tectonique alpin, il est formé de terrains charriés du Nord vers le Sud sur un autochtone atlasique.

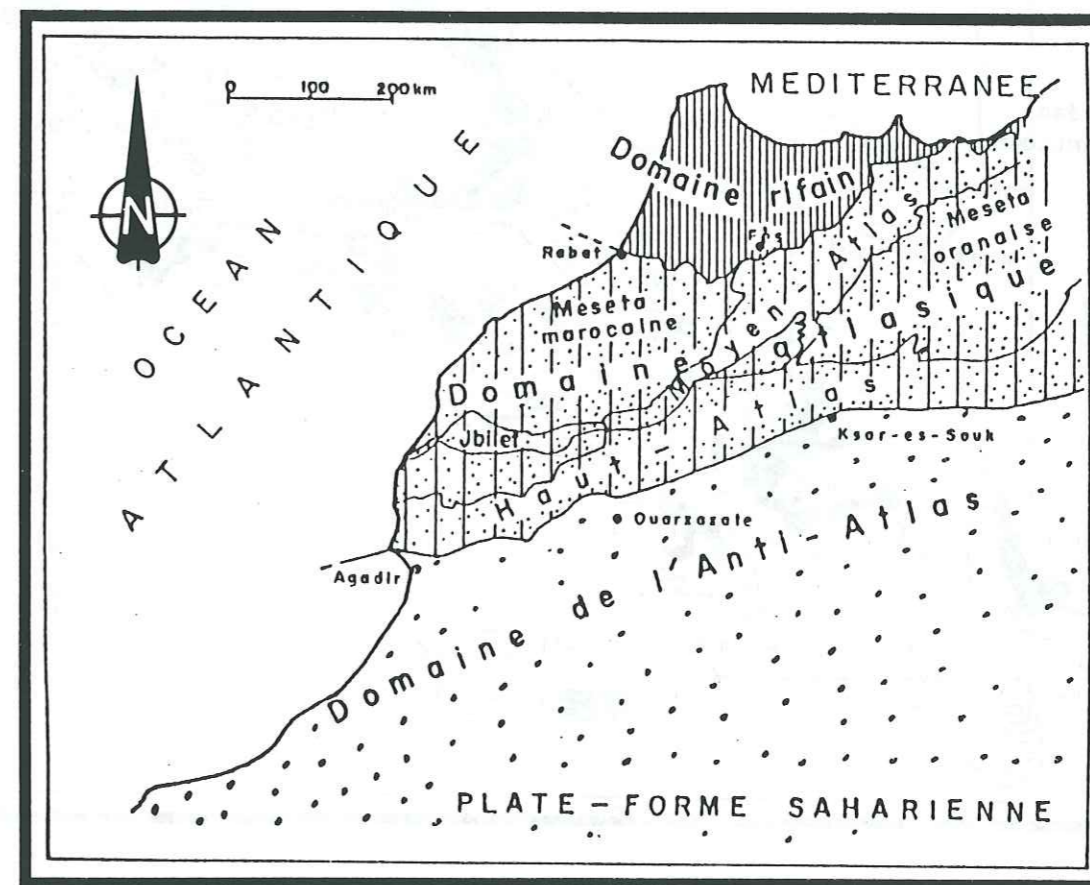


Figure 3: Les domaines structuraux du Maroc, d'après G. CHOUBERT et J. MARCAIS (1956); A. MICHARD (1976).

Ces trois domaines sont séparés par des couloirs d'accidents tectoniques importants, ainsi entre le domaine de l'Anti-Atlas et le domaine Atlasique, s'allonge le sillon préafricain, bordé au nord par l'accident sud-atlasique (P. et L. RUSSO 1934, R. LAFFITE 1939). Entre le domaine atlasique et le domaine rifain s'allonge le couloir sud-rifain bordé au Nord par le front de la nappe pré-rifaine.

Les trois domaines structuraux sont l'oeuvre de trois grands cycles orogéniques au niveau de la marge septentrionale du craton Ouest africain qui ont abouti à l'accroissement du continent africain vers le Nord, à savoir les orogénèses panafricaine, hercynienne et alpine.

I.1.2.2. Situation structurale de l'Anti-Atlas:

Séparé du Haut-Atlas par l'accident sud-atlasique qui traverse le Maroc d'Agadir à Figuig dans une direction ENE-WSW (figure 4), l'Anti-Atlas est bordé au Nord par le sillon préafricain constitué par les plaines du Sous et d'Ouarzazate. Ce sillon est interrompu par le massif de

Siroua.

L'ossature de la chaîne anti-atlasique formée par des massifs précambriens, affleure sous forme de coeurs de boutonnières alignées dans une direction générale NE-SW (figure 4), ces massifs sont enveloppés par des formations sédimentaires infracambriennes à paléozoïques.

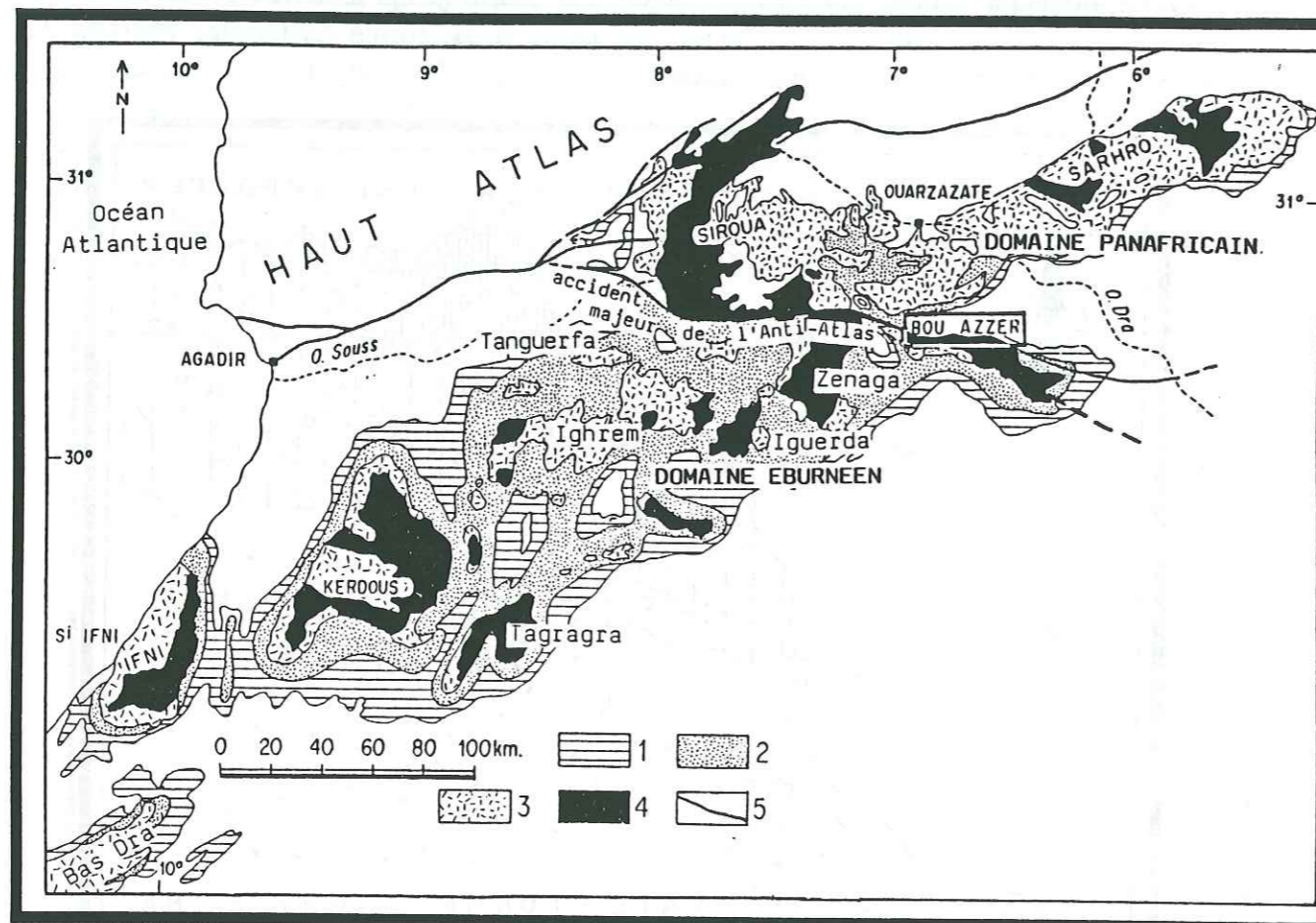


Figure 4: Répartition des terrains du Précambrien dans l'Anti-Atlas, d'après G. CHOUBERT (1963) et F. BENZIANE et al. (1983). 1: cambrien inférieur fossilifère; 2: série à dominante sédimentaire (Adoudounien); 3: série à dominante volcanique (PIII); 4: Protérozoïque; 5: accidents tectoniques majeurs.

La chaîne de l'Anti-Atlas est traversée par l'accident majeur de l'Anti-Atlas (G. CHOUBERT, 1963) qui sépare deux unités structurales importantes (M. LEBLANC, 1972, 1975, 1976, 1981):

- La bordure du craton ouest-africain au S-W, daté à 2000 Ma (R. CHARLOT, 1978).
- La zone Pan-Africaine au N-E, liée à l'orogénèse Pan-Africaine dont la phase majeure est datée à 685 Ma (N. CLAUER, 1976).

Cet ensemble à cheval sur deux domaines différents (Panafricain et Eburnéen), est donc plus récent comme unité structurale, il a été soulevé par l'orogénèse hercynienne puis exhaussé par les phases de mouvements alpins.

1.1.2.3. Evolution des idées sur la géologie de l'Anti-Atlas:

Pour la lecture de ce paragraphe on se reportera au tableau 1. L. NELTNER (1936) propose à la suite de sa découverte de la double discordance du Tizi-n-Tarhatine, la subdivision des formations géologiques de l'Anti-Atlas en Archéen, Algonkien et Cambrien.

NELTNER (1938)	G. CHOUBERT (1974-1983)		M. LEBLANC (1975-1980)		Age (M.a.)	
	Stratigraphie	Formations	Stratigraphie	Formations		Orogenèses
Géorgien	Georgien	série d'Ouarzazate	I.C. inf. ou P. III	série d'Ouarzazate	Pan-africain tardif (B 2)	600
	Adoudounien					
Algonkien	P. II ³	Granite du Sroua-Sarhro	P. II sup.	series de Tiddiline, d'Anzi et d'Ambed	Pan-africain (B I)	680
		serie des Calcaires et Quartzites		serie des Calcaires et Quartzites		
		serie d'El Graara		Ophiolites		
Archéen	P. I	Granites de Tazenakht, d'Azguimerzi, et de Tazeroual	P. I	Granite d'Azguimerzi et Gneiss d'Assemliil	Eburnéen	1750 1900
		Gneiss d'Assemliil		P. 0 ?		

Tableau 1: Historique de l'interprétation des terrains Précambriens dans l'Anti-Atlas (les âges sont donnés en Ma).

Une stratigraphie détaillée du Précambrien de l'Anti-Atlas a été établie par G. CHOUBERT, cet auteur propose en 1945 une classification en Précambrien 0, I, II, III et en Adoudounien, puis en 1970, ces étages précambriens sont subdivisés en unités ayant été affectées à des orogènes différents. Les âges des différentes orogènes proposés par cet auteur sont fondés:

1) sur la paléontologie: tout ce qui était sous-jacent aux couches à Trilobites devait être Précambrien. Or le Tommotien était à l'époque inconnu -au moins en Afrique- et a duré environ 30 Ma.

2) sur des âges radiométriques sur minéraux qui donnaient en fait des âges "trop jeunes" donc "rajeunis" notamment par le phénomène varisque.

3) sur l'épaisseur des séries.

4) par comparaison avec les orogènes connues alors dans le monde.

En 1974 G. CHOUBERT abandonne la notion de P0 estimant qu'il n'existe pas de critères pour subdiviser le socle ancien en P0 et P1, seule la notion de P1 subsiste donc, en 1983 G. CHOUBERT et al. maintiennent cette classification tout en excluant l'existence d'une chaîne Pan-Africaine plissée dans l'Anti-Atlas.

M. LEBLANC (1973-1975) grâce à la découverte de structures hercyniennes et de phases tectoniques précambriennes, a démontré la validité d'hypothèses antérieures sur la présence d'un complexe ophiolitique dans la boutonnière (A. MARQUELET et P. ROUTHIER, 1962). Il a aussi établi l'appartenance de ce complexe au cycle Pan-Africain (P II) qu'il a défini. On doit à cet auteur la classification la plus récente des terrains précambriens de l'Anti-Atlas. La figure 4, représente la répartition géographique des grands ensembles géologiques dans l'Anti-Atlas.

I.2. CONTEXTE LOCAL:

I.2.1. CADRE GEOGRAPHIQUE:

Le terrain étudié (Tamdrost-Ambed) fait partie de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara (figure 5) à 100 km au sud de la ville d'Ouarzazate.

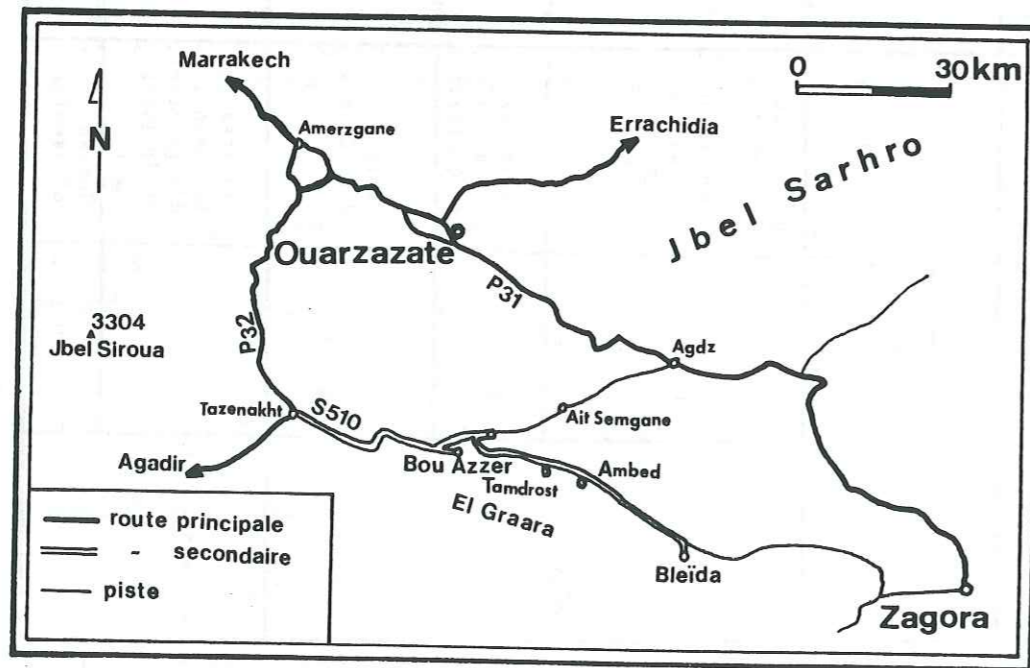


Figure 5: situation géographique et réseau routier dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara.

a) Réseau routier:

Ce secteur est traversé par la route secondaire qui relie les mines de Bou Azzer à l'ouest et de Bleïda à l'est. Cette région est reliée à Marrakech (270 km) par la route principale P31 qui passe par le col du Tichka et se ramifie au niveau du village d'Amerzggane par la route principale P32, reliant la région à Agadir, le port le plus proche sur l'Atlantique. La boutonnière est longée par la route secondaire S510 qui part de Taznakht et qui est relayée à Bleïda par la piste qui mène à Zagora (70 km plus à l'Est, figure 5).

b) Climat et réseau hydrographique:

Le climat est de type continental aride avec une pluviométrie annuelle de 100 à 200 mm et des températures moyennes allant de +5°C en hiver à +40 °C en été. Le réseau hydrographique de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara est de type tarissable, coule vers le sud et fait partie du système de l'oued Draa.

c) Morphologie:

A l'échelle de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara, le relief est représenté par des monts de hauteur moyenne dont les sommets culminent entre 1400 et 1730 m avec des dénivelées de 200 à 400 m.

I.2.2. CADRE GEOLOGIQUE:

I.2.2.1. La boutonnière de Bou-Azzer-El Graara dans l'Anti-Atlas:

Cette boutonnière jalonne l'accident majeur de l'Anti-Atlas (figures 4) d'âge précambrien et de direction NW-SE. Le socle précambrien de cette boutonnière comprend quatre ensembles principaux (figure 6):

- Un ensemble de terrains métamorphiques (gneiss, amphibolites, schistes, granites) cratonisé à 2000 Ma environ (orogène Eburnéenne).
- Un complexe ophiolitique (s. l.) qui affleure dans l'axe de la boutonnière composé des formations suivantes:

- des roches ultrabasiques serpentinesuses,
- des roches gabbroïques (gabbros et épidiorites stratiformes) associées aux serpentines,
- un ensemble volcanosédimentaire (diabases, spilites, kératophyres) qui surmonte les gabbros,
- des diorites quartziques intrusives dans le complexe ophiolitique.

- Une série de plateforme (Bléïda-Tachdamt) composée de calcaires, de quartzites, de grauweekes et de schistes.

- Les ensembles précédents sont surmontés suivant le secteur considéré:

- soit par la formation de Tiddiline de type molassique qui correspond à l'accumulation locale des produits d'érosion des formations précédentes.
- soit par la formation d'Ambed qui serait une carapace d'altération météorique sur les serpentines (M. LEBLANC, 1974).

La couverture infracambrienne repose en discordance sur le socle précédent. Elle comprend à sa base une puissante série volcanodétritique (formation d'Ouarzazate). Très

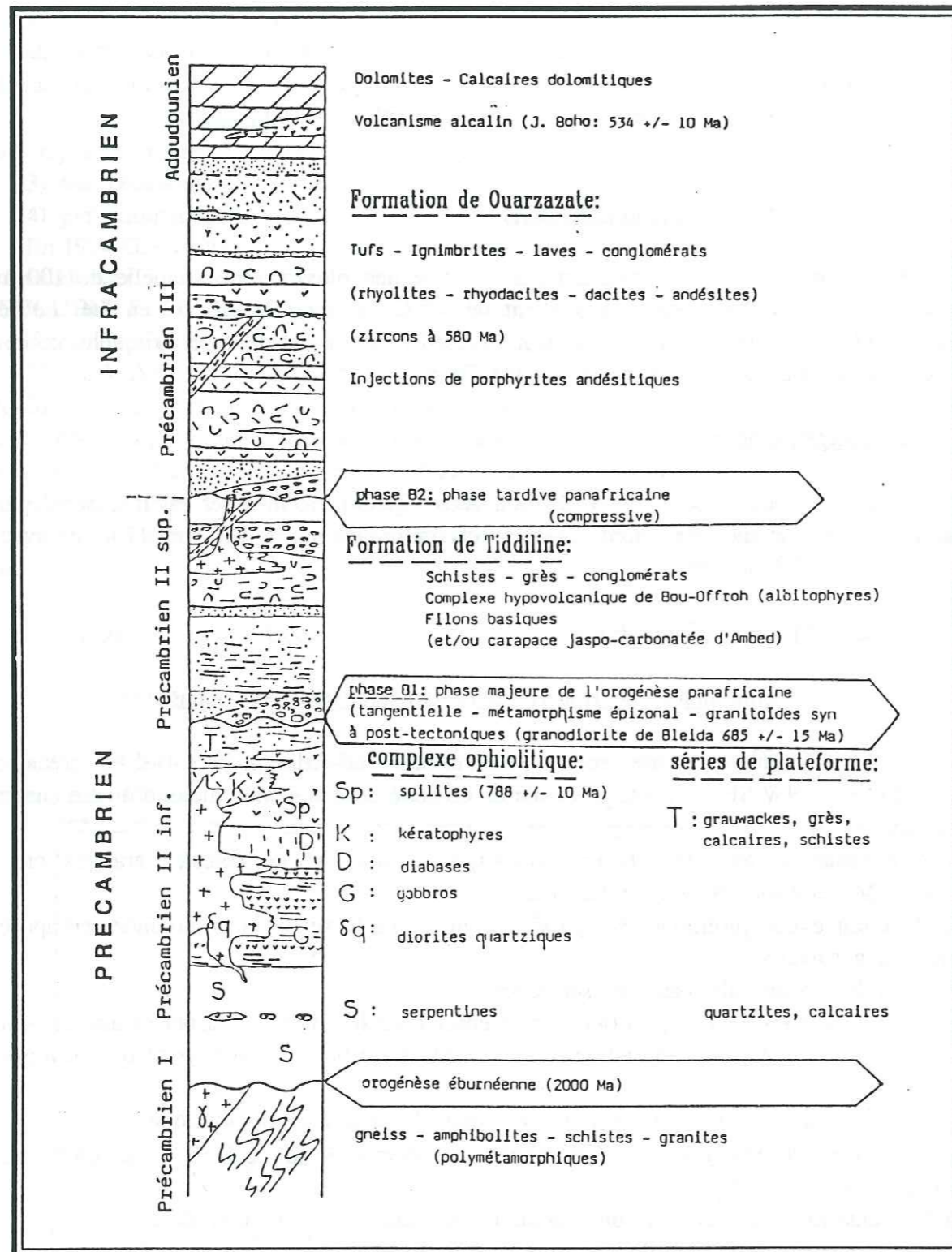


Figure 6: Les ensembles géologiques de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara.

développée dans l'Anti-Atlas, cette série porte des minéralisations en manganèse.

Ensuite vient l'Adoudounien, séparé de la formation d'Ouazzazate par une discordance (interprétée comme une discordance de ravinement par M. LEBLANC, 1974). Il est constitué de calcaires dolomitiques, de grès et pélites avec des intercalations volcaniques en trachytes et andésites à rattacher au volcan du Jbel Boho (M. LEBLANC, 1973c; 1975; M. LEBLANC et J.R. LANCELOT, 1980). Les calcaires dolomitiques inférieures comportent un niveau riche en indices de cuivre (M.R. AZIZI SAMIR, 1983).

A) Repères géochronologiques:

Les âges radiométriques obtenus dans le secteur étudié datent les événements suivants:

(a) l'âge du métamorphisme de contact lié à la mise en place des dykes basiques du complexe ophiolitique (M. LEBLANC, 1973b), est de l'ordre de 787 +/- 10 Ma (Rb-Sr, N. CLAUER, 1974, 1976). Cet âge daterait l'ouverture océanique pan africaine (M. LEBLANC, 1981).

(b) l'âge de 685 +/- 15 Ma (Rb-Sr, N. CLAUER, 1976), date le métamorphisme lié à la phase majeure B1.

(c) l'âge de 615 +/- 12 Ma (U-Pb sur zircon, J. DUCROT et J.R. LANCELOT, 1978), a été obtenu sur la granodiorite de Bleïda considérée post-tectonique par M. LEBLANC (1975) et P. BILLAUD (1977), mais syn à tardi-tectonique par A. SAQUAQUE et al. (1989).

(d) l'âge de 608 +/- 7 Ma (Rb-Sr, N. CLAUER et M. LEBLANC, 1975), obtenu sur les séricitoschistes de Bleïda, daterait la phase tardive B2 à Bleïda (N. CLAUER, 1976). Il permet de dater indirectement la formation de Tiddiline affectée par la phase B2.

(e) la formation de Ouazzazate a livré des âges (U-Pb sur zircon), qui s'échelonnent entre 580 +/- 12 Ma à la base et 563 +/- 10 Ma au sommet (A. JUERY et al. 1974; J. DUCROT et J.R. LANCELOT, 1978; A. MIFDAL et J. PEUCAT, 1985).

(f) l'âge de 534 +/- 10 Ma (U-Pb sur zircon a été obtenu (J. DUCROT et al., 1976; 1977), sur la syénite du Jbel Boho auquel seraient associées les volcanites interstratifiées dans les dolomies inférieures de l'Adoudounien.

Des âges Rb-Sr plus jeunes obtenus sur le PIII et sur l'Adoudounien, successivement: 320 +/- 10 Ma (A. JUERY et al., 1974) et 311 +/- 5 Ma (R. CHARLOT, 1978), traduisent l'influence de l'orogénèse hercynienne.

B) Situation paléogéographique:

Les rapports entre les différentes formations de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara ont permis à M. LEBLANC (1975) puis à P. BILLAUD (1977) d'envisager le modèle paléogéographique suivant (figure 7):

Sur le craton Ouest-africain se sont déposés des calcaires à stromatolites, des quartzites et des pélites, ce qui correspond à une sédimentation épicontinentale. Plus au Nord s'est constitué un bassin océanique, lors d'une phase de distension générale, avec mise en place d'ophiolites donnant en particulier en surface des laves basiques et des roches effusives de type spillites et kératophyres.

La zone intermédiaire est un domaine de plateforme à sédimentation détritique fine (pélites) et à épanchements volcaniques surmontés de jaspes et de calcaires. A ce volcanisme basique succède, dans la zone intermédiaire, une série de laves et de tufs kératophyriques.

Une dernière phase de sédimentation essentiellement détritique s'accumule sur la marge continentale; enfin, des diorites quartziques (non représentées sur la figure 7, mais visibles sur la Figure 6) se mettent en place à la limite entre le bassin océanique et la marge continentale.

La continuité de faciès entre la bordure continentale et le bassin a été effacée lors de la phase de déformation B1 de l'orogénèse pan-africaine. Celle-ci a d'autre part provoqué l'obduction de la croûte océanique (série ophiolitique) sur la bordure du craton.

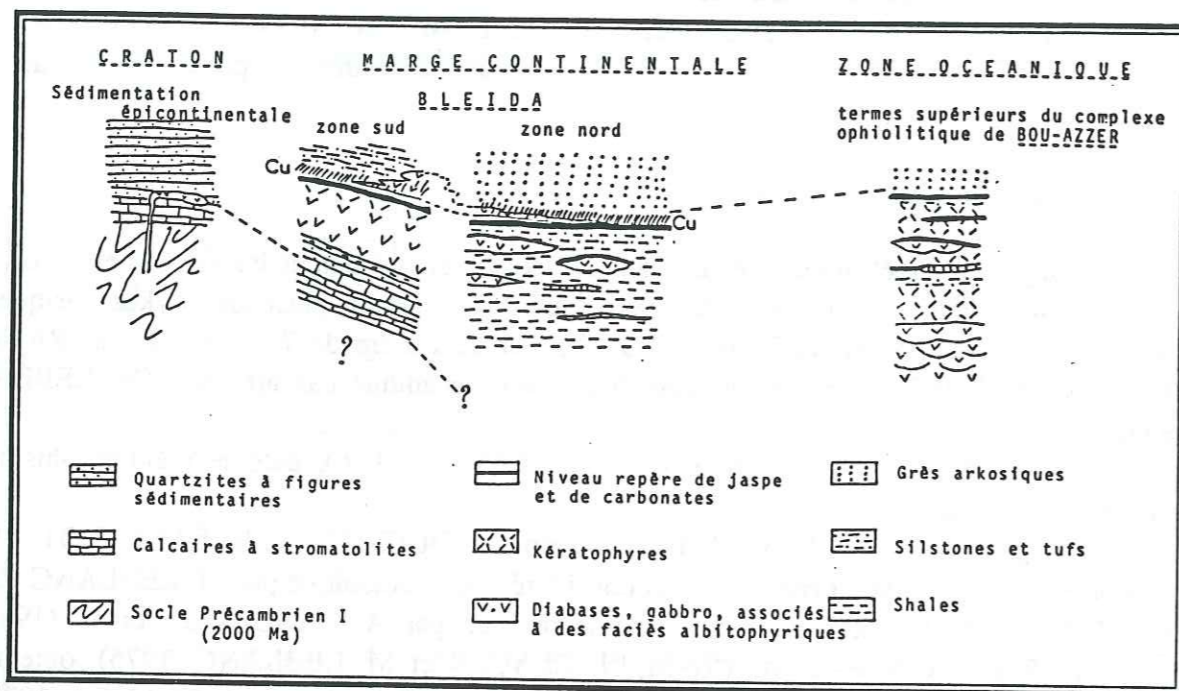


Figure 7: Situation paléogéographique du Protérozoïque supérieur dans l'Anti-Atlas central, d'après P. BILLAUD (1977).

Des travaux récents dans la région ont abouti à une situation paléogéodynamique légèrement différente: Les termes 3 et 4 du complexe ophiolitique (séries volcanosédimentaires et plutons intermédiaires) seront liés au développement d'un arc (figure 8) se juxtaposant à une croûte océanique subductée vers le Nord (A. SAQUAQUE et al. 1989).

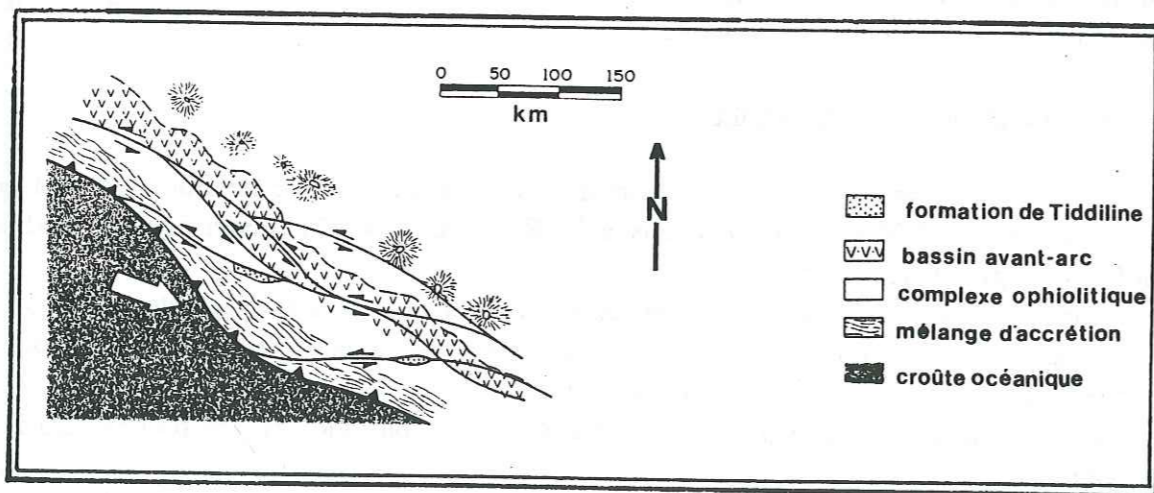


Figure 8: Schéma paléogéographique de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara au Précambrien II inférieur (d'après A. SAQUAQUE et al., 1989).

I.2.2.2. Situation géologique locale:

Le secteur de Tamdrost-Ambed est situé à 13 km à l'Est de la mine de Bou Azzer. Il est compris entre deux massifs de serpentines: Oumlil à l'Ouest et Irhitem à l'Est (figure 9). Dans ce secteuraffleure aussi le socle précambrien I et II, surmonté par la formation volcanogène d'Ouarzazate qui domine à l'affleurement.

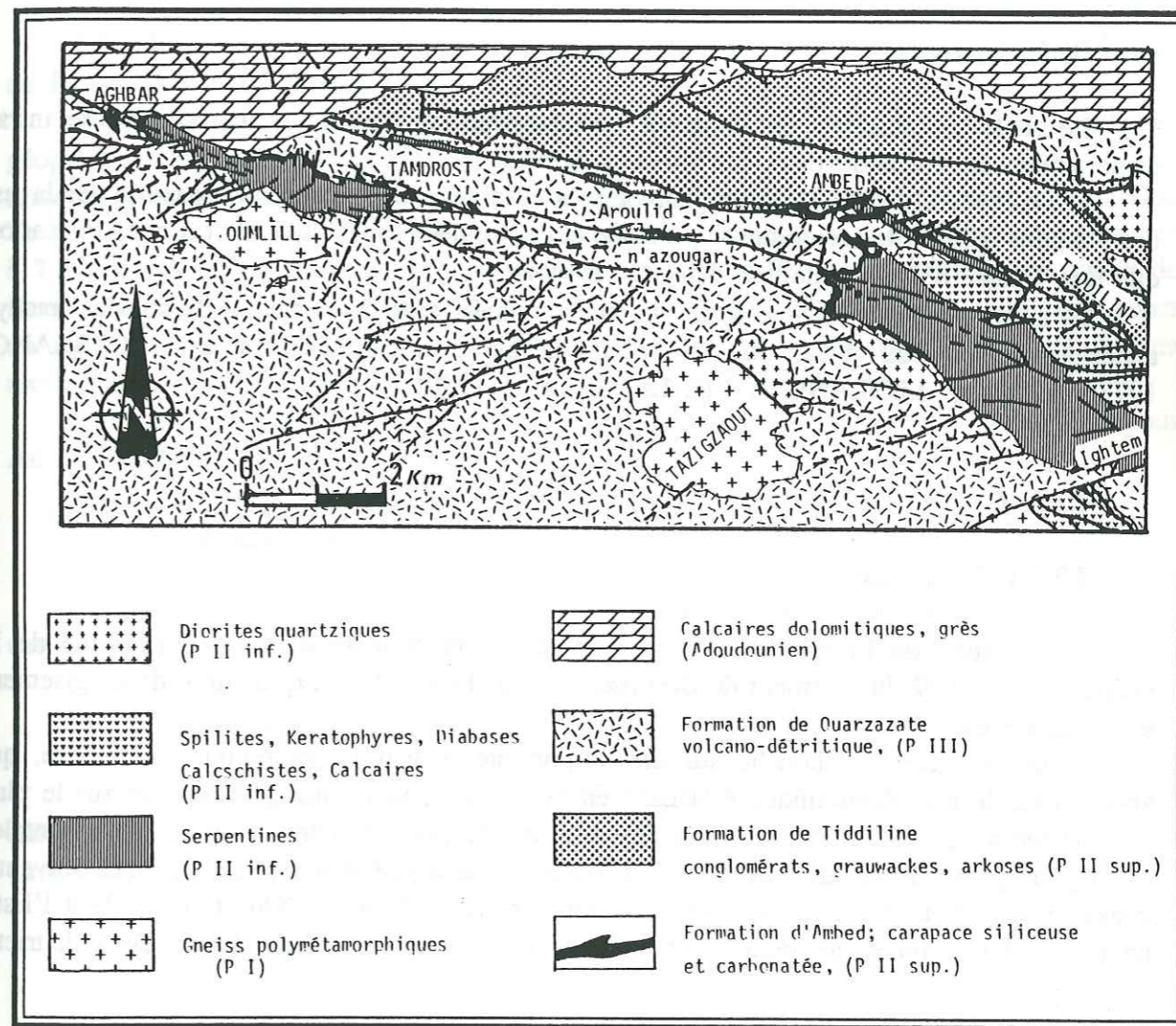


Figure 9: Schéma géologique du district de Tamdrost-Ambed.

A) Le socle:

Dans l'ordre stratigraphique établi par M. LEBLANC (1975) on rencontre: Un socle ancien ou P.I, représenté par des gneiss ocellés, qui affleurent dans deux fenêtres au Sud du district, à Oumlil et à Tazigzaout.

Un socle plus récent ou P.II qui comprend l'extrémité Ouest du massif de serpentine d'Ambed-Irhitem prolongé vers l'Ouest par une bande étroite de roches vertes.

Associé aux serpentines et roches vertes de la zone d'Ambed on trouve un massif de diorite en contact tectonique avec celles-ci.

Les roches vertes comprennent des chloritoschistes, qui ont conservé des reliques de texture spilitique et amygdalaire; on y trouve aussi des gabbros et diabases déformés.

Quant aux serpentines, elles proviennent de la transformation de péridotites, elles sont talcifiées et carbonatées sur leurs épontes (M. LEBLANC, 1975).

Ces roches vertes sont surmontées par la formation d'Ambed de nature jaspo-carbonatée qui est attribuée au P II supérieur.

B) La couverture:

Le socle précambrien est surmonté en discordance majeure par une couverture infracambrienne constituée de deux membres principaux:

a) Le Précambrien III, volcanogène, appelé aussi série d'Ouarzazate, comporte des laves, des tufs, des ignimbrites de composition acide et des coulées andésitiques (c'est cette formation qui fera l'objet d'étude détaillée dans ce mémoire).

b) L'Adoudounien est une série gréso-carbonatée, avec intercalation de coulées trachy-andésitiques issues du volcan du Jbel Boho situé au sud de la boutonnière (M. LEBLANC, 1973c; 1975; M. LEBLANC et J.R. LANCELOT, 1980).

I.2.3. CADRE MINIER:

I.2.3.1. Historique:

L'utilisation de l'erythrine comme raticide par la population, a été à l'origine de la découverte en 1927 du gisement de Bou-Azzer par J. EPINAT. L'exploitation de ce gisement est entamée en 1933.

Cette découverte débouche sur une importante recherche géologique et minière, qui aboutira sur le plan économique à la mise en évidence de nouveaux gisements et sur le plan scientifique à des découvertes de première importance pour les connaissances fondamentales de la géologie et de la structure de l'Anti-Atlas. Nous allons dans les paragraphes suivants, consacrés aux deux pôles miniers de la boutonnière (Bou Azzer à l'Ouest et Bleïda à l'Est), un rappel des activités géologiques et minières à l'échelle de chacun de ces deux districts.

I.2.3.2. Le district de Bou Azzer:

a) Travaux géologiques:

De 1938 à 1963, G. JOURAVSKY a été à l'origine d'une importante étude minéralogique et gîtologique; on lui doit la découverte de nombreux minéraux, la classification des gisements en bordure des serpentines et la reconnaissance de leur position préférentielle à l'intersection des accidents transverses. R. GOLOUBINOW (1956) dirigeant la première campagne de géochimie sur Bou Azzer a mis en évidence le lessivage du cobalt dans les serpentines au voisinage des gisements.

Des données importantes ont été apportées par les travaux du B.R.G.M. (1962), de M. CLAVEL (1970-1971) et surtout par les campagnes de la mission soviétique Techno-Export (1971 puis 1980).

Néanmoins les hypothèses sur la genèse des gisements de cobalt qui impliquent toutes que les serpentines soient la roche mère du cobalt et du nickel, divergent quant au processus

de concentration de ces métaux. En effet, G. JOURAVSKY (1949) et J. BOULADON (1963), évoquent des solutions hydrothermales hercyniennes, tandis que pour G.A. KROUTOV (1969-1970) ces solutions seraient liées au volcanisme infracambrien inférieur (PIII).

D'autre part M. LEBLANC et al. (1970) proposent une origine sédimentaire du matériel de la gangue et envisagent la préconcentration de Co et As à partir des serpentines lors d'une phase d'altération météorique à la fin du Précambrien II.

b) Activité minière:

L'exploitation des gisements de cobalt fut commencée en 1933 par la Société Minière de Bou Azzer et du Graara (S.M.A.G.).

Afin de repérer les massifs de serpentine sous la couverture volcanique PIII, des méthodes géophysiques ont été utilisées en 1956-1957 puis reprises en 1961-1963. Les problèmes d'épuisement des réserves ont été à l'origine de l'organisation d'une campagne de prospection (mission Techno-Export, 1969-1971), qui aboutira à la mise en évidence d'une minéralisation cachée à Tamdrost, sous plus de 150 m de couverture volcanique PIII. L'exploitation du cobalt de Bou Azzer a cependant été suspendue en 1983 à cause de problèmes de réserves et de cours du métal. Le district de Bou Azzer a produit 2000000 tonnes de minerai dont les teneurs moyennes à l'exploitation sont de 1.2% pour Co et 0.15% pour Ni.

Les teneurs pour Au et Ag sont irrégulières, 1 à 15 g/t de minerai toutvenant pour Au (M. LEBLANC, 1975).

I.2.3.3. Le district de Bleïda:

Ce district a connu une intense exploitation minière du cuivre qui remonte au XIe siècle; des traces de travaux en témoignent et confirment les écrits de ELBEKRI (1094) à ce propos.

a) Travaux géologiques:

Les premières études géologiques ont été réalisées par M. SAADI (1973), puis par M. LEBLANC (1973 à 1976) qui a analysé le contexte géologique régional du district. Une étude structurale de cette zone a été ensuite effectuée par P. BILLAUD (1977).

b) Activité minière:

La première campagne de reconnaissance a été entamée en 1962 par la société canadienne Northfield et l'O.N.A. (Omnium Nord Africain), elle a abouti à la localisation des zones minéralisées de la partie Sud de Bleïda, avec un tonnage estimé de 2689000 tonnes à 2.29% de cuivre en moyenne.

De 1971 à 1973, un syndicat regroupant le B.R.P.M. (Bureau de recherches et Participations Minières), l'O.N.A. et MITSUI (société japonaise), entreprend la reconnaissance de la partie Nord du gisement et aboutit à l'estimation de 62000 à 73000 tonnes de cuivre métal (P. BILLAUD, 1977). Le gisement de cuivre de Bleïda est actuellement en cours d'exploitation par la SOMIFER (Société Minière du Bou-Gaffer).

Le présent travail est en partie consacré à l'exploitation des résultats d'une campagne d'échantillonnage et d'analyses géochimiques dans le district Tamdrost-Ambed. La troisième partie de ce mémoire portera sur l'analyse et le traitement de l'information géochimique recueillie dans un but de prospection.

Chapitre II :

Cartographie et lithostratigraphie

II.1. Cartographie du secteur étudié	43
II.1.1. Introduction	43
II.1.2. Matériel utilisé	43
II.1.3. Présentation de la carte réalisée	43
II.1.4. Coupes géologiques	43
II.1.5. Apports de la carte réalisée	44
II.2. Lithostratigraphie de la série volcanique d'Ouarzazate	44
II.2.1. La série volcanique d'Ouarzazate dans l'Anti-Atlas	44
II.2.2. La série volcanique d'Ouarzazate dans le secteur étudié	44
II.2.2.1. Découpage lithostratigraphique	45
II.2.2.2. Description de la coupe lithologique du secteur Tamdrost-Ambed	45
II.2.3. Autres coupes dans la boutonnière de Bou Azzer - El Graara	48
II.2.3.1. Coupe dans le Jbel Bou Derga	48
II.2.3.2. Coupe dans le secteur de Bou Offroh Sud	49
II.2.3.3. Coupe dans le secteur de Guelb Tassaout	50
II.2.4. Rapports entre les différentes coupes	51
II.2.5. Conclusions	52

Chapitre II: CARTOGRAPHIE ET LITHOSTRATIGRAPHIE.

II.1. CARTOGRAPHIE DU SECTEUR ETUDIE:

II.1.1. Introduction:

Nous nous sommes fixés deux objectifs essentiels pour ce travail cartographique réalisé à l'échelle du 1/2000°:

- Comprendre les rapports lithostratigraphiques et tectoniques des formations rencontrées.
- Elaborer un support géologique adapté à l'interprétation de l'étude géochimique de prospection.

II.1.2. Matériel utilisé:

Nous avons disposé pour ce travail d'un fond topographique récent au 1/2000e en trois feuilles. Il faut signaler que les axes de ce plan épousent ceux de la maille d'échantillonnage géochimique qui sont décalés des directions N-S et E-W de 15°E. Comme documents préalablement disponibles et outre les cartes géologiques au 1/100000° de G. CHOUBERT et de M. LEBLANC mentionnées plus haut, nous avons utilisé une couverture photographique aérienne au 1/7000° de la zone étudiée.

II.1.3. Présentation de la carte réalisée:

Cette carte géologique se présente en trois feuilles correspondant d'Ouest en Est aux secteurs: Tamdrost-Est, Arouli n'Azougar et Ambed (Annexe hors-texte).

Deux grands ensembles se distinguent sur cette carte: d'une part le socle PII qui porte l'empreinte des phases de déformation pan-africaines, d'autre part l'ensemble volcanique stratiforme, monoclinale et discordant sur le socle, ce deuxième ensemble n'ayant subi qu'une déformation cassante. Un troisième ensemble de moindre importance volumétrique est représenté par les formations filoniennes: dykes de dolérite, filons de carbonates et de quartz.

II.1.4. Coupes géologiques:

A partir de la carte géologique réalisée et des résultats des sondages effectués par la mission soviétique Techno-Export (1980), nous avons effectué trois coupes dans le district étudié. Le lecteur peut consulter ces coupes sur le même document que la carte géologique.

* La coupe A-B, de direction N-S, passe par ou à proximité des points de sondage: Zp6, Zp10, Zp14, Zp16, Zp18, Zp22, Zp26 et Zp30.

* La coupe C-D, de direction WSW-ENE, passe par les points de sondage: Vn100, Vd100 et Ut104.

* La coupe E-F, de direction NW-SE passe par le point de sondage A2C2.

Les points de sondage ci-dessus, sont tous reportés sur la carte géologique.

Ces coupes montrent les rapports entre la couverture PIII et le socle sous-jacent. On y observe le caractère non plissé de la série PIII, son contact discordant sur le socle et surtout le caractère cassant de la déformation qui affecte cette série. Des structures en horsts, grabens et hémigrabens, déterminent la répartition et l'épaisseur des volcanites du PIII. On peut noter aussi

que certaines failles normales s'amortissent au sein des volcanites.

II.1.5. Apports de la carte réalisée:

Le lever cartographique de la zone étudiée, homogène au premier abord, a abouti essentiellement aux résultats suivants:

- 1) L'établissement de critères de reconnaissance lithostratigraphique pour les différents composants de la série volcanique du PIII. Ces critères seront exposés dans la suite de ce chapitre.
- 2) Des informations d'ordre structural, sur les rapports de la couverture volcanique avec le socle sous-jacent et surtout sur les événements tectoniques qu'a subi celle-ci. Cet aspect sera développé dans la deuxième partie de ce mémoire.
- 3) En outre, ce document cartographique constituera un support au traitement du signal géochimique, développé dans la troisième partie. Par ailleurs ce document a été transmis à la mine de Bleida où il est utilisé pour les travaux de sondage dans le district de Tamdrost-Ambed.

II.2. LITHOSTRATIGRAPHIE DE LA SERIE VOLCANIQUE D'OUARZAZATE:

II.2.1. La série volcanique d'Ouarzazate dans l'Anti-Atlas:

Trois ensembles ont été distingués au sein du Précambrien III (G. CHOUBERT 1963):

- a) Le PIII inférieur défini dans le bas Tidili est un ensemble pyroclastique et volcano-détritique caractérisé par la présence d'andésites porphyroïdes à grands feldspaths.
- b) Le PIII moyen où se développe un complexe volcanique riche en ignimbrites et tufs de composition rhyolitique, il est surtout développé dans l'Anti-Atlas central dont fait partie le secteur étudié.
- c) Le PIII supérieur est un ensemble détritique formé de grès et de conglomérats.

II.2.2. La série volcanique d'Ouarzazate dans le secteur étudié:

Dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara seuls le PIII moyen et supérieur sont représentés (M. R. AZIZI SAMIR, 1990). Cette série est constituée de matériaux pyroclastiques et ignimbritiques avec des coulées d'andésite et des conglomérats. Le sommet de la série est détritique: grès et cailloutis à éléments de roches volcaniques. Des dykes de porphyrite andésitique recoupent cette série à différents niveaux.

La série volcanodétritique du PIII présente des variations notables d'épaisseur et de composition à l'échelle de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara (figure 10). L'épaisseur totale varie de 0 à 600m.

Dans le secteur de Tamdrost-Ambed, cette série présente une puissance d'environ 400m. Elle comporte des coulées andésitiques, des tufs, des ignimbrites et des conglomérats.

Certains niveaux par la constance latérale de leur faciès constituent de très bons repères stratigraphiques.

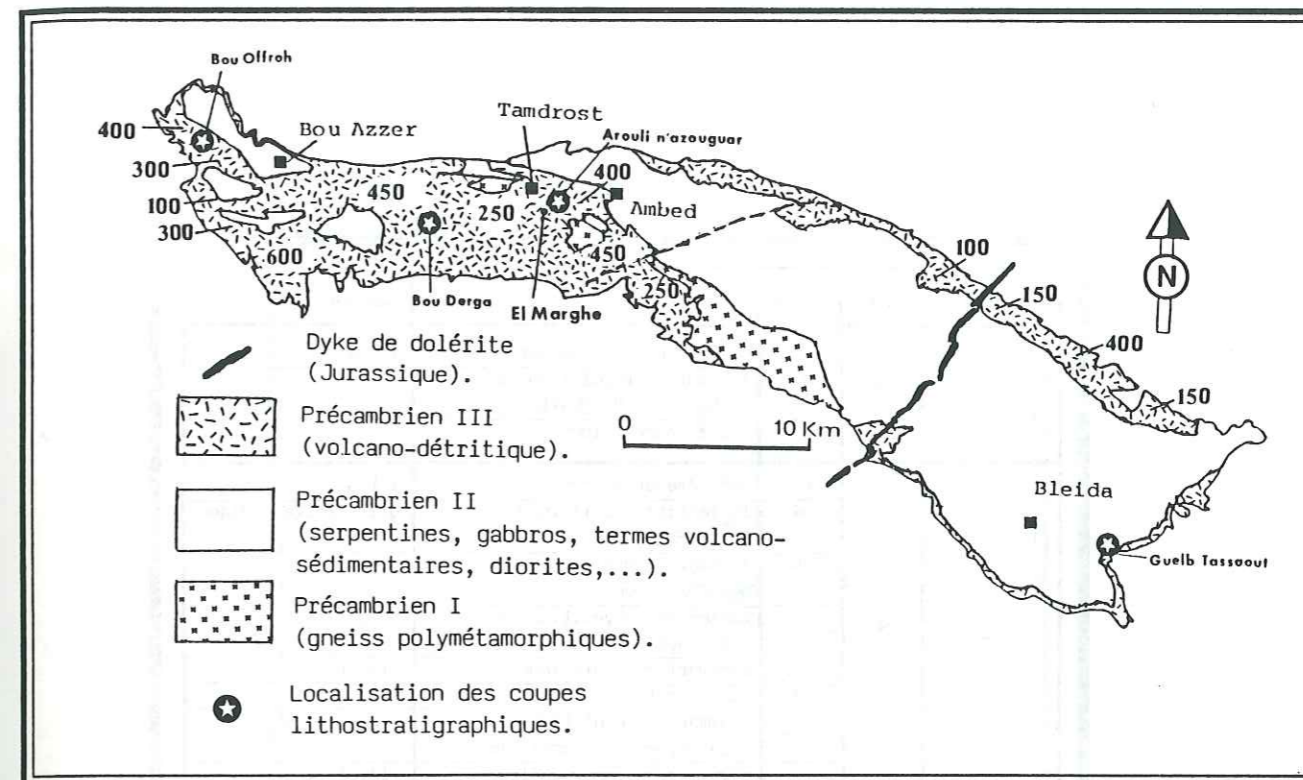


Figure 10: Carte de répartition des affleurements de la série PIII et de ses variations d'épaisseur dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara.

II.2.2.1. Découpage lithostratigraphique:

La discontinuité des caractères physiques (dureté, densité, couleur,...), des caractères volcanologiques (présence de fiammes, de xénolithes,...) et des caractères pétrographiques, est à l'origine des coupures qu'on établira au sein de cette série (pour la légende des colonnes lithostratigraphiques, se reporter au tableau 2).

II.2.2.2. Description de la coupe lithologique du secteur Tamdrost-Ambed:

L'examen détaillé de la colonne lithostratigraphique (figure 11), en se basant sur les critères mentionnés ci-dessus, permet de distinguer dans la série volcano-détritique, deux ensembles 1 et 2, séparés par un conglomérat grossier (assise H). Ce conglomérat est constitué presque exclusivement de blocs de matériaux volcaniques de l'ensemble 1 et dans une moindre mesure de blocs de roches du PI et PII (gneiss, diorite...), il serait lié à l'érosion de ces formations au cours d'une trêve de l'activité volcanique PIII.

La coupe au niveau du secteur Tamdrost-Ambed se termine par des matériaux grésio-conglomératiques (assise K) qui, nous le verrons pour d'autres coupes, serviront de limite entre l'ensemble 2 et un ensemble 3 qui sera défini.

La présence de coulées andésitiques intercalées dans la série confère à celle-ci un caractère de rythmicité. Cette variation pseudo-rythmique du faciès lithologique nous a servi de critère de subdivision de la série. Nous admettrons par convention que chaque coulée andésitique est à la base d'une unité ce qui nous amène à distinguer différentes unités par ensemble.

L'ensemble 1 comprend:

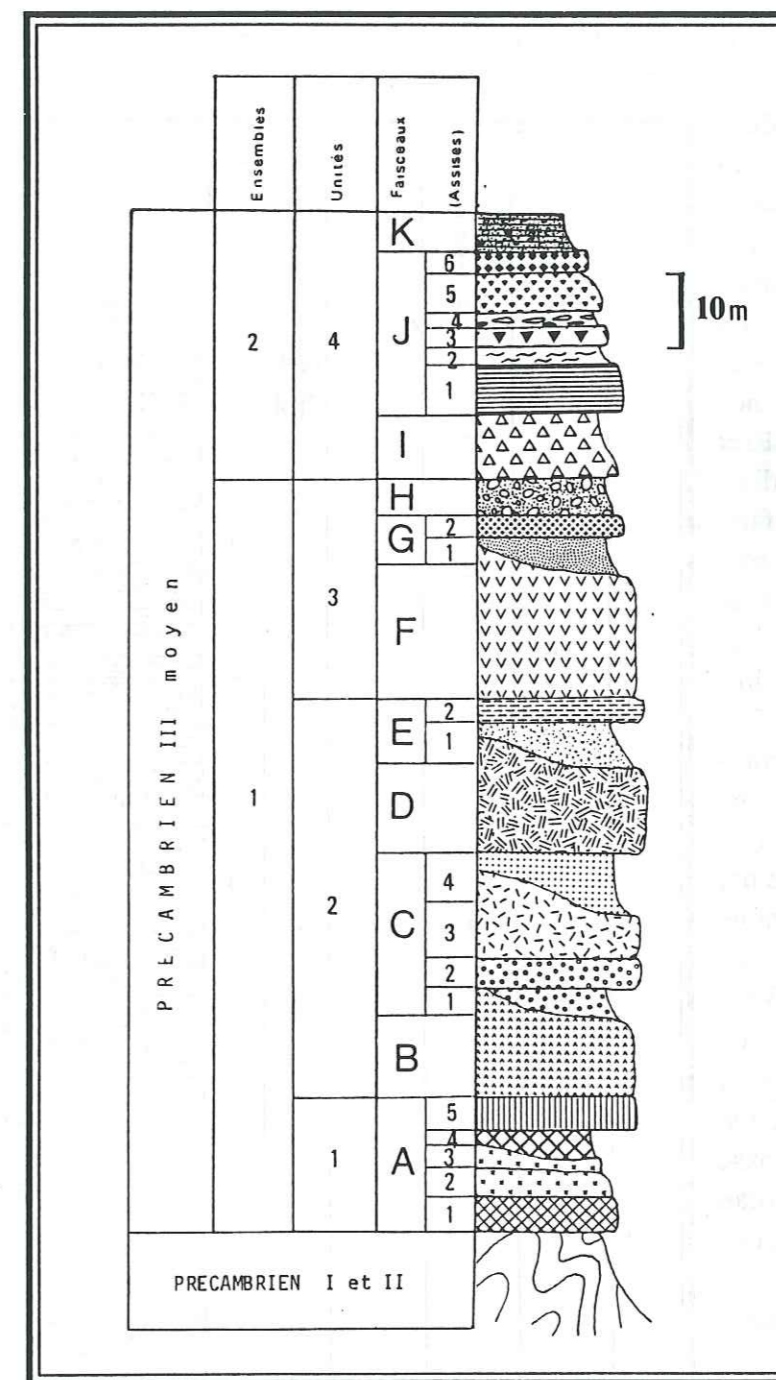
- l'unité 1 constituée du faisceau A,
- l'unité 2 constituée des faisceaux B, C, D et E,
- l'unité 3 constituée des faisceaux F et G.

Ensemble	Unité	Assise	Nature	Observations
3	5	N	grès, microconglomérat	lités
		M	ignimbrite rhyolitique à lithophyses de quartz	
		L	coulée andésitique	
2	4	K	conglomérat et grès	lités
		J6	ignimbrite rhyolitique agglomératique	gris claire à blanc
		J5	ignimbrite dacitique agglomératique	violet
		J4	ignimbrite rhyolitique à lithophyses en "galettes"	rouge lilas
		J3	ignimbrite rhyolitique	violet
		J2	tuf rhyolitique soudé	gris violet
		J1	ignimbrite rhyolitique à lithophyses très aplatiees	rouge lilas
		I	andésite à sommet bulleux (amandes de quartz)	violet
1	3	H	conglomérat (lapillis, bombes, cinérites)	
		G2	ignimbrite dacitique à éléments de ponce	gris claire
		G1	tuf dacitique	rouge violacé
		F3	coulée d'andésitique	gris mauve
		F2	brèche volcanique à éléments d'andésite dans tuf andésitique	
	2	F1	coulée andésitique porphyrique	grise
		E2	ignimbrite rhyolitique porphyrique	grise
		E1	tuf rhyolitique	rouge brique
		D	ignimbrite et tuf soudé rhyolitiques à biotites	rouge violacé
		C4	ignimbrite rhyolitique	rouge brique
		C3	ignimbrite rhyolitique porphyrique	grise
		C2	ignimbrite rhyolitique à lithophyses de quartz	rouge brique
		C1	tuf rhyolitique	rose grisâtre
	1	B	coulée andésitique	grise violacé
		A5	ignimbrite rhyolitique agglomératique	rouge brique
A4		ignimbrite rhyolitique hyperquartzeuse	rose grisâtre	
A3		ignimbrite rhyolitique porphyrique	grise	
A2		ignimbrite rhyolitique	rose claire	
A1	tuf et ignimbrite rhyolitique à lithophyses de quartz	rose violacé		

tableau 2 : description sommaire des constituants de la série d'Ouarzazate dans la boutonnière de Bou Azzer - El Graara

L'ensemble 2 surmontant le conglomérat du faisceau H, est composé de la seule unité 4 qui comprend les faisceaux I et J.

Ces subdivisions nous permettent de faire des corrélations avec des coupes effectuées en d'autres points de la boutonnière et de constater les variations d'épaisseur et de composition de la série PIII à cette échelle (cf. II.2.4).



(Légende: cf. tableau 2, p. 39)

Figure 11: Colonne lithostratigraphique du secteur Tamdrost-Ambed.

La coupe de la série PIII dans ce secteur est l'une des plus complètes dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara, elle atteint 400 m d'épaisseur totale. Les différents constituants de cette série sont représentés sur la figure 11, elle comprend les ensembles 1 et 2.

Le contact discordant sur le socle PI et PII se situe à différents niveaux de l'unité 1 ce qui dénote

la présence de paléoreliefs et/ou d'activité tectonique lors de la mise en place de cette série. Chaque unité représente une séquence d'ignimbrites et de tufs de nature dacitique à rhyolitique et débute par une coulée andésitique.

II.2.3. Autres coupes dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara:

II.2.3.1. Coupe dans le Jbel Bou Derga (X= 363.000, Y= 390.000):

La série PIII dans cette zone (figure 12) présente une épaisseur totale de 200m. On y reconnaît l'unité 4 définie dans le secteur de Tamdrost-Ambed. Reposant en discordance majeure sur le socle PI et PII, cette série est divisée en deux par le faisceau grésoconglomératique (K) ce qui nous permet de définir un troisième ensemble constitué de l'unité 5.

L'unité 5 comprend à sa base une coulée andésitique (assise L1), surmontée par une assise ignimbritique (assise M1).

L'ensemble 3 est coiffé par un niveau de micro-conglomérats et de grès bien lités. On constate donc à la base de la série PIII au niveau du Jbel Bou Derga, une lacune importante correspondant à l'absence de l'ensemble 1.

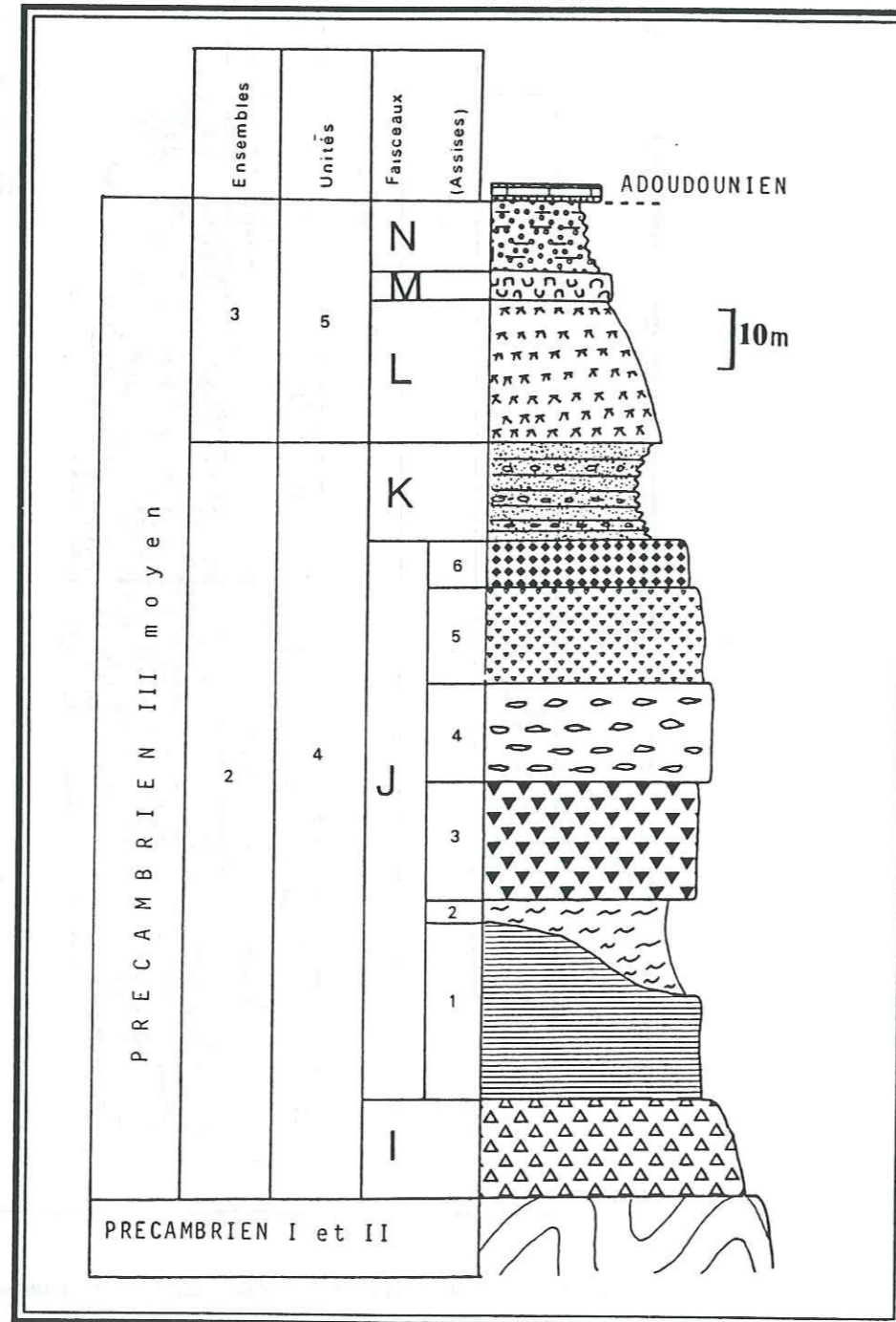


Figure 12: Colonne lithostratigraphique du secteur du Jbel Bou Derga.

II.2.3.2. Coupe dans le secteur de Bou Offroh Sud: (X= 393.000, Y= 350.000)

Ce secteur se situe dans la région de Bou Azzer à 20 Km environ à l'ouest du secteur Tamdrost-Ambed. La colonne lithostratigraphique de cette coupe (figure 13), est constituée à sa base d'une partie de l'ensemble 1, l'unité 2 est représentée par l'assise d'ignimbrite micacée avec une épaisseur de 20m, l'unité 3 est dominée par une assise andésitique, composée de deux coulées successives, d'une épaisseur totale de 110m. Ces deux coulées sont séparées par un niveau de brèches volcaniques à éléments d'andésite.

L'unité 3 est coiffée par le conglomérat (H) d'une épaisseur de 5m. Les deux assises comprises entre le conglomérat (H) et l'andésite F1, correspondraient aux assises G1 et G2 définies dans le secteur Tamdrost-Ambed. L'épaisseur totale de l'unité 3 est de 120m.

Sur le conglomérat (H) repose l'unité 4 débutant par une coulée andésitique de couleur brun violet, d'une épaisseur de 15m. Elle est surmontée par les assises J1 à J6, l'unité 4 présente une épaisseur totale de 95m environ.

L'ensemble 2 est surmonté par le niveau détritique (K) constitué de micro-conglomérats, de cailloutis et de grès rouges bien lités.

L'ensemble 3 n'est représenté dans cette coupe que par la coulée andésitique basale. D'une épaisseur de 10m, cette coulée repose soit sur le conglomérat (K) soit directement sur l'assise J6 de l'unité 4. La série volcanique du PIII est surmontée par les formations grèsocarbonatées de l'Adoudounien.

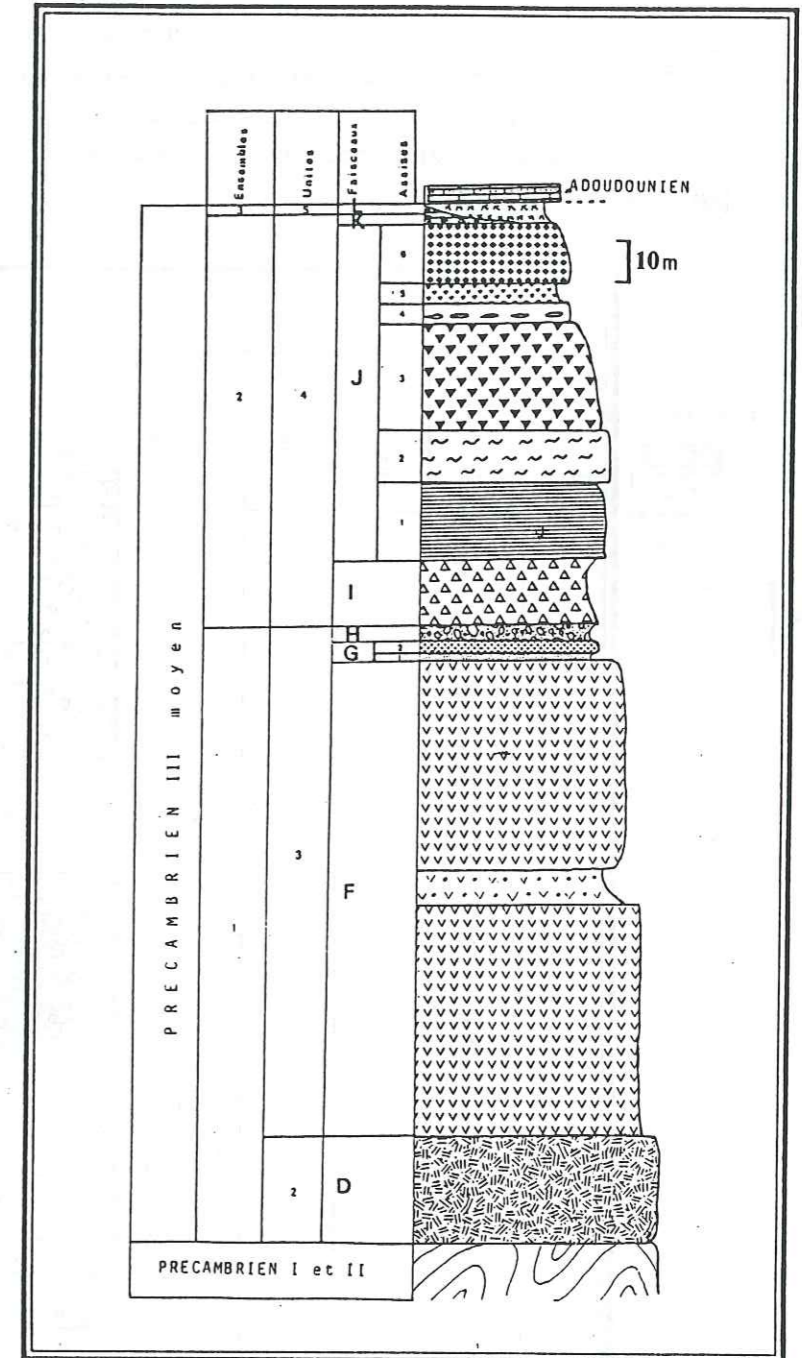


Figure 13: Colonne lithostratigraphique du secteur du Bou Offroh.

tel-00708240, version 1 - 14 Jun 2012

II.2.5. Conclusions:

Dans le découpage lithostratigraphique proposé, la définition des ensembles 1, 2 et 3 est basée sur la présence au sein de la série volcanique de niveaux détritiques mis en place au cours des trèves de l'activité volcanique.

A l'intérieur de chaque ensemble, considéré comme une période d'activité volcanique relativement continue, nous avons défini des unités sur la base des variations lithologiques observées. Le découpage proposé ci-dessus nous permet d'établir des corrélations lithostratigraphiques entre les coupes locales situées à différents points de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara.

Il s'en dégage les résultats suivants:

1) L'établissement d'une coupe synthétique à l'échelle de la boutonnière.

2) La présence très probable de paléoreliefs au début du PIII.

3) La présence d'indices d'une activité tectonique au cours du PIII.

Par ailleurs l'absence de dépôts marins dans la série étudiée confirme le caractère continental de celle-ci. La série PIII n'étant que partiellement représentée dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara, il sera important à la lumière des résultats obtenus, d'affiner et d'étendre cette stratigraphie à d'autres régions de l'Anti-Atlas.

Chapitre III:

Etude pétrographique

III.1. Introduction	55
III.2. Caractères généraux	55
III.3. Les roches acides	55
III.3.1. Les ignimbrites	57
a. La mésostase	57
b. Les phénocristaux	57
c. Les enclaves	61
III.3.2. Les pyroclastites	61
III.4. Les roches basiques	63
III.4.1. Les coulées andésitiques	63
a. Le faisceau B	63
b. Le faisceau F	63
III.4.2. Les dykes de porphyrite andésitique	63
III.5. Caractères géochimiques	65
III.6. Situation dans le cadre géodynamique régional	67
III.7. Conclusion	68

Chapitre III: ETUDE PETROGRAPHIQUE.

III.1. INTRODUCTION:

Nous allons dans ce chapitre, donner un aperçu de la pétrographie des différents constituants de la série volcanique d'Ouarzazate rencontrée dans le secteur étudié. Le but est de caractériser les différents termes de cette série et d'examiner leurs rapports pétrographiques et volcanologiques, d'utiliser les données géochimiques dont nous disposons pour déterminer le type de série magmatique, afin de réaliser une approche du contexte géodynamique de sa mise en place.

Des descriptions de matériaux appartenant à la même série (Précambrien III ou série d'Ouarzazate) ont été effectuées dans d'autres régions de l'Anti-Atlas (A. YAZIDI, 1976; C. BOYER et M. LEBLANC, 1977; C. BOYER et al., 1978; A. CHABANE, 1978; F. BENZIANE, 1978) voir même dans le massif ancien du Haut-Atlas (S. BAUCHE, 1984). Nous tenterons au terme de cette étude de faire une synthèse entre nos observations et celles réalisées par nos prédécesseurs en d'autres points du sud marocain et de l'Ougarta (M. CHIKHAOUI, 1975).

III.2. CARACTERES GENERAUX:

La nature pyroclastique et ignimbritique prédominante des roches de la série d'Ouarzazate a été reconnue pour la première fois par J. BOULADON et G. JOURAVSKY (1954). C'est aussi le cas dans le secteur étudié ici où l'on constate une large prédominance volumique de matériaux acides. En effet, les roches acides représentent environ 55 à 60% du volume total de la série, contre 30 à 35% pour les roches basiques, les 10 à 15% restant étant occupés par des matériaux détritiques (conglomérats). Le pôle acide est représenté par des roches ignimbritiques et pyroclastiques, alors que le pôle basique est constitué d'une part de coulées andésitiques et d'autre part de dykes de porphyrite andésitique. Les voies d'accès du volcanisme sont variées (C. BOYER et M. LEBLANC, 1977): appareils annulaires, appareils ponctuels et appareils fissuraux. Ce dernier semble le plus dominant dans le secteur étudié.

III.3. LES ROCHES ACIDES:

Le pôle acide de la série étudiée ici est exclusivement constitué de roches ignimbritiques et pyroclastiques. Dans la littérature consacrée à ce type de roches et à leur genèse, nous pouvons retracer l'évolution des idées avec:

a) La création en Nouvelle-Zélande du terme ignimbrite en 1935 par MARSHALL, qui a postulé son idée de «pluie de feu» de la façon suivante: «l'ignimbrite est une roche de composition acide ou intermédiaire qui a été formée d'un matériel éjecté des orifices volcaniques sous forme d'une multitude de particules hautement incandescentes, principalement de petite taille».

b) La critique et la redéfinition du même terme par P. VINCENT (1963) qui propose la définition suivante: «Les ignimbrites sont des roches acides présentant des caractères qui les opposent à la fois aux laves et aux tufs classiques. Parmi ces caractères figurent obligatoirement ceux qui dénotent une grande fluidité originelle et une haute température».

c) Cette définition est reprise par F. CHALOT-PRAT et J. LEGALL (1978): «elles résultent de l'émission d'un magma en effervescence, riche en volatils. Cette effervescence provoque la formation de bulles qui éclatent sous expansion des gaz et donnent naissance

à des vitroclastes ou échardes de ponce. Les gaz alors libérés possèdent une vitesse suffisante pour permettre la fluidisation de la masse des particules et rendre compte de son extrême mobilité».

Notons que dans le cas de nos roches, il est fréquent de rencontrer dans la même assise les deux types de facies; ignimbritique et pyroclastique (s.s.), d'où très probablement sur le plan dynamique une origine mixte de ces roches.

Du point de vue terminologique nous pouvons distinguer dans la littérature, essentiellement trois types de termes:

1) Des termes de portée dynamique, qui essayent de souligner le mécanisme de mise en place des roches pyroclastiques, par exemple les termes «ash fall» (dépôt de cendres) et «ash flow» (coulée de cendres) utilisés par les auteurs anglo-saxons.

2) Des termes pétrographiques qui sont utilisés pour rattacher ces roches à un groupe pétrographique en fonction de la composition minéralogique et/ou chimique (exemple: rhyolite, dacite, rhyodacite...).

3) Des termes structuraux qui donnent une idée de la structure interne de la roche et des dimensions des éléments constitutifs de celle-ci. Nous retiendrons à cet effet la classification de la «subcommission on the systematics of igneous rocks» de l'IUGS, proposée par R. SCHMID (1981), elle comporte une classification granulométrique pour l'ensemble des roches pyroclastique (figure 16).

Taille des clastes en mm	pyroclastes	dépôts pyroclastiques	
		non consolidé	consolidé
64	bombe bloc	téphra	agglomérat brèche pyroclastique
	lapilli	lapilli téphra	lapilli tuff
2	cendre à grain grossier	cendre grossière	tuff grossier
1/16	cendre à grain fin	cendre fine	tuff fin

Figure 16: Classification granulométrique des roches pyroclastiques, d'après R. SCHMID (1981).

C'est souvent par la combinaison de deux ou trois termes que nous distinguerons une roche donnée, ainsi par exemple pour une ignimbrite où le plagioclase constitue la phase minérale la plus importante et dont la teneur en SiO₂ est comprise entre 69 et 73% on parlera d'ignimbrite rhyodacitique. Il s'agira d'ignimbrite rhyolitique quand la roche est formée essentiellement de quartz et de feldspath alcalin et/ou la teneur en SiO₂ est supérieure à 73% (A. EWART, 1979). La notion de texture vitroclastique fréquemment utilisée dans la description de ces roches, correspond à la présence d'échardes de verre (bulles éclatées) de formes variables (M. BOUCARUT, 1971).

III.3.1. Les ignimbrites:

Les épanchements ignimbritiques de notre secteur présentent généralement une belle texture vitroclastique (présence d'échardes et/ou de fiammes). Elles présentent deux types de composants: d'une part une matrice ou mésostase de composition quartzo-feldspathique souvent riche en échardes et d'autre part des éléments noyés dans cette première. Parmi ces éléments on dénombre principalement des phénocristaux de feldspath, des quartz rhyolitiques, des minéraux ferromagnésiens (biotites et/ou fantômes de pyroxènes) et des xénolithes.

a) La mésostase:

Les ignimbrites étudiées présentent généralement une très belle texture vitroclastique avec un aspect pseudofluidal (planche 1). Elle est souvent pigmentée de très fins grains et aiguilles d'hématite dont la concentration est plus grande au niveau des parois des échardes (planche 1), ce qui rend souvent la texture vitroclastique reconnaissable même dans certains cas d'al-tération et de recristallisation de la mésostase.

Une dévitrification primaire est souvent reconnaissable grâce au développement de microstructures axiolitiques ou sphérolitiques (planche 1).

b) Les phénocristaux:

Ce sont essentiellement des feldspaths, des quartz rhyolitiques (dans certains cas) et moins souvent des minéraux ferromagnésiens.

* Les feldspaths:

De nombreux cristaux de feldspath (0.5 à 3mm) sont presque toujours brisés parfois résorbés sur leur bord ou complètement pulvérisés (planche 2). Cet aspect serait le résultat des conditions de mise en place des matériaux ignimbritiques. Le grand axe des feldspaths est généralement orienté dans la direction de la pseudofluidalité (planche 2). Ce sont généralement des feldspaths plagioclases (albite-oligoclase) et des feldspaths potassiques essentiellement l'orthose.

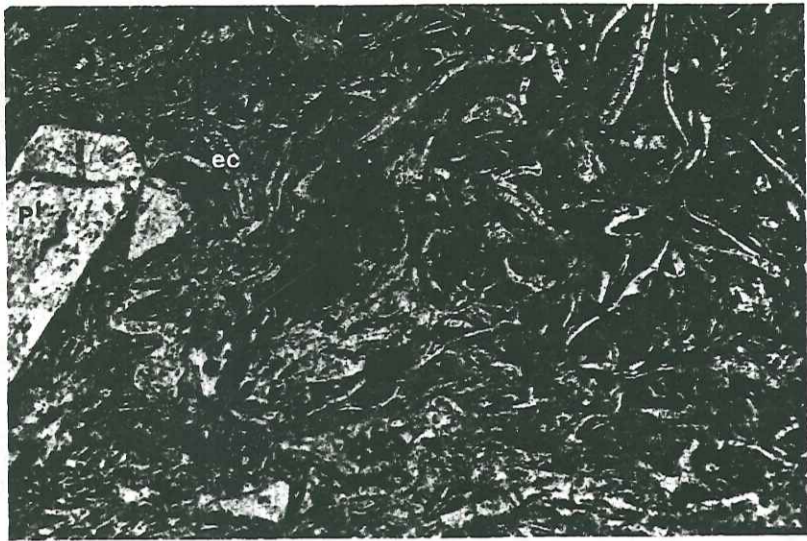
* Les quartz rhyolitiques:

Observés uniquement dans les ignimbrites à composition rhyolitique, où le feldspath prédominant est le feldspath alcalin (orthose), ils sont bien conservés avec des formes très variables (planche 3); automorphes, arrondis, globuleux ou éclatés. Ils sont caractérisés par la présence de golfes de croissance dans lesquels s'infiltré la mésostase. Différents auteurs envisagent une origine magmatique de ces quartz; A. RITTMAN (1963) considère ces quartz comme étant des cristaux reliques de l'anatexie des séries ultramétamorphiques. T.H. GREEN et A.E. RINGWOOD (1968) lient l'aspect éclaté ou corrodé de ces quartz à une chute brutale de la pression au moment de la montée du magma. R. CLOCCHIATTI et R. BROUSSE (1972) considèrent que dans un premier temps ces quartz ont cristallisé dans un milieu favorable tout en présentant des lacunes de cristallisation et que la croissance de ces minéraux continue après l'émission du magma mais cette fois dans des conditions d'instabilité provoquant la fusion de leur bords.

* Les ferro-magnésiens (planche 3):

Ce sont généralement des biotites ou chlorites et plus rarement des fantômes de pyroxène. Les biotites abondantes dans l'assise D (elles y sont observables à l'oeil nu), sont en fait retromorphosées en mica blanc et oxydes de fer disposés généralement autour du minéral. Ces anciennes biotites présentent des zircons alignés dans le clivage du minéral.

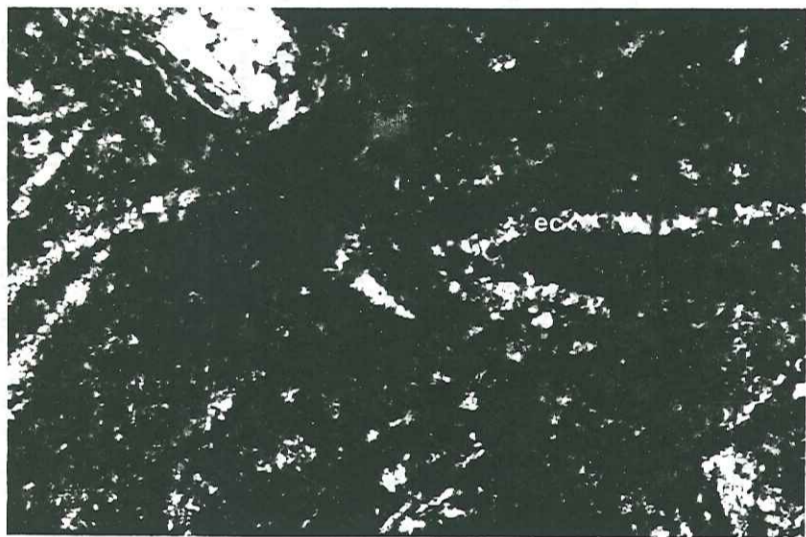
Les autres ferro-magnésiens ne sont généralement reconnaissables que par leur forme.



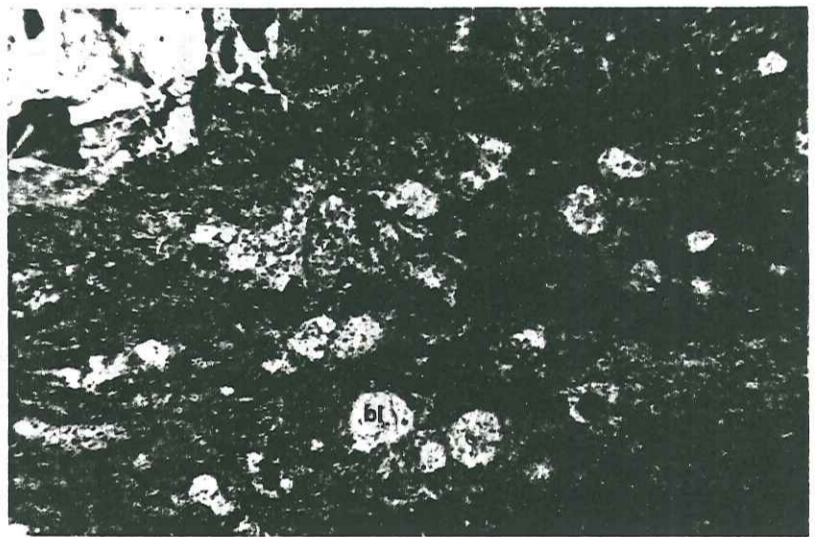
Exemple de texture vitroclastique bien conservée présentant des écharde (ec) de différentes formes, pl = plagioclase, lumière normale.



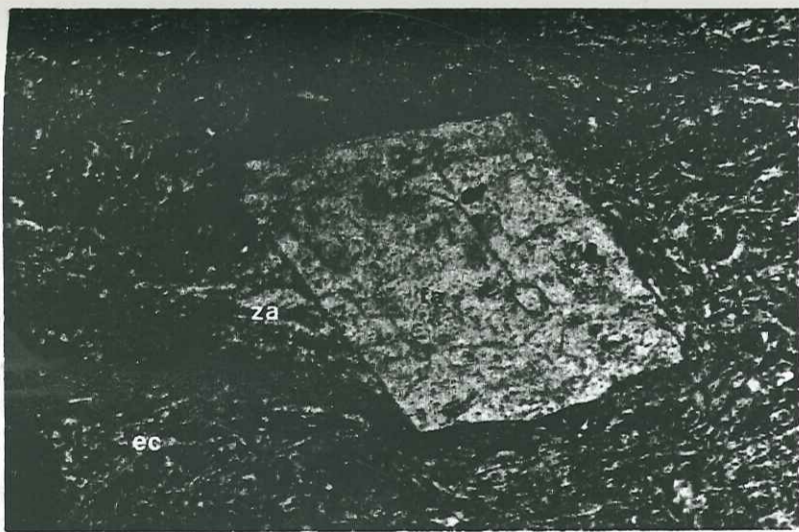
Détails d'écharde montrant deux parties contiguës, initialement paroi d'une même bulle, lumière normale.



Composition quartzo-feldspathique et structure axiolithique au niveau des parois des écharde, lumière normale.



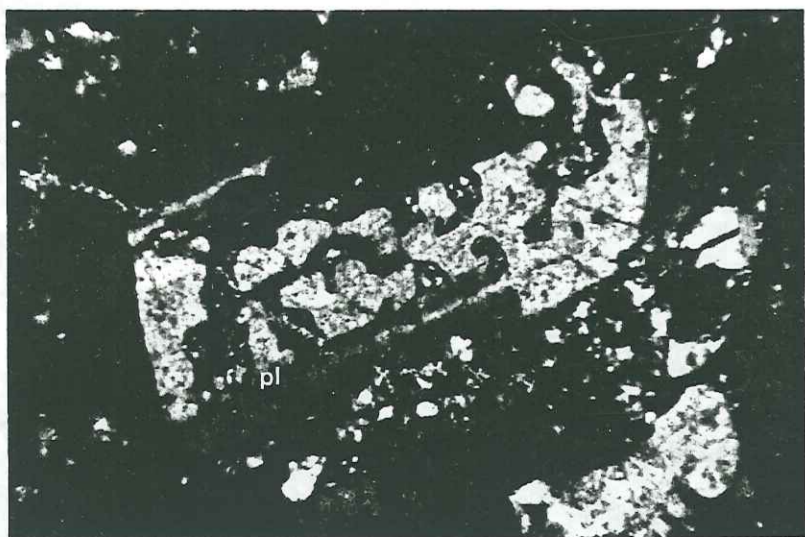
Texture vitroclastique en billes présentant des bulles à remplissage quartzitique ou quartzo-feldspathique, lumière normale.



Phénocrystal de feldspath potassique (fa) dont le grand axe est orienté dans la direction de la pseudo-fluidalité, les zones abritées (za) indiquent un sens relatif d'écoulement dans l'ignimbrite riche en écharde (ec), lumière normale.



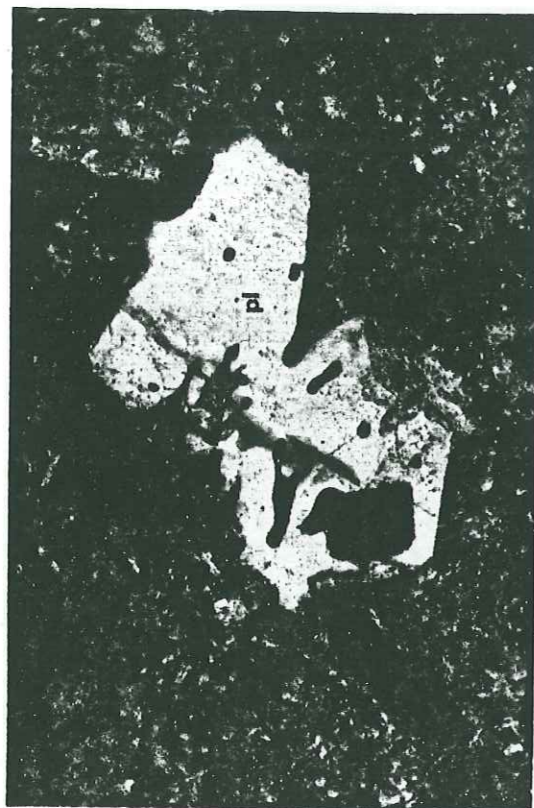
Phénocristaux de plagioclase (pl) trapus et allongés dans une matrice riche en écharde (ec) orientées, lumière normale.



Phénocrystal de plagioclase (pl) présentant des golfes de corrosion très développés envahies par la mesostase, lumière polarisée.



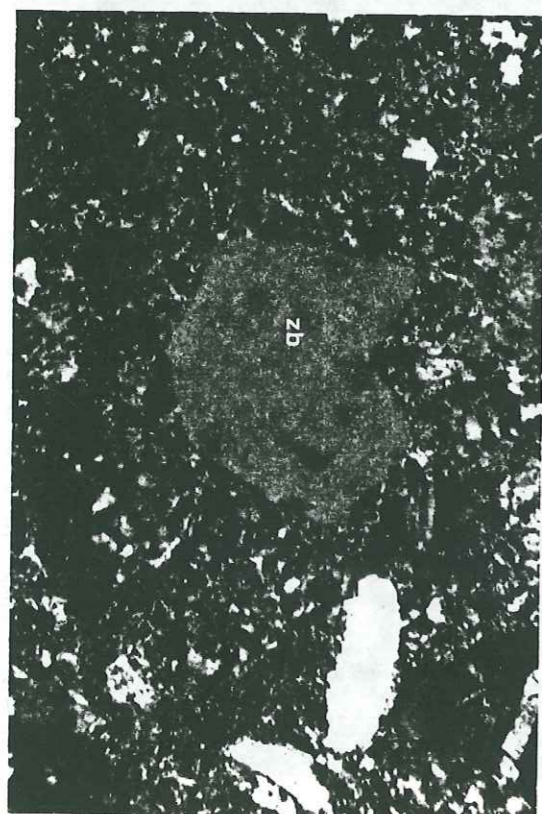
Phénocrystal de plagioclase (pl) résorbé et fragmenté, l'écoulement ayant développé une zone d'ombre sous forme de trainée, lumière normale.



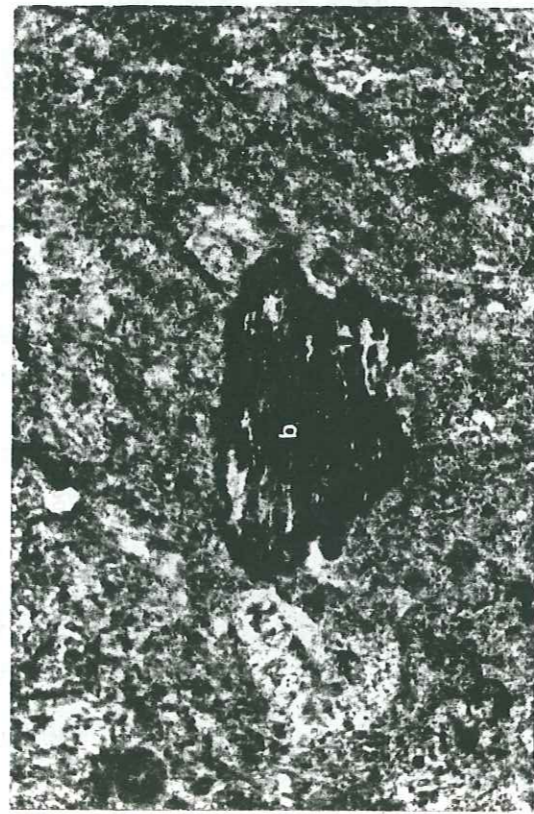
Phénocristal de quartz rhyolitique riche en golfes de corrosion (qz), lumière normale. — 3 mm —



Réliquies de minéraux ferromagnésiens (fm) recrystallisés en micas blancs et oxydes de fer, lumière normale. — 3 mm —



Phénocristal de quartz rhyolitique sub-augitique (qz), lumière polarisée. — 3 mm —



Phénocristal de biotite rétro-morphosée (b) en micas blancs et oxydes de fer, lumière normale. — 3 mm —

Ils sont complètement rétro-morphosés en mica blanc et en oxydes de fer. Ces minéraux présentent parfois des vestiges d'un clivage laissant présumer qu'il s'agirait d'anciens pyroxènes.

c) Les enclaves:

Ce sont des fragments de roches emballés dans la masse des ignimbrites; leur proportion peut atteindre 5 à 10% du volume total de la roche. Nous distinguons deux types d'enclaves:

* des enclaves enallogènes: fragments de roches à contour irrégulier elles se distinguent de la roche porteuse par leur texture et par leur composition minéralogique (planche 4). Parmi ces enclaves, des fragments de roches pyroclastiques sont fréquemment observés. Cependant les plus remarquables sont les fragments holofeldspathiques, constitués uniquement de plagioclases en microlites et dont la texture peut être bien orientée (pseudofluidale) ou au contraire enchevêtrée. Les plagioclases, souvent altérés, sont enrobés dans une mésostase très riche en oxydes de fer. La composition ainsi que la texture de ces fragments les rattachent à la famille des plagioclases; leurs minéraux ferromagnésiens seraient complètement rétro-morphosés en oxydes de fer et les plagioclases en albite. Ces enclaves par leur morphologie et par leur composition, seraient des fragments de roches préexistantes emballés dans la masse ignimbritique.

* des enclaves homoégènes: ce sont des fragments de ponce généralement fusiformes, allongés dans la direction de la pseudofluidalité et à extrémités souvent effilochées (planche 4). Ils sont composés de nombreuses sphérolites (0.1 à 0.5mm), dont la forme peut être arrondie ou aplatie, selon le degré d'aplatissement et d'étirement de l'ensemble du fragment. Ces sphérolites sont composés d'un coeur cristallisé en quartz à extinction rayonnante, noyé dans une matrice quartzo-feldspathique qui contraste avec la mésostase de l'ignimbrite par une plus grande richesse en oxydes de fer. Ces fragments peuvent mouler en partie des phénocristaux ou des enclaves enallogènes et seraient donc contemporains de la mise en place du matériau ignimbritique.

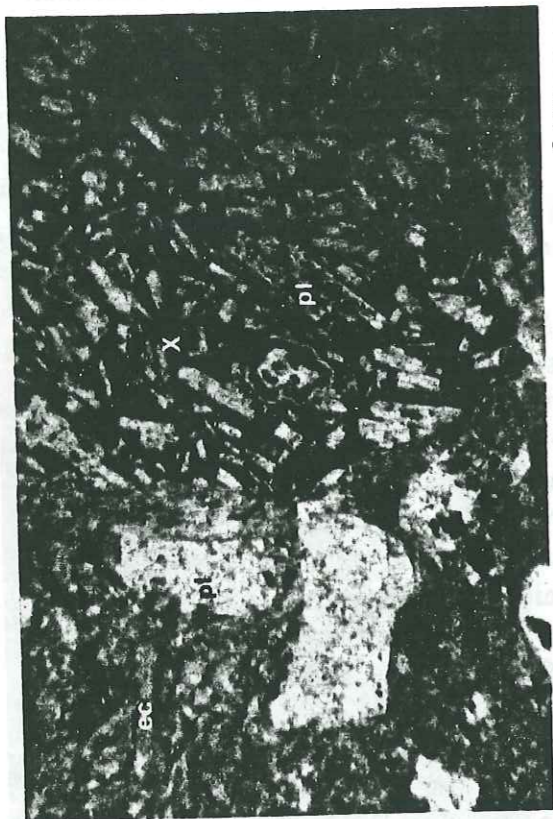
III.3.2. Les pyroclastites:

Ce sont des roches formées par la projection et le dépôt de fragments volcaniques de cristaux ou de roches. On distingue selon la classification de R. SCHMID (1981) retenue par la « subcommission on the systematics of igneous rocks » de l'I.U.G.S., des brèches volcaniques, des tufs et des cendres. Ces roches se distinguent des ignimbrites par leur richesse en cristoclastes et/ou lithoclastes et surtout par l'absence de texture vitroclastique.

Notons que, conformément à cette définition, les seules assises entièrement pyroclastiques sont les assises: C 2-1, F 1-1 et G1 dont un exemple est montré dans la planche 4; cependant comme nous l'avons signalé dans le paragraphe consacré aux ignimbrites, il n'est pas impossible que celles-ci présentent une évolution latérale ou verticale vers un faciès plutôt mixte ou franchement pyroclastique.

Les roches pyroclastiques (s.s.) de notre série se caractérisent par une très grande abondance de fragments anguleux qui occupent jusqu'à 80% du volume total de la roche. La matrice, généralement de nature cinéritique, est réduite aux interstices entre les fragments contigus.

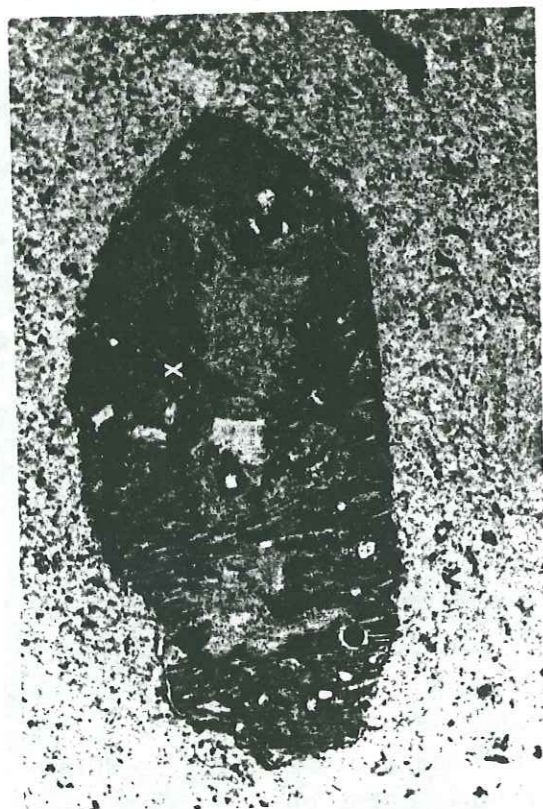
La brèche volcanique à la base de l'assise F1 est constituée d'éléments de nature andésitique. Les interstices sont remplis par un verre sombre riche en oxydes de fer. La plupart des éléments proviendraient d'andésites porphyriques à ferro-magnésiens (opacifiés). Cependant certains fragments présentent une texture vitroclastique et proviennent donc de roches ignimbritiques.



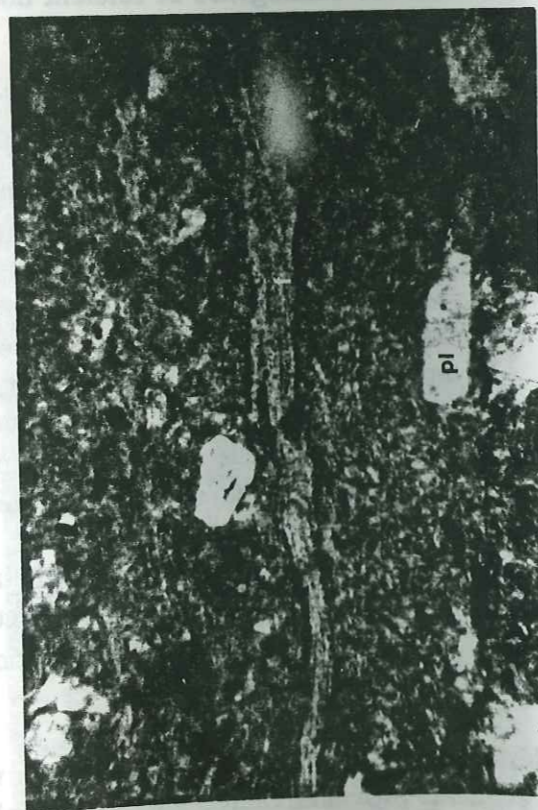
Xénolite enaligène (X) de plagioclase (pl) à vacuoles (v) dans l'ignimbrite à plagioclases (pl) et écharde (ec), lumière normale.



Tuf à lithoclastes (lc) et cristoclastes (cc) avec une mésostase (m) de nature quartzo-feldspathique remplissant les interstices, lumière normale.



Xénolite homogène (X) = un fragment d'ignimbrite, lumière normale.



Flammé ou fragment de ponce effilochée (f) dans l'ignimbrite, lumière normale.

III.4. LES ROCHES BASIQUES: (planche 5)

De nature andésitique, les roches basiques de la série du Précambrien III du secteur étudié présentent deux types de gisements: soit des coulées de laves andésitiques, (faisceaux B et F), soit des dykes intrusifs dans la série volcanique. Toutes ces roches ont une couleur grise sombre, parfois rougeâtre.

III.4.1. Les coulées andésitiques:

a) Le faisceau B:

On peut distinguer dans ce faisceau, deux faciès différents:

* d'une part un faciès d'andésite microcristalline aphanitique de couleur violacée à brunâtre. Ce faciès présente en microscopie une texture trachytique fluidale; la mésostase occupe 10 à 15% du volume total de la roche et est très riche en oxydes de fer. Les microlites de plagioclase sont souvent séricitisés.

* d'autre part, un faciès porphyrique et vacuolaire: la texture y est porphyrique trachytique, les phénocristaux (andésine, oligoclase-andésine) souvent zonaires atteignent 3 à 4mm de diamètre et sont généralement séricitisés. Ces phénocristaux sont entourés de microlites de plagioclases partiellement séricitisés; les interstices sont remplis d'un verre brun foncé et de magnétite. Les vacuoles d'un diamètre de 1 à 3mm sont souvent remplies de quartz, de calcite et de chlorite.

b) Le faisceau F:

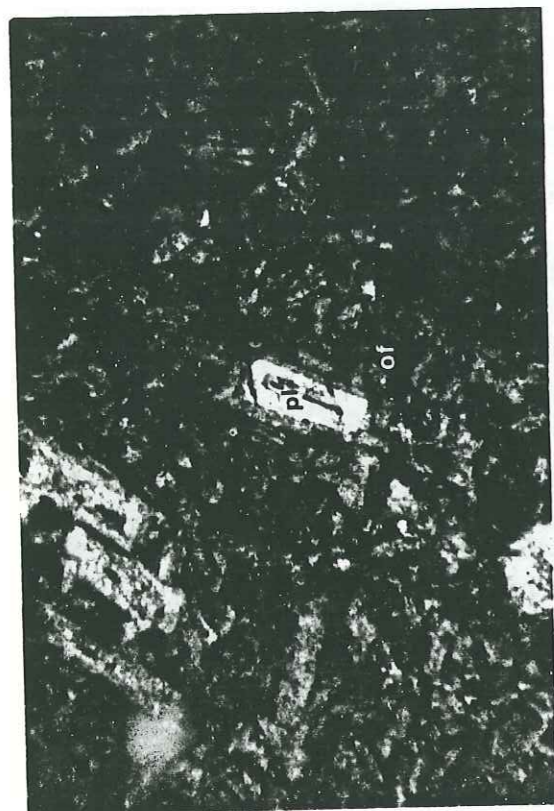
De couleur gris violacé, ces andésites présentent une texture microlithique porphyrique. Les phénocristaux de plagioclase (andésine) sont souvent zonés avec des dimensions de 1 à 4mm; le reste de la roche (50 à 60%) est occupé par des microlites de plagioclase avec une mésostase vitreuse au niveau des interstices. Ces feldspaths sont généralement séricitisés. L'ilménite bien représentée peut passer au leucoxène; de rares cristaux d'apatite et de pyroxènes opacifiés sont aussi présents. Comme minéraux secondaires on peut noter surtout la séricite, le leucoxène, la chlorite et des épidotes (pistachite).

III.4.2. Les dykes de porphyrite andésitique:

L'étude de ces dykes basiques est effectuée dans le but d'examiner leur relation avec les coulées andésitiques du Précambrien III, sachant que ces filons recoupent partiellement et à différents niveaux la série volcanique.

Le même genre de dykes a été signalé dans le massif ancien du Haut-Atlas, où PROUST (1961) avait supposé qu'au moins une partie de ces dykes alimentaient les coulées andésitiques du Précambrien III de ce secteur.

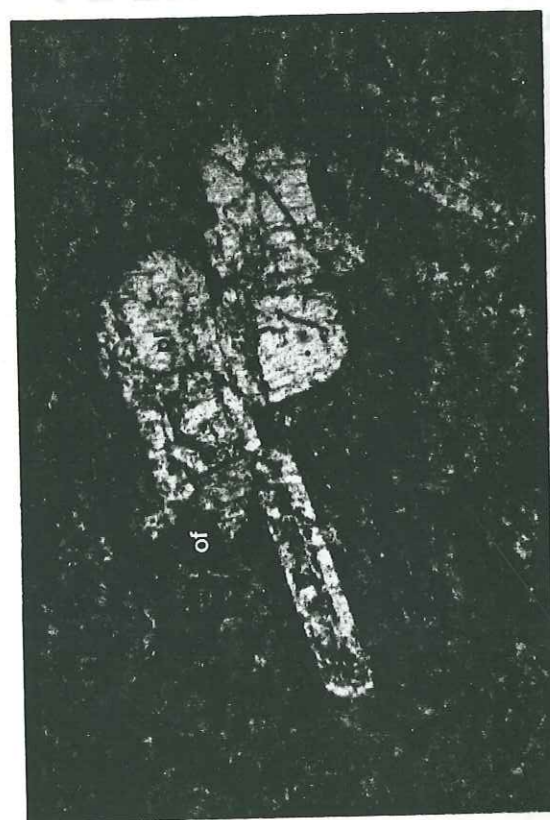
Dans notre secteur, il s'agit de dykes d'épaisseur métrique (3m au maximum), à épontes très nettes. Macroscopiquement la roche est compacte, de couleur rougeâtre en surface, gris verdâtre en cassure, souvent d'aspect microgrenu. Au microscope, ces roches présentent une texture porphyrique doléritique. Les phénocristaux ainsi que les microlites de feldspath sont des plagioclases de type oligoclase-andésine. La mésostase (10 à 20% du volume total de la roche) est constituée d'un verre quartzueux riche en oxydes de fer. Les phénocristaux et les microlites de plagioclase sont fortement altérés en séricite.



Plagioclases (pl) et oxydes de fer (of) dans l'andésite porphyrique à amygdales F1, lumière polarisée. — 3 mm —



Plagioclases (pl) et oxydes de fer (of) dans un dyke d'andésite porphyrique, lumière polarisée. — 3 mm —



Phénocristaux de plagioclase (pl) très altérés dans l'andésite porphyrique B1 (of = oxyde de fer), lumière polarisée. — 3 mm —



Détail d'une amygdale dans l'andésite F1 montrant un remplissage complexe à calcite (ca), quartz (qz) et oxydes de fer (of), lumière polarisée. — 3 mm —

III.5. CARACTERES GEOCHIMIQUES:

Toutes les données analytiques utilisées dans ce paragraphe ont été acquises au laboratoire de spectrométrie de l'O.N.A. (Omnium Nord Africain) à Bou Azzer. S'agissant d'analyses semi-quantitatives, nous avons recalculé pour chaque assise une composition moyenne à partir de plusieurs analyses (M.R. AZIZI SAMIR, 1986).

Le volcanisme de la formation de Ouarzazate comprend des laves calcoalcalines (C. Boyer et al., 1978), associées à des basaltes tholéitiques, des trachytes, d'abondantes ignimbrites et des intrusions granitiques.

Ces volcanites présentent souvent des altérations assez poussées (C. Boyer et al., 1978; M. Chikhaoui, 1981), dont l'origine peut être complexe (transformations hydrothermales précoces, métamorphisme d'enfouissement sous les séries paléozoïques, métamorphisme thermique d'âge hercynien). Ces roches ont néanmoins gardé des caractères chimiques qui permettent de les rattacher à un magmatisme de série calco-alcaline.

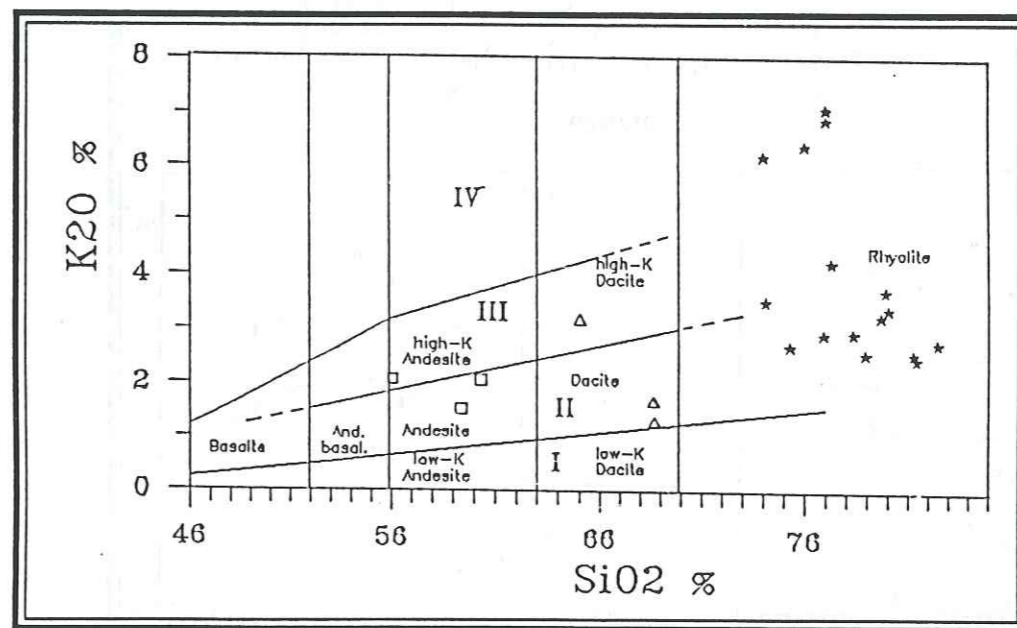


Figure 17: Diagramme K₂O vs SiO₂ (d'après PECCERILLO et TAYLOR, 1976); I: domaine des séries tholéitiques; II: série calco-alcaline; III: série calco-alcaline potassique; IV: séries shoshonitiques.

La projection (figure 17) des compositions moyennes sur le diagramme K₂O vs SiO₂ de A. PECCERILLO et S.R. TAYLOR (1976), montre un étalement dans les domaines calco-alcalins et une tendance potassique pour les formations les plus acides. Cette observation restant sujette à caution, dans la mesure où K et Si sont sensibles à l'altération, nous avons utilisé aussi les diagrammes de A. MIYASHIRO (1974) et de A. MIYASHIRO et F. SHIDO (1975) fondés sur des éléments traces réputés plus stables tels que: V, Cr et Ni. Ces diagrammes (figures 18 et 19) confirment le caractère calco-alcalin de nos roches avec cependant une affinité tholéitique pour les pôles basiques (M. R. AZIZI SAMIR, 1990).

tel-00708240, version 1 - 14 Jun 2012

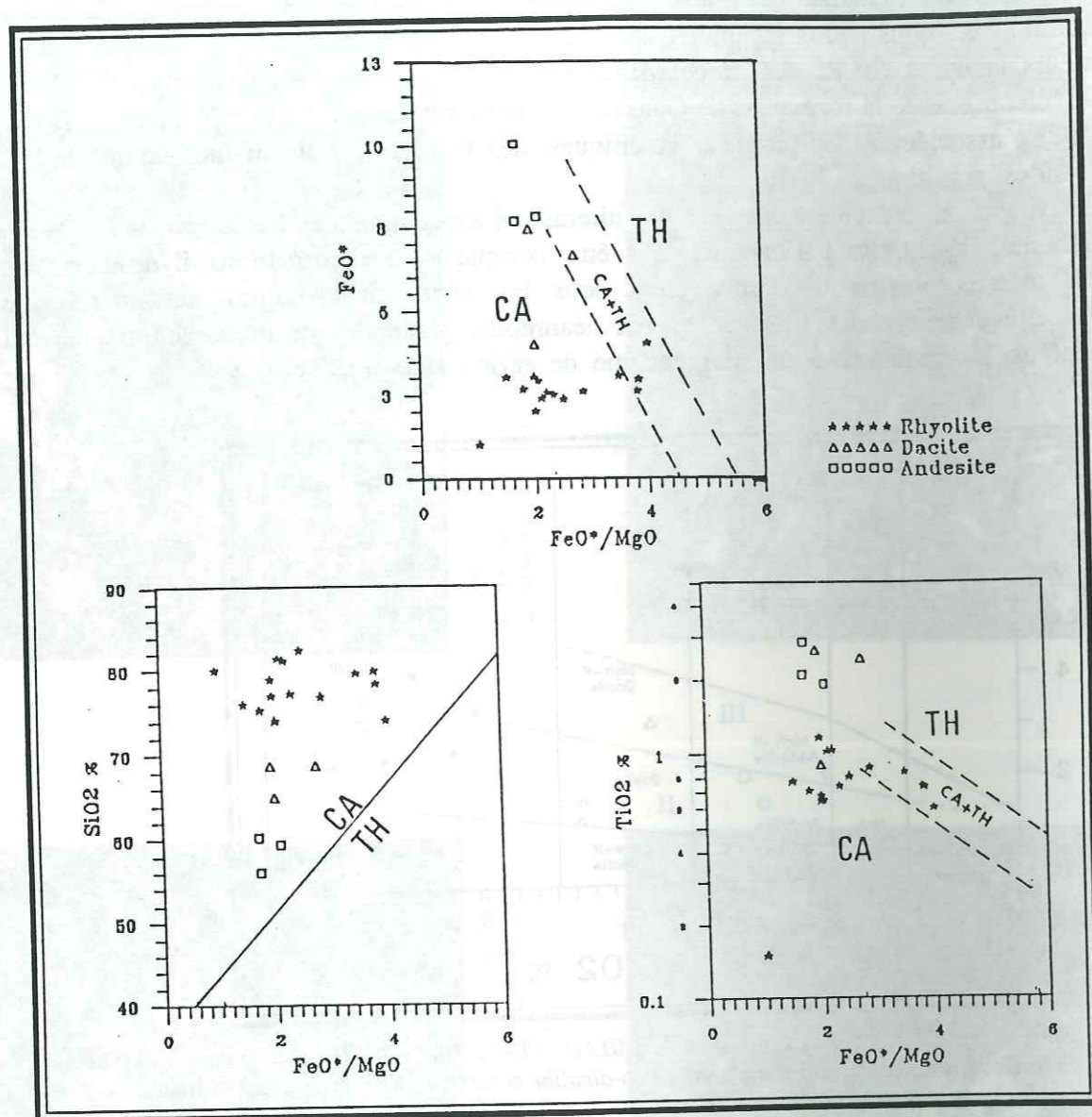


Figure 18: Diagrammes de variation de SiO₂, de FeO et de TiO₂ en fonction de FeO/MgO (A. MIYASHIRO, 1974; A. MIYASHIRO et F. SHIDO, 1975); CA: domaine calco-alcalin; TH: domaine tholéitique.

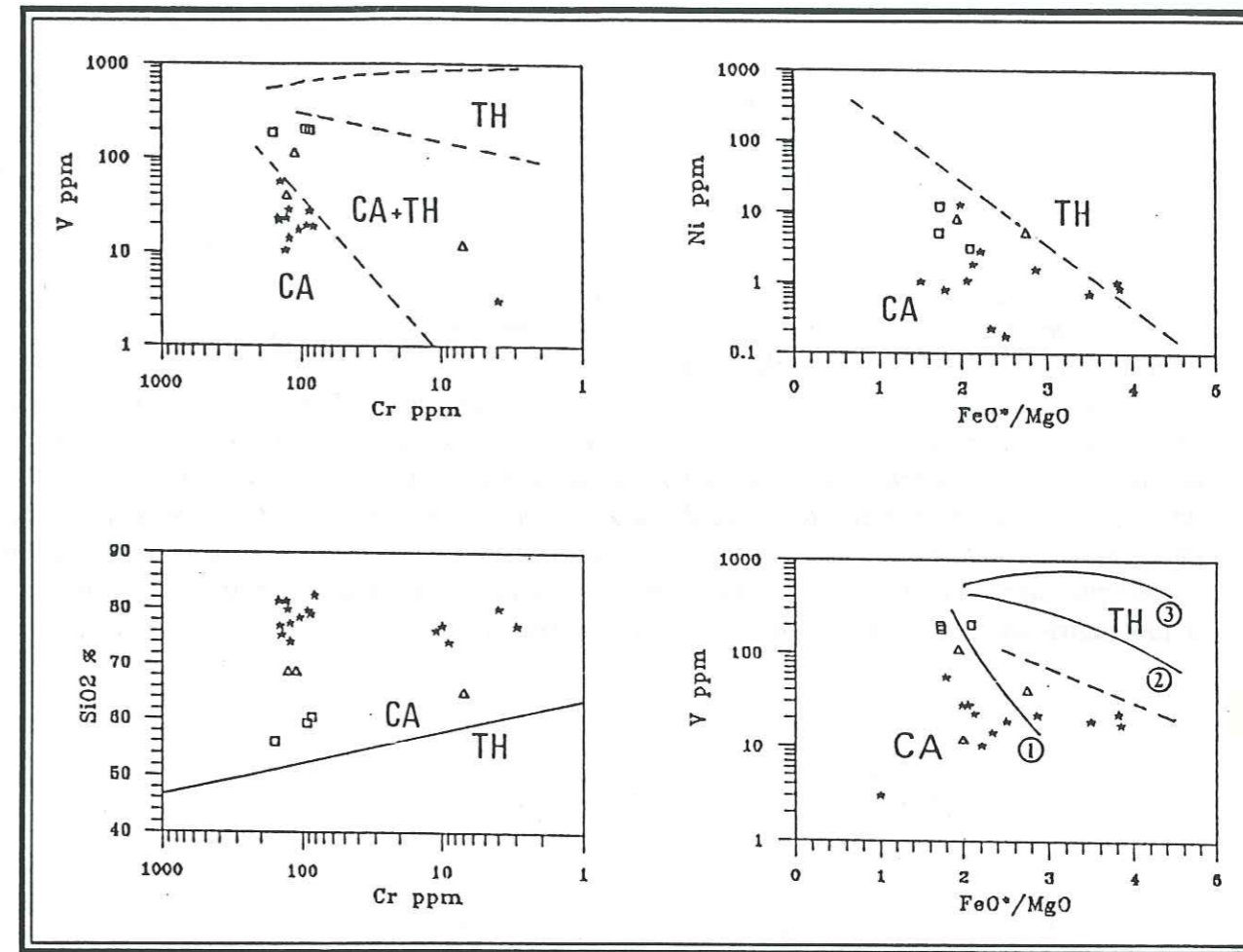


Figure 19: diagrammes de variation pour les éléments traces, (A. MIYASHIRO ET F. SHIDO, 1975); CA: domaine calco-alcalin; TH: domaine tholéitique; (1): lignée calco-alkaline pure; (2): lignée à affinité tholéitique; (3): lignée tholéitique pure.

III.6. SITUATION DANS LE CADRE GEODYNAMIQUE REGIONAL:

A l'échelle du sud marocain, deux origines différentes sont retenues pour ce magmatisme calco-alcalin: une origine crustale pour le magma acide et une origine mantellique pour le magma basique (Baouch, 1984; Hassenforder, 1987). Cet important magmatisme calco-alcalin est mis en rapport avec la subduction du dernier fragment de croûte océanique lors de la collision panafricaine (Leblanc et al. 1980), ou en rapport avec le sous-charriage, lors de la même phase, d'un craton septentrional sous le craton ouest-africain (Schermerhorn et al. 1986). Le magma basique serait produit soit directement par fusion partielle de la croûte océanique subductée, soit par fusion du manteau supérieur sous l'effet des fluides dégagés par celle-ci.

La production du magma basique calco-alcalin peut continuer jusqu'à 30 à 50 M.a. après la fin du processus de subduction (Bonin, 1987), il est par ailleurs supposé avoir stationné suffisamment longtemps au sein de la croûte continentale pour entraîner sa fusion et la genèse du magma acide.

La distinction de deux origines différentes du magmatisme calco-alcalin du PIII ou de type PIII, se retrouve dans certaines régions de la chaîne Trans-Saharienne, dans l'Ougarta (Remichi, 1987), dans le Hoggar et l'Adrar des Iforas (Chikhaoui, 1981).

III.7. CONCLUSION:

L'examen macroscopique et microscopique des roches du PIII du secteur étudié montre la présence de deux composants: d'une part un cortège basique constitué de coulées et de dykes d'andésite et d'autre part un cortège acide plus important en volume et de nature pyroclastique (s.l.). L'intime association d'ignimbrites et de tufs dans cette série, révèle une origine dynamique mixte de ces matériaux. Ces roches présentent un degré d'altération non négligeable mais qui n'a cependant pas effacé leur texture originelle.

Les données géochimiques de ces volcanites sont en faveur d'une appartenance à une suite calco-alkaline, à affinité tholéitique.

D'un point de vue géodynamique, cette série peut être interprétée dans le cadre du modèle retenu dans d'autres régions de l'Anti-Atlas (exposé ci-dessus), faisant appel à une origine double: manteau supérieur pour les roches basiques et croûte continentale pour les roches acides, sous réserve de mettre la variabilité des proportions des différents types pétrographiques, de certains caractères géochimiques, ainsi que la présence ou l'absence de roches à affinité tholéitique, sur le compte des variations de l'épaisseur de la croûte continentale d'une région à une autre lors de la mise en place des différentes séries.

Deuxième partie

Analyse structurale du PIII

de la boutonnière de Bou Azzer - El Graara

et interprétation géotectonique régionale

Deuxième partie

ANALYSE STRUCTURALE DU PIII DE BOU AZZER-EL GRAARA ET INTERPRETATION GEOTECTONIQUE REGIONALE.

INTRODUCTION:

La chaîne anti-atlasique (figure 20) fait partie de la ceinture orogénique pan-africaine (R. CABY et M. LEBLANC, 1973; R. BLACK et al., 1979; R. BLACK, 1980, 1984). Elle est interprétée en termes de tectonique de plaques comme le résultat du cycle orogénique pan-africain et de la collision entre le craton ouest-africain et un continent septentrional «supposé» (M. LEBLANC et J.R. LANCELOT, 1980).

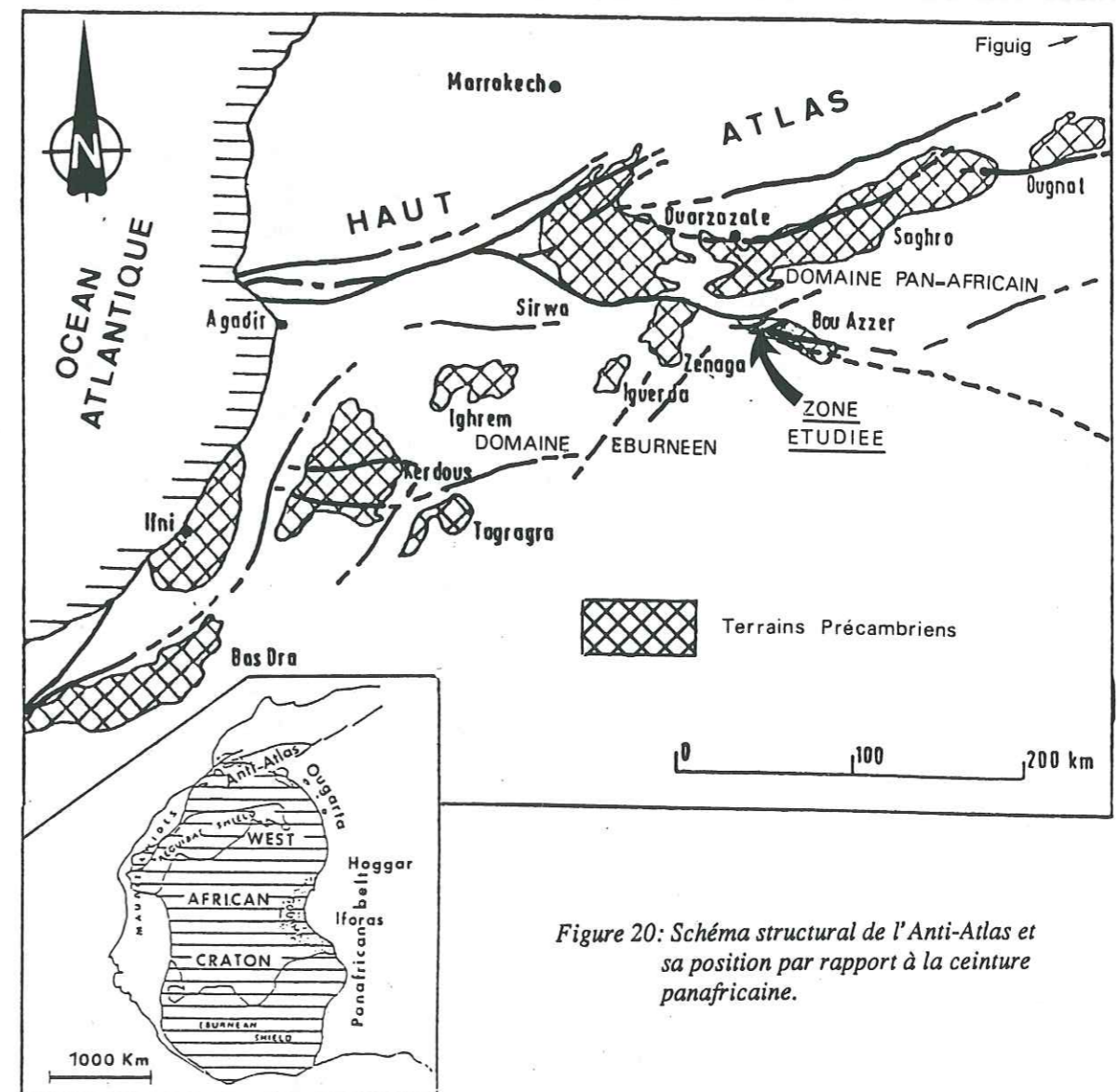


Figure 20: Schéma structural de l'Anti-Atlas et sa position par rapport à la ceinture panafricaine.

tel-00708240, version 1 - 14 Jun 2012

Deux phases tectoniques majeures ont été mises en évidence par M. LEBLANC (1975) pour ce cycle:

* la phase majeure B1 (685 +/- 15 Ma) responsable de l'obduction du complexe ophiolitique de Bou Azzer sur la marge nord du craton Ouest africain. Cette phase est différemment interprétée par A. SAQUAQUE et al. (1989), qui l'associe à une subduction vers le nord et à la construction d'un arc, se terminant par la collision entre l'arc sur croûte océanique et le craton Ouest-africain.

* la phase tardive B2 (608 +/- 7 Ma) responsable du plissement de la série de Tiddiline (post B1 et anté B2). Cette dernière phase marque l'entrée en collision directe du craton ouest-africain avec le «continent septentrional» (M. LEBLANC, 1981).

La mise en place de la série volcanique du PIII est associée à une activité tectonique distensive qui contraste avec le régime compressif de la phase B2. La présente partie, centrée sur la zone de Bou Azzer-El Graara où la situation géodynamique à la fin du cycle Pan-Africain semble bien établie, a pour but:

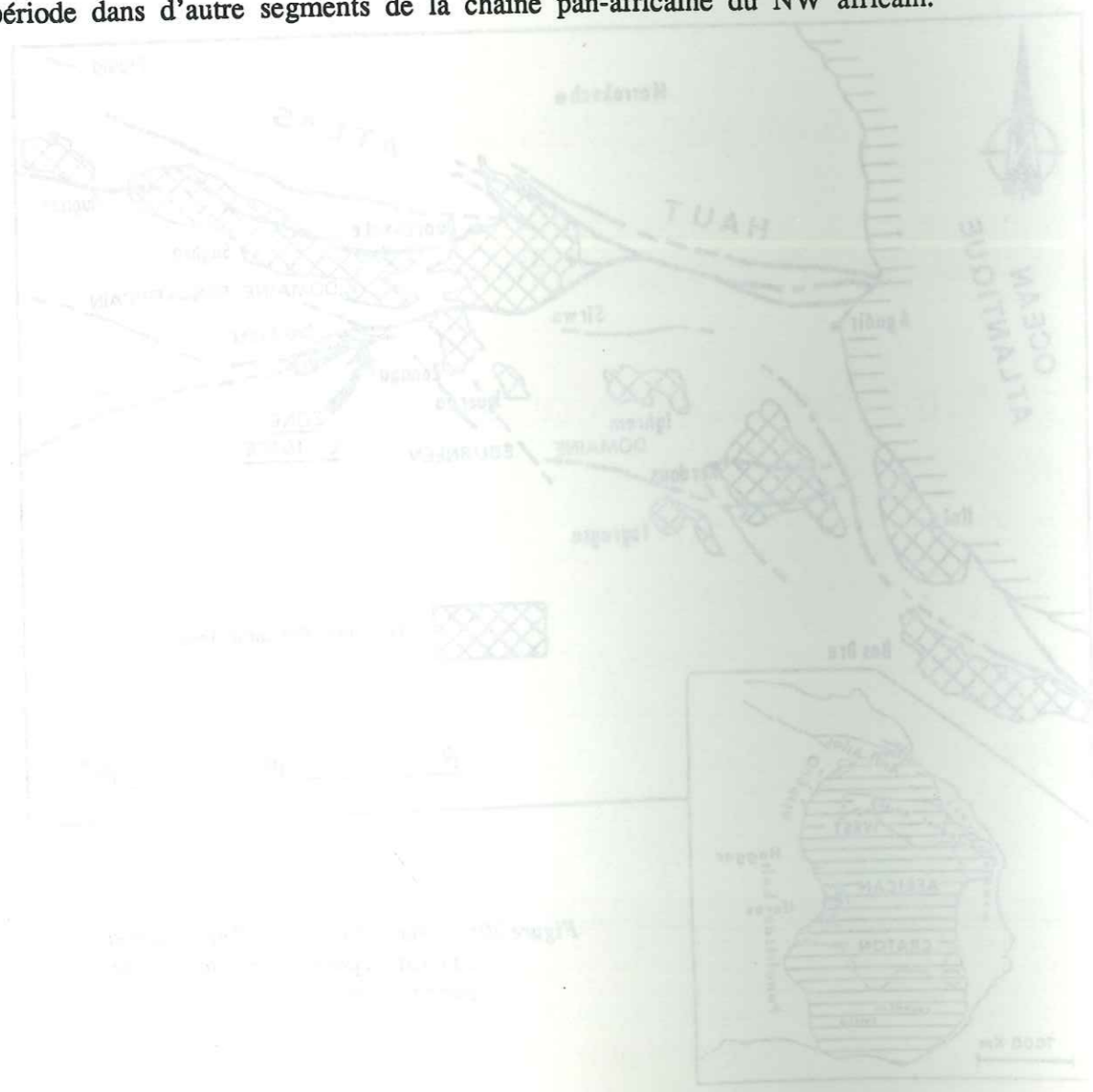
1) de caractériser l'évolution tectonique contemporaine du volcanisme post-orogénique du PIII.

2) de situer cette évolution par rapport aux événements géologiques connus pour la même période dans d'autres segments de la chaîne pan-africaine du NW africain.

Chapitre IV:

Analyse de la déformation de la série PIII

dans la boutonnière de Bou Azzer - El Graara



IV.1. Evolution tectonique de la région	75
IV.2. Analyse statistique de la fracturation	75
IV.2.1. Méthode	75
IV.2.2. Origine des données	77
IV.2.3. La fracturation de la boutonnière de Bou Azzer - El Graara	77
IV.2.4. La fracturation dans le secteur Tamdrost-Ambed	77
IV.3. Analyse de la déformation de la série volcanique PIII	78
IV.3.1. Aspects cartographiques	78
IV.3.1.1. Les failles normales	79
IV.3.1.2. Les grabens et hémi-grabens	79
A. Echelle métrique	79
B. Echelle décamétrique	81
C. Echelle hectométrique	83
IV.3.1.3. Les structures de glissement	83
A. Les glissements banc sur banc	83
B. Les loupes de glissement sur faille	83
IV.3.1.4. Les dykes de porphyrite andésitique	83
IV.3.2. Aspects microtectoniques	83
IV.3.3. Conclusion	85

tel-00708240, version 1 - 14 Jun 2012

Chapitre IV: ANALYSE STRUCTURALE DE LA DEFORMATION DANS LA SERIE PIII DANS LA BOUTONNIERE DE BOU AZZER-EL GRAARA.

IV.1. EVOLUTION TECTONIQUE DE LA REGION:

Quatre principaux événements tectoniques ont marqué l'histoire de la région étudiée (M. LEBLANC, 1975; M. LEBLANC et J.R. LANCELOT, 1980):

(a) L'événement éburnéen qui est à l'origine des gneiss (2000 Ma) de la bordure nord du craton Ouest africain.

(b) La phase B1 est caractérisée (figure 21) par:

- des plis isoclinaux déversés vers l'WSW et des chevauchements pluri-kilométriques.
 - une schistosité de flux (S1) dans un domaine de métamorphisme épizonal.
 - des cisaillements dans le plan de schistosité, engendrant parfois des bandes de mylonites.
- Le métamorphisme lié à cette phase est daté à 685+/-15 Ma (Rb-Sr, N. CLAUER, 1976).

(c) la phase tardive panafricaine B2 détermine les lignes structurales visibles dans les terrains PII de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara. Elle se caractérise par deux styles de déformation:

- Une déformation souple, donnant des plis à charnière arrondie et angle d'ouverture très faible, affectés d'une schistosité espacée (S2). Les axes de ces plis sont de direction moyenne N140°E;

- Une déformation cassante sous forme de décrochements conjugués et de failles inverses, donnant une direction moyenne de compression entre N20°E et N35°E. Cette phase tardive B2 marque la fin du PII supérieur.

(d) la tectonique hercynienne, peu développée dans la région, se traduit dans le PIII, rigide, par des structures cassantes. Des fractures pluri-kilométriques (N70° à N120°) se superposent à d'anciens accidents précambriens (B2). Elles auraient alors fonctionné en cisaillements senestres et seraient responsables des décalages horizontaux des massifs de serpentine. Ces déformations hercyniennes se traduisent aussi dans l'Adoudounien, par des structures plissées, qui se distinguent par leur caractère disharmonique (M. LEBLANC, 1972;1975). Comme dans l'Ougarta (J. FABRE, 1971), l'Anti-Atlas à l'hercynien, est assimilé à un aulacogène: ensemble de structures du socle, induisant des plissements de la couverture, en domaine structural peu profond et avec un faible taux de raccourcissement (M. LEBLANC, 1975).

IV.2. ANALYSE STATISTIQUE DE LA FRACTURATION:

Nous allons décrire les principales familles de directions de fracturation dans l'ensemble de la boutonnière et tout particulièrement dans le secteur Tamdrost-Ambed, afin de dégager les rapports entre ces directions et la série volcanique du PIII.

IV.2.1. méthode:

Chaque mesure consiste en deux informations:

- la direction de la faille mesurée.
- la longueur de la faille à l'affleurement.

	PHASE B1. (685 +/- 15Ma)	PHASE B'1.	PHASE B2. (608 +/- 7 Ma)	M.R. AZIZI SAMIR DISTENTION PIII (580 à 560 Ma)	PHASE HERCINIENNE (280 à 240 Ma)
STYLE DE DEFORMATION					PLIS Disharmoniques et localisés
SCHISTOSITE	Pliis Isoclinaux (métamorphisme de facies schiste vert). FLUX S1	Pliis Isoclinaux STRAIN SLIP S'1	FRACTURE S2	HORSTS ET GRABENS	
FRACTURATION	BOUDINAGE CISAILLEMENT	CISAILLEMENT CHEVAUCHEMENT dans S1	D. dextre N20°E D. senestre N25°E	Faïlles normales NE-SW Décrochement extension senestre	
DIPECTION DE CONTRAINTE	Déversement vers le SUD			Extension NW-SE	

Figure 21: Chronologie et styles de déformation dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara, (d'après P. BILLAUD, 1977, modifié).

Les données sont classées selon leur orientation dans des classes conventionnelles de 0 à 9°, de 10 à 19° etc... Ces données sont représentées graphiquement sur des rosaces, qui permettent de visualiser les directions principales de fracturation et qui facilitent les comparaisons d'une échelle à l'autre.

IV.2.2. Origine des données:

Les données analysées proviennent des mesures de failles que nous avons effectuées, d'une part, sur la carte au 1/100000° de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara, établie par M. LEBLANC (1975), d'autre part, sur la carte au 1/2000° du secteur étudié, que nous avons établie.

IV.2.3. La fracturation dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara:

La rosace R1 (figure 22), montre les principales familles de directions et leurs proportions relatives. On distingue sur cette rosace cinq principaux pics; le pic 1 (N20°E à N40°E), le pic 2 (N50°E à N70°E), le pic 3 (N80°E à N90°E), le pic 4 (N100°E à N110°E) et le pic 5 (N120°E à N130°E).

D'autres familles de direction sont présentes mais avec une moindre importance statistique; C'est le cas notamment des directions (N0°E à N20°E) et (N130°E à N150°E).

IV.2.4. La fracturation dans le secteur Tamdrost-Ambed:

La rosace R2 (figure 22), montre les principales familles de directions pour l'ensemble des mesures de ce secteur: le pic 1 (N0°E à N20°E), le pic 2 (N40°E à N70°E) et le pic 3 (N100°E à N120°E). Les deux dernières familles sont statistiquement les plus importantes.

Les trois grandes familles de failles de direction; (N0°E à N20°E), (N40°E à N70°E) et

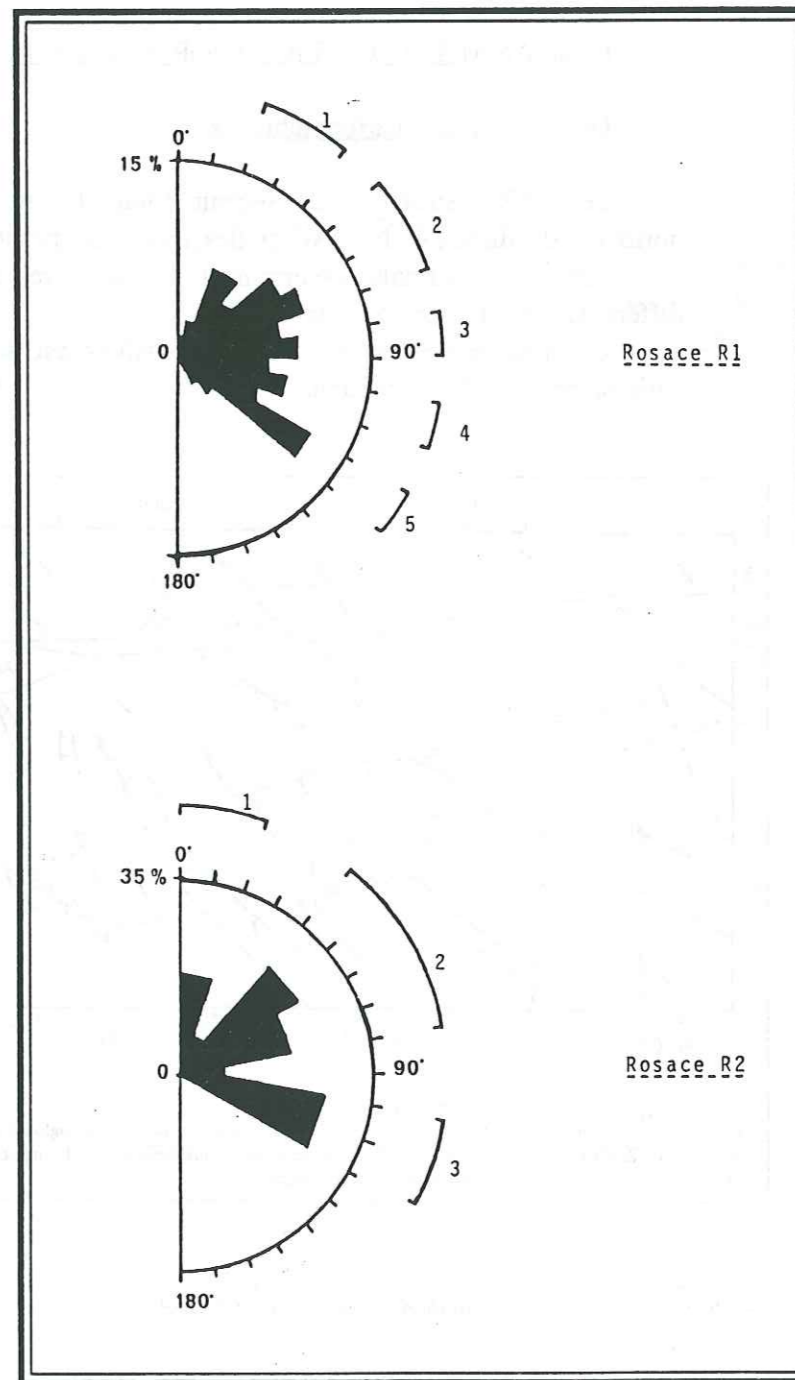


Figure 22: Rosaces des directions de fracturation; R1: dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara; R2: dans le secteur de Tamdrost-Ambed.

(N100°E à N120°E), affectent la série volcanique du PIII qui occupe à l'affleurement la presque totalité du secteur. Ces failles ont donc probablement toutes joué lors de phases tectoniques contemporaines ou postérieures à la mise en place de cette série.

La famille de directions (N100°E à N120°E), dite Ougartienne est celle de la suture de Bou-Azzer, ces accidents sont hérités de la phase majeure pan-africaine.

La famille de directions (N40°E à N70°E), vue son importance dans la série PIII sera étudiée en détail dans la suite du présent chapitre.

Le pic (N0°E à N20°E), de moindre importance statistique représente des décrochements sénestres associés à des filons de quartz-carbonate-oligiste, ils seraient liés à l'orogénèse hercynienne.

IV.3. ANALYSE DE LA DEFORMATION DANS LA SERIE VOLCANIQUE PIII:

IV.3.1. Aspects cartographiques:

Le schéma structural du secteur étudié (figure 23), montre l'importance des failles normales de direction NE-SW et des dykes de porphyrite andésitique de même direction.

Ces failles normales déterminent des structures distensives en horsts et hémigrabens à différents niveaux de la série PIII.

L'ensemble de ces structures distensives est scellé par la série sédimentaire grésocarbonatée de l'Adoudounien.

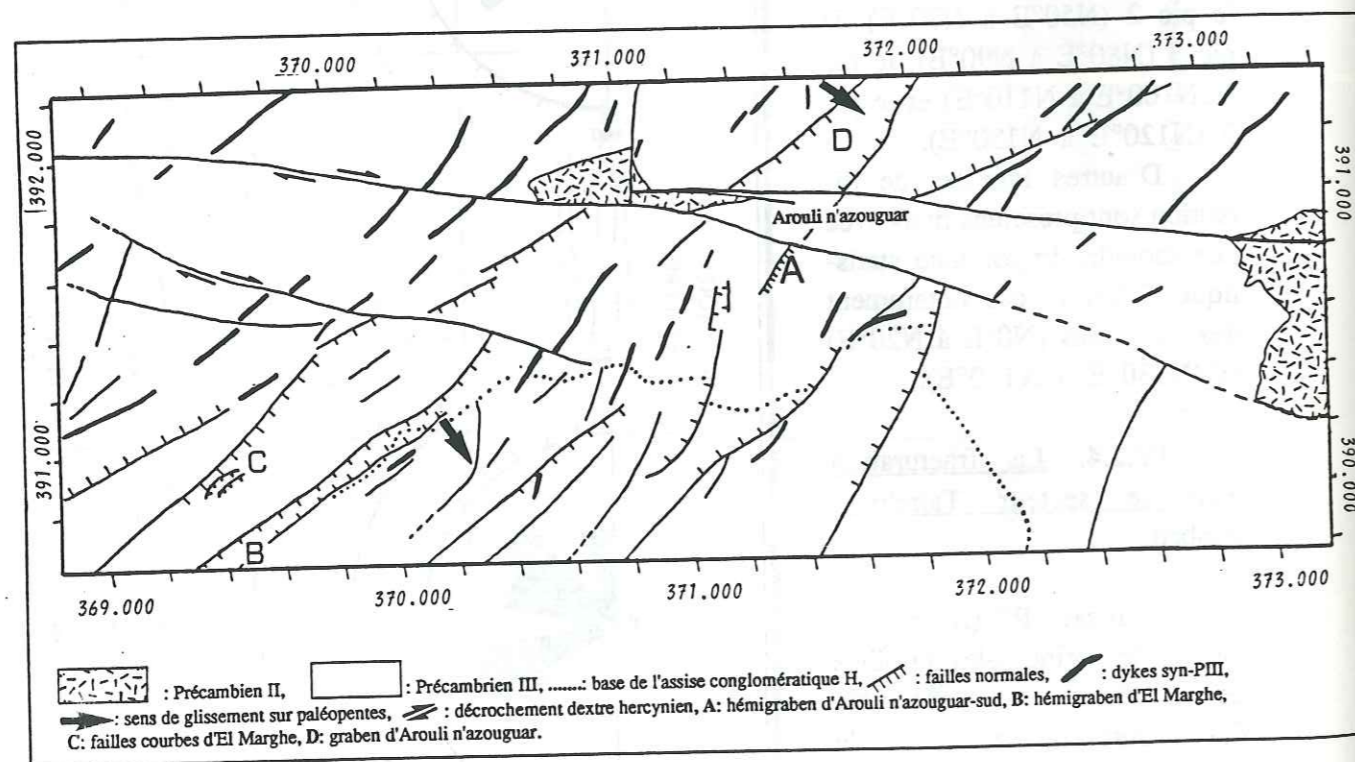


Figure 23: Schéma structural du district Tamdrost-Ambed.

IV.3.1.1. Les failles normales:

De direction générale NE-SW, elles déterminent la structure générale du secteur étudié par basculement et effondrement de blocs. Ces failles normales présentent souvent des miroirs striés que nous décrirons plus loin (cf. IV.3.2).

IV.3.1.2. Les grabens et hémigrabens:

Ces structures distensives ont été observées en différents points, nous allons en décrire quelques exemples à des échelles différentes.

A) Echelle métrique:

Des structures d'effondrement en grabens et hémigrabens de dimension métrique se présentent à différents niveaux de la série PIII:

a) Des microstructures en horsts et grabens (figure 24) sont observées au toit de l'assise A3, à la base de la série PIII, au Nord d'Ambed (X=373.200; Y=392.200). Ces microstructures sont déterminées et délimitées par des plans striés. Le stéréogramme (figure 25) où sont reportées les projections de plan des microfailles et des stries qu'elles portent, indique une direction générale NW-SE des plans de mouvement.

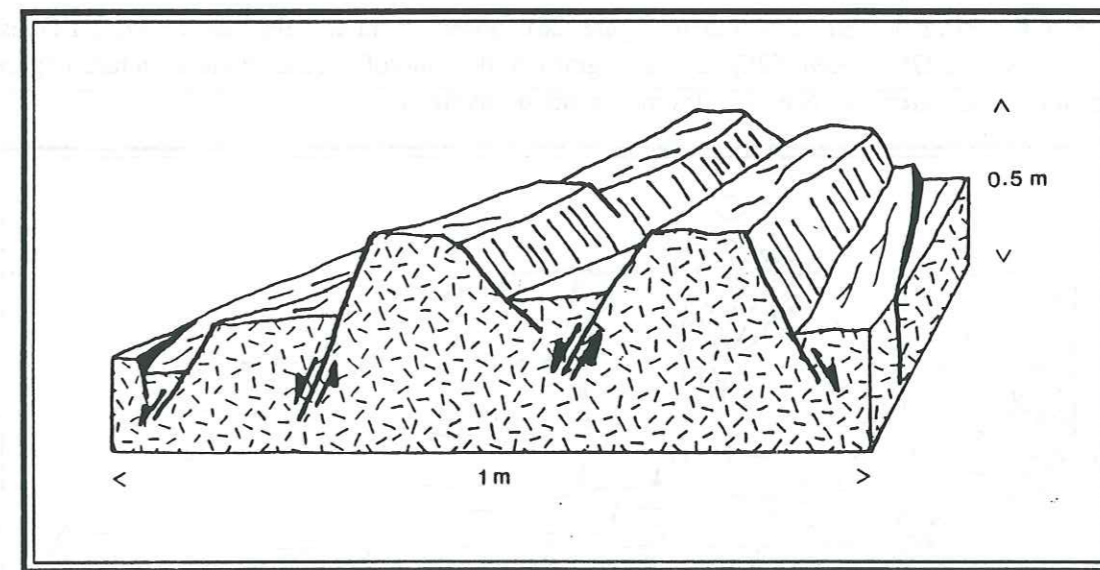
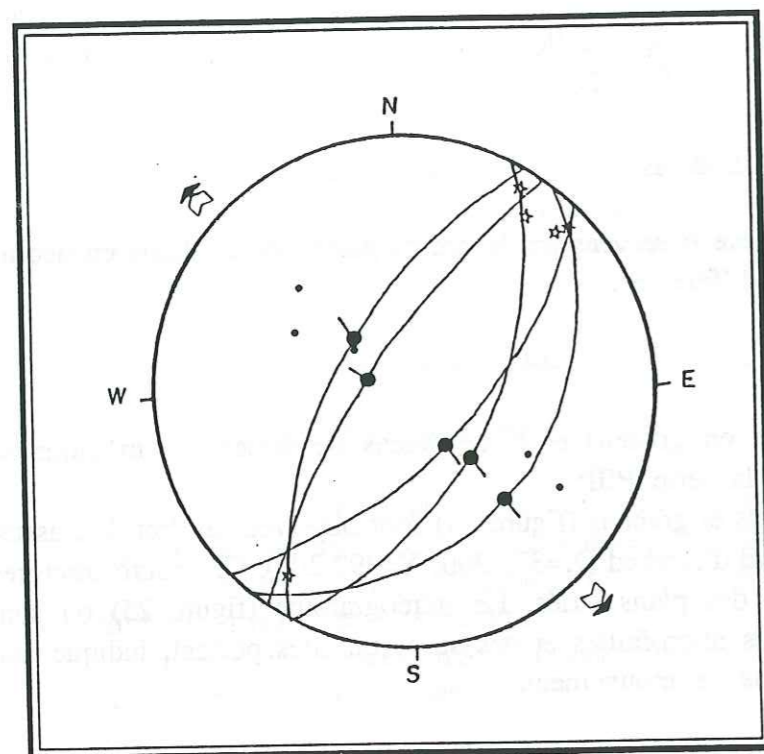


Figure 24: Structure distensive en microhorsts et micrograbens, observée à Ambed (d'après photos), au toit de l'assise A3, (X=373.200 Y=392.200).

tel-00708240, version 1 - 14 Jun 2012



Légende commune aux figures: 25, 27, 29, et 33.
 — : trace cyclographique du plan de faille.
 • : pôle du plan de faille.
 ● : strie.
 ☆ : pôle du plan de mouvement.

Figure 25: Projection stéréographique des plans de failles normales de la structure ci-dessus, (hémisphère inférieure).

b) Microstructure en hémigraben (figure 26), observée au toit de l'assise D, à l'Ouest d-Ambed (X=372.170; Y=390.820). Le stéréogramme des microfailles de cette structure (figure 27) montre une direction NW-SE des plans de mouvement.

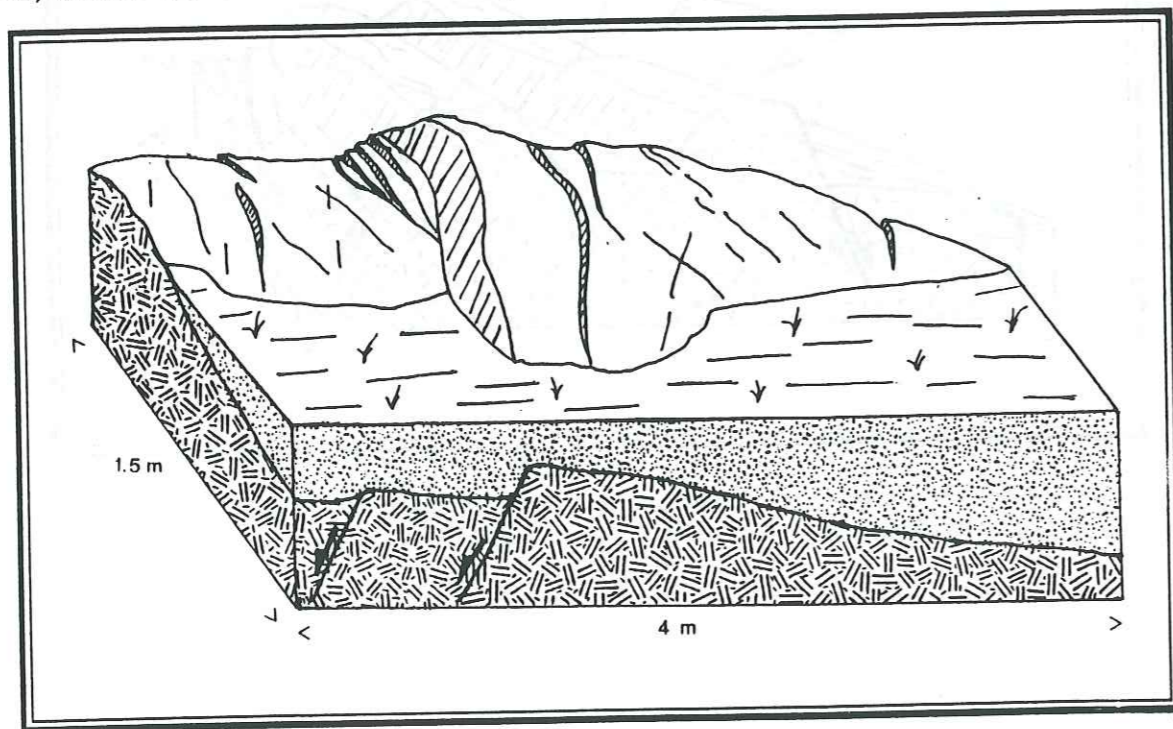


Figure 26: Microstructure distensive en hémigraben, observée au toit de l'assise D (d'après photos), à l'ouest d'Ambed, (X=372.170 Y=390.820).

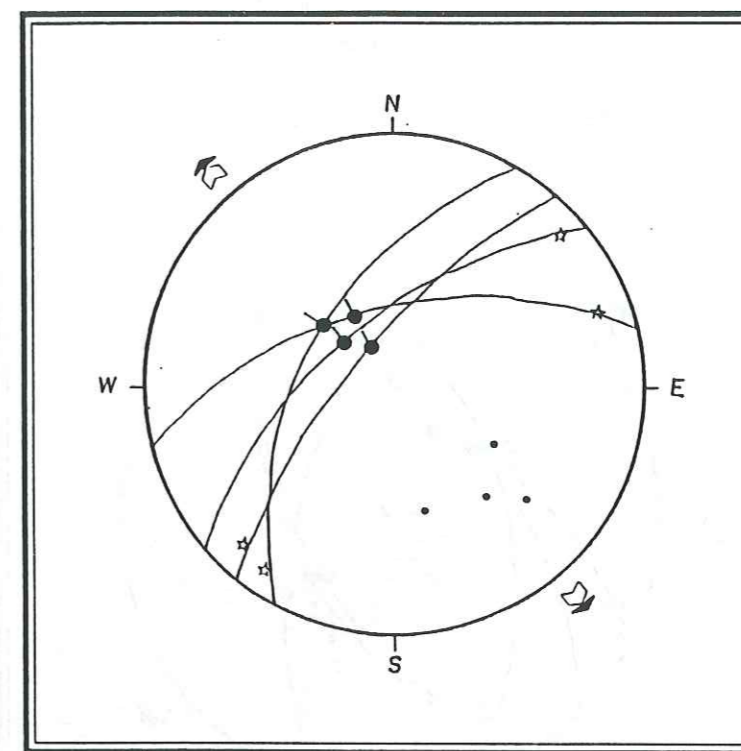


Figure 27: Stéréogramme des plans de failles précoces de la structure de la figure 26.

B) Echelle décimétrique:

a) Exemple du graben de Tamarakht (X=369.400; Y=390.650), feuille Tamdrost-Est: Au toit de l'assise D1, ce graben (figure 28) est délimité par des failles normales à

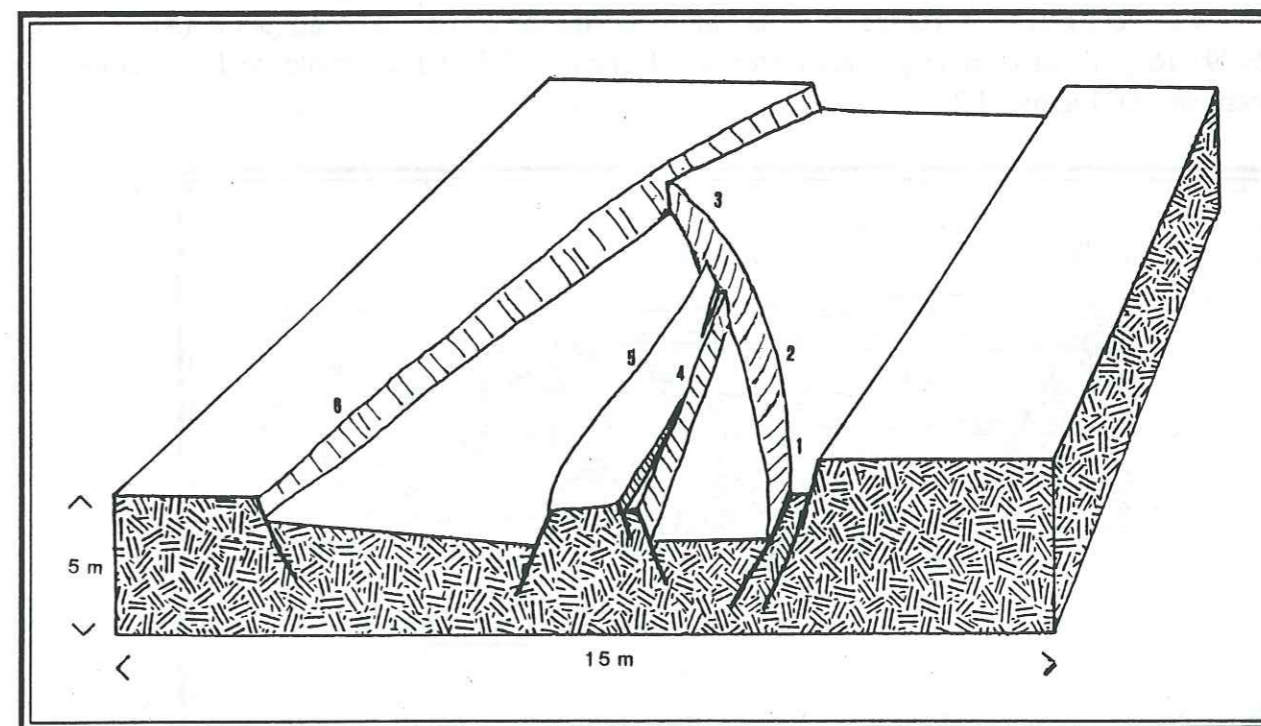


Figure 28: Structure distensive précoce (d'après photos), observée à l'Est de Tamdrost, (X=369.400 Y=390.650).

miroir strié. Un de ces plans de faille est courbe, avec une strie à pitch 90° là où le plan de faille a une direction NE-SW (points de mesures 1 et 2), et oblique dans la zone où le plan de faille prend une direction subméridienne (point de mesure 3). Le stéréogramme de ces plans de failles (figure 29), confirme une direction d'extension NW-SE.

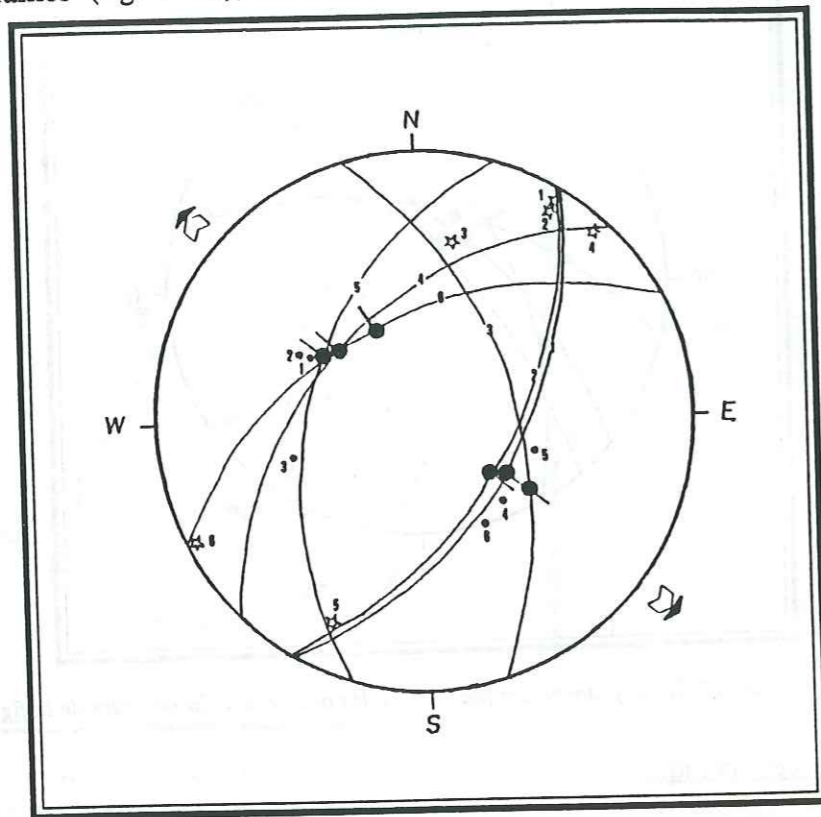


Figure 29: Stéréogramme des plan de failles de la structure ci-dessus.

b) Exemple de l'hémigraben fossilisé d'Arouli n'azouguar (figure 30):

Cet hémigraben à regard NW, se situe au toit de l'assise D1, au point (X=371.440; Y=391.160), il est comblé par les matériaux de l'assise E1 et l'ensemble de la structure est fossilisé par l'assise E2.

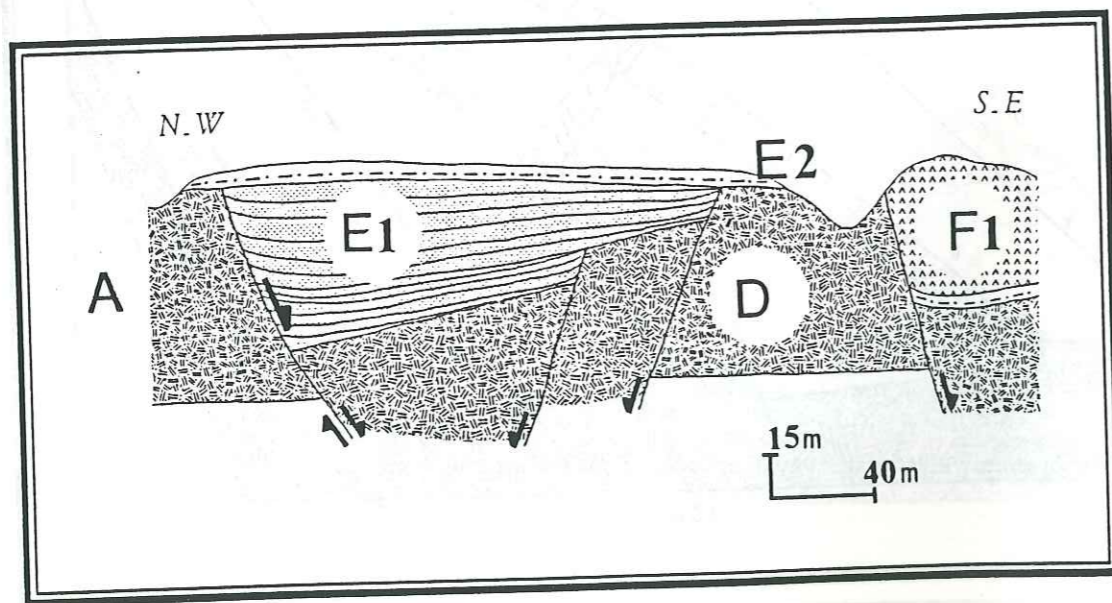


Figure 30: Hémigraben scél é par l'assise E2, observé dans la zone d'Arouli n'azouguar (d'après photos), X=371.440 Y=391.160.

C) Echelle hectométrique:

L'hémigraben d'El-Marghe (X=369.600; Y=390.500), à regard NW (figure 31), est déterminé par des failles normales de direction NE-SW, par basculement et effondrement de blocs. La formation K, détritique, qui comble cette structure, présente de fortes variations d'épaisseur des niveaux et des discordances progressives en biseau sur le toit de l'assise sous-jacente basculée.

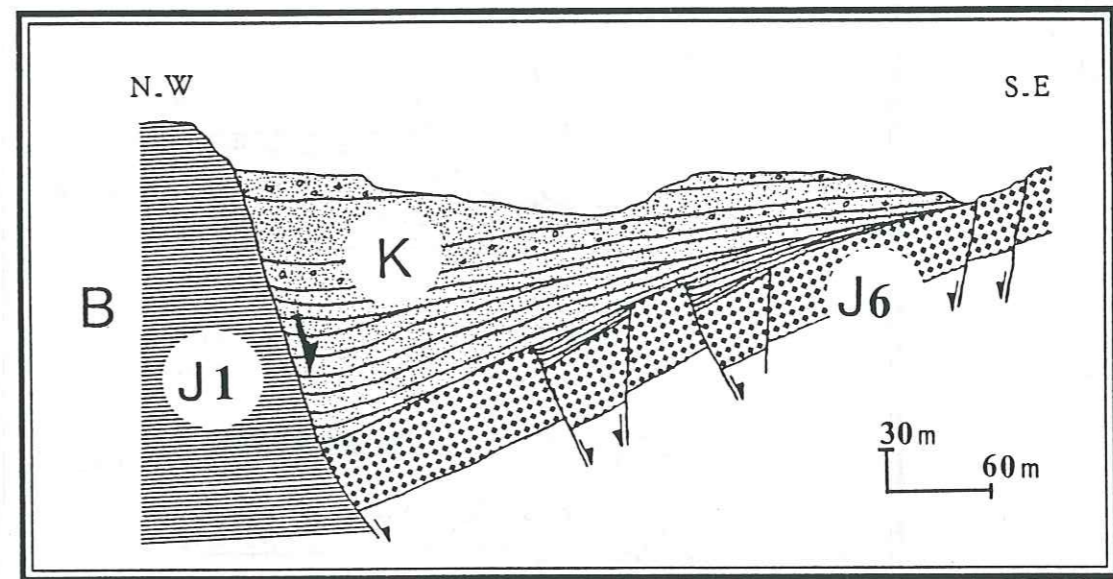


Figure 31: Le demigraben d'El Marghe, à regard NW, présentant des discordances progressives (d'après photos), X=369.600 Y=390.500.

IV.3.1.3. Les structures de glissement:

A) Les glissements banc sur banc:

Des glissements en masse de matériaux volcaniques, se placent à la limite entre deux coulées. Leur surface basale est soulignée par des cannelures centimétriques à décimétriques. Sur un exemple situé au niveau de la falaise Sud Arouli n'azouguar (planche 6), les stries sont très bien réglées avec une direction N160°E et un plongement de 10 à 20°S. Ce genre de stries est observé en plusieurs autres points du secteur étudié et à différents niveaux de la série volcanique, notamment dans la partie Nord d'Arouli n'azouguar au point (X=371.860; Y=391.600). Sur une surface de stratification (N120°E, 40°S), les stries ont une direction N125°E et un plongement de 5 à 10°SE.

B) Les loupes de glissement sur faille:

L'exemple de la station «Azib» au point (X=369.500, Y=391.060), montre (figure 32) qu'un fonctionnement en faille normale, alors que l'assise C3 est encore non consolidée, est à l'origine du développement d'une loupe de glissement à microfailles multiples et donne au toit de l'assise C3 un aspect en marches d'escaliers courbes (planche 6).

Les matériaux de l'assise C4 glissent sur ces petits escarpements engendrant une striation de ceux-ci. Il y a ensuite épandement de l'assise D qui fossilise à sa base un rejeu de la

tel-00708240, version 1 - 14 Jun 2012

faille normale principale (figure 32). Notons que dans ce cas aussi, la direction d'extension est NW-SE (figure 33).

Ces glissements témoignent de l'existence de paléopentes induites par la distension générale.

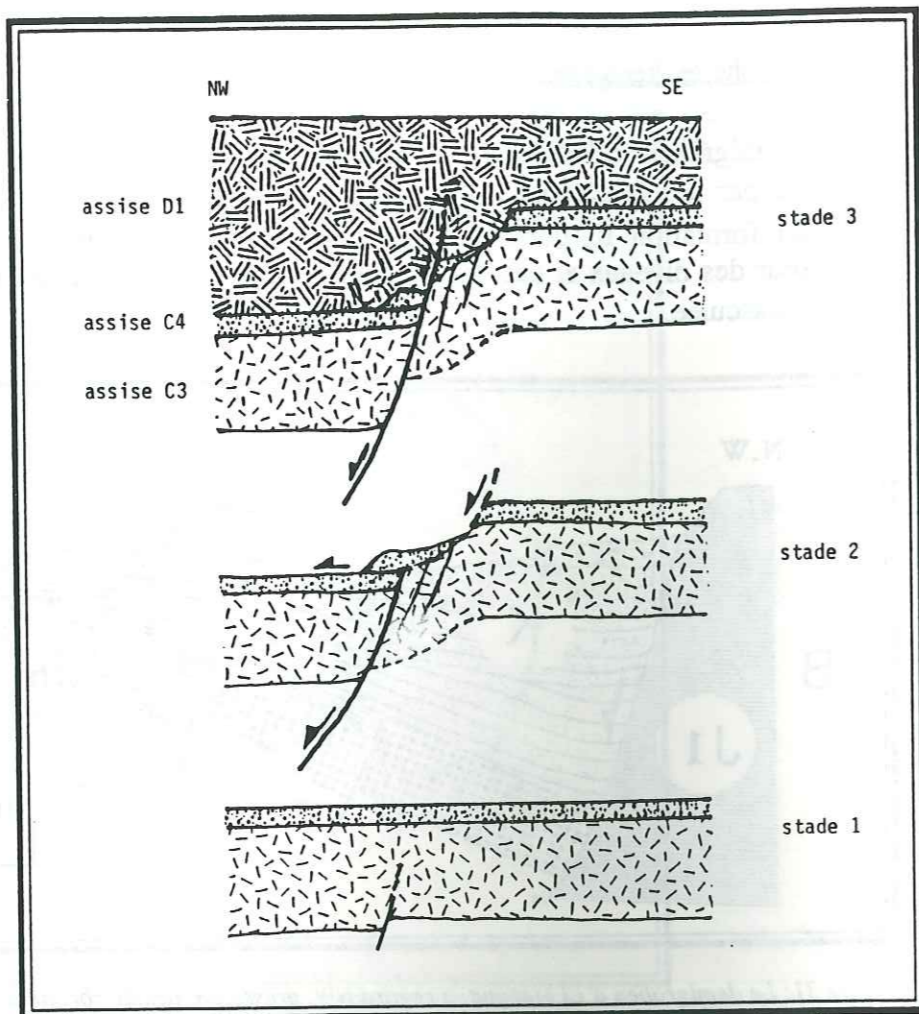
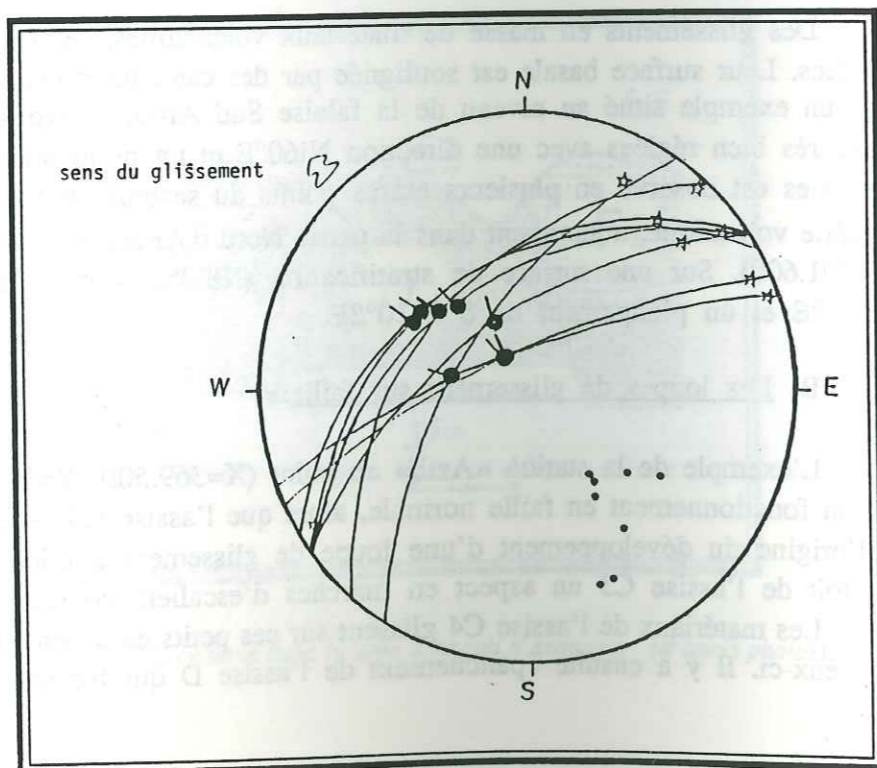


Figure 32: Reconstitution cinématique du glissement précoce de matériau volcanique observé à la station Azib, (X=369.500 Y=391.060); stade 1: mise en place de l'assise C4; stade 2: rejeu de la faille normale et mise en place d'une loupe de glissement, avec développement de failles normales secondaires; stade 3: épanchement de l'assise D1 qui fossilise la structure avec rejeu de la faille normale à la base de l'assise D1.

Figure 33: Stéréogramme des failles normales précoces, associées à la structure observée au Azib.



IV.3.1.4. Les dykes de porphyrite andésitique:

De nombreux dykes de 1 à 3m de large pour quelques centaines de mètres de longueur, sont intrusifs dans la série volcanique du PIII. Verticaux et de même direction que les failles normales, ces dykes peuvent être assimilés à des fentes de tension dans le plan σ_1 - σ_2 .

La rosace de direction de ces dykes orientés NE-SW (figure 34), montre également une direction d'extension NW-SE.

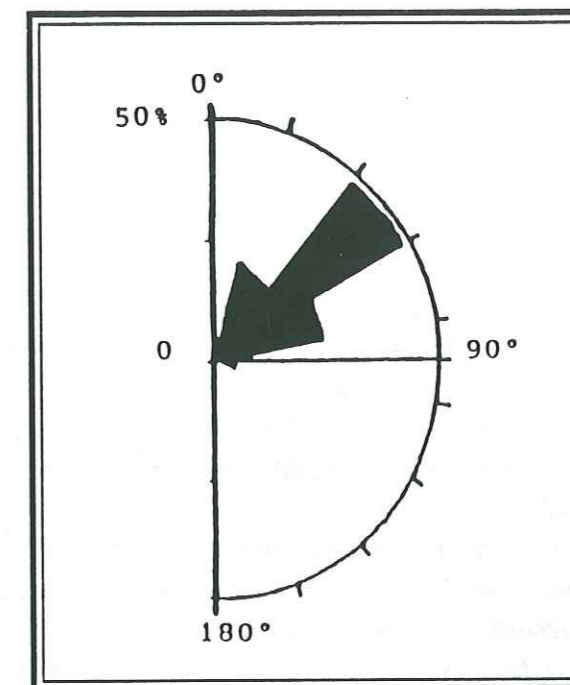


Figure 34: Rosace des directions des dykes de porphyrite andésitique, (noter l'éventail étroit des directions).

IV.3.2. Aspects microtectoniques:

De nombreux miroirs de failles normales présentent des indices de déformation précoce: abondance d'éléments striateurs intacts et absence de toute recristallisation (planche 6). Des structures néoformées en «rouleaux» se développent sur certains miroirs de failles normales principales. Elles se présentent sous forme d'une succession de rides ou "rouleaux" dissymétriques (figure 35 et planche 6).

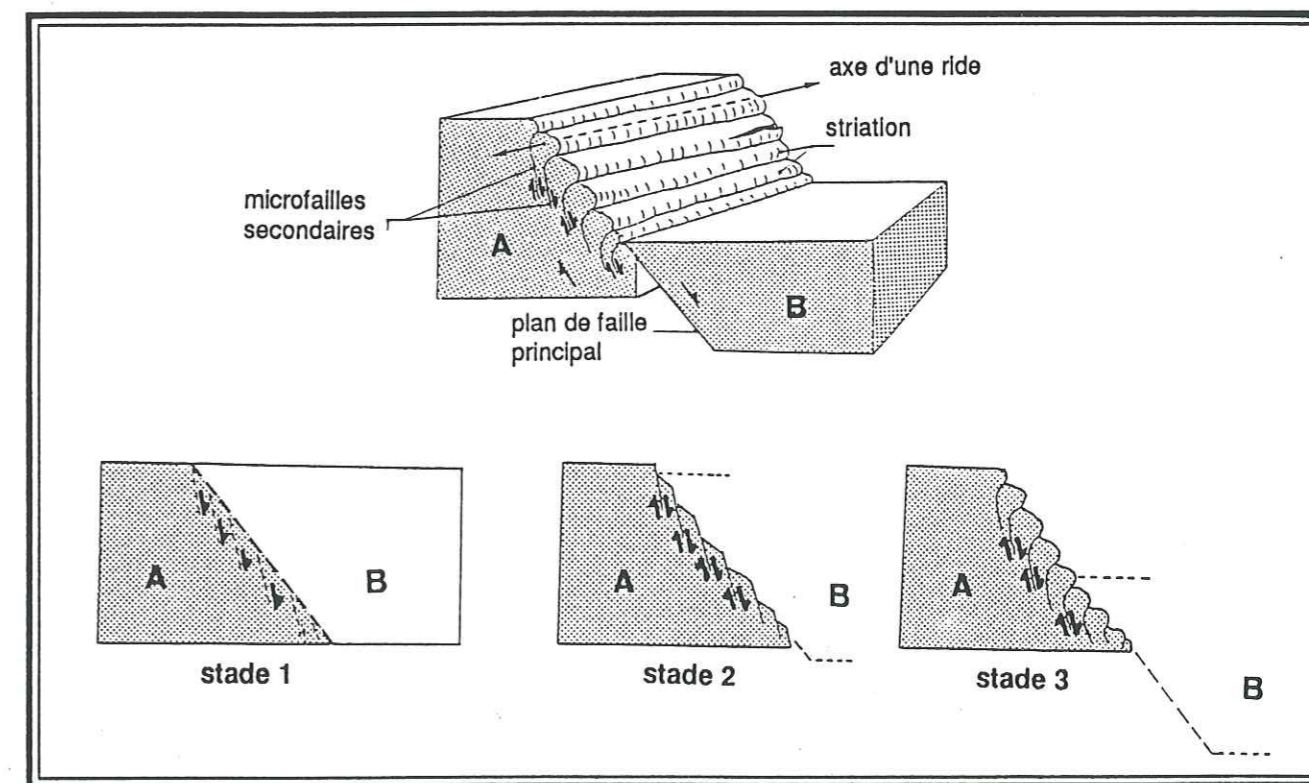


Figure 35: Morphologie et mécanisme (interprétatif) de formation des structures précoces en «rouleaux», observées à Arouli n'azouguar; stade 1: formation d'un plan de néorupture avec initiation d'un système de microfailles secondaires; stade 2: début de basculement du compartiment B, associé à un jeu normal des microfailles; stade 3: étape avancée du basculement de B le long du plan de faille principale, avec torsion des microfailles secondaires et torsion conforme des lanières de matériau qu'elles séparent.

Chaque "rouleau" est limité par des microfailles secondaires elles-mêmes striées et courbées vers l'aval lors du déplacement du compartiment supérieur. Ce type de déformation implique un matériau encore plastique au moment de la déformation. Des structures comparables ont été décrites dans des sédiments gréseux non indurés du Trias du Haut-Atlas (E. LAVILLE et J.P. PETIT, 1984) et interprétées comme le résultat de déformations synsédimentaires.

IV.3.3. conclusion:

De l'étude des aspects cartographiques et microtectoniques de la déformation dans la série volcanique du PIII, nous pouvons retenir que:

- * *Les failles normales de direction NE-SW jouent un rôle principal dans la détermination des structures distensives observées à différentes échelles (métrique à hectométrique).*
- * *Les différentes structures possèdent des caractères géométriques indiquant une distension NW-SE.*
- * *La présence de ces structures distensives à différents niveaux de la série du PIII, ainsi que celle de discordances progressives au sein de certains hémigrabens, indique le caractère saccadé de cette distension.*
- * *La fossilisation de certaines structures distensives par les niveaux postérieurs, reflète la contemporanéité de la mise en place de celle-ci avec le phénomène de distension.*

Chapitre V:

Paléochamps de contraintes et modèle géotectonique

V.1. Détermination du paléochamps des contraintes	89
V.1.1. Méthode	89
a. Hypothèse de départ	89
b. Interprétation géologique	90
V.1.2. Origine et nature des données	90
V.1.3. Les failles normales précoces	90
V.1.4. Les autres plans de failles	92
V.1.5. Conclusion	92
V.2. Aspect régional de la distension PIII et interprétation géodynamique	93
V.2.1. Aspect régional	93
V.2.2. Interprétation de la tectonique étudiée	94
V.3. Modèle géotectonique	95
V.4. Conclusion	97

V.1. DETERMINATION DU PALEOCHAMP DE CONTRAINTES:

V.1.1. Méthode:

D'après J. ANGELIER et P. MECHLER (1977), la méthode des dièdres droits est fondée sur la distinction pour chaque jeu de faille, de quatre dièdres droits (deux en compression et deux en extension).

Cette méthode permet de localiser les directions des contraintes principales soit graphiquement, soit par le calcul, pour une population de failles contemporaines.

a) Hypothèses de départ:

On définit à l'échelle du site examiné trois contraintes principales, qui sont les axes de l'ellipsoïde des contraintes, appelées σ_1 (contrainte principale maximale), σ_2 et σ_3 , avec $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

D'autre part on suppose que pour chaque faille, le sens du jeu est tel que la contrainte principale σ_1 est contenue dans le dièdre en compression et la contrainte principale σ_3 dans le dièdre en extension (figure 36).

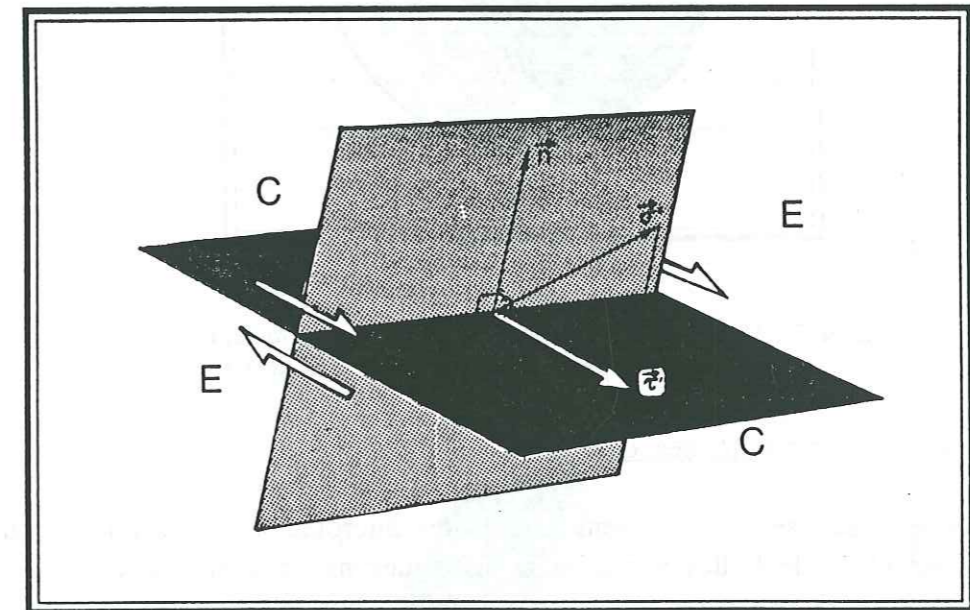


Figure 36: Dièdres droits d'extension (E) et de compression (C) pour le jeu d'un plan de faille (noir) suivant le sens (flèche) imposé par la contrainte tangentielle τ' , composante de σ' . Le plan auxiliaire (gris) est perpendiculaire à τ' et contient la normale n' au plan de faille (d'après J. ANGELIER et P. MICHLER, 1977).

b) Interprétation géologique:

Les mesures sur le terrain permettent de caractériser numériquement l'orientation du plan de faille ainsi que la direction et le sens du mouvement.

Un type de représentation graphique est celui de la figure 37, où le plan de faille est PF. Sa strie est A (la flèche centrifuge indique que le jeu est de composante normale). A partir de cela on construit le «plan auxiliaire» PA perpendiculaire à A (donc à PF). Les deux plans PA et PF divisent l'espace en quatre dièdres droits représentés sur la figure par les régions en noir (dièdre en compression contenant σ_1) et en gris (dièdre en extension contenant σ_3).

Le traitement de nos mesures par cette méthode a été effectué sur ordinateur à l'IRIGM, à l'aide d'un programme écrit par J.L. MUGNIER (1984).

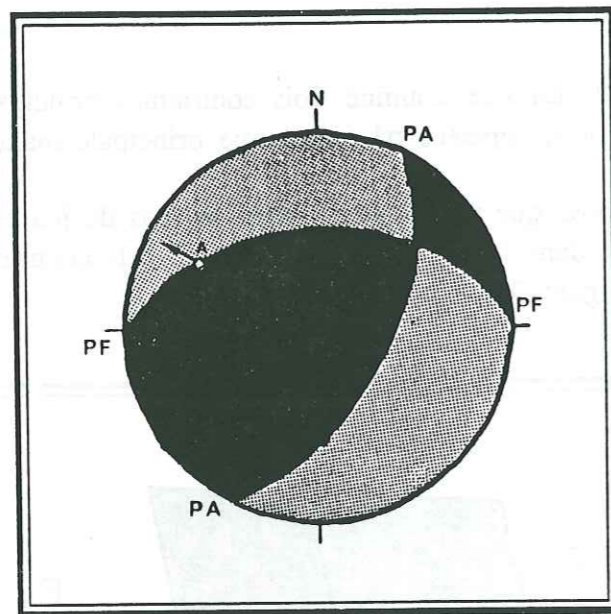


Figure 37: Mécanisme d'un jeu de faille, (PF: plan de faille; PA: plan auxiliaire perpendiculaire à la strie; A: strie).

V.1.2. Origine et nature des données:

Les données analysées proviennent de mesures microtectoniques sur le terrain. Ce sont des mesures de plans de failles striés; nous distinguerons deux ensembles:

- Les mesures de plans de failles striés, (failles normales) présentant des critères de fonctionnement au PIII.
- Les mesures de plans striés sur les failles de direction Ougartienne (N110°E à N130°E).
Sont mesurés: la direction du plan de faille, son pendage, le pitch des stries et le sens de mouvement.

V.1.3. Les failles normales précoces:

Le traitement par la méthode des dièdres droits, des mesures de plans de failles normales à fonctionnement d'âge PIII certain, confirme (figure 38) que ces plans de failles ont une direction générale NE-SW bien réglée.

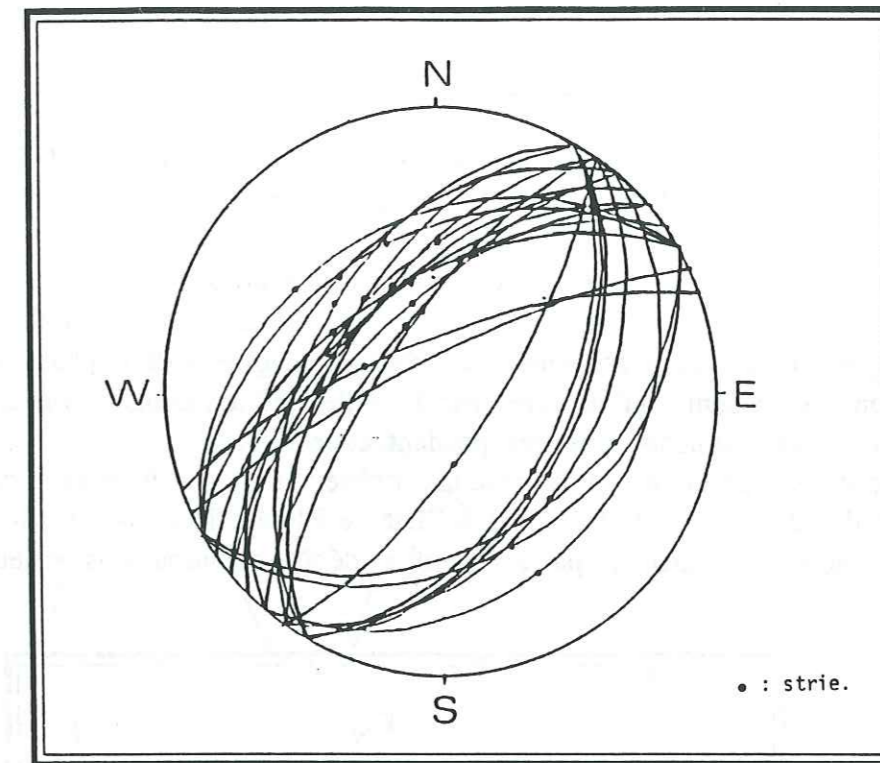


Figure 38: Stéréogramme des plans de failles normales précoces du secteur Tamdrost-Ambed.

La projection isoaire sur hémisphère inférieure (figure 39), donne la direction des axes des contraintes principales σ_1 , σ_2 et σ_3 . L'axe de la contrainte principale maximale σ_1 , est pratiquement vertical, celui de la contrainte principale minimale σ_3 est pratiquement horizontal, avec une direction moyenne NW-SE. Ce diagramme indique donc une distension NW-SE.

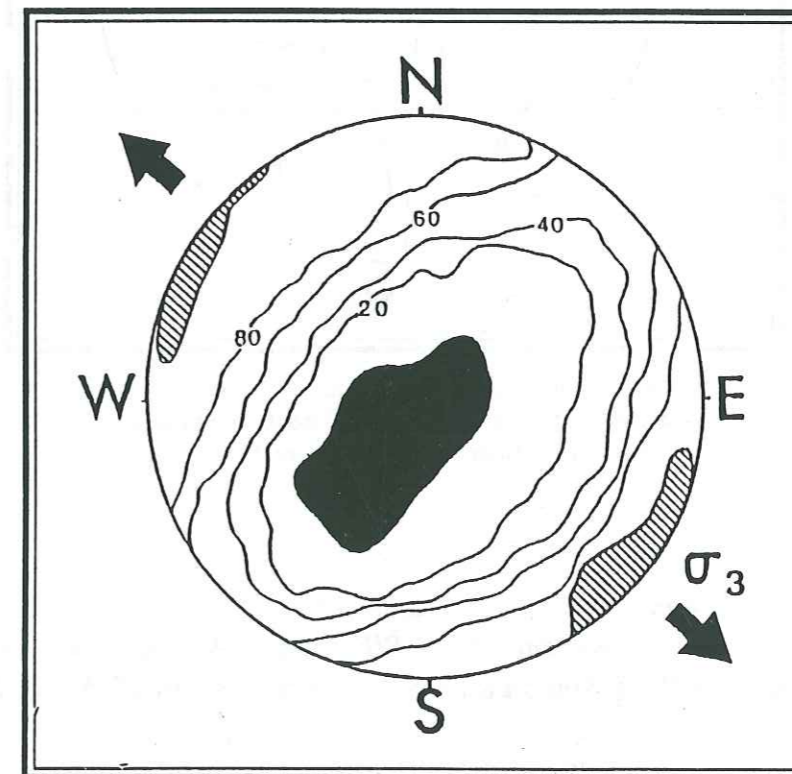


Figure 39: Axes principaux des contraintes, σ_1 en noir, σ_3 en hachuré, projection isoaire sur hémisphère inférieure correspondant à la distension synvolcanique PIII, (92 mesures).

V.1.4. Les autres plans de failles:

Le traitement par la méthode des dièdres droits des mesures de plans striés effectuées sur les plans de failles N120°E, nous a permis de mettre en évidence une "phase" de décrochement-extension.

La projection isoaire (figure 40) correspondant à cette phase donne un axe de contrainte principale maximale σ_1 oblique qui se rapproche de (N40°E, 50°NE). Les critères cartographiques liés à cette phase sont moins évidents que ceux de la phase de décrochement-compression plus récente qu'on verra par la suite; les accidents sub-latitudinaux auraient fonctionné en décrochements sénestres pendant cette «phase».

Il faut noter par rapport à ce résultat: l'observation sur le terrain de décrochements extensifs scellés dans les matériaux PIII à l'Est de Bleïda (M.R. AZIZI SAMIR 1983). Ces accidents (planche 6), n'affectent pas les premiers dépôts adoudouniens, et leur jeu serait donc d'âge PIII.

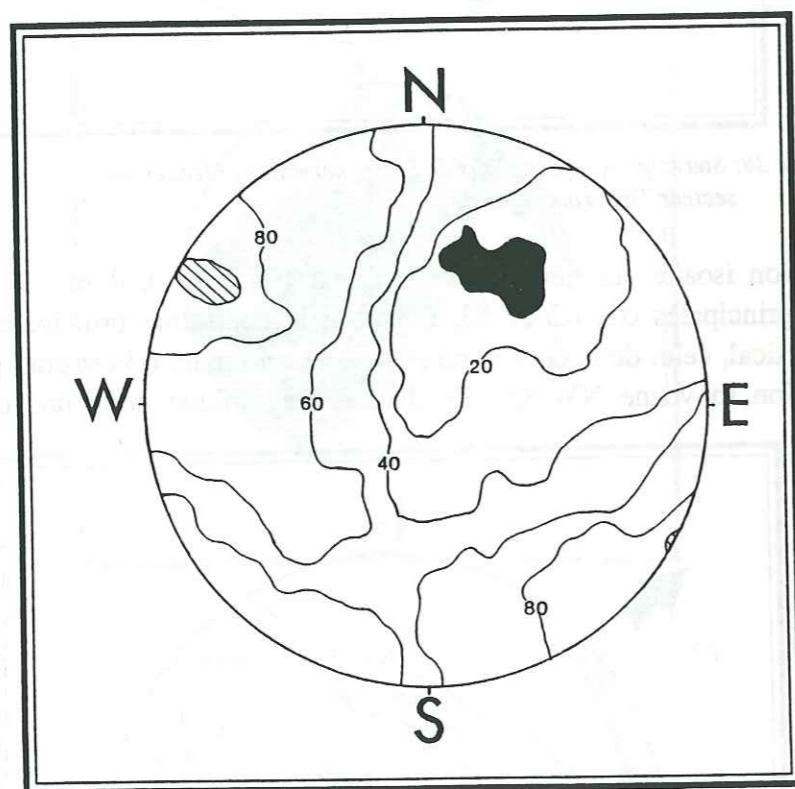


Figure 40: Axes principaux des contraintes (σ_1 en noir et σ_3 en hachuré), correspondant aux décrochement-extension sénestre (hémisphère inf., 78 mesures).

V.1.5. Conclusion:

Le traitement des données microtectoniques, nous conduit à distinguer par rapport à la mise en place de la série volcanique du PIII, deux mécanismes tectoniques:

a) Une distension NW-SE dont on a démontré la contemporanéité avec les épanchements volcaniques.

b) Un phénomène de décrochement-extension, au cours duquel les accidents sub-latitudinaux auraient joué en décrochements sénestres extensifs.

Les observations de terrain et les résultats des traitements statistiques, nous permettent d'envisager un lien génétique entre les deux mécanismes, avec comme hypothèse, une activité

magmatique mise en place dans des structures distensives NW-SE résultante de décrochements-extension sénestre (transtension sénestre), comme représenté sur la figure 41.

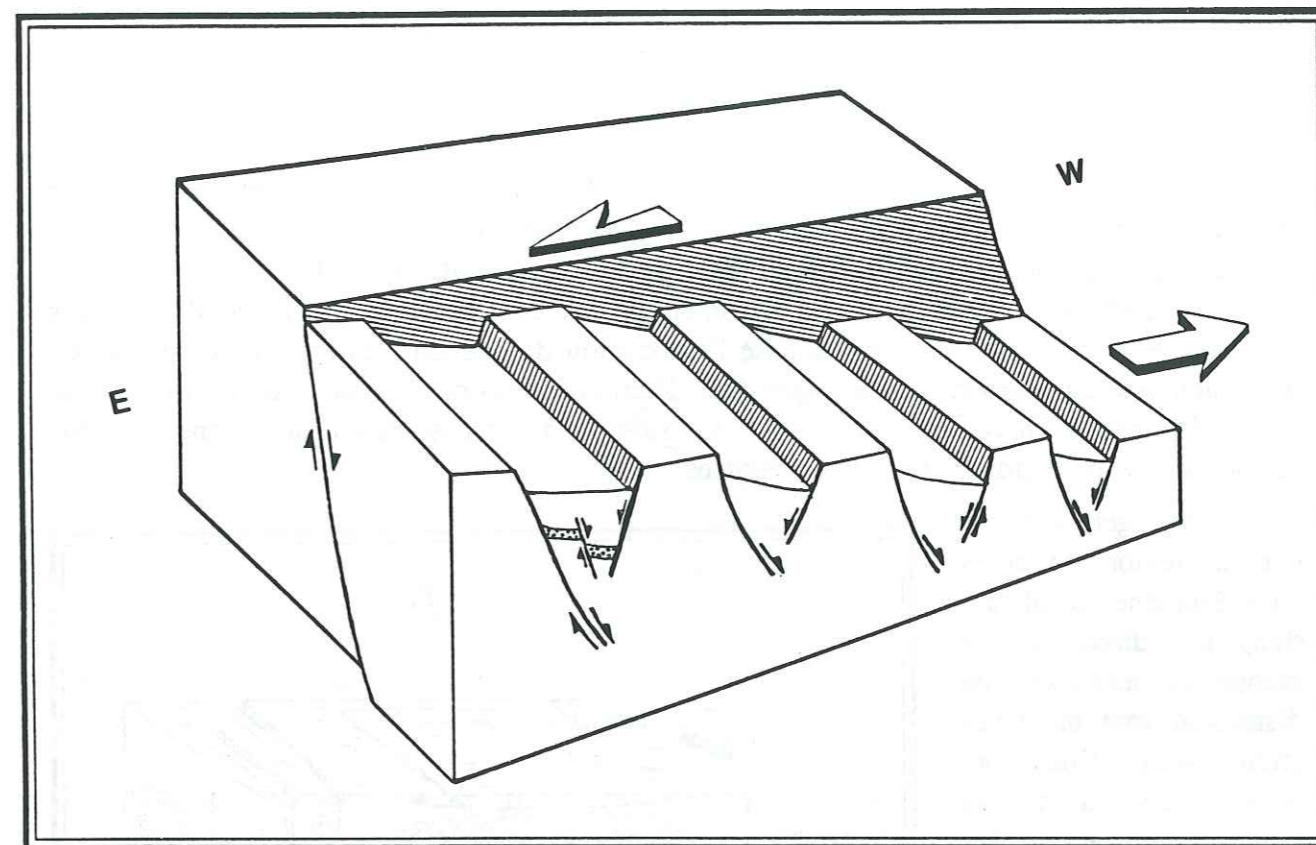


Figure 41: Schéma interprétatif du lien entre les décrochements-extension sénestres N100 à N120°E et la distension simple orientée NW-SE, tous deux synvolcaniques PIII.

V.2. ASPECT REGIONAL DE LA DISTENSION PIII ET INTERPRETATION GEODYNAMIQUE:

V.2.1. Aspect régional:

La grande étendue des affleurements des volcanites du PIII et la mise en place de celles-ci dans un contexte général distensif (M. LEBLANC, 1981; M.R. AZIZI SAMIR, 1986; B. HASSENFORDER, 1987) confère à ce régime tectonique un caractère régional. Il faut noter que des indices de distension ont été directement ou indirectement signalés dans la littérature consacrée au PIII, ainsi par exemple:

* Entre Bou Azzer et Ouarzazate, ont été répertoriés des filons manganésifères associés au volcanisme PIII (G. JOURAVSKY, 1963). Ces filons sont orientés NE-SW dans une très large proportion.

* Au Sud de Ouarzazate a été décrit un microprotorift allongé NE-SW (C. BOYER et M. LEBLANC, 1977).

* Dans le Haut-Atlas de Marrakech, sur la bordure nord de l'Anti-Atlas, de nombreux filons volcaniques ont été décrits (F. PROUST, 1961). Ces filons appartiennent à la série du PIII. Ils sont orientés NE-SW.

* Enfin, les récents résultats obtenus par B. HASSENFORDER (1987) dans la boutonnière du Kerdous à l'extrémité SW de l'Anti-Atlas, mettent en évidence une direction d'extension orientée E-W au PIII, associée à des bassins allongés selon une direction méridienne. Ceci

nous conduit à poser le problème du rapport entre la direction d'extension (NW-SE) observée dans notre secteur et (E-W) observée dans le Kerdous. Cette différence angulaire serait-elle due au contexte géologique local, ou au contraire à des variations dans le temps?, cette question sera discutée dans le paragraphe consacré au modèle géotectonique proposé.

V.2.2. Interprétation de la tectonique étudiée:

Afin d'élucider les rapports de la tectonique PIII avec la phase de collision B2, qui la précède, nous allons examiner les cas de figures suivants:

Les travaux de J.L. MERCIER (1984), de J.C. BOUSQUET et H. PHILIP (1981) et de MOUSSAT et al. (1984), sur la déformation des continents au voisinage des marges convergentes, ont montré la possibilité de l'association de phénomènes de compression et de distension avec des rapports géométriques bien déterminés. Ils ont établi qu'outre la simultanéité de la déformation en compression et en distension dans des régions voisines, dans la même région, les deux régimes peuvent se succéder.

Ainsi généralement dans les régions soumises au phénomène de subduction, les directions de raccourcissement et de distension sont parallèles (figure 42A). Elles sont orthogonales dans les régions soumises au phénomène de collision (figure 42B). Dans ce dernier cas la contrainte maximale horizontale garde la même direction dans les deux régimes de déformation; elle correspond à σ_2 en distension et à σ_1 en compression.

Le secteur qui nous intéresse se rapproche du cas des régions soumises au phénomène de collision: les directions de collision B2 et de distension PIII sont sub-orthogonales.

Cependant, l'observation de décrochements-extension sénestres d'âge PIII, sur des accidents parallèles à la ligne de collision B2, nous amène à opérer une légère

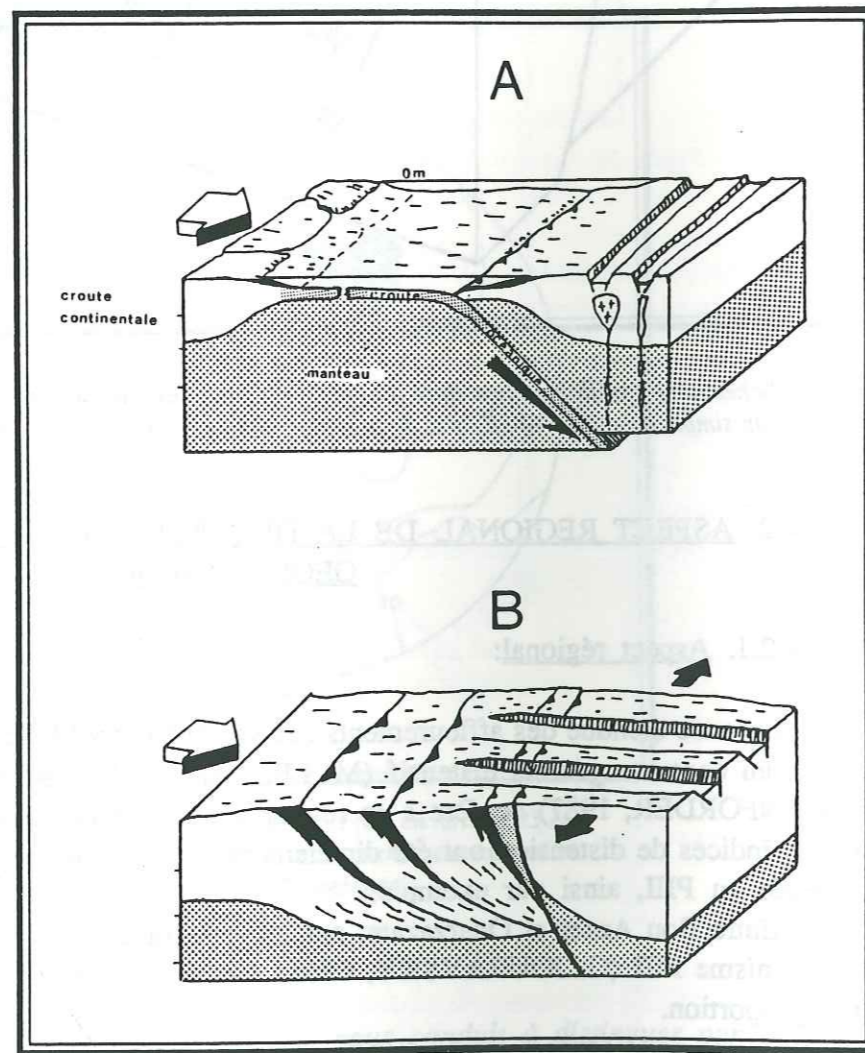
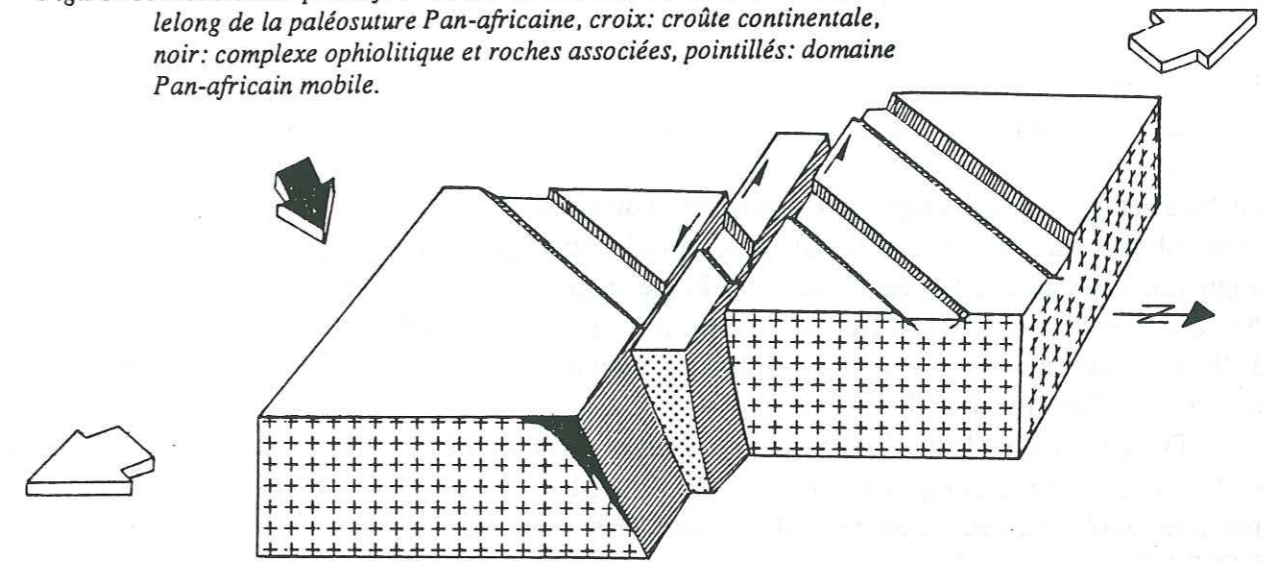


Figure 42: Rapports compression-extension, A: dans un contexte géodynamique de subduction, les directions de compression et de distension sont parallèles, B: dans un contexte géodynamique de collision, les directions de compression et de distension sont orthogonales, (d'après J. L. MERCIER, 1984).

adaptation du modèle de la figure 42B, en introduisant une composante de décrochement (figure 43).

Figure 43: Modèle interprétatif du coulissement-extension sénestre au PIII, le long de la paléosuture Pan-africaine, croix: croûte continentale, noir: complexe ophiolitique et roches associées, pointillés: domaine Pan-africain mobile.



Après la phase majeure pan-africaine B1, on assiste à une reprise de la subduction avec émission d'un volcanisme calcoalcalin et ouverture de bassins (grabens) parallèles à la ligne de collision, ce qui paraît conforme au modèle de la figure 42A. Ces grabens ont été comblés par la formation de Tiddiline.

L'étape suivante est l'entrée en collision du craton Ouest-africain et des terrains «septentrionaux» au cours de la phase panafricaine ultime B2, responsable du plissement de la formation de Tiddiline.

L'épaississement crustal résultant de cette phase de collision serait à l'origine du magmatisme calcoalcalin du PIII.

Au moment de l'arrivée en surface de ce volcanisme PIII, il y aurait un phénomène de coulissement entre les deux cratons, lequel se serait manifesté par des décrochements sénestres le long des accidents N100° à N120°E. On peut admettre dans ce cas le mécanisme de la figure 41 où les décrochements sénestres auraient joué un rôle important dans l'initiation de l'ouverture de grabens contemporains des épanchements volcaniques du PIII; les dykes de porphyrite andésitique représenteraient des fentes de tension dans le plan σ_1 - σ_2 .

Dans cette hypothèse l'activité volcanique du PIII succède donc à un changement du champ de contraintes, avec une rotation de l'axe σ_1 de N30° à N40°E et surtout un redressement de cet axe pour passer de l'horizontale à un plongement de 50°N.

Cette évolution du champ de contraintes et les observations de terrain impliquent un mouvement de coulissement sénestre entre le craton Ouest-africain et le domaine panafricain, avec le développement au sein de ce dernier, d'effondrement et d'extension traduisant une évolution de rifting transtensif.

V.3. MODELE GEOTECTONIQUE:

Les relations des phénomènes tectoniques PIII étudiés ci-dessus avec ceux observés (pour la même époque) dans d'autres régions du NW africain permettent de situer cette évolution dans un cadre global. Ainsi, dans le Siroua, le modèle de SCHERMERHORN et al. (1986), suppose que la subduction ne s'arrête pas avec la collision, mais que le continent nord plonge, à la suite de la croûte océanique, sous la bordure du craton Ouest-africain, entraînant ainsi

un épaissement crustal. Celui-ci et l'élévation de température qui l'accompagne, sont à l'origine d'une fusion crustale partielle attestée par la présence de migmatites.

Un large couloir (6Km) de cisaillement dextre orienté E-W, tardi-panafricain mais anté PIII (L.J.G. SCHERMERHORN et al., 1986), est souligné par des mylonites dont l'importance augmente vers le Nord. Ceci montre que les deux blocs continentaux se déplacent latéralement l'un par rapport à l'autre, en réponse à une composante oblique de la collision.

Dans le Kerdous à l'extrémité W de l'Anti-Atlas, la série post-tectonique et tardi-orogénique de Tanalt, est affectée au sommet du Protérozoïque supérieur, par des effondrements en horst et graben à allongement dominant subméridien. La série de Tanalt étant attribué au Précambrien III (B. HASSENFORDER, 1987) nous pouvons présumer que la différence angulaire constatée entre les directions d'extension (E-W) au Kerdous et (NW-SE) dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara serait due au contexte géologique local. Cette distension E-W à l'extrémité ouest de l'Anti-Atlas est peut-être à mettre en relation avec l'ouverture du Proto-Atlantique (P. SCHENK, 1971).

Dans la chaîne Trans-Saharienne qui résulte d'une collision entre le craton Ouest-africain et les massifs de Tuareg et du Niger vers 600 M.a., on assiste au niveau des Iforas à un passage rapide d'un magmatisme calcoalcalin à un magmatisme alcalin vers 550 M.a. (A. M. BOULLIER et al., 1986). Cette transition est liée du point de vue structural à un changement du champs de contraintes à la fin et après la collision. Pendant cette évolution, la direction de σ_1 varie de N135°E à N90°E autour de 600 Ma, avec des décrochements sénestres orientés N-S qui provoquent des déplacements latéraux sénestres de plusieurs centaines de kilomètres. Vers 550 Ma, σ_1 prend une direction de N50°E à N60°E (J.R. LANCELOT et al., 1983), avec des décrochements dextres orientés N-S à N20°E.

L'évolution tectonique dans ces différentes régions, toutes reliées par la suture panafricaine, pourrait s'inscrire schématiquement dans le modèle préliminaire (M.R. AZIZI SAMIR et al., 1990) suivant (figure 44):

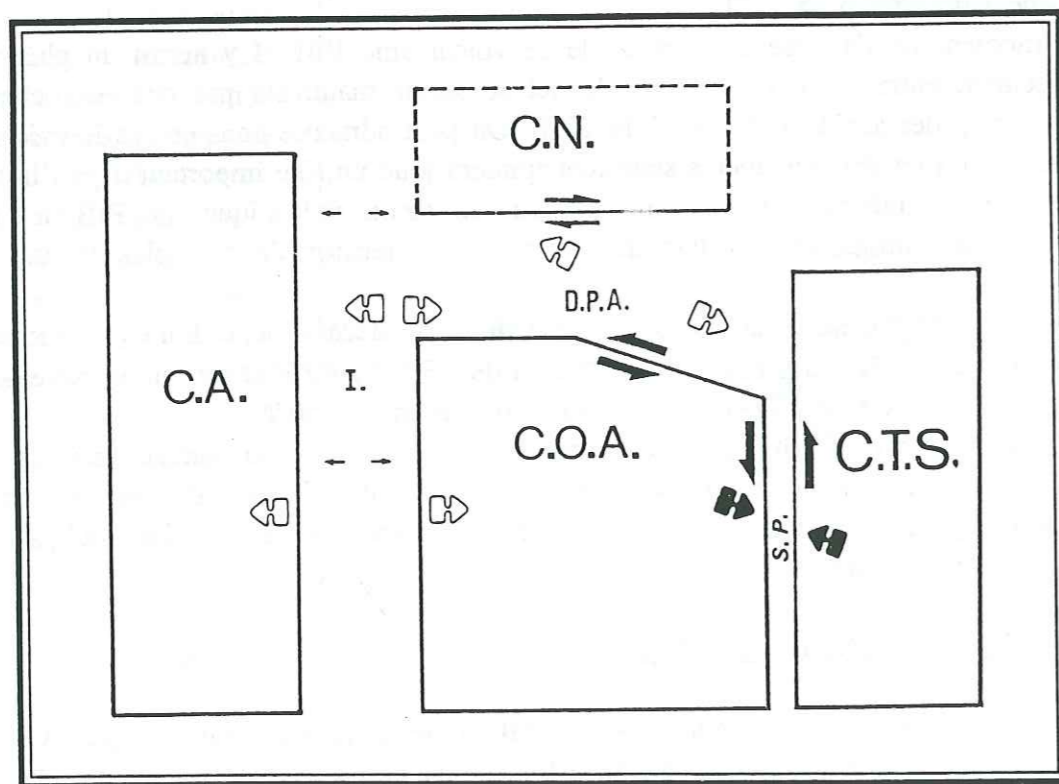


Figure 44: Modèle schématique de la situation géotectonique dans le NW africain au PIII; D.P.A.: domaine panafricain de l'Anti-Atlas; C.T.S.: chaîne Trans-Saharienne; S.P.: suture panafricaine; I.: Iapetus; C.O.A.: craton Ouest-Africain; C.A.: craton d'Amérique; C.N.: craton (s) nord «supposé (s)».

Les deux extrémités (occidentale et orientale) de la chaîne anti-atlasique connaissent deux événements majeurs: d'une part, à l'Ouest, l'ouverture d'un Proto-Atlantique, marquée sur la bordure NW du craton Ouest-Africain par des bassins subméridiens et une extension E-W, et d'autre part, à l'Est (dans la chaîne Trans-Saharienne), la compression tardive panafricaine dont l'orientation évolue de SE-NW à E-W. Cette compression est accompagnée d'importants cisaillements sénestres N-S.

On assisterait donc au niveau de l'Anti-Atlas central (zone intermédiaire) à l'interférence des répercussions des ces deux événements majeurs. Ceci se traduit par le fonctionnement en décrochements sénestres des accidents N100° à N120°E, une extension NW-SE et des effondrements qui indiquent le début d'un processus de rifting intracontinental, au niveau du domaine panafricain. Cette évolution aboutira par la suite à un amincissement de la croûte, attesté par l'arrivée du magmatisme alcalin à la base de l'Adoudounien et à l'installation d'un golfe ouvert vers l'Ouest (Proto-Atlantique) au moment de la transgression adoudounienne.

V.4. CONCLUSIONS:

Les principaux résultats qu'on peut retenir de cette étude portent sur trois points fondamentaux:

1) La contemporanéité des phénomènes tectoniques (décrochement et distension) et du volcanisme calcoalcalin du PIII. Nous soulignons notamment le caractère saccadé de ces mouvements tectoniques, mis en évidence par la présence de structures scellées à différents niveaux de la série volcanodétritique.

2) Le sens sénestre et le caractère extensif des décrochements ainsi que la direction générale NW-SE de la distension qui affecte la série du PIII au moment de sa mise en place.

3) Cette activité tectonique s'inscrit dans une dynamique globale de tectonique de plaques, dont les événements moteurs paraissent être, d'une part, la collision oblique tardi panafricaine, dans la chaîne Trans-Saharienne et d'autre part, les premiers stades de l'ouverture du Proto-Atlantique sur le côté occidental du craton Ouest-africain.

La série du PIII est interprétée comme mise en place dans un contexte tectonique de rifting intracontinental, annonçant déjà le début du cycle paléozoïque marocain.

Cette évolution de type rifting aboutira à l'installation progressive, d'un golfe ouvert vers l'Ouest, qu'envahira la transgression Adoudounienne, marquée à sa base par la mise en place d'un magmatisme alcalin.

D'un point de vue appliqué, il serait important à la lumière de ces résultats et tenant compte des hypothèses de R. GOLOUBINOW (1956) sur un lien entre la formation des gisements de cobalt (du moins certains d'entre eux) et l'hydrothermalisme lié à l'activité volcanique du PIII, de faire une analyse structurale détaillée au niveau des gisements connus, afin de déceler l'impact sur les minéralisations, des phénomènes tectoniques décrits dans ce chapitre.

Troisième partie :

Traitement

des données géochimiques de prospection

et exploration du signal anomal



Chapitre VI:

Généralités sur le traitement des données géochimiques de prospection

VI.1. Introduction	103
VI.2. Historique	103
VI.3. L'information géochimique	104
VI.3.1. Définition	104
VI.3.1.1. Aspect structural	104
a. Relation entre variables quantitatives	104
b. Relation entre variables quantitatives et qualitatives	105
c. Relation entre variables qualitatives	105
VI.3.1.2. Aspect génétique	105
VI.3.2. Aquisition	105
VI.3.2.1. Echantillonnage	105
VI.3.2.2. Préparation des échantillons	105
VI.3.2.3. Analyse	105
VI.4. Méthodes de traitement des données géochimiques	106
VI.4.1. Méthode d'exploration de la distribution des données	106
VI.4.2. Analyse statistique descriptive classique	108
VI.4.2.1. Caractéristiques de la distribution des teneurs en un élément	108
VI.4.2.2. Description des relations entre variables quantitatives	108
a. L'analyse factorielle	109
b. La régression linéaire	111
c. La classification	113
VI.4.2.3. Description des relations entre variables qualitatives et variables quantitatives	114
a. L'analyse de variance	114
b. L'analyse discriminante	115
VI.4.2.4. Description des relations entre variables qualitatives	115
VI.5. Représentation et analyse spatiale de l'information géochimique	116
VI.5.1. Représentation spatiale de l'information géochimique	116
VI.5.2. Représentation spatiale du signal géochimique de prospection	117



**TRAITEMENTS DES DONNEES GEOCHIMIQUES
ET EXPLORATION DU SIGNAL ANOMAL.**

**Chapitre VI: GENERALITES SUR LE TRAITEMENT DES DONNEES
GEOCHIMIQUES.**

VI.1. INTRODUCTION:

La question fondamentale qui se pose lors de l'étude et de l'interprétation des données géochimiques de prospection minière consiste à expliquer les fluctuations de teneurs observées et de repérer celles qui correspondent à des anomalies significatives.

Une analyse minutieuse du signal géochimique est donc nécessaire afin d'isoler chacune des composantes de la variation des teneurs et de dégager la partie de l'information liée à l'influence d'un phénomène géologique particulier ou à une minéralisation.

L'utilisation de techniques informatiques adaptées au nombre élevé d'analyses multi-élémentaires, présente l'avantage de pouvoir tester plusieurs hypothèses de travail et d'utiliser des méthodes statistiques et mathématiques précises. Néanmoins, les résultats obtenus par ces méthodes sont confrontés aux connaissances géologiques et géochimiques déjà acquises afin de vérifier et de contrôler leur interprétation.

Dans cette partie, le terme «échantillon» sera utilisé dans le sens courant (résultat d'un prélèvement en un point précis), qui correspond en fait au terme «individu» en langage statistique. Ce travail est réalisé à partir d'analyses en spectrométrie d'émission sur roche totale avec une maille d'échantillonnage initiale de 20 m.

Le présent chapitre est consacré à un rappel sur le développement des techniques de prospection géochimique et des bases mathématiques et statistiques utilisées dans le traitement des données.

VI.2. HISTORIQUE:

Le développement des techniques de prospection géochimique a été assez spectaculaire durant les quatres dernières décennies:

* les premiers pas de la prospection géochimique se situent en URSS, avec les travaux fondamentaux de V.M. GOLDSCHMIDT, V.I. VERNADSKI, A.E. FERSMAN. La prospection géochimique y fut expérimentée dès 1930 en s'appuyant sur un échantillonnage de sédiments de ruisseaux et de sols analysés pour plusieurs éléments par spectrométrie optique d'émission (Cu, Pb, Zn, Ni, Cr, W, Mo, Sn...).

* Deux facteurs importants vont déterminer le développement de la prospection géochimique: d'une part la demande pressante de matières premières pour l'industrie d'autre part le perfectionnement des techniques analytiques et en particulier des analyses spectrales d'absorption atomique et plus récemment d'émission à lecture directe (quantométrie, émission à plasma,...).

* Actuellement les techniques multi-élémentaires, permettant le dosage simultané de

20 à 30 éléments, ont considérablement augmenté le nombre des données analytiques mises à la disposition du géochimiste. Elles sont ainsi à l'origine de l'adaptation et du développement de techniques spécifiques de traitement par ordinateur, rendant l'interprétation des résultats analytiques plus efficace.

Les approches géochimiques sont multiples et les matériaux collectés et analysés sont variés: roches, sédiments de ruisseau, sols, eaux, végétaux...

VI.3. L'INFORMATION GEOCHIMIQUE :

VI.3.1. Définition:

L'information géochimique recueillie en prospection comporte deux types de composantes; les unes décrivent la constitution des prélèvements tandis que les autres renseignent sur leur provenance.

* La composition des échantillons est appréhendée par l'analyse de plusieurs éléments. Ces variables chimiques comprennent au minimum des éléments d'intérêt économique tels que les métaux de base des minéralisations sulfurées: Cu, Pb, Zn auxquels s'ajoutent éventuellement des traceurs plus spécifiques de certaines minéralisations (As, Ag, Bi, Mo, W, Sn...). D'autres éléments traces ou majeurs sont utilisés comme marqueurs de l'environnement lithologique. L'éventail des éléments dosés est fonction des possibilités analytiques et surtout de l'objectif de chaque campagne géochimique. Les prospections s'appuient de plus en plus souvent sur une analyse multi-élémentaire par spectrométrie, ce qui permet un balayage très complet du potentiel métallogénique des régions prospectées. Tel est le cas des données géochimiques utilisées dans la présente étude pour lesquelles 24 éléments traces et 10 éléments majeurs sont systématiquement dosés.

* La position des échantillons sur la carte est indiquée par leurs coordonnées. Les observations de terrain relatives à l'environnement des échantillons telles que la nature lithologique sont aussi retenues.

Cette information complexe peut être considérée sous deux points de vue complémentaires concernant l'aspect descriptif ou structural des données et l'aspect génétique.

VI.3.1.1. Aspect structural:

Chacune des mesures effectuées sur un lot d'échantillons définit une structure sur cet ensemble. La richesse de cette structure est fonction du niveau de quantification de la variable considérée (W.C. KRUMBEIN et F.A. GRAYBILL, 1965; D. HARVEY, 1969). Les variables qualitatives déterminent des catégories d'échantillons caractérisés par leurs différentes modalités. Tandis que les mesures quantitatives définissent un espace vectoriel de référence dans lequel on pourra évaluer les distances entre les échantillons.

Les relations entre les structures élémentaires définies par chaque variable doivent être prises en compte pour donner une représentation synthétique de l'ensemble des données. Suivant le type de variables on distingue trois types de relations.

a) Relations entre variables quantitatives:

* Dans l'espace des compositions chimiques, la structure du nuage des échantillons se définit essentiellement en termes d'homogénéité et d'isotropie. Elle reflète les caractéristiques majeures de la population étudiée: partitions et/ou tendances.

* Dans l'espace géographique, les relations entre les teneurs et les coordonnées des échantillons traduisent la structure spatiale des données.

b) Relations entre variables quantitatives et qualitatives:

Les catégories d'échantillons définies par les variables qualitatives sont caractérisées par des classes de teneurs plus ou moins différenciées. Ces différenciations reflètent le contrôle du paramètre qualitatif sur la composition chimique des échantillons; elles seront étudiées notamment pour montrer l'influence des facteurs de l'environnement (ici la lithologie), pris en compte au cours de l'échantillonnage.

c) Relation entre variables qualitatives:

Il y a liaison entre deux paramètres qualitatifs lorsque les partitions qu'ils déterminent ont tendance à coïncider.

L'ensemble des structures décrites constitue l'architecture globale de l'information dont la compréhension est essentielle pour l'interprétation des résultats.

VI.3.1.2. Aspect génétique:

La prospection géochimique s'intéresse à des matériaux superficiels facilement accessibles à l'échantillonnage (roche en surface, sédiments de ruisseaux, sols...), susceptibles de refléter la présence d'une minéralisation affleurante ou sub-affleurante. On s'attache par ailleurs à échantillonner des milieux où, par le jeu de dispersions chimiques et/ou mécaniques, l'auréole anormale cernant la cible recherchée, sera la plus étendue.

VI.3.2. Aquisition:

L'image de la répartition spatiale des teneurs en traitement de données géochimiques est obtenue par l'intermédiaire d'un dispositif de mesure comprenant:

- * un plan d'échantillonnage qui détermine la nature, la taille, le nombre et la disposition des prélèvements;
- * une méthode d'analyse dont dépend en partie le choix des éléments dosés et la qualité des mesures.

VI.3.2.1. Echantillonnage:

De nombreux types de matériaux peuvent être utilisés (roches, eau, plantes, ...) mais le plus souvent en prospection, les prélèvements sont effectués en sols, en sédiments de ruisseau ou en roches en surface.

La maille de prélèvement est choisie essentiellement en fonction de la dimension des cibles anormales recherchées. L'expérience montre que par exemple, les conditions de dispersion supergènes permettent d'atteindre les anomalies correspondant à la plupart des gîtes sulfurés connus avec une densité de 4 ou 5 échantillons par Km² en sol ou de 2 ou 3 échantillons par Km² dans les alluvions (J. BARBIER et E. WILHELM, 1978).

VI.3.2.2. Préparation des échantillons:

Entre le prélèvement effectué sur le terrain et l'analyse au laboratoire, les échantillons subissent un certain nombre de manipulations (nettoyage, séchage, broyage, tamisage, tri ...) destinées à fournir une prise d'essai qui constitue le support effectif de la teneur.

VI.3.2.3. Analyse:

Deux étapes peuvent être distinguées au cours de l'analyse, quelle que soit la méthode

utilisée:

a) une attaque de l'échantillon qui libère les éléments par mise en solution ou volatilisation. Cette libération peut être totale ou partielle.

b) la mesure de la concentration peut s'effectuer par les méthodes chimiques (colorimétrie) ou physiques (absorption atomique, fluorescence X et spectrométrie d'émission).

Quelle que soit la méthode utilisée, la qualité de l'analyse et la signification qu'on peut lui attribuer, dépendent de son exactitude et de sa précision:

* l'exactitude dépend des erreurs systématiques entre la valeur mesurée et la teneur réelle. Elle est contrôlée par un étalonnage de l'appareil à l'aide d'échantillons standards de référence;

* la précision caractérise la reproductibilité des mesures effectuées sur un même échantillon. Elle se traduit par une zone d'incertitude entourant les teneurs mesurées, dans laquelle la teneur exacte a une forte probabilité de se trouver.

En général, la précision varie suivant la teneur de l'élément dosé. Vers les faibles teneurs le seuil de dosabilité est atteint lorsque la mesure ne diffère plus de manière significative du bruit de fond de l'appareil. Cette sensibilité de la mesure est souvent très contraignante en prospection pour l'étude des éléments tels que Au, Ag, Bi, Sn, W, Mo dont les teneurs sont souvent inférieures au ppm.

Les méthodes de spectrométrie d'émission sont actuellement les plus utilisées, permettant le dosage simultané de nombreux éléments et un rapport qualité/prix le plus adapté aux campagnes de prospection géochimique minière.

VI.4. MÉTHODES DE TRAITEMENT DES DONNÉES GÉOCHIMIQUES:

De nombreuses données sont recueillies à l'issue d'une campagne de prospection. Elles représentent souvent le dosage de plusieurs éléments sur quelques centaines (voir milliers) d'échantillons, et l'interprétation des résultats numériques contenus dans un bulletin d'analyse n'est pas immédiate; une simple lecture du fichier permet seulement de faire des comparaisons entre quelques valeurs et ne portent pas sur l'ensemble des résultats. Ce sont pourtant des études comparatives d'ordre général qui permettent de dégager les différenciations géochimiques majeures à l'intérieur de la région prospectée. En particulier, la détection des signaux anomaux parmi les fluctuations du fond géochimique, nécessite une bonne connaissance de la structure des données.

Nous utiliserons dans un premier temps une technique exploratoire d'analyse de données, ne faisant pas appel a priori à des modèles de distribution statistique.

Les techniques de statistique classique, fondées sur des hypothèses et des modèles a priori, mais permettant une analyse de l'information géochimique multi-variables, seront appliquées après adaptation des données.

L'objectif des traitements réalisés est donc de faire apparaître l'organisation des données dans l'espace des compositions, défini par l'analyse multi-éléments et dans l'espace géographique.

VI.4.1. méthode d'exploration de la distribution des données:

En traitement de données géochimiques, les méthodes conventionnelles sont basées sur des statistiques classiques et des tests d'hypothèses, fondés sur un modèle de distribution normale des données.

Or, dans le cas des données lithogéochimiques, plusieurs facteurs incontrôlables peuvent influencer les valeurs absolues et la variabilité des teneurs mesurées d'un élément. Parmi ceux-ci nous pouvons citer les erreurs d'échantillonnage, la procédure analytique, l'environnement

physico-chimique, le changement de lithologie et la pollution introduite par l'homme.

Contrairement à des données provenant d'un environnement stable expérimental où les conditions sont stables et dont tout changement est généralement contrôlable, les données géochimiques sont à considérer plutôt comme des données souples (H. KÜRZL, 1988), dont la distribution n'obéit pas nécessairement aux modèles empiriques de distribution statistique.

En effet, dès 1977, TUKEY propose un outil d'analyse des données géochimiques, basé sur l'utilisation de cinq paramètres descriptifs à partir des données elles-mêmes et indépendamment de tout modèle, permettant de saisir rapidement le comportement et la structure des données et aboutissant à des notions de tendance centrale, de dispersion et de seuil d'anomalie.

Pour calculer ces paramètres, les valeurs sont rangées par ordre décroissant. C'est la valeur centrale par rapport aux deux extrêmes qui est prise comme «médiane». Les données se trouvent donc partagées en deux parts égales. Dans chacune de celles-ci on cherche la valeur à mi-chemin entre l'extrémité et la «médiane», qu'on définit alors comme des «charnières».

Les cinq paramètres seront donc: les deux extrêmes, minimum et maximum; la médiane et les deux charnières.

La principale représentation graphique utilisée par cette méthode est le «Boxplot» (figure 44 bis), dont la construction consiste à tracer parallèlement à l'axe des valeurs, un rectangle compris entre les deux charnières, englobant donc 50% des valeurs, la médiane est représentée par une barre verticale contenue dans le rectangle. Ce dernier décrit l'étendue de la distribution (h-spread). La position de la médiane dans le rectangle donne une idée de la symétrie de la partie centrale de la distribution. Le comportement des données périphériques est donné par la position des «whiskers», représentant chacun 25% des données, entre les charnières et les extrêmes.

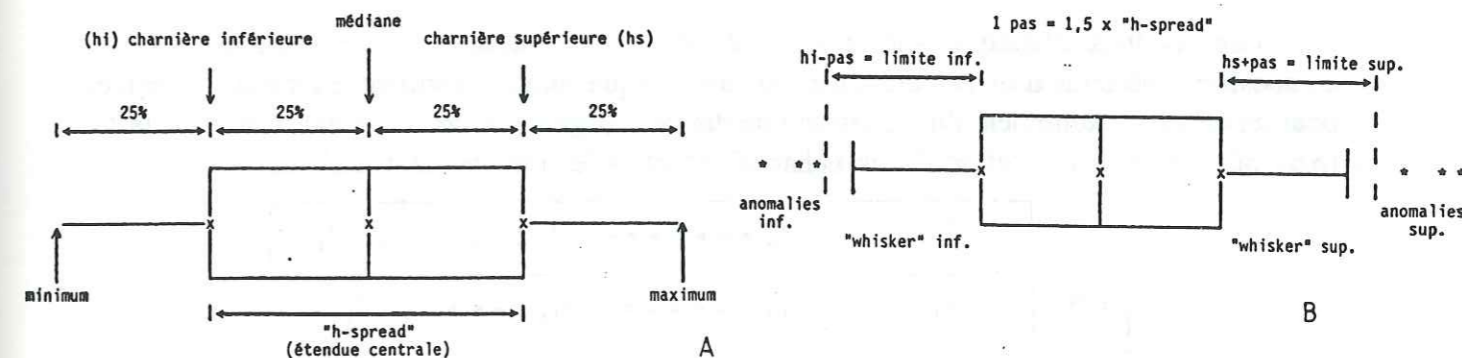


Figure 44 bis: A: Définition graphique des cinq paramètres du "boxplot", B: définition du seuil d'anomalie

Des seuils d'anomalie sont fixés par convention, en ajoutant ou en retranchant au niveau des charnières une fois et demi l'étendue centrale de la distribution (1.5 «h-spread»), toutes les valeurs se situant en dehors de ces deux limites (thresholds) sont considérées anomaux.

L'avantage de cette technique consiste en sa grande résistance vis à vis des valeurs aberrantes, du fait que les seuils d'anomalie soient définis uniquement à partir de l'étendue centrale (h-spread) sans être influencés par les valeurs anomaux elles-mêmes.

Cependant, si cette technique peut être intéressante pour une description rapide et exploratoire des données géochimiques, l'analyse multi-variée de l'information géochimique nécessite le recours aux techniques statistiques classiques, dont l'application ne sera pas effectuée sans précautions étant donnée la qualité des données traitées.

VI.4.2. Analyse statistique descriptive classique:

VI.4.2.1. Caractéristiques de la distribution des teneurs en un élément:

Dans le cas d'une variable quantitative, la répartition des échantillons sur l'axe des réels ou, s'il s'agit de teneurs, sur le demi axe positif R^+ , est souvent représentée sous une forme légèrement simplifiée par l'histogramme des fréquences ou la courbe de fréquences cumulées. Un certain nombre de paramètres peuvent être associés à la courbe de distribution pour en résumer les caractéristiques principales. Ce sont essentiellement:

- * les caractéristiques de tendance centrale, telles que moyenne arithmétique ou géométrique, mode, médiane, qui représentent l'ordre de grandeur de la variable sur l'ensemble des échantillons;

- * les caractéristiques de dispersion telles que variance, écart-type, coefficient de variation ou déviation géométrique, qui mesurent l'importance de la dispersion des teneurs autour de la valeur centrale.

A partir de la distribution empirique observée pour un élément, on essaie souvent de retrouver la loi de répartition théorique au niveau de la population dont sont issus les échantillons. Les lois de référence les plus utilisées sont de type normal ou lognormal (L.H. AHRENS, 1954; D.M. SHAW, 1964).

Une fois que le niveau du fond est connu, on peut fixer un seuil de coupure au-delà duquel l'échantillon est considéré comme anomal. Le plus souvent, par référence à une loi normale, ce seuil est fixé à $m + 2 \sigma$ (H.E. HAWKES et J.S. WEBB, 1962).

VI.4.2.2. Description des relations entre variables quantitatives:

Les résultats d'analyse sont rassemblés dans un tableau où chaque ligne décrit la composition chimique d'un échantillon et où dans chaque colonne, figurent les teneurs mesurées pour un élément. Autrement dit, ce tableau de données (figure 45) constitue une matrice d'ordre (n,p) où n représente l'effectif des échantillons et p le nombre de variables.

	var ₁	var ₂	var _j	var _p
Ech ₁	x _{1,1}	x _{1,2}	x _{1,j}	x _{1,p}
Ech ₂	x _{2,1}	x _{2,2}	x _{2,j}	x _{2,p}
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
Ech _i	x _{i,1}	x _{i,2}	x _{i,j}	x _{i,p}
•	•	•	•	•
Ech _n	x _{n,1}	x _{n,2}	x _{n,j}	x _{n,p}

figure 45: Représentation d'un tableau de données.

A cette matrice de données, correspondent deux représentations géométriques équivalentes: dans l'une, les n échantillons (ou individus) sont représentés par un nuage de n points dans un espace à p dimensions, R^p , avec pour coordonnées respectives, les teneurs mesurées pour les p éléments; dans l'autre ce sont les éléments (ou variables) qui sont reportés

dans R^n en fonction de leurs concentrations dans chaque prélèvement. Mais il s'agit là de figures abstraites qui reposent sur une généralisation des règles géométriques dans l'espace usuel à trois dimensions. Ces règles servent encore à mesurer la distance ou la proximité entre deux points prélèvements ou deux points variables, ce qui revient à comparer deux lignes ou deux colonnes du tableau des teneurs. Suivant la nature des données et le type de relation que l'on cherche à mettre en évidence, les règles de comparaison peuvent être modifiées par le choix d'une métrique particulière différente de la métrique euclidienne usuelle; ce choix intervient notamment au niveau de la transformation des données (F. CAILLIEZ et J.P. PAGES, 1976; A.T. MIESCH, 1980).

La transformation la plus courante (standardisation) consiste à effectuer un centrage des teneurs par la moyenne et une réduction par l'écart-type de chaque élément:

$$(pour\ l'échantillon\ "i"\ et\ la\ variable\ "j")\ t_{ij} = (x_{ij} - m_j) / \sigma_j$$

Cette transformation modifie la représentation du nuage des échantillons et des variables:

- * dans R^p , il y a translation de l'origine au barycentre du nuage des échantillons et changement d'échelle sur chacun des axes;

- * dans R^n , les points variables sont projetés sur le sous-espace orthogonal à la droite des constantes (droite dont les cosinus directeurs sont tous égaux à un) et situés sur l'hypersphère de rayon unité.

Le but de cette opération est de compenser l'hétérogénéité des teneurs entre les éléments. En effet, les variations d'abondance d'un élément à l'autre sont souvent très fortes. La suppression de cet effet d'échelle facilite les comparaisons entre éléments et entre prélèvements:

- * la ressemblance entre les variations de deux éléments est indiquée par leur coefficient de corrélation qui est égal au cosinus de l'angle entre les vecteurs représentatifs des éléments, après centrage;

- * la différence entre deux échantillons est mesurée par la distance euclidienne:

$$d^2(i,i') = \sum (t_{ij} - t_{i'j})^2$$

L'ensemble des relations exprimées à partir des indices de proximité ou de distance, caractérise la structure des données. L'objectif de l'analyse multivariable est de donner une image simplifiée mais encore assez fidèle de cette structure. Cette image est obtenue soit par projection de données sur un sous-espace privilégié, par les méthodes factorielles ou de régression, soit par une classification.

a) L'analyse factorielle:

Il existe beaucoup de variantes de la méthode, le type le plus simple et sans doute le plus utilisé actuellement pour le traitement des données géochimiques est l'analyse en composantes principales. Quelques présentations récentes sont données par J.E. KLOVAN, 1975; E. DIDAY et F. LEBART, 1977; L. LEBART, A. MORINEAU et J.P. FENELON, 1979.

De nombreux ouvrages et articles illustrent ses applications et ses développements en géologie: R.B. Mc CAMMON, 1966; R. TILL et H. COOLEY, 1973; K.G. JORESLOG et al., 1976; J.T. TEMPLE, 1978; V.S. TRIPATHI, 1979.

Le principe de base est relativement simple, puisqu'il consiste à déterminer les axes d'inertie principaux du nuage des points-échantillons dans R^p (ou variables dans R^n) et à projeter ces points sur le sous-espace engendré par les k premiers axes. Cette représentation a l'avantage de minimiser les défauts de perspective inhérents à toute projection. De plus la qualité de l'image obtenue peut être estimée au niveau global par le pourcentage d'inertie pris en compte et au niveau de chaque point (échantillon ou variable) par leur contribution.

Dans cette représentation, les axes d'inertie correspondent aux vecteurs propres de la matrice de corrélation associée aux données et les valeurs propres mesurent l'inertie absorbée par chacun des axes. Sur le plan numérique, ceci revient à calculer les k premiers termes de la décomposition d'une matrice rectangulaire suivant la formule de YOUNG-ECKART:

$$X_E = Z_k (\lambda_k)^{0.5} v_k u'_k$$

Dans cette expression:

- * X_E est une approximation au sens des moindres carrés de la matrice des données $X(n,p)$;
- * u_k est le k ième vecteur propre du produit mineur $X'X$ et u'_k son transposé;
- * v_k est k ième vecteur propre du produit majeur XX' ;
- * λ_k est la k ième valeur propre associée à u_k et v_k .

En reprenant le formalisme de l'analyse en composantes principales, on distingue:

- * les saturations ou poids des variables sur le k ième facteur:

$$F_k = (\lambda_k)^{0.5} u_k$$

Chacune des p composantes du vecteur F_k représente la projection d'un élément sur le k ième axe d'inertie u_k ; dans le cas de données centrées réduites, ces composantes sont égales aux coefficients de corrélation entre les éléments et le k ième facteur;

* la projection des échantillons sur le k ième axe u_k correspond au facteur score (ou composante principale) G_k . Celui-ci est égal, après réduction, au vecteur v_k . Finalement, on peut écrire:

$$X_E = Z_k G_k F'_k / (\lambda R)^{0.5}$$

soit en notation matricielle:

$$X_{E(n,p)} = G_{(n,k)} F'_{(k,p)} / (\lambda R)^{0.5}$$

Ces relations montrent que chaque facteur contribue, dans une proportion équivalente à sa valeur propre, à la reconstitution des teneurs telles qu'elles sont exprimées après transformation de la matrice de données.

Ainsi, contrairement à d'autres méthodes factorielles, l'analyse en composantes principales ne requiert pas d'hypothèses a priori sur la nature des données. Elle peut être utilisée dans un premier temps, selon une démarche exploratoire, pour mettre en évidence les caractéristiques essentielles des différenciations géochimiques entre échantillons. L'information ainsi condensée, se prête mieux à une visualisation synthétique sous forme de carte ou de diagramme binaire entre facteurs.

Ces premiers résultats ne correspondent qu'à un stade préliminaire de reconnaissance des données, mais sont souvent très utiles pour guider la suite du traitement. Lorsque la population est hétérogène, certains facteurs opposent des groupes d'échantillons correspondant à différents faciès géochimiques. Ce type de structure conduit à établir une classification, éventuellement à partir de l'examen des plans factoriels (plans formés par deux des facteurs obtenus), puis à étudier séparément chacun des groupes retenus. De même, en prospection, il arrive qu'un facteur soit lié à certains échantillons anomaux; cette population anormale ressort d'autant mieux qu'elle est plus contrastée et caractérisée par un plus grand nombre d'individus et de variables. Dans le cas d'un échantillonnage homogène, un facteur traduit les variations simultanées d'un groupe d'éléments sur l'ensemble des échantillons.

Les associations géochimiques ainsi dégagées sur chacun des axes sont en général mieux caractérisées après rotation. En effet, cette opération permet de mieux répartir les éléments entre les différents facteurs retenus, en leur donnant des poids plus contrastés. Par la suite, l'interprétation des facteurs consiste à préciser la nature et l'origine des associations géochimiques qui les caractérisent.

Dans de nombreux cas, les associations peuvent être rattachées à certaines phases minéralogiques des prélèvements. En l'absence de contrôles minéralogiques, l'analyse

factorielle permet d'estimer le nombre minimum de phases nécessaires pour reconstituer avec une bonne approximation, les teneurs observées. Elle indique également la répartition des éléments entre ces phases, ainsi que leur abondance dans chaque échantillon. C'est ainsi qu'elle a pu être utilisée en pétrochimie des éléments majeurs pour décrire les variations des proportions des minéraux constitutifs de certains ensembles granitiques (de la H. ROCHE et P. ISNARD, 1978; P. LEYMARIE, 1978; P. ISNARD, 1982). Dans ce cas, l'identification des processus de différenciation primaires ou secondaires (hydrothermaux ou deutériques) est facilitée par une transformation appropriée des facteurs: dérédaction et calcul normatif (G. BUFFET, 1984).

Dans le même esprit, l'analyse factorielle en mode Q a été développée dans le cas de données à somme constante, pour étudier les phénomènes de mélange entre différents matériaux au cours des processus sédimentaires et magmatiques (J.E. KLOVAN et J. IMBRIE, 1971; A.T. MIESCH, 1976, 1979, 1981; W.E. FULL, R. EHRLICH et J.E. KLOVAN, 1981). Des résultats analogues ont été obtenus par F. VALENCHON, 1982, par l'analyse factorielle des correspondances.

b) La régression linéaire:

Le but de la régression est de relier les variations d'un élément à celles d'autres variables caractéristiques des échantillons. Cette méthode d'ajustement est décrite dans de nombreux ouvrages statistiques (N.R. DRAPER et H. SMITH, 1966; W.C. KRUMBEIN et F.A. GRAYBILL, 1965; F. CAILLEZ et J.P. PAGES, 1976; L. LEBART et al., 1979).

Sur un plan descriptif, l'ajustement des valeurs observées pour la variable y est réalisé par une combinaison linéaire de p variables «explicatives» x_j , suivant le critère des moindres carrés, soit:

$$y = \hat{y} + e \quad \text{tels que:}$$

$$\hat{y} = \sum_{j=1}^p a_j x_j + b$$

$$\sum e_i^2 \text{ min}$$

En notation matricielle, on a:

$$\hat{y}_{(n,1)} = X_{(n,p)} a_{(p,1)} + b_{(1,1)}$$

Le vecteur des coefficients a est obtenu après centrage et réduction des données par la formule:

$$a = (X'X)^{-1} X'y$$

Le terme constant b est calculé à partir des moyennes observées:

$$b = y - \sum_j a_j x_j$$

Du point de vue géométrique, la méthode peut être décrite, dans l'espace R^n ou R^{p+1} :

* dans R^n , \hat{y} correspond à la projection orthogonale de la variable y sur l'hyperplan défini par les p variables explicatives (et la bissectrice si les variables ne sont pas centrées);

* dans R^{p+1} , les points échantillons sont projetés parallèlement à l'axe de la variable y sur l'hyperplan défini par l'équation de régression. Cet hyperplan est celui pour lequel la somme du carré des distances entre les points du nuage et leur projection est la plus faible.

Dans son principe même, la régression présente un grand intérêt en prospection géochimique. Elle permet, en effet, de distinguer deux composantes de variation des teneurs d'un élément:

* la composante «expliquée» \hat{y} mesure la contribution des facteurs responsables des fluctuations des variables x_j ;

* la composante résiduelle e, exprime les variations de teneurs non corrélées avec les variables x_j .

Le pourcentage de variance pris en compte par chaque composante indique dans quelle mesure le modèle linéaire permet de rendre compte des teneurs observées pour y à partir des variables x_j; ce pourcentage est proportionnel au carré du coefficient de corrélation entre y et \hat{y} souvent désigné comme le coefficient de détermination r²(y, \hat{y}). Ce qui se traduit par la relation:

$$v(y) = v(\hat{y}) + v(e)$$
$$v(\hat{y}) = r^2(y, \hat{y}) v(y)$$
$$v(e) = [1 - r^2(y, \hat{y})] v(y)$$

Mais, comme le rappellent J. PAGES et F. CAILLEZ, 1976, des représentations graphiques sont également nécessaires pour juger de la validité du modèle de régression:

* avant le traitement, on a intérêt à examiner la distribution des échantillons sur les diagrammes de corrélation entre variables;

* après le traitement, l'absence de liaison entre les deux composantes, expliquée et résiduelle, peut également être contrôlée sur un diagramme.

Dans de nombreux cas, le modèle linéaire sera plus conforme aux données observées, après transformation des variables ou élimination de certains individus «aberrants».

En prospection, la régression a surtout été utilisée pour ajuster les teneurs de fond d'un élément en tenant compte des caractères du milieu de prélèvement. Les approches diffèrent essentiellement par le choix des variables explicatives. On peut distinguer:

* des paramètres d'environnement, tels que l'aire couverte par chaque unité lithologique, pédologique ou végétale, au voisinage de chaque site de prélèvement, le relief ou le nombre d'habitations (E.C. DAHLBERG, 1969; A.W. ROSE et al., 1970; P. LECOMTE et al., 1975);

* des paramètres minéralogiques tels que les contenus en hydroxydes ou en matière organique (N.H. BRUNDIN et B. NAIRIS, 1972) ou le pourcentage de particules fines (J. CHATUPA et K. FLETCHER, 1972);

* des paramètres chimiques représentatifs des facteurs précédents, tels que les éléments majeurs (A.W. ROSE et N.H. SUHR, 1971), ou en traces (N.H. BRUNDIN et B. NAIRIS, 1972; L. MALMQUIST, 1978), le pH et le carbone organique (P. LECOMTE et al., 1980).

La difficulté du choix des variables explicatives vient de ce qu'elles sont souvent elles-mêmes des grandeurs complexes dont la signification n'est pas toujours sans ambiguïté. Et ceci pour plusieurs raisons:

* les erreurs de mesures qui les affectent, peuvent être relativement importantes par rapport à la variance de la composante résiduelle. Il est possible de tenir compte de la variance d'erreur sur chaque variable en modifiant le critère d'ajustement (R.P. CHAPMAN, 1976; D.M. MARK et M. CHURCH, 1977; T.A. JONES, 1976);

* les variables explicatives sont souvent corrélées entre elles et reflètent en partie, l'influence des mêmes phénomènes. Différentes techniques ont été mises au point pour sélectionner les variables utiles (régression pas à pas) et améliorer la stabilité des résultats (ridge régression), (A.T. JONES, 1972). Il est également possible de remplacer les variables corrélées par les facteurs issus d'une analyse en composantes principales;

* de nombreux caractères de l'environnement sont susceptibles d'être modifiés en présence d'une minéralisation. Il n'est pas toujours facile de savoir, a priori, si une variable explicative est réellement indépendante des facteurs métallogéniques. Ce problème est soulevé par V. AUSTRIA et C.Y. CHORK (1976) dans le cas de la régression de Zn, Pb, Cu et Mo par Fe et Mn. En effet, l'enrichissement des oxydes de fer et de manganèse dont ils cherchent à compenser les effets sur la teneur des métaux a le plus souvent une origine lithologique ou secondaire, mais il peut également être en rapport avec une minéralisation oxydée.

Certains auteurs préconisent d'ailleurs la sélection des phases oxydées comme support du signal géochimique en prospection (R.H. CARPENTER et al., 1975; P.R. WHITNEY, 1975; G.A. NOWLAN, 1976). On peut remarquer toutefois que dans ce cas, d'autres auteurs préfèrent utiliser le rapport de la teneur métal sur la teneur en fer et manganèse plutôt que la teneur elle-même comme variable d'information (R.H. CARPENTER et W.B. HAYES, 1978), ce qui indique également une possibilité de discrimination des anomalies significatives par la régression. Cependant, le risque de sur-correction des teneurs existe; il convient d'en tenir compte avant de rejeter une anomalie qui n'est pas confirmée au niveau de la composante résiduelle après régression.

c) la classification:

Une campagne de prospection géochimique s'étend généralement sur un domaine assez vaste pour que l'on puisse y distinguer différentes unités géographiques en fonction de critères tels que la géologie, la pédologie ou la morphologie. Cette hétérogénéité spatiale du domaine étudié se reflète généralement sur la matrice des données, dans laquelle il est possible de reconnaître l'existence de plusieurs populations d'échantillons.

Il est donc naturel de chercher à regrouper les prélèvements en classes plus homogènes du point de vue de leur composition chimique. De nombreuses techniques permettent d'aboutir à une telle classification suivant une démarche rigoureuse à partir de certaines règles fixées au départ (M. JAMBU, 1978; L. LEBART et al., 1979; J.L. CHANDON et S. PINSON, 1981).

Elles supposent notamment le choix d'une métrique permettant de mesurer les distances (ou les proximités) entre individus et entre groupes d'individus. Avec la métrique euclidienne, la qualité d'une partition peut être estimée en considérant la décomposition de l'inertie du nuage des échantillons en inertie intra-classes et inertie inter-classes suivant le théorème de HUYGHENS: T=W+B (avec T=inertie totale, W=inertie intra-classes, B=inertie inter-classes).

La meilleure classification est celle qui minimise l'inertie intra-classes, ce qui revient à maximiser l'inertie entre les classes. Suivant la démarche adoptée, la classification établit simplement une partition de l'ensemble des échantillons en classes d'équivalence, ou bien elle conduit à une hiérarchie de partitions dans laquelle les échantillons se regroupent progressivement par affinités décroissantes.

* Les méthodes non hiérarchiques sont surtout connues en France par la technique des Nuées Dynamiques mise au point par E. DIDAY (1971). Pour appliquer cette méthode, l'utilisateur doit fixer le nombre de classes et les individus caractérisant chacune d'elles. Les autres individus sont alors affectés à la classe dont le centre de gravité est le plus proche; il s'agit alors d'un problème de classement. Lorsque les classes ne sont pas connues a priori, les étalons sont sélectionnés par tirage au hasard. Après une première affectation, de nouveaux noyaux sont définis en choisissant les individus les plus proches du barycentre de chaque classe. Le procédé est repris plusieurs fois et la classification s'améliore rapidement en convergeant vers une forme stable.

* Les méthodes hiérarchiques, ou analyses de grappes, ne nécessitent aucune hypothèse sur la nature et le nombre des classes. Les échantillons sont regroupés progressivement suivant (n-1) partitions emboîtées décrites par l'arbre de classification ou dendrogramme. En mesurant l'accroissement de l'inertie intra-classe à chaque niveau d'agrégation, il est possible de choisir, après coup, la partition dont les classes sont suffisamment homogènes sans être trop nombreuses. Récemment, des algorithmes rapides, tel que celui fondé sur la construction des voisinages réductibles (M. BRUY-NOOGHE, 1978), ont rendu cette méthode opérationnelle sur de grands échantillonnages.

VI.4.2.3. Description des relations entre variables qualitatives et variables quantitatives:

Lorsque les échantillons sont décrits à la fois par des variables quantitatives et des variables qualitatives, on peut s'interroger sur l'existence de relations entre les deux types d'information. L'utilisation de variables qualitatives est fréquente en prospection pour représenter les observations de terrain concernant les caractères de l'environnement de chaque échantillon (géologie, type de prélèvement, etc...). Le problème est alors de savoir si les catégories de prélèvement définies par les différentes modalités des variables qualitatives, ont une signification du point de vue des teneurs mesurées. En fait, suivant le but à atteindre, deux types de questions se posent:

* soit que l'on cherche à expliquer les teneurs observées pour chaque élément par l'influence des facteurs décrits de manière qualitative, et on fera appel aux méthodes d'analyse de variance;

* soit que l'on désire expliquer la partition engendrée par une variable qualitative à partir des compositions chimiques des prélèvements et on s'adressera aux techniques d'analyses discriminantes.

Ces deux types de démarche peuvent être traités dans le cadre de l'analyse linéaire.

a) L'analyse de variance: cette méthode est un cas particulier de la régression linéaire multiple lorsque les variables «explicatives» sont qualitatives (J. BACHACOU et al., 1981; L. LEBART et al., 1979). Dans le cas d'un seul facteur qualitatif, la teneur d'un échantillon, y_{ij} , peut se décomposer en distinguant la contribution α_i de la modalité i du facteur des autres sources de variation ϵ_{ij} suivant un modèle additif du type:

$$y_{ij} = u + \alpha_i + \epsilon_{ij}$$

en introduisant la matrice d'incidence des modalités, codées sous forme d'un tableau disjonctif binaire, la relation linéaire entre les teneurs de l'élément y et les k modalités α_i du facteur peut s'écrire:

$$y_{(n,1)} = u_{(n,1)} + X_{(n,k)} \alpha_{(k,1)} + \epsilon_{(n,1)}$$

où:

- * u représente la teneur moyenne de l'élément y pour chaque échantillon;
- * X correspond à la matrice d'incidence des modalités du facteur;
- * $\alpha_{(k,1)}$ décrit l'influence de chaque modalité du facteur sur la teneur de l'élément y ;
- * $\epsilon_{(n,1)}$ est une composante de variation aléatoire de moyenne nulle et de variance σ_ϵ^2 indépendante du facteur considéré.

Du point de vue géométrique, les coefficients α_i sont obtenus comme dans le cas de la régression, par projection de la variable y sur le sous-espace R^n déterminé par les colonnes de la matrice $X_{(n,k)}$. L'estimation du coefficient α_i correspond à la moyenne des teneurs dans la catégorie d'échantillons correspondant à la modalité i , du facteur. La comparaison des variances dans chaque classe et entre les classes par le test de FISHER, permet de confirmer l'influence du facteur sous réserve des hypothèses faites sur la composante aléatoire epsilon.

La méthode connaît de nombreux développements en géologie (W.C. KRUMBEIN et F.A. GRAYBILL, 1965). Différents types de modèles ont été conçus suivant le nombre et la nature des facteurs pris en compte (facteurs déterministes ou aléatoires, croisés ou hiérarchisés).

En prospection, le modèle le plus utilisé est de type hiérarchique à composantes aléatoires. Il sert notamment à contrôler l'importance des erreurs d'analyse et d'échantillonnage à partir de mesures et de prélèvements en double (R.G. GARRETT, 1969, 1973; R.J. HOWARTH et P. LOWENSTEIN, 1971; J. PLANT et al., 1975; R.G. GARRETT et T.I. GOSS, 1979), et permet également d'estimer les contributions de plusieurs composantes de variation à

différentes échelles (A.T. MIESCH, 1976; R.G. GARRETT, 1983). On réalise ainsi une analyse de la structure spatiale des données analogue à l'étude des variogrammes (A.T. MIESCH, 1975).

b) L'analyse discriminante: le problème se pose en prospection, à chaque fois que l'on désire retrouver la partition d'un lot d'échantillons en plusieurs classes, correspondant aux différentes modalités d'une variable qualitative, à partir de leur composition chimique. C'est le cas, notamment, lorsqu'il s'agit de classer les échantillons suivant leur appartenance à la classe «anormale» ou à celle du «fond géochimique». L'analyse discriminante permet d'établir un critère de distinction entre chaque catégorie, à condition de disposer d'un échantillonnage de référence où chacune d'elle soit bien représentée.

Dans l'espace des variables R^p , l'axe le plus discriminant est celui sur lequel on obtient après projection des échantillons, la plus grande inertie (ou variance) entre les classes, B. Ce qui revient suivant le principe de décomposition de l'inertie de HUYGENS, à minimiser l'inertie (ou variance) à l'intérieur de chaque classe, W.

$$T = W + B$$

Ainsi, la recherche de l'axe discriminant se ramène au calcul du premier vecteur propre de la matrice $T^{-1}B$ (J.M. ROMEDER, 1973; L. LEBART, 1979). La valeur propre associée indique le pourcentage de variance contribuant à la discrimination entre les groupes. Le nombre d'axes factoriels discriminants est au plus égal au nombre de groupes moins un. En fonction de leur coordonnées sur chacun des axes, les échantillons peuvent être reclassés dans l'un ou l'autre groupe de départ; le pourcentage d'échantillons bien classés indique le degré de réussite atteint par la méthode. Cependant, le score obtenu donne une appréciation optimiste du pouvoir de discrimination au stade prévisionnel, lorsqu'il s'agit d'affecter un nouvel échantillon, de type inconnu, à l'un des groupes précédents.

Ainsi est-il prudent de s'assurer de l'efficacité réelle de la méthode sur un lot d'échantillons témoins (R.J. HOWARTH et R. SINDING-LARSEN, 1983). Des tests de validité statistique peuvent être utilisés lorsque les groupes possèdent la même matrice de variance-covariance W et que les distributions des variables suivent une loi normale; ce qui correspond aux conditions d'efficacité optimum de la méthode (J.C. DAVIS, 1973).

En recherche minière, l'analyse discriminante a surtout été appliquée à la géochimie en roche pour reconnaître des halos de dispersion primaire et distinguer ainsi les formations stériles et minéralisées de même type lithologique (E.M. CAMERON et al., 1979; R.E.S. WHITEHEAD et G.J.S. GOVETT, 1974; B. HENRY et al., 1979; D. MARCOTTE et M. DAVID, 1981). Elle a également été utilisée pour la caractérisation des formations ferrugineuses, types «chapeaux de fer» (A.J. BULL et R.H. MAZUCHELLI, 1980; E. WILHELM et A. KOSAKEVITCH, 1979).

VI.4.2.4. Description des relations entre variables qualitatives:

Dans le cas de données qualitatives, un indice de similarité entre variables ou entre individus est obtenu par comparaison du nombre de coïncidences positives (co-présences), ou négatives (co-absence), des modalités de chaque variable et du nombre de discordances. Plusieurs indices correspondant à des formulations légèrement différentes du concept de similarité sont décrits dans la littérature (R.R. SOKAL et P.M. SNEATH, 1963; P. ISNARD et al., 1971; J.L. CHANDON et S. PINSON, 1981).

Le calcul de la matrice de similarité représente une étape préliminaire indispensable vers une description plus synthétique des données à l'aide d'une classification ou de l'analyse factorielle des correspondances.

L'analyse des correspondances utilise la métrique du χ^2 pour décrire les proximités entre les variables et les individus (J.P. BENZECRI, 1973), ce qui permet le traitement des données qualitatives. Celles-ci se présentent généralement sous forme d'un tableau disjonctif complet où chaque variable qualitative est remplacée par une suite de variables binaires indicatrices de chaque modalité; elles prennent la valeur 1 lorsque la modalité correspondante est réalisée et 0 dans le cas contraire. La présentation des résultats sous la forme plus condensée d'un tableau croisé dit «de contingence» dont chaque élément représente le nombre de réalisations simultanées d'un couple de modalités, constitue une première étape dans la synthèse de l'information. En effet, la taille de ce tableau carré symétrique ($p * p$ variables) est très sensiblement inférieure à celle du tableau logique (n échantillons * p variables) dans le cas de grands échantillonnages où $n \geq p$. L'analyse de correspondance du tableau initial ($n * p$) se déduit de celle du tableau de contingence ($p * p$).

Cette méthode est surtout utile en prospection dans le cas du traitement des données alluvionnaires correspondant à l'estimation semi-quantitative de l'abondance des minéraux lourds dans les fonds de batées (C. ROQUIN et P. SOLETY, 1977). Elle permet également d'intégrer des mesures quantitatives telles que les analyses chimiques, après codage logique de ces variables en plusieurs classes.

VI.5. REPRESENTATION ET ANALYSE SPACIALE DU SIGNAL GEOCHIMIQUE:

Les méthodes d'analyse de données permettent de simplifier une information géochimique volumineuse et complexe, pour en faire apparaître les caractères essentiels. Mais ces traitements statistiques ne tiennent généralement pas compte de la localisation et de l'organisation spatiale des données. Cet aspect complémentaire de l'information, si important du point de vue de la prospection, est représenté sur la carte géochimique.

VI.5.1. Représentation spatiale de l'information géochimique:

La visualisation de l'information nécessite un codage des données numériques dans le système des variables "graphiques". Le principe de cette traduction a été formalisé en règles de sémiologie graphique (J. BERTIN, 1967).

Les variables graphiques élémentaires sont peu nombreuses; outre les deux dimensions du plan, utilisées pour la représentation des coordonnées géographiques, on dispose seulement de six variables visuelles: taille, valeur, grain, couleur, orientation et forme.

La transcription des valeurs prises par une grandeur peut se réaliser parfaitement sans perte d'information, à l'aide d'une variable visuelle ayant le même niveau de structuration (qualitatif, ordonné ou quantitatif).

L'implantation des variables graphiques change également suivant l'extension des objets (points, lignes ou surfaces), que l'on veut caractériser en adoptant le même type de support, ponctuel, linéaire ou zonal. Seule la taille d'un figuré ponctuel est capable de traduire fidèlement la variation d'un caractère quantitatif tel que la teneur d'un élément. Une relation d'ordre pourra être exprimée en implantation zonale par un changement de valeur (noircissement) ou de grain d'un figuré. Les autres variables graphiques, couleur, orientation et forme, indiquent seulement des différences qualitatives.

En géochimie, la couleur est très utile lorsque l'on désire représenter simultanément deux ou trois éléments (P.L. LOWENSTEIN et R.J. HOWARTH, 1973; J.M. MASSET, 1973; J. BARBIER, 1979). A chaque variable est associée une composante chromatique (bleu, jaune, rouge) dont l'intensité varie en fonction des teneurs. La cartographie des composantes

multivariées dégagées par l'analyse statistique (classes ou facteurs) permet également de dresser des cartes de synthèse géochimique.

Il existe donc, pour une même variable, de nombreuses possibilités de visualisation, mais on peut les regrouper en deux catégories de représentation correspondant à des objectifs bien distincts:

- * enregistrer et localiser fidèlement les résultats d'analyse par un simple report des teneurs en chaque point d'échantillonnage à l'aide d'un chiffre ou d'un figuré ponctuel de taille variable;

- * donner une image continue des variations du fond géochimique à l'échelle régionale.

Le premier type de carte convient parfaitement pour montrer la répartition des teneurs anormales, mais on y reconnaît souvent assez mal les différenciations géochimiques régionales au niveau du fond géochimique.

Le deuxième type de carte, plus élaboré, donne une représentation continue du relief géochimique par interpolation à partir des mesures disponibles. Deux méthodes de visualisation sont couramment utilisées pour représenter la surface estimée:

- * les courbes isovaleurs constituent un procédé conventionnel pour figurer le relief sur les cartes topographiques; elles font nettement apparaître les pentes et les gradients d'une surface mais donnent une image parfois difficile à appréhender globalement lorsque la forme du relief est trop compliquée;

- * les cartes en noircissement variable, donnent une meilleure vue d'ensemble en raison du mécanisme d'intégration visuelle des taches élémentaires, ce qui permet de bien différencier les zones à faibles et fortes teneurs. L'échelle des valeurs entre le blanc et le noir peut être obtenue par différents procédés (R.J. HOWARTH, 1983); l'un des plus efficaces consiste à utiliser une trame régulière de points dont la taille varie en fonction des teneurs (J. BARBIER, P. LECUYER, 1976).

VI.5.2. Représentation spatiale du signal géochimique de prospection:

Quel que soit le mode de visualisation, la carte est généralement construite après interpolation des teneurs aux noeuds d'un réseau régulier. Ceci pose un problème d'estimation d'une teneur en un point où l'on ne dispose pas d'observation, et une solution ne peut être formulée que dans le cadre d'un modèle statistique. Les résultats obtenus dépendent en partie du modèle adopté.

D'une manière générale, la teneur $Z(x)$ au point x de la carte peut être considérée comme la somme d'une composante systématique $m(x)$ et d'une composante aléatoire $r(x)$:

$$Z(x) = m(x) + r(x)$$

La composante aléatoire $r(x)$ se manifeste par des variations irrégulières de teneur d'un échantillon à l'autre. Elle résulte de la combinaison d'un certain nombre de facteurs tels que les erreurs d'analyse et d'échantillonnage ainsi que des hétérogénéités locales de faible dimension par rapport à la maille d'échantillonnage.

La tendance régionale ou dérive $m(x)$ se marque au contraire par une évolution plus lente et régulière des teneurs à l'échelle de la carte. Cette composante systématique représente la teneur moyenne que l'on obtiendrait par répétition des mesures au point x :

$$m(x) = E[Z(x)]$$

En général, on suppose qu'elle est d'une forme assez simple pour être décrite en fonction des coordonnées par un développement en série du type:

$$m(x) = \sum_{i=0}^k a_i f_i(x)$$

Le nombre et le type de fonctions de base $f_i(x)$ est fixé au départ; il s'agit en général des premiers termes d'un développement polynomial ou d'une série de FOURIER. Les

tel-00708240, version 1 - 14 Jun 2012

coefficients a_i sont estimés par ajustement aux points expérimentaux suivant le critère des moindres carrés ou par krigeage. Ces deux méthodes peuvent conduire à des résultats assez différents car elles ne donnent pas le même statut à la composante résiduelle $r(x)$.

L'estimation par les moindres carrés des coefficients a_i revient à minimiser la moyenne quadratique de la composante résiduelle $r(x)$ aux points de mesure. Cette technique peut être considérée comme un cas particulier de la méthode de régression multiple où les variables explicatives correspondent à certaines fonctions élémentaires des coordonnées X et Y.

Elle a été largement développée par les auteurs anglo-saxons sous le nom de «trend analysis» (W.C. KRUMBEIN et F.A. GRAYBILL, 1965; R.J. HOWARTH, 1967; J.W. HARBAUGH et D.F. MERRIAM, 1968; I. NICHOL et al., 1969; F.H.T. WHITTEN, 1975). Cependant, en géochimie régionale, les variations de teneurs d'un échantillon à l'autre sont souvent très rapides et la détermination des deux composantes $m(x)$ et $r(x)$ du signal devient difficile. En fait, le modèle statistique classique où une composante purement aléatoire $r(x)$ se superpose à une composante déterministe $m(x)$ n'est pas adapté à la représentation des variables régionalisées (G. MATHERON, 1967).

Les méthodes d'interpolation par krigeage ponctuel ont été développées à partir des problèmes d'estimation de gisements dans le cadre de la théorie des variables régionalisées par G. MATHERON (1965, 1970). Elles ont été appliquées en cartographie dans de nombreuses disciplines des Sciences de la Terre (P. DELFINER, 1973; J.P. CHILES et G. MATHERON, 1975; P. DELFINER et J.P. DELHOMME, 1975; J.P. DELHOMME, 1978; A.G. ROYLE et al., 1981).

Dans les cas les plus simples, la répartition des teneurs sur la carte peut être considérée comme la réalisation d'une fonction aléatoire stationnaire; l'hypothèse de stationnarité introduit les conditions d'homogénéité spatiale nécessaires pour modéliser la loi de probabilité de la variable aléatoire $Z(x)$ dont on ne possède généralement qu'une valeur en chaque point d'échantillonnage x . Cela revient à supposer, comme pour les méthodes statistiques classiques, que les teneurs appartiennent à la même population mais en tenant compte du fait que les réalisations ne sont pas indépendantes d'un point de mesure à l'autre. En fait, les conditions d'homogénéité ne portent que sur les moments d'ordre un et deux.

* L'espérance $E[Z(x)]$ est constante sur tout l'étendue du domaine échantillonné; il n'y a pas de dérive des teneurs:

$$m(x)=m$$

* Le degré de similarité des teneurs entre deux points de mesure x et $x+h$ dépend uniquement de la distance h qui les sépare. Elle s'exprime soit par la covariance:

$$C(h)=E[Z(x).Z(x+h)-m^2]$$

soit, d'une manière plus générale, par le variogramme correspondant à la variance des accroissements de $Z(x)$:

$$2\gamma(h)=E[[Z(x)-Z(x+h)]^2]$$

Lorsque la covariance existe, les deux fonctions sont équivalentes:

$$\gamma(h)=C(o)-C(h)$$

Dans ce cas, le variogramme est borné: il atteint un palier au-delà d'une distance e égale à la portée. Cette distance représente l'étendue du voisinage pour lequel un échantillon possède une certaine représentativité.

Le variogramme expérimental obtenu par le calcul est ajusté à l'un des schémas théoriques admissibles pour l'estimation par krigeage; les modèles classiques sont de type sphériques, exponentiel ou gaussien dans le cas d'un variogramme borné au lieu de la forme h^λ ($\lambda < 2$) en l'absence de palier.

* Lorsque le variogramme ne passe pas par l'origine, l'ordonnée C_o correspond à l'effet de pépite. Elle représente l'importance des hétérogénéités locales de teneurs dont la dimension

est nettement inférieure à la maille d'échantillonnage. Si la répartition des teneurs est totalement aléatoire, le variogramme atteint son palier dès l'origine: il s'agit d'un comportement purement pépitique.

Ainsi, le variogramme résume les caractères de la structure spatiale des données et le krigeage permet alors de résoudre le problème d'interpolation de manière optimale en tenant compte de cette information. L'interpolation au point x_o correspond à une moyenne pondérée des valeurs observées sur les points du voisinage.

$$Z(x_o)=\sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i)$$

$$\text{avec: } \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$$

Les poids λ_i sont calculés en fonction de la répartition des points x_i autour de x_o en résolvant un système d'équations linéaires du type suivant:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i-x_o) + \mu_o = \gamma(x_i-x_o)$$

où μ_o est le paramètre de LAGRANGE.

Dans ces conditions, on démontre que l'estimation $\hat{Z}(x_o)$ est sans biais et de variance minimum. Cette erreur d'estimation peut être évaluée:

$$E[[Z(x_o) - \hat{Z}(x_o)]^2] = \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i-x_o) + \mu_o$$

En présence d'une dérive $m(x)$, l'interpolation par krigeage universel est plus difficile car le variogramme expérimental est marqué par un biais important. Les covariances généralisées d'ordre k sont alors utilisées pour filtrer les dérives polynomiales.

L'analyse structurale de la carte géochimique n'est pas seulement utile pour résoudre le problème d'interpolation mais elle peut servir également lors du filtrage du signal géochimique. Cette opération a pour but de séparer plusieurs composantes de variation correspondant à des structures d'échelles différentes. Cette notion d'échelle ou de dimension des structures se traduit en termes de fréquences pour les composantes harmoniques de la transformée de FOURIER du signal (R. BRACEWELL, 1965; J. MAX, 1977; J. LIFERMANN, 1977). Le spectre de variance correspondant au carré de l'amplitude de chaque harmonique représente une décomposition de la variance du signal géochimique en terme de fréquences. Les composantes spectrales de basse fréquence reflètent plutôt les variations géochimiques à l'échelle régionale, tandis que les hautes fréquences caractérisent essentiellement les fluctuations locales de teneurs. Ainsi, l'importance relative de chacune des parties du spectre dépend du caractère plus ou moins régulier de la répartition géographique d'un élément.

Le spectre de variance correspond également à la transformée de FOURIER de la covariance $C(h)$ (ou fonction d'auto-covariance). Ces deux représentations apparaissent donc comme deux images réciproques qui expriment chacune à sa manière les caractères essentiels de la structure des données.

Le passage au domaine fréquentiel, assez facile à réaliser lorsque les données sont situées aux noeuds d'une grille régulière, présente un intérêt particulier pour effectuer un filtrage de la carte des teneurs.

En effet, dans le domaine fréquentiel, le filtrage consiste simplement à multiplier certaines composantes par une fonction favorisant certaines fréquences. Par contre dans le domaine direct, la même opération est obtenue par convolution entre la carte des teneurs et la «fonction filtrante». Ainsi, un lissage des données peut être obtenu par filtrage «passe-bas» en ne retenant que les composantes de basses fréquences correspondant aux variations régionales de teneurs. L'examen du spectre de variance guide le choix du seuil de coupure.

Il est intéressant de remarquer que l'analyse krigeante permet également de séparer plusieurs composantes de variation du signal géochimique que l'on peut identifier à l'aide de leur covariance spatiale lors de l'analyse structurale (G. MATHERON, 1982; L. SANDJIVY, 1983). Le variogramme apparaît alors comme la somme de plusieurs schémas de base auxquels correspondent les composantes aléatoires intrinsèques du signal $Z(x)$.

En pratique, les moyennes mobiles sont souvent utilisées en géochimie comme méthode de filtrage (J. DE GEOFFROY et al., 1968; C.Y. CHORK et G.J.S. GOVETT, 1979; R.J. HOWARTH et al., 1980). Une estimation du fond géochimique est obtenue de cette manière par compensation statistique des écarts aléatoires à l'intérieur de chaque cellule. En chaque point d'échantillonnage l'écart entre la valeur observée et la valeur estimée représente la contribution de la composante «anormale» du signal géochimique. Cette méthode reste très empirique, dans la mesure où le choix des paramètres tels que la taille de la cellule ou la pondération des valeurs, n'est pas guidé par l'analyse structurale du signal. La décomposition du signal risque alors d'être très artificielle.

Chapitre VII:

Etude de la précision

des données géochimiques de Bou Azzer

et méthode de correction

VII.1. Origine et préparation des données	123
VII.1.1. Echantillonnage	123
VII.1.2. Analyses géochimiques	123
VII.1.2.1. Préparation des échantillons	123
VII.1.2.2. Méthode d'analyse géochimique	123
A. Principes de la méthode	123
B. Appareil de mesure	124
VII.1.3. Préparation des données	125
VII.1.3.1. Choix de la maille utilisée	125
VII.1.3.2. Informations tirées de la carte géologique	125

Chapitre VII: ETUDE DE LA PRECISION DES DONNEES GEOCHIMIQUES DE BOU AZZER ET METHODE DE CORRECTION:

VII.2. Etude de la précision des analyses	125
VII.2.1. Introduction	125
VII.2.2. Distributions statistiques des données témoins	126
VII.2.3. Estimation de la précision à partir des analyses témoins	132
VII.2.3.1. Principe	132
VII.2.3.2. Définition	132
VII.2.4. Evolution de la précision en fonction du niveau de teneur	141
VII.2.5. Evolution de la précision en fonction du temps	142
VII.2.6. Etude des corrélations sur les données témoins	143
VII.2.6.1. Matrices de corrélation	143
a. Résultats	143
b. Interprétation	143
VII.2.6.2. Analyse factorielle sur les données témoins	146
a. Résultats	146
b. Interprétation	146
VII.2.6.3. Conclusion	149
VII.2.7. Evolution du niveau de teneur en fonction du temps	149
VII.2.7.1. Analyse de la relation $C = f(t)$	149
VII.2.7.2. Conclusion	157
VII.2.8. Méthode de correction des analyses géochimiques	157
VII.2.8.1. Principe	157
VII.2.8.2. Méthode	157
a. Régression linéaire sur les teneurs mesurées des analyses témoins	157
b. Correction de la teneur en un élément A d'un échantillon quelconque	158
VII.2.9. Conclusion	160

VII.1. ORIGINE ET PREPARATION DES DONNEES:

VII.1.1. Echantillonnage:

Une campagne d'échantillonnage de roche en surface a été effectuée par la mine de Bou Azzer, elle recouvre le secteur de Tamdrost-Ambed, la maille est un carré de 20 m de côté. Le prélèvement est fait suivant des cotes N15°E en allant du Nord vers le Sud et d'une cote à la suivante en allant d'Ouest en Est.

Chaque échantillon peut être repéré de deux manières:

- par un code binomial (cote, ligne), ce qui correspond aux coordonnées de l'échantillon dans le réseau de prélèvement pré-établi, où la cote est l'abscisse et la ligne est l'ordonnée du point de prélèvement.

- par un numéro qui correspond au rang de l'échantillon dans la série des analyses géochimiques, sachant que les analyses sont effectuées dans l'ordre du prélèvement.

En fait seul ce numéro figure dans les bulletins d'analyse, ce qui a conduit à établir des listes de correspondance entre les coordonnées d'un échantillon et le numéro de son analyse.

Les coordonnées étant utilisées comme des variables au cours des traitements cartographiques, seul le numéro de l'analyse a été retenu comme identification de l'échantillon correspondant.

VII.1.2 Analyses géochimiques:

VII.1.2.1 Préparation des échantillons:

Sur 16832 échantillons récoltés dans le secteur Tamdrost-Ambed, 13000 ont été analysés. Ces échantillons correspondent principalement à des roches à matrice silico-alumineuse ou carbonatée. Les échantillons ont été lavés à l'eau puis séchés, avant de subir un broyage les ramenant à une granulométrie inférieure à 40µm.

VII.1.2.2 Méthode d'analyse géochimique:

La technique utilisée au laboratoire d'analyses géochimiques de Bou Azzer est la spectrométrie d'émission. Elle rend possible la mesure simultanée de plusieurs éléments. Elle se distingue aussi par la rapidité des analyses, avec un contrôle automatique et des procédures de calcul qui rendent les opérations simples et reproductibles. Ces caractères font de la spectrométrie d'émission l'un des moyens d'analyse géochimique les plus adaptés à la manipulation de grands nombres d'échantillons.

A- Principe de la méthode:

Un atome au repos (état fondamental) recevant un apport d'énergie (ici électrique) passe

à l'état excité. Le ou les électrons de sa couche périphérique subissent alors des transitions électroniques, passant d'un niveau énergétique inférieur à un niveau énergétique supérieur.

L'électron redescend du niveau supérieur, soit sur un niveau intermédiaire, soit sur son niveau de départ, en restituant sous forme de lumière l'énergie qu'il a reçue.

Cette émission est gouvernée par la loi: $E_2 - E_1 = hc/\lambda$

où E_2 = Energie du niveau supérieur.

E_1 = Energie du niveau sur lequel redescend l'électron.

h = constante de PLANCK.

c = vitesse de la lumière.

λ = longueur d'onde de la lumière émise par cette transition électronique.

Etant donné qu'un électron ne peut occuper qu'un certain nombre de niveaux énergétiques, les transitions électroniques après excitation d'un élément seront toujours les mêmes, toutes les transitions possibles (pour tous les électrons périphériques de l'atome considéré) aboutissent à un ensemble de radiations émises qui constituent le spectre d'émission atomique de cet élément.

Chaque élément d'un échantillon excité émettra ainsi un spectre constitué d'un certain nombre de raies caractéristiques dont l'étude conduit à deux types d'analyses:

a) une analyse qualitative par identification des raies les plus caractéristiques des éléments présents.

b) une analyse quantitative par la mesure des intensités de ces mêmes radiations, celles-ci étant proportionnelles à la teneur de l'échantillon en cet élément.

B- Appareil de mesure:

Le laboratoire d'analyses géochimiques de Bou Azzer est monté autour d'un spectromètre d'émission à lecture directe, de type PV 8210, il est raccordé à un ordinateur de type P851 (PHILIPS) qui permet le dépouillement des spectres et le calcul des teneurs en éléments.

Par ailleurs les résultats de chaque analyse sont enregistrés sur des disquettes 8 pouces et sont sortis sous forme de listings à l'aide d'une imprimante «TELETYPE». Ce système permet le dosage de 34 éléments (tableau 2 bis), dont 10 éléments majeurs sous forme d'oxydes et 24 éléments en traces. L'étalonnage est de type externe naturel.

Elt. l. s. (%) l. i.	SiO ₂ - -	Al ₂ O ₃ - -	Fe ₂ O ₃ - -	MgO - -	CaO - -	Na ₂ O - -	K ₂ O - -	TiO ₂ 20 0.01	MnO 5 0.005	P ₂ O ₅ 7 0.01
Elt. l. s. (ppm) l. i.	Li 5000 20	Be 300 1	B 3000 5	V 3000 5	Cr 25000 5	Co 4000 2	Ni 10000 2	Cu 50000 1	Zn 50000 5	As 20000 20
Elt. l. s. l. i.	Cd 500 1	Sr 5000 5	Y 3000 20	Zr 20000 50	Nb 5000 20	Mo 2000 2	Ag 300 0.2	Sn 5000 2	Sb 5000 20	Ba 20000 5
Elt. l. s. l. i.	La 5000 20	W 5000 15	Pb 7000 5	Bi 2000 4						

Tableau 2 bis: Eléments chimiques dosés dans le laboratoire d'analyse géochimique par spectrométrie d'émission, de Bou Azzer, Elt.: éléments dosés, l. s.: limite supérieure de détection, l. i.: limite inférieure de détection.

VII.1.3 Préparation des données:

VII.1.3.1 Choix de la maille utilisée:

Les 13000 analyses de roche totale dont nous avons disposé et qui constituent une quantité considérable d'informations, sont présentés sous forme de listings.

L'indisponibilité des résultats des analyses sur un support directement utilisable par un système informatique (bande magnétique, cartes perforées ...) et devant le volume de données à traiter nous avons reconsidéré le nombre de points à utiliser dans un premier temps. A cet effet nous avons joué sur la dimension de la maille tout en gardant un réseau régulier destiné en principe à conserver la représentativité des échantillons dans leur ensemble et permettant de rendre ultérieurement la maille plus dense aux niveaux qui révéleraient un intérêt particulier.

Ainsi avons-nous choisi une maille de 60 m de côté, ce qui revient à retenir un échantillon sur trois pour chaque ligne et chaque cote, soit un échantillon sur neuf pour la totalité du réseau, ainsi 1426 échantillons sont retenus pour le traitement du signal géochimique de prospection.

VII.1.3.2. Information tirée de la carte géologique:

A partir de la carte géologique au 1/2000e du secteur étudié, nous avons affecté à chaque échantillon, en plus des coordonnées, une variable qualitative qui traduit le faciès lithologique du point de prélèvement.

VII.2. ETUDE DE LA PRECISION DES ANALYSES:

VII.2.1. Introduction:

L'interprétation des résultats du traitement de données géochimiques, conduit généralement à comparer la composition chimique des échantillons prélevés et à s'interroger sur la signification des variations de teneurs observées.

Une partie de la dispersion des teneurs est en fait introduite par les opérations de préparation des échantillons et d'analyse proprement dite. Or la validité de toute utilisation des données géochimiques et de l'interprétation de la dispersion des teneurs est pour une grande part fonction de la connaissance du degré de précision des analyses géochimiques.

Aussi pour évaluer l'importance des erreurs induites par ces opérations allons nous étudier les échantillons références qui ont été analysés périodiquement, pratiquement au début de chaque série de deux cents analyses.

Nous appelons analyses témoins, les résultats d'analyses répétitives faites sur un même échantillon (dit échantillon référence) qui correspond à un seul prélèvement d'une roche donnée. Cet échantillon est analysé périodiquement afin de contrôler les erreurs dues au dispositif de mesure.

L'étude de la précision a porté sur trois groupes d'analyses témoins (I, J, K), l'effectif de celles-ci dans chaque groupe est de 60. Les groupes d'analyses témoins I et J correspondent à des analyses de deux échantillons références granitiques et le groupe K à des analyses d'un échantillon référence quartzo-carbonaté.

Dans le souci d'étudier l'évolution de la précision dans le temps, chaque groupe de témoins est subdivisé en trois lots (figure 46), correspondants au début, au milieu et à la

fin de la série des analyses. Les analyses témoins sont donc répartis en neufs lots: I1, I2, I3; J1, J2, J3; K1, K2, K3.

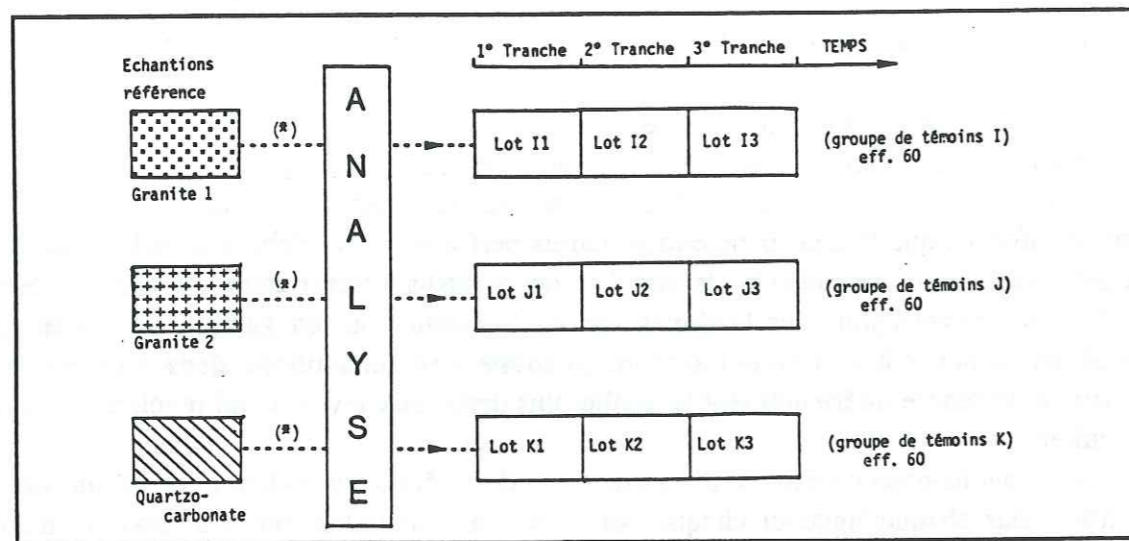


figure 46: Représentation schématique des étalons et des analyses témoins qui en sont issues, (*): une analyse témoin au bout de chaque série de 200 analyses de roche.

En fait, les analyses des échantillons références sont étalées dans le temps, ce qui permet à la fois de tenir compte de la reproductibilité des mesures et des effets possibles de dérive à long terme entre des résultats recueillis à des séances d'analyse différentes.

VII.2.2. Distributions statistiques des données témoins:

Les histogrammes de fréquence, les courbes cumulées et les droites d'Henri (fréquences cumulées reportées dans un diagramme à échelle gaussienne), construits pour ces données témoins, montrent (figures 47, 48, 49, 50 et 51) que les distributions des teneurs en éléments SiO₂, Al₂O₃, CaO, Na₂O, Ni, Zr, Sr et Ba se rapproche d'une distribution log-normale.

Les distributions des teneurs en MnO, Co, Pb, Bi, Mo, Ag et Sn, s'apparentent plutôt à une loi de distribution normale. Ceci pour les éléments qui présentent le même type de distribution dans les deux groupes de témoins considérés I et K.

Cependant il existe des éléments dont la distribution des teneurs s'apparente à des lois différentes selon le groupe de témoins auquel ils appartiennent (Tableau 3). Ainsi la distribution des teneurs des éléments K₂O, TiO₂, Li, B, V et Cr, s'apparente à une loi de distribution normale dans le groupe de témoins I, alors que dans le groupe K elle se rapproche de la loi de distribution log-normale. La même chose mais dans le sens inverse est observée pour les éléments Zn et As.

distribution	groupes de témoins	
	I	K
Normale	MnO, Co, Pb, Bi, Mo, Ag, Sn	
	K ₂ O, TiO ₂ , Li, B, V, Cr, Cu	Zn, As
Lognormale	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, Na ₂ O, P ₂ O ₅ , Ni, Zr, Sr, Ba	
	Zn, As	K ₂ O, TiO ₂ , Li, B, V, Cr, Cu

Tableau 3: Distribution statistique des analyses témoins en fonction de la matrice.

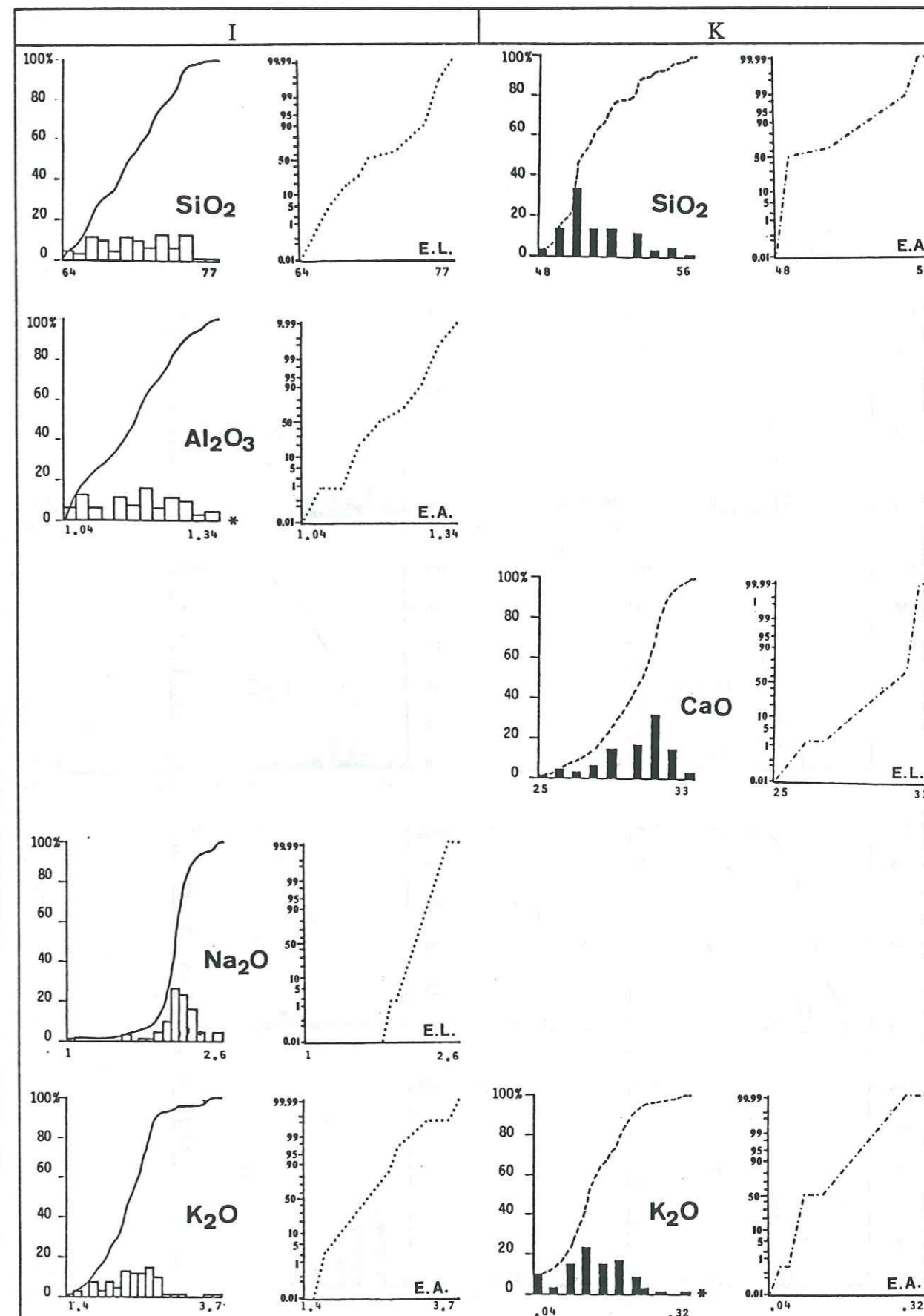


Figure 47: Histogrammes et droites d'Henri pour les deux lots de témoins I et K, barres vides: groupe témoins I, barres pleines: groupe de témoins K, —: courbe de fréquences cummulées pour témoins I, ---: courbe de fréquences cummulées pour témoins K,: droite d'Henri pour témoins I, -.-.-: droite d'Henri pour témoins K; E.A.: Echelle Arithmétique, E.L.: Echelle Logarithmique, *: valeurs logarithmiques.

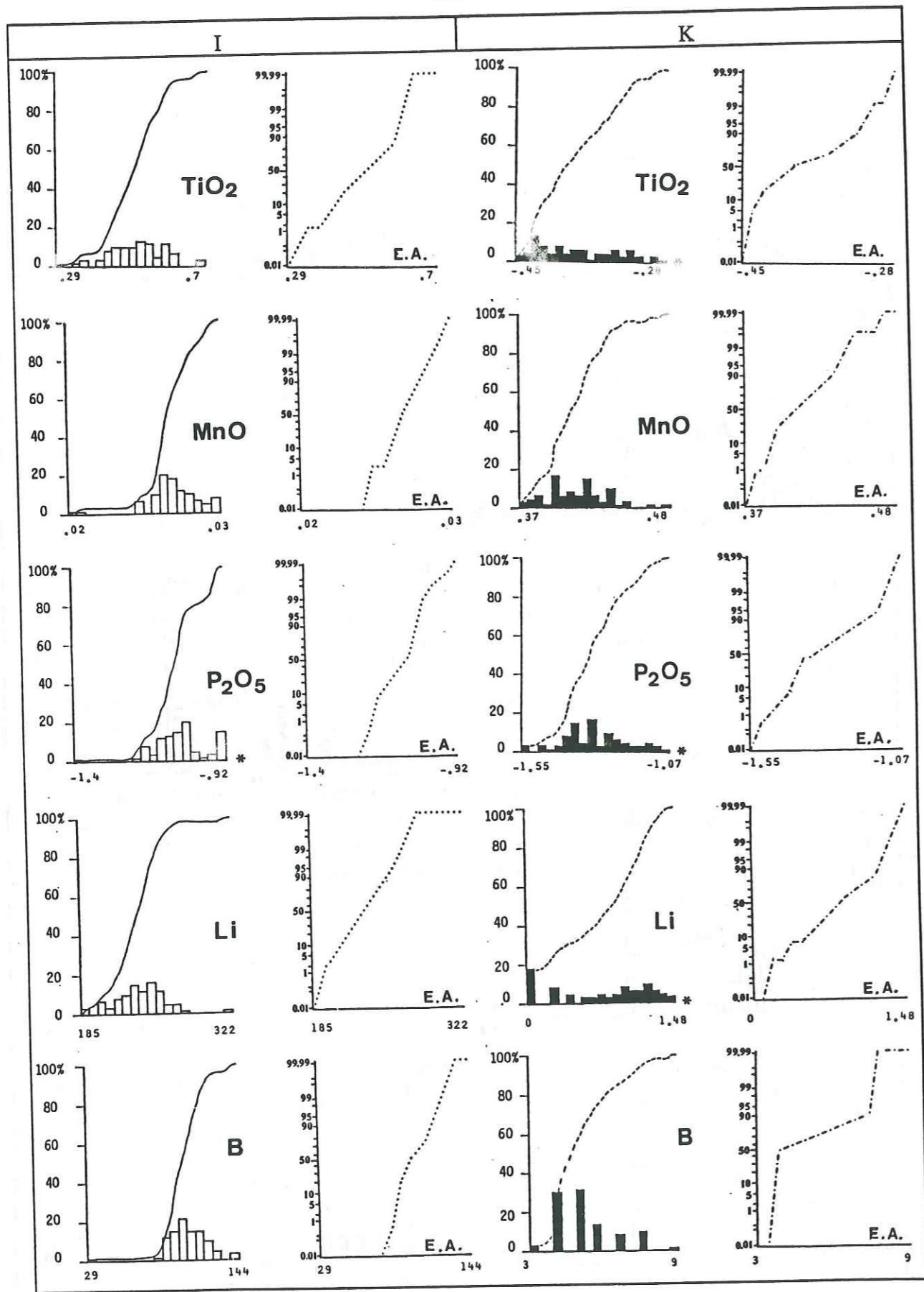


Figure 48: Histogrammes et droites d'Henri pour les deux lots de témoins I et K (suite);

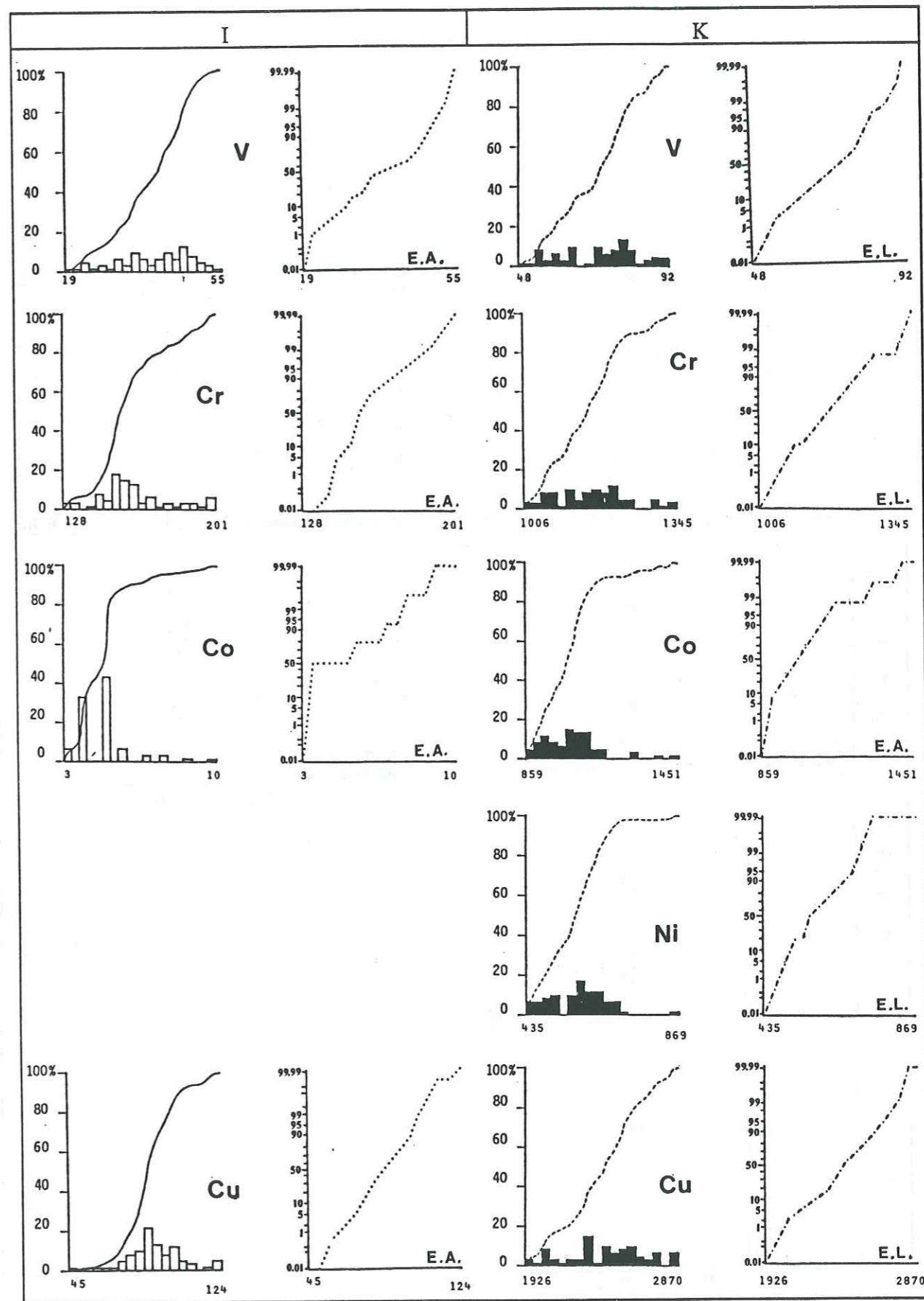


Figure 49: Histogrammes et droites d'Henri pour les deux lots de témoins I et K (suite);

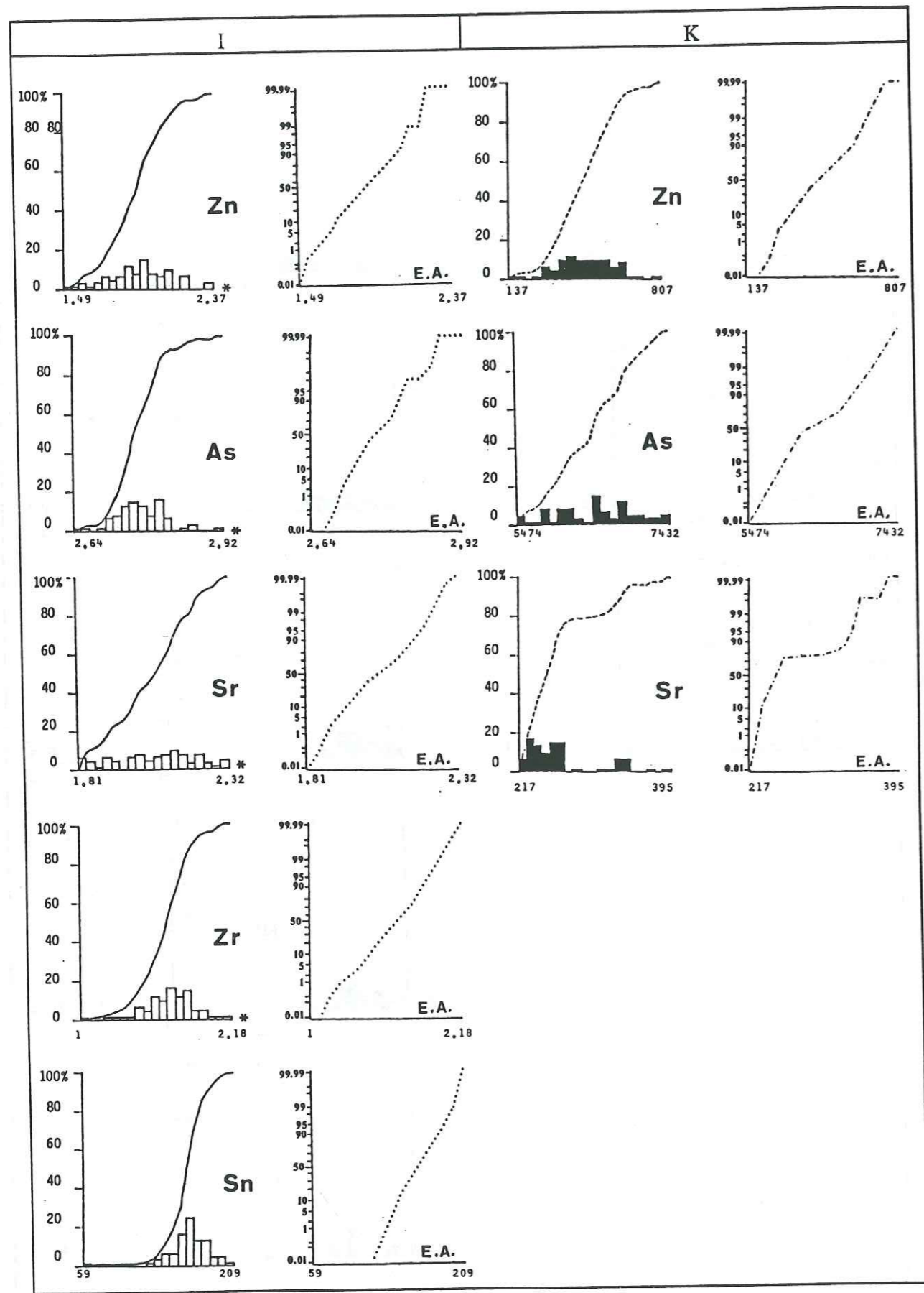


Figure 50: Histogrammes et droites d'Henri pour les deux lots de témoins I et K (suite);

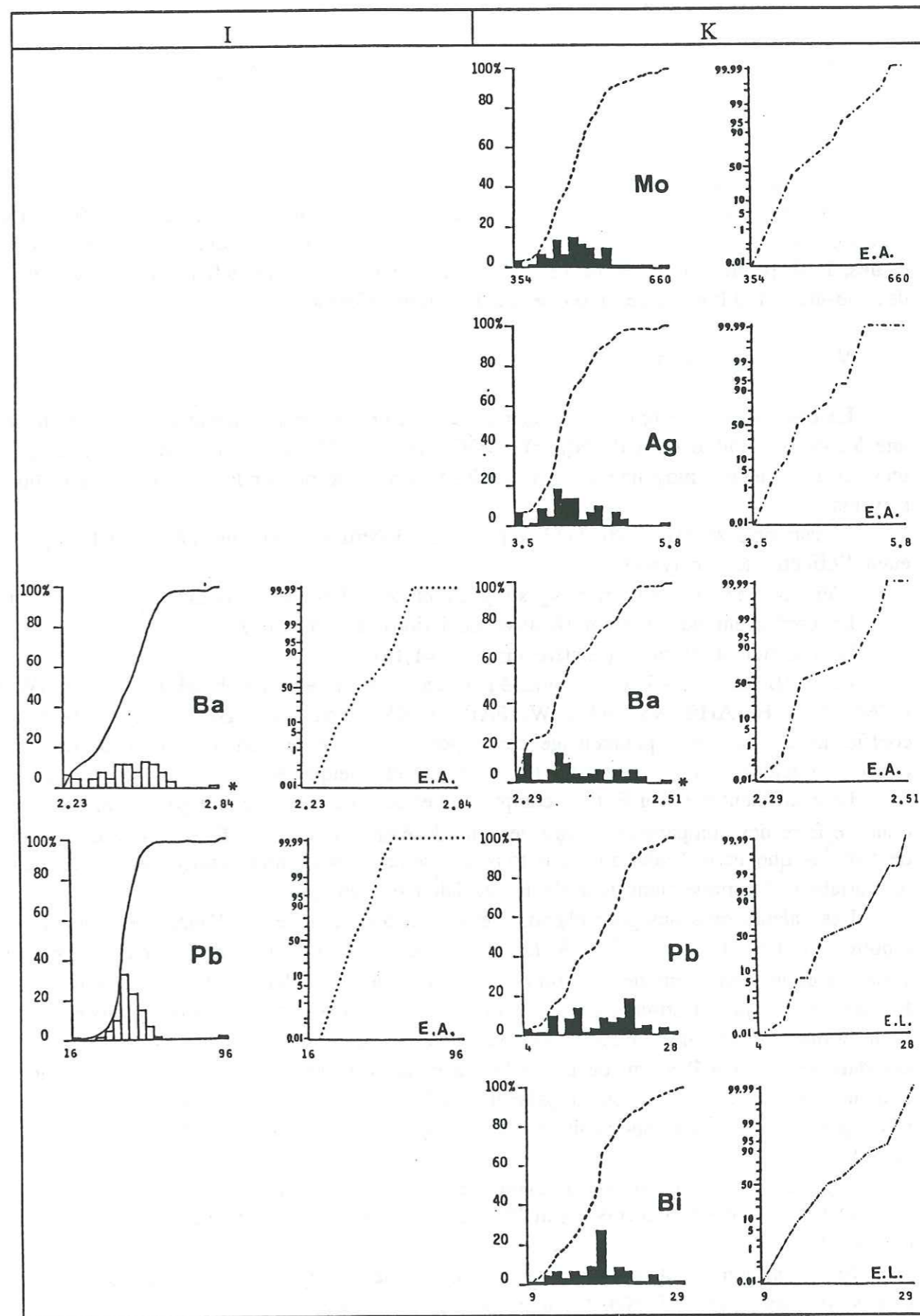


Figure 51: Histogrammes et droites d'Henri pour les deux lots de témoins I et K (suite).

VII.2.3. Estimation de la précision à partir des analyses témoins:

VII.2.3.1. Principe:

Les analyses appartenant à un lot de témoins fournissent une série de teneurs (X1, X2, ..., Xn) pour chaque élément dosé. Dans le cas d'une parfaite homogénéité de l'échantillon référence analysé et d'une parfaite reproductibilité des mesures, les teneurs X1 à Xn seraient égales; la dispersion observée de ces valeurs caractérise donc les défauts de reproductibilité des mesures et d'homogénéisation de l'échantillon référence.

VII.2.3.2 Définition:

La distribution aléatoire des teneurs, due aux erreurs expérimentales suit généralement une loi de probabilité normale N(m,s), (ROQUIN C. 1985). La différence entre une teneur mesurée et la teneur moyenne m (d=déviaton), permet de définir les paramètres statistiques suivants:

L'écart-type $s = [(\sum d^2)/(n-1)]^{0.5}$, représente l'incertitude sur une teneur quelconque, (n étant l'effectif des analyses).

L'erreur-type (standard error) $s_m = s/(n)^{0.5}$, représente l'erreur sur la moyenne arithmétique.

Le coefficient de variation (relative deviation), $P=(s/m)*100$

Le coefficient d'erreur (relative error), $E=P/(n)^{0.5}$.

Le coefficient de variation est utilisé pour apprécier la reproductibilité des mesures (W.H. DENNEN, L.H. AHRENS and H.W. FAIRBAIRN, 1951; A. GUILLAUME, 1977). Ce coefficient est exprimé en pourcentage, ce qui permet de faire des comparaisons entre différents éléments quelque soit la dimension (% ou ppm) et quelque soit le niveau de teneur.

Le coefficient d'erreur E, tient compte de l'effectif des observations (mesures) et autorise donc de faire des comparaisons entre des lots différents d'analyses. Etant donné que les lots de témoins que nous étudierons sont tous de même effectif, nous utiliserons le coefficient de variation P comme indicateur de la précision des analyses.

Les valeurs obtenues pour chaque élément et pour chaque lot d'analyses témoins, sont reportés sur les tableaux 4, 5 et 6. Dans le tableau 7, nous donnons l'étendue globale de variation et le coefficient de variation globale calculé pour l'ensemble des témoins I, J et K. Ces valeurs ne constituent qu'une estimation de la précision moyenne calculée à partir d'un nombre limité de témoins; leur signification doit être précisée par l'examen des diagrammes binaires P vs m, où m est la moyenne arithmétique des teneurs dans un lot de témoins donné, où chaque point représente un lot d'analyses témoins et où chaque courbe passe par les points correspondants à une même tranche de temps, (figures 52, 53, 54, 55 et 56).

Ces diagrammes binaires permettent de visualiser deux types de relations:

a) l'évolution de la précision en fonction du niveau de teneur que traduit chacune des courbes $P=f(m)$.

b) l'évolution de la précision en fonction du temps, que nous pouvons déduire de la disposition des courbes $P=f(t)$, les unes par rapport aux autres.

Les diagrammes P vs m sont établis pour les éléments majeurs et les éléments en traces, sauf néanmoins ceux dont le niveau de teneur ne dépasse jamais ou dépasse rarement le seuil de dosabilité.

ELEMENTS	S. d.	MIN-MAX.	LOT I 1			LOT I 2			LOT I 3			C. V. M.	E. R. M.			
			MOYENNE	ECART TYPE	COEF. VAR. P	ERR. REL.	MOYENNE	ECART TYPE	COEF. VAR. P	ERR. REL.	MOYENNE			ECART TYPE	COEF. VAR. P	ERR. REL.
SiO2 (%)	-	64-77	68.25	2.55	3.74	0.83	69.77	2.12	3.04	0.67	73.61	1.77	2.40	0.50	3.06	0.66
Al2O3	-	11-22	17.9	2.3	12.85	2.80	16.27	1.96	12.05	2.60	12.8	1.53	11.95	2.60	12.28	2.66
Fe2O3	-	2-4	4.8	0.6	12.50	2.70	4.44	0.51	11.49	2.50	3.14	0.87	14.97	3.30	4.99	3.30
CaO	-	1-2.6	2.15	0.19	8.84	1.92	2.28	0.12	5.26	1.10	2.28	0.33	22.08	4.90	13.35	3.35
MgO	-	1.6-3.7	2.1	0.37	17.62	3.90	2.41	0.21	8.71	1.90	2.83	0.34	14.47	3.20	9.52	2.06
K2O	-	0.403-0.696	0.029	0.002	6.90	1.51	0.520	0.03	5.77	1.20	0.46	0.06	13.04	2.80	12.78	2.80
TiO2	0.003	0.024-0.03	0.1	0.015	15.00	3.34	0.077	0.007	9.09	2.02	0.026	0.002	7.69	1.70	35.28	1.60
P2O5	0.01	0.085-0.121	244	22	9.02	2.00	238	14.5	6.09	1.30	0.09	0.012	13.33	2.90	4.86	1.60
Li (ppm)	30	82-144	97	7	7.22	1.60	110	9	8.18	1.80	115	16.9	14.70	2.00	12.47	2.74
V	10	28-55	47	5	10.64	2.30	41	5.6	13.66	3.00	57	16.4	10.53	3.20	10.03	2.20
Cr	2	128-201	177	7	8.47	1.80	158	4	2.53	0.50	148	10.4	7.03	2.34	11.61	2.54
Co	1	3-7	4.5	0.7	15.56	3.40	4.70	8	17.02	3.70	5	1	20.00	4.48	6.01	1.26
Cu	1	64-124	82	7	8.54	1.80	92	8	8.70	1.92	102	13.9	13.63	3.00	10.29	2.23
Zn	2	62-136	66	17.5	26.52	5.80	99	20	20.20	4.41	136	40.6	29.85	6.60	25.52	3.60
As	20	462-827	557	34	6.10	1.30	576	48	8.33	1.88	639	76.6	11.99	2.60	8.81	1.90
Sr	5	64-199	160	22.8	14.25	3.10	119	19.4	16.30	3.60	81	13.3	16.42	3.60	15.66	3.43
Zr	50	50-106	160	22.8	14.25	3.10	119	19.4	16.30	3.60	81	13.3	16.42	3.60	15.66	3.43
Sn	3	128-209	176	18.9	10.74	2.30	168	11	6.55	1.45	170	20.1	11.82	2.60	12.71	4.20
Ba	3	168-424	371	37.4	10.08	2.20	316	48	15.19	3.36	229	43.3	18.91	4.20	14.73	2.10
Pb	10	31-62	43.7	4	9.15	2.00	45	4	8.89	1.90	48	8.3	17.29	3.80	11.78	2.56
Bi	4	5-20	9	1.7	18.89	4.10	10	2	20.00	4.40	14	4	28.57	6.30	22.49	4.90

Légende:

- S.d.: Seuil de détection.
- COEF.VAR.: Coefficient de variation. P
- ERR.REL.: Erreur relative.
- C.V.M.: Coefficient de variation moyen.
- E.R.M.: Erreur relative moyenne.

Tableau 4: Paramètres statistiques élémentaires calculés pour les lots de témoins I1, I2 et I3 (matrice aluminosilicatée).

ELEMENTS	S. d.	MIN.-MAX.	LOT J 1				LOT J 2				LOT J 3				C. V. M.	E. R. M.
			MOYENNE	ECART TYPE	COEF. VAR.	ERR. REL.	MOYENNE	ECART TYPE	COEF. VAR.	ERR. REL.	MOYENNE	ECART TYPE	COEF. VAR.	ERR. REL.		
SiO2 (%)	-	64-78	69.8	3.12	4.47	0.99	71.65	2.23	3.11	0.69	74.2	1.8	2.43	0.54	3.34	0.74
Al2O3	-	12-24	18.75	2.73	14.56	3.33	16.70	1.9	11.38	2.53	14.6	1.56	10.68	2.37	12.21	2.70
Fe2O3	-	2-3	2.7	0.477	17.67	3.92	2.85	0.36	12.63	2.81	2.5	0.51	20.40	4.53	16.90	3.75
CaO	-	2-5	2.4	0.5	20.83	4.63	2.70	0.7	25.93	5.76	2.45	0.75	30.61	6.80	25.79	5.73
Na2O	-	0.8-2.3	0.93	0.055	5.91	1.31	0.98	0.26	26.53	5.89	0.98	0.31	31.63	7.02	21.36	4.74
K2O	-	2.1-5.2	3.52	0.58	16.48	3.66	3.67	0.47	12.81	2.85	3.8	0.63	16.58	3.68	15.29	3.39
TiO2	0.003	0.360-0.663	0.535	0.052	9.72	2.16	0.469	0.047	10.02	2.23	0.44	0.071	16.14	3.58	11.96	2.65
MnO	0.002	0.023-0.034	0.029	0.002	6.90	1.53	0.026	0.002	7.69	1.71	0.027	0.002	7.41	1.64	7.33	1.62
P2O5	0.01	0.077-0.146	0.117	0.016	13.68	3.04	0.090	0.01	11.11	2.47	0.098	0.011	11.22	2.49	12.00	2.66
Li (ppm)	30	190-323	247	26	10.53	2.34	246	28	11.38	2.52	239	32	13.39	2.97	11.77	2.61
B	10	17-31	23	2.8	12.17	2.70	25	3	12.00	2.66	24	4.2	17.50	3.88	13.89	3.08
V	10	36-69	64	3.6	5.62	1.25	59	4	6.78	1.50	44	4.7	10.68	2.37	7.70	1.70
Cr	2	153-263	228	19	8.33	1.85	198	9	4.55	1.01	185	15	8.11	1.80	7.00	1.55
Co	1	4-9	7	1	14.29	3.18	6	0.8	13.33	2.96	6	1.3	21.67	4.81	16.43	3.65
Cu	1	21-56	25	2.8	11.20	2.49	41	11	26.83	5.96	42	6.7	15.95	3.54	17.99	3.99
Zn	2	105-297	164	36.5	22.26	4.95	201	31	15.42	3.42	224	39.3	17.54	3.89	18.41	4.08
As	20	2177-2776	2380	130	5.46	1.21	2436	121	4.97	1.10	2475	102.7	4.15	0.92	4.86	1.07
Sr	5	49-130	101	14.8	14.65	3.26	78	11	14.10	3.13	59	7.7	13.05	2.90	13.94	3.09
Zr	50	52-128	88	19.1	21.70	4.82	85	23.1	27.18	6.04	62	13.2	21.29	4.73	23.39	5.19
Sn	3	38-72	60	6	10.00	2.22	60	5	8.33	1.85	57	6.9	12.11	2.69	10.15	2.25
Ba	5	236-588	494	80.6	16.32	3.63	445	55	12.36	2.74	367	49	13.35	2.96	14.01	3.11
Pb	10	13-26	19.6	2.7	13.78	3.06	18	2.6	14.44	3.20	17	3	17.65	3.92	15.29	3.40

Légende :

- S. d. : Seuil de détection.
- COEF.VAR. : Coefficient de variation. **P**
- ERR. REL. : Erreur relative.
- C. V. M. : Coefficient de variation moyen.
- E. R. M. : Erreur relative moyenne.

Tableau 5: Paramètres statistiques élémentaires calculés pour les lots de témoins J1, J2 et J3 (matrice aluminosilicatée).

ELEMENTS	S. d.	MIN.-MAX.	LOT K 1				LOT K 2				LOT K 3				C. V. M.	E. R. M.
			MOYENNE	ECART TYPE	COEF. VAR.	ERR. REL.	MOYENNE	ECART TYPE	COEF. VAR.	ERR. REL.	MOYENNE	ECART TYPE	COEF. VAR.	ERR. REL.		
SiO2 (%)	-	48-54	50.26	1.6	3.18	0.70	50.50	1.05	2.08	0.46	52.3	2.02	3.86	0.85	3.04	0.67
Al2O3	-	4-7	6.3	0.74	11.75	2.61	5.85	0.48	8.21	1.82	5.15	1.34	26.02	5.78	15.32	3.40
Fe2O3	-	4-5	4.21	0.41	9.74	2.16	4.80	0.41	8.54	1.89	4.8	0.41	8.54	1.89	8.94	1.98
MgO	-	5-6	5.47	0.51	9.32	2.07	4.95	0.39	7.88	1.75	4.75	0.63	13.26	2.94	10.16	2.25
CaO	-	26-33	30.5	1.57	5.15	1.14	30.55	1.23	4.03	0.89	29.1	2.14	7.35	1.63	5.51	1.22
Na2O	-	0.8-1.1	0.9	0.08	8.89	1.97	0.995	0.06	6.03	1.34	1.03	0.08	7.77	1.72	7.56	1.67
K2O	-	1.1-1.6	1.3	0.1	7.69	1.70	1.480	0.14	9.46	2.10	1.56	0.21	13.46	2.99	10.20	2.26
TiO2	0.003	0.368-0.439	0.4	0.019	4.75	1.05	0.400	0.03	7.50	1.66	0.403	0.047	11.66	2.59	7.97	1.76
MnO	0.002	0.399-0.523	0.46	0.038	8.26	1.83	0.403	0.016	3.97	0.88	0.427	0.026	6.09	1.35	6.11	1.35
P2O5	0.01	0.041-0.086	0.06	0.014	23.33	5.18	0.041	0.007	17.07	3.79	0.052	0.009	17.31	3.84	19.24	4.27
V (ppm)	10	71-91	81	6	7.41	1.64	72	6.4	8.89	1.97	60	7.3	12.17	2.70	9.49	2.10
Cr	2	1028-1334	1126	84	7.46	1.65	1135	70	6.17	1.37	1002	73.5	7.34	1.63	6.99	1.55
Co	1	859-1060	953	59	6.19	1.37	1026	60	5.85	1.30	1169	114.8	9.82	2.18	7.29	1.61
Ni	1	435-644	520	64	12.31	2.73	575	55	9.57	2.12	651	67	10.29	2.28	10.72	2.37
Cu	1	1926-2574	2225	173	7.78	1.72	2593	174	6.71	1.49	2496	165.6	6.63	1.47	7.04	1.56
Zn	2	299-522	388	65	16.75	3.72	506	67.1	13.26	2.94	577	85.3	14.78	3.28	14.93	3.31
As	20	5474-6407	5960	284	4.77	1.06	6484	269	4.15	0.92	6995	269	3.85	0.84	4.25	0.94
Sr	5	246-353	300	43	14.33	3.18	261	12	4.60	1.02	232	7	3.02	0.67	7.32	1.62
Mo	1	406-547	464	45	9.70	2.15	491	44.3	9.02	2.00	499	67.3	13.49	2.99	10.74	2.38
Ag	0.1	3.5-4.8	4.3	0.3	6.98	1.55	4.5	0.5	11.11	2.46	4	0.4	10.00	2.28	9.36	2.07
Ba	5	239-320	275	21	7.64	1.69	234	19	8.12	1.80	212	13	6.13	1.36	7.30	1.61
Pb	10	12-24	17	4.2	24.71	5.49	18	4.5	25.00	5.55	21	3.9	18.57	4.13	22.76	5.05
Bi	4	11-19	15	2.7	18.00	4.00	19	2.2	11.58	2.57	21	4	19.05	4.20	16.21	3.60

Légende :

- S. d. : Seuil de détection.
- COEF.VAR. : Coefficient de variation. **P**
- ERR. REL. : Erreur relative.
- C. V. M. : Coefficient de variation moyen.
- E. R. M. : Erreur relative moyenne.

Tableau 6: Paramètres statistiques élémentaires calculés pour les lots de témoins K1, K2 et K3 (matrice carbonatée).

Eléments	Min.-Max.	Précision globale (%)
SiO ₂ (%)	48-78	3.15
Al ₂ O ₃	4-24	13.27
Fe ₂ O ₃	2-5	10.27
MgO	5-6	10.16
CaO	2-33	15.40
Na ₂ O	0.8-2.6	12.80
K ₂ O	1.6-5.2	12.75
TiO ₂	0.360-0.696	18.40
MnO	0.023-0.523	6.10
P ₂ O ₅	0.041-0.146	14.57
Li (ppm)	185-323	9.93
B	17-144	11.96
V	28-91	9.60
Cr	128-1334	6.66
Co	3-1060	13.75
Ni	435-644	10.72
Cu	21-2574	11.77
Zn	62-522	18.21
As	462-6407	6.00
Sr	49-353	12.30
Zr	50-128	18.05
Sn	38-209	10.00
Mo	406-547	10.74
Ag	3.5-4.8	9.36
Ba	168-588	12.00
Pb	12-62	16.60
Bi	5-20	19.35

Tableau 7: Etendue de variation et précision moyenne globale, calculée sur l'ensemble des témoins.

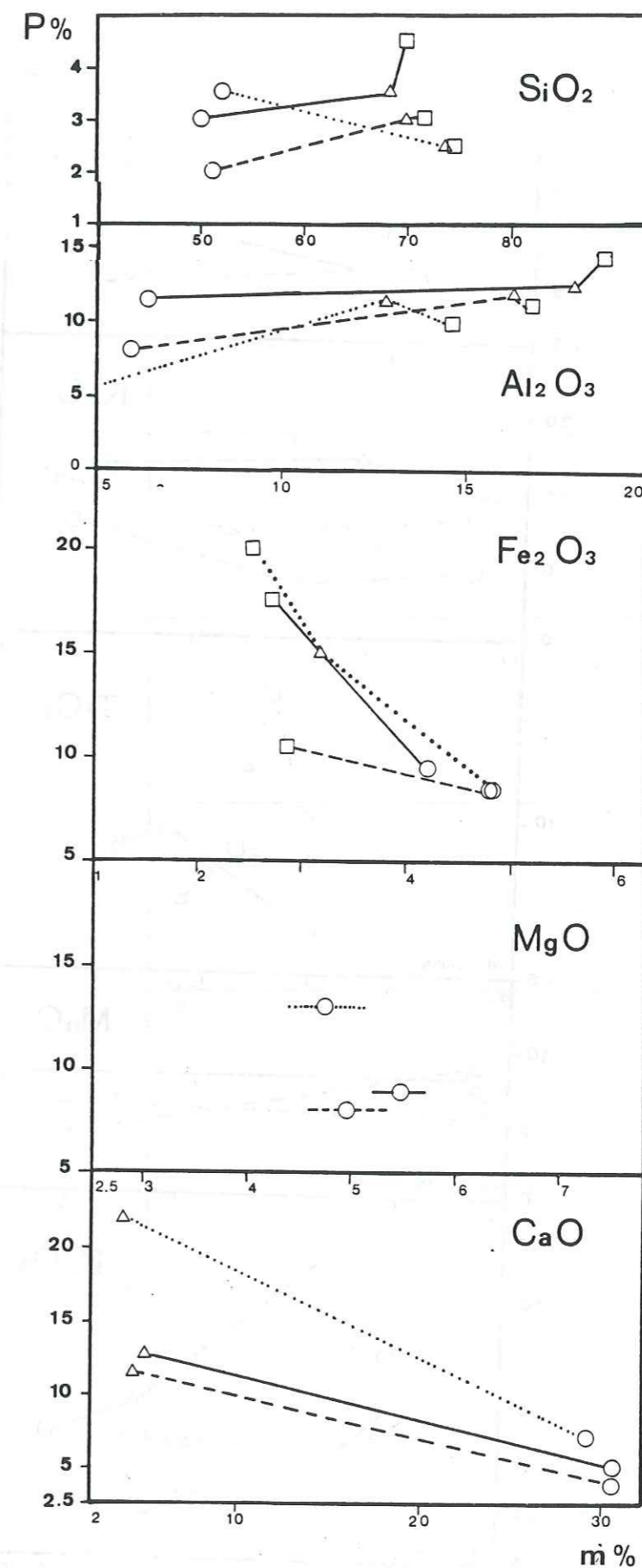


Figure 52: Diagrammes binaires de la Précision en fonction de la teneur moyenne par lot de témoins; Δ :témoins I; \square :témoins J; \circ : témoins K; — :1^o tranche de temps; - - - :2^o tranche de temps; :3^o tranche de temps

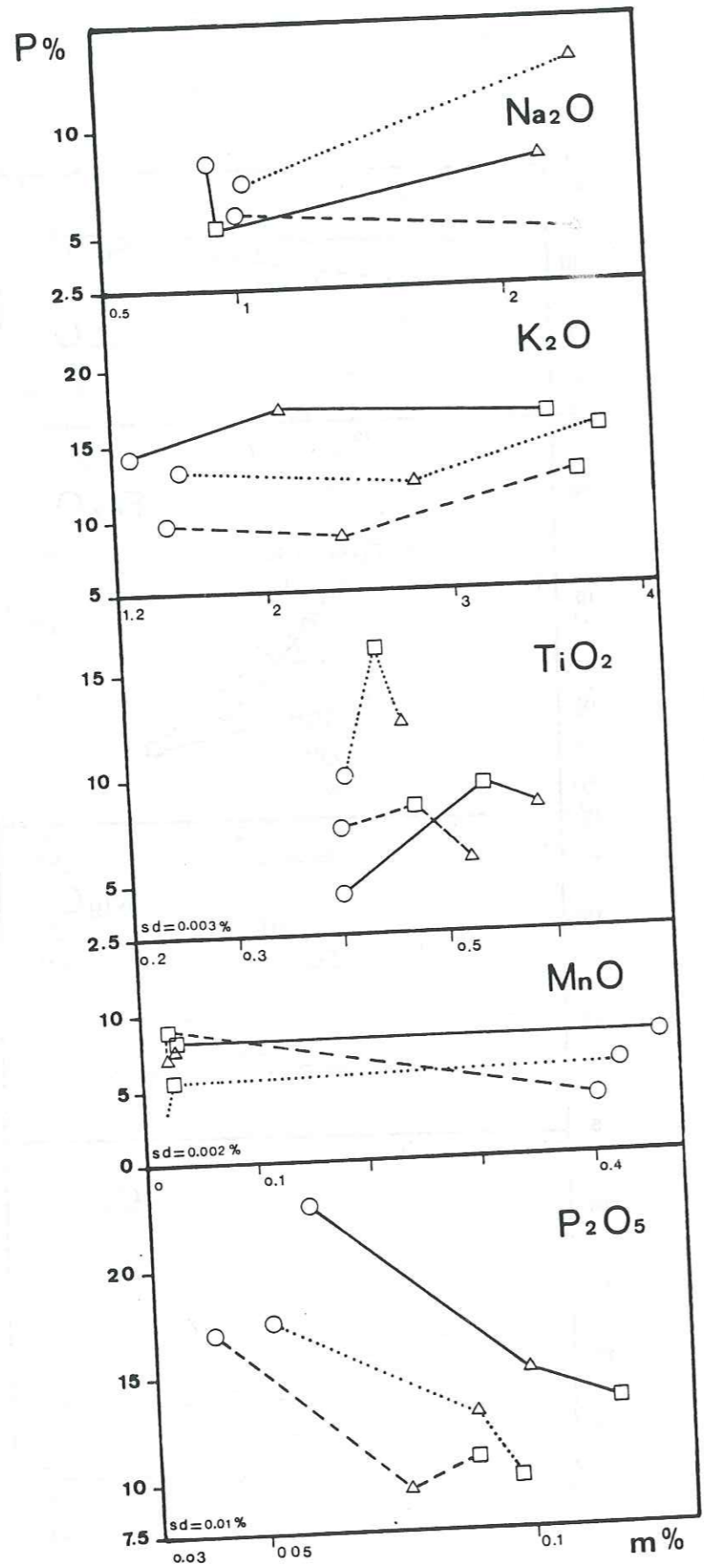


Figure 53: Diagrammes binaires de la Précision en fonction de la teneur moyenne par lot de témoins (suite);

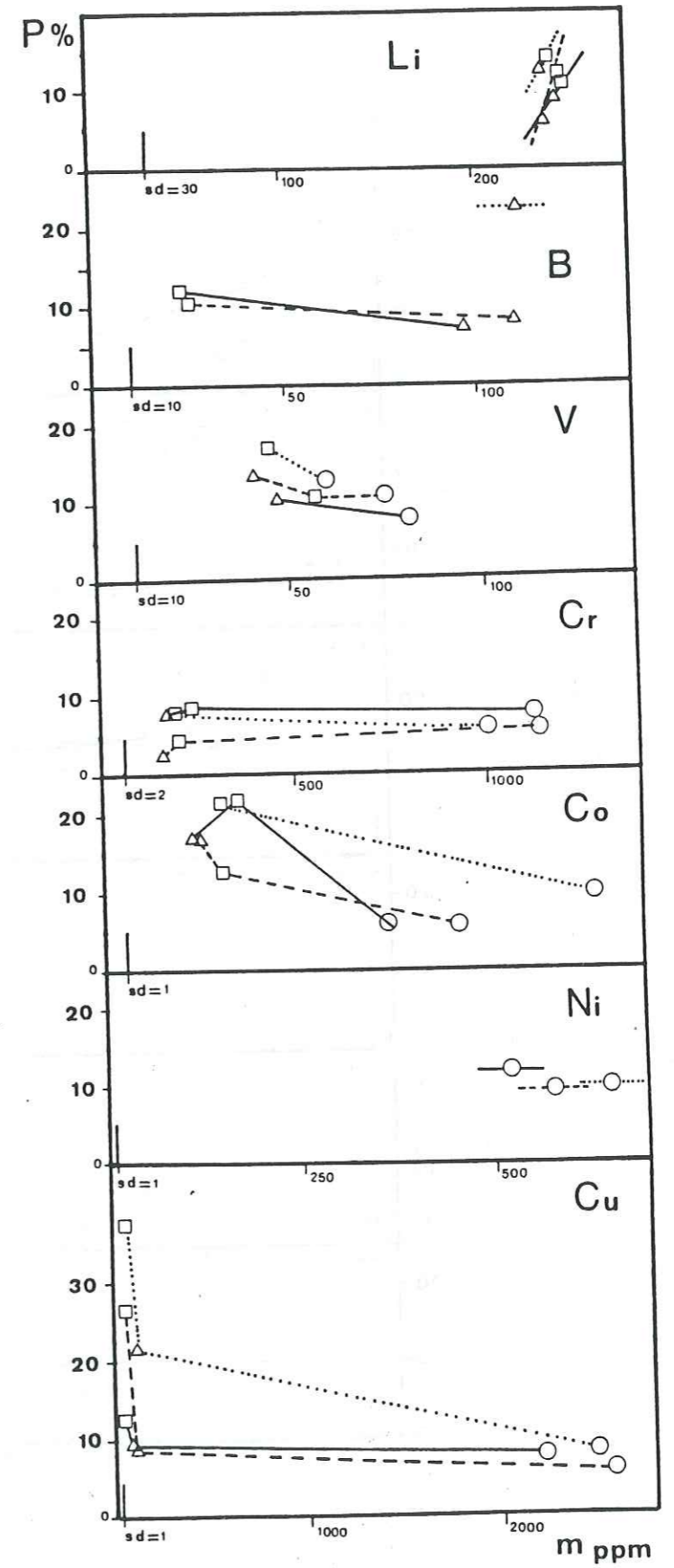


Figure 54: Diagrammes binaires de la Précision en fonction de la teneur moyenne par lot de témoins (suite);

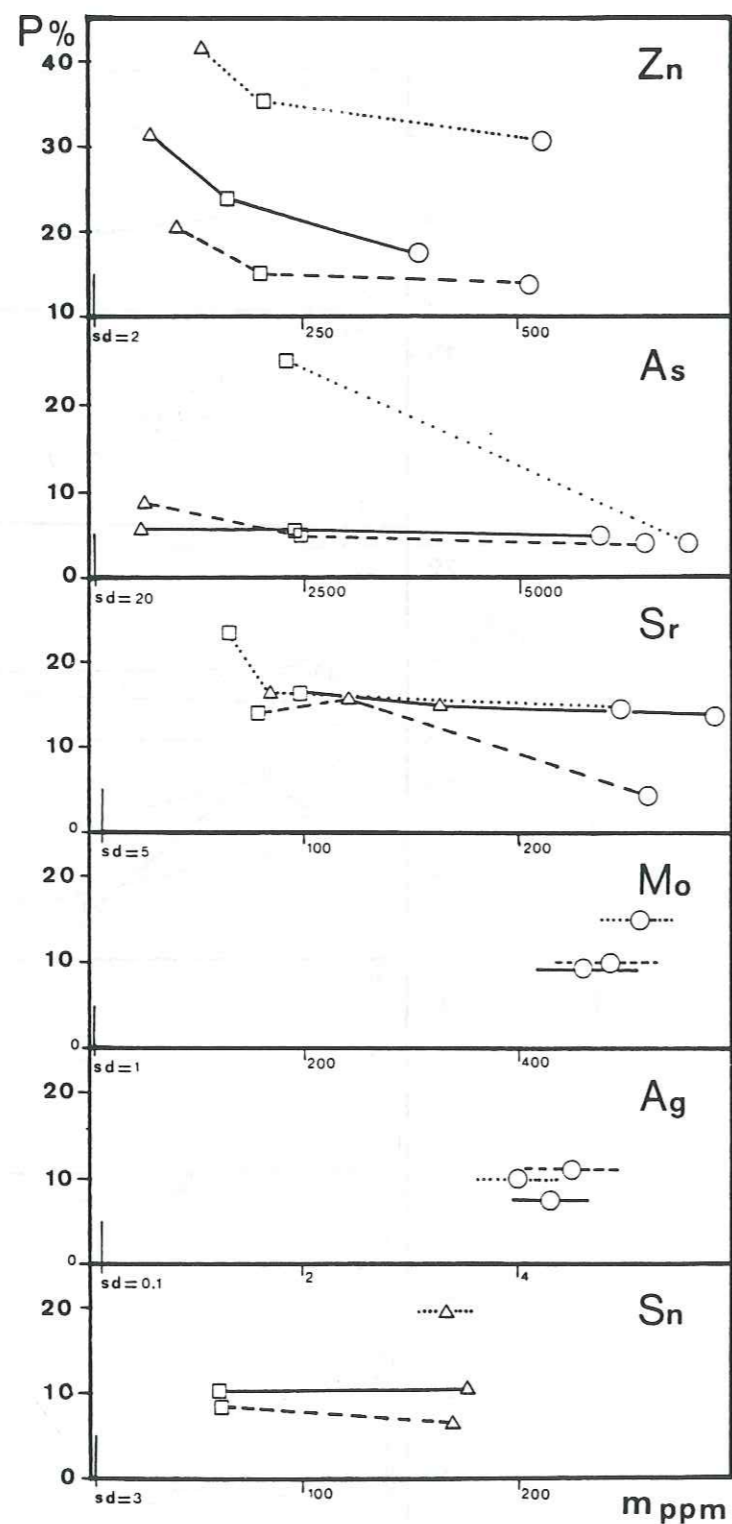


Figure 55: Diagrammes binaires de la Précision en fonction de la teneur moyenne par lot de témoins (suite);

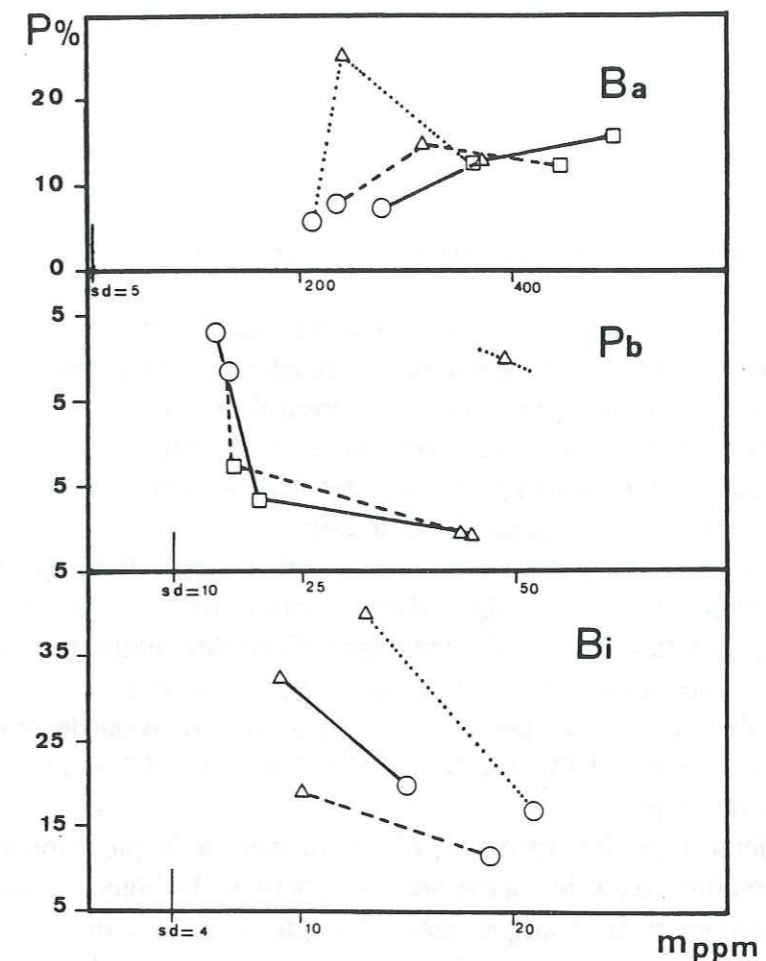


Figure 56: Diagrammes binaires de la Précision en fonction de la teneur moyenne par lot de témoins (suite).

VII.2.4. Evolution de la précision en fonction du niveau de teneur:

Sur les neuf lots d'analyses témoins (soit 180 analyses) on obtient une précision assez bonne pour l'ensemble des éléments (tableau 4, 5, 6 et 7), elle varie entre 3% pour SiO₂ et 19% pour Bi.

Pour les éléments Fe₂O₃, MgO, MnO, Li, V, Cr, As, Sn et Ag le coefficient de variation est compris entre 5 et 10%. Il est compris entre 11 et 15% pour les éléments Al₂O₃, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅, B, Co, Ni, Cu, Sr, Mo et Ba; entre 16 et 20% pour TiO₂, Zn, Zr, Pb et Bi.

Comme on peut le constater sur les diagrammes P vs m (figures 52 à 56), les courbes d'évolution de la précision en fonction du niveau de teneur se présentent sous deux formes principales; soit elles présentent une pente positive (évolution croissante), soit une pente négative (évolution décroissante). Il en ressort que cette relation est décroissante pour la plus part des éléments (73%), c'est à dire que la précision s'améliore quand le niveau de teneur augmente, c'est le cas notamment de Fe₂O₃, CaO, P₂O₅, B, V, Co, Cu, Zn, As, Sr, Pb et Bi. Par contre cette relation est croissante (c'est à dire que plus le niveau de teneur augmente plus la précision est mauvaise), dans le cas de SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O et Li.

La relation P=f(m) est relativement constante pour les éléments MnO, Cr et Sn. Cependant pour TiO₂ et Ba on obtient des courbes à pente variable avec une tendance plutôt croissante

pour Ba, alors que pour TiO₂ les trois courbes sont en forme de cloche. Il faut noter que pour les éléments MgO, Ni, Mo et Ag on n'a de résultats que pour un seul groupe de témoins ce qui fait que la répartition des lots dans le diagramme P vs m traduit plutôt pour ces éléments, l'évolution de la précision dans le temps que nous allons examiner pour l'ensemble des éléments.

VII.2.5. Evolution de la précision en fonction du temps:

Sur les diagrammes binaires P vs m, chaque courbe contient les points correspondant à des lots différents mais appartenant à la même tranche de temps. Ces courbes sont numérotées de 1 à 3 dans l'ordre chronologique. La disposition de ces courbes les unes par rapport aux autres traduit alors l'évolution de la précision dans le temps.

L'examen des courbes P=f(m) nous permet de distinguer trois types de comportements de la précision dans le temps (figures 52 à 56):

* Un premier type avec une amélioration continue dans le temps, ce comportement est présenté par les éléments SiO₂ et Al₂O₃, dans ce cas le passage successivement de la courbe 1 à la courbe 2 puis à la courbe 3 s'accompagne d'une diminution du coefficient de variation P et donc d'une amélioration de la précision proprement dite.

* Un deuxième type, avec une tendance vers une précision de moins en moins bonne, présentée par les éléments TiO₂, Li, B, V, Mo, Ba et Pb. C'est un comportement opposé de celui du premier type.

* Un troisième type, intermédiaire, où l'évolution de la précision en fonction du temps ne se fait pas toujours dans le même sens, on peut y distinguer deux cas particuliers qui présentent un comportement identique quand il s'agit du passage de la première à la deuxième tranche de temps (courbe 2 toujours à un niveau inférieur à celui de la courbe 1), ce qui correspond à une amélioration de la précision, ensuite celle-ci évolue vers des valeurs moins bonnes quand il s'agit de passer à la troisième tranche de temps (courbe 3).

Cependant la différence entre ces deux cas particuliers est que pour K₂O, MnO, P₂O₅, Cr, Ni, Sr et Ag les valeurs atteintes par P à la troisième tranche de temps resteront toujours inférieures à celle de la première tranche de temps, ce qui se traduit sur le diagramme P vs m par une courbe 3 située à un niveau intermédiaire entre les courbes 1 et 2, et correspond à une précision relativement meilleure.

Dans l'autre cas, celui de Fe₂O₃, MgO, CaO, Na₂O, Co, Cu, Zn, As, Sn et Bi, la précision atteinte à la troisième tranche de temps est moins bonne que celle de la première tranche de temps (courbe 3 au dessus des courbes 1 et 2).

On peut considérer que dans le premier cas, il y a globalement amélioration de la précision par rapport à son niveau initial (courbe 1), alors que dans le deuxième cas il y a tendance à des niveaux de précision moins bons.

VII.2.6. Etude des corrélations sur les données témoins:

VII.2.6.1. Matrices de corrélation:

a) Résultats:

Les matrices de corrélation (Tableaux 8 et 9) ont été calculés sur les groupes de témoins I et K, d'effectifs égaux à 60. Pour des populations de cet effectif, les tables de validité du coefficient de corrélation donnent un seuil de signification de l'ordre de 0.26 (SAPORTA 1978).

Les calculs des corrélations ont été effectués sur l'ensemble des éléments dosés, majeurs et en traces, sauf ceux dont le niveau de teneur ne dépasse pas le seuil de détection. Ces corrélations sont variables d'un groupe de témoins à un autre. Sur la figure 57 sont représentées les associations d'éléments déduites de la matrice de corrélation. Ces associations sont obtenues en retenant pour chaque élément le coefficient de corrélation le plus élevé en valeur absolue. Sur la partie gauche de la figure sont regroupés les éléments à corrélations négatives et sur la partie droite ceux représentant des corrélations positives.

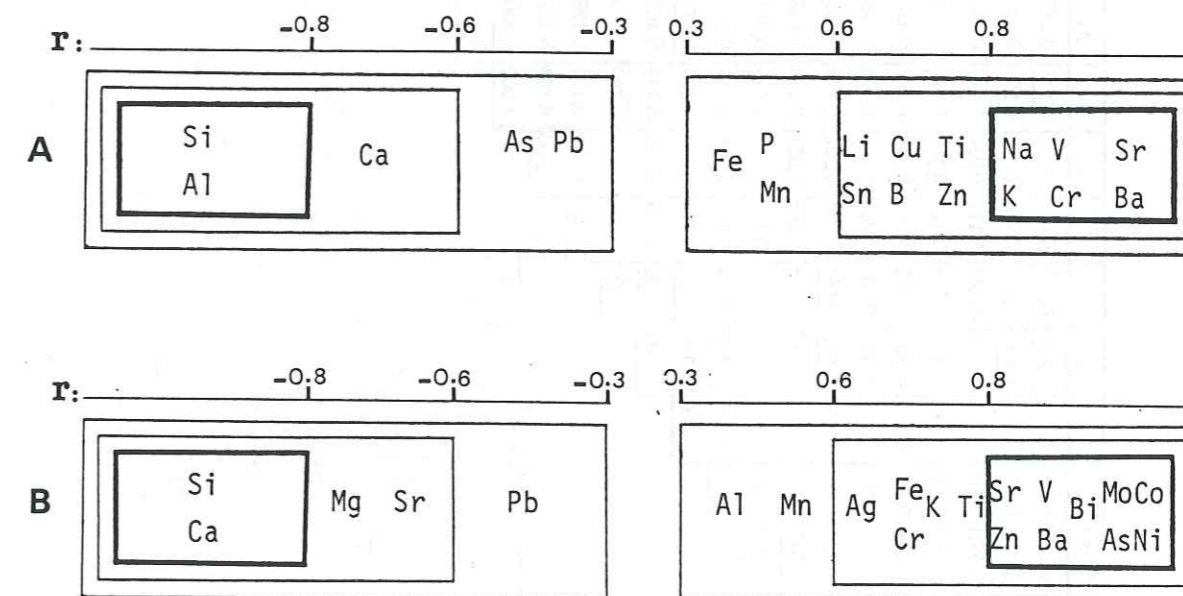


Figure 57: Associations géochimiques déduites de la matrice de corrélation, A: pour le groupe de témoins I, B: pour le groupe de témoins K, r: coefficient de corrélation.

b) Interprétation:

L'étude de la matrice de corrélation fait ressortir pour chacun des groupes de témoins étudiés, deux pôles d'éléments. Sur la figure 57 nous pouvons distinguer:

*- Un pôle dominé par les éléments majeurs les plus importants; SiO₂ et Al₂O₃ dans le cas du groupe I (de nature granitique) et SiO₂ et CaO dans le cas du groupe K (de nature quartzo-carbonatée). Les éléments de ce pôle présentent une forte corrélation négative, ces associations paraissent traduire des fluctuations inversement proportionnelles des teneurs en minéraux cardinaux: quartz et feldspaths pour le groupe I et quartz et carbonate pour le groupe K.

tel-00708240, version 1 - 14 Jun 2012

SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	Na2O	K2O	TiO2	MnO	P2O5	Li	B	V	Cr	Co	Cu	Zn	As	Sr	Zr	Sn	Ba	Pb	T	
1,000	-0,935	-0,088	-0,659	0,167	0,574	-0,804	-0,502	-0,129	-0,215	0,261	-0,659	-0,487	0,070	0,317	0,511	0,247	-0,767	-0,555	-0,076	-0,648	0,238	0,677	SiO2
	1,000	-0,092	0,559	-0,349	-0,538	0,681	0,347	0,027	0,173	-0,178	0,671	0,452	-0,126	-0,282	-0,551	-0,290	0,796	0,514	0,089	0,683	-0,168	-0,683	Al2O3
		1,000	-0,052	0,510	-0,005	0,062	0,204	0,052	-0,113	-0,084	-0,115	-0,148	-0,111	-0,034	0,019	-0,150	-0,100	0,062	-0,029	-0,150	-0,115	-0,027	Fe2O3
			1,000	-0,069	-0,672	0,599	0,343	-0,078	-0,138	-0,427	0,406	0,324	0,126	-0,563	-0,417	-0,223	0,516	0,256	-0,231	0,460	-0,414	-0,431	CaO
				1,000	0,193	-0,169	0,012	0,206	-0,168	0,053	-0,252	-0,152	-0,182	0,049	0,320	-0,030	-0,233	-0,149	-0,018	-0,349	0,007	0,074	Na2O
					1,000	-0,638	-0,383	0,188	0,209	0,277	-0,368	-0,201	0,085	0,301	0,405	0,293	-0,475	-0,285	0,071	-0,427	0,128	0,478	K2O
						1,000	0,543	0,220	0,301	-0,279	0,653	0,564	-0,108	-0,228	-0,472	-0,205	0,699	0,512	0,225	0,553	-0,122	-0,696	TiO2
							1,000	0,507	0,223	-0,118	0,235	0,338	-0,068	-0,081	-0,103	0,148	0,338	0,143	0,231	0,198	0,034	-0,381	MnO
								1,000	0,361	-0,160	0,170	0,497	-0,141	-0,058	0,036	0,034	0,307	0,076	0,362	0,052	-0,005	-0,354	P2O5
									1,000	0,122	0,528	0,464	0,035	0,418	0,111	0,244	0,201	0,337	0,456	0,176	0,245	-0,206	Li
										1,000	-0,360	-0,523	-0,105	0,750	0,329	0,577	-0,288	-0,225	0,636	-0,454	0,638	0,265	B
											1,000	0,802	-0,098	-0,206	-0,443	-0,405	0,776	0,582	0,096	0,669	-0,187	-0,726	V
												1,000	-0,057	-0,289	-0,299	-0,379	0,720	0,315	0,071	0,552	-0,321	-0,666	Cr
													1,000	-0,225	0,130	0,396	-0,263	0,083	-0,370	-0,194	-0,110	0,460	Co
														1,000	0,459	0,457	-0,323	-0,228	0,661	-0,367	0,711	0,286	Cu
															1,000	0,549	-0,620	-0,420	0,056	-0,424	0,349	0,559	Zn
																1,000	-0,456	-0,222	0,314	-0,445	0,452	0,499	As
																	1,000	0,504	0,230	0,699	-0,180	-0,855	Sr
																		1,000	0,002	0,439	-0,043	-0,463	Zr
																			1,000	-0,154	0,613	-0,296	Sn
																				1,000	-0,334	-0,589	Ba
																					1,000	0,173	Pb
																						1,000	T

Tableau 8: Matrice de corrélation pour le groupe de témoins I.

SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	MnO	P2O5	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Ag	Ba	Pb	Bi	T	
1,000	-0,260	0,425	-0,626	-0,863	-0,069	0,150	-0,431	0,159	0,245	-0,578	0,569	0,295	0,125	-0,088	0,472	0,476	-0,128	0,037	0,013	-0,492	0,286	0,070	0,363	SiO2
	1,000	-0,368	0,260	-0,007	0,014	-0,404	0,349	-0,399	0,147	0,516	-0,308	-0,414	-0,427	-0,339	-0,241	-0,404	0,387	-0,431	0,000	0,542	0,007	-0,167	-0,465	Al2O3
		1,000	-0,458	-0,482	-0,132	0,552	-0,453	0,326	-0,045	-0,293	0,653	0,383	0,394	0,322	0,373	0,565	-0,124	0,345	0,373	-0,476	0,146	0,383	0,409	Fe2O3
			1,000	0,380	-0,028	-0,354	0,595	-0,277	0,001	0,503	-0,341	-0,149	-0,241	-0,364	-0,748	-0,496	0,357	-0,250	-0,338	0,498	-0,513	-0,295	-0,417	MgO
				1,000	0,128	-0,205	0,286	-0,101	-0,297	0,344	-0,691	-0,348	-0,170	0,206	-0,286	-0,466	-0,074	-0,015	-0,062	0,341	-0,135	-0,148	-0,255	CaO
					1,000	0,017	-0,111	0,068	-0,084	-0,092	-0,202	0,015	0,020	0,195	0,111	0,044	-0,067	-0,095	-0,019	-0,068	0,057	0,074	0,082	Na2O
						1,000	-0,527	0,561	0,114	-0,200	0,572	0,378	0,640	0,528	0,491	0,596	-0,213	0,679	0,480	-0,470	0,172	0,563	0,393	K2O
							1,000	-0,224	0,055	0,441	-0,235	-0,017	-0,064	-0,623	-0,675	-0,442	0,319	-0,185	-0,314	0,654	-0,545	-0,218	-0,366	TiO2
								1,000	0,220	-0,333	0,471	0,356	0,579	0,293	0,461	0,566	-0,250	0,508	0,463	-0,285	0,272	0,539	0,400	MnO
									1,000	0,200	0,227	-0,191	-0,127	-0,344	0,094	-0,179	0,406	0,140	0,146	0,256	0,204	-0,192	-0,336	P2O5
										1,000	-0,179	-0,590	-0,368	-0,234	-0,370	-0,692	0,489	0,026	0,131	0,809	-0,163	-0,357	-0,786	V
											1,000	0,467	0,532	-0,003	0,291	0,553	0,028	0,506	0,255	-0,278	0,023	0,418	0,294	Cr
												1,000	0,800	0,020	0,029	0,773	-0,157	0,255	-0,004	-0,560	-0,273	0,662	0,746	Co
													1,000	0,248	0,328	0,780	-0,395	0,705	0,283	-0,497	-0,228	0,737	0,640	Ni
														1,000	0,559	0,406	-0,556	0,324	0,464	-0,461	0,453	0,369	0,386	Cu
															1,000	0,515	-0,515	0,473	0,550	-0,539	0,598	0,320	0,354	Zn
																1,000	-0,493	0,396	0,328	-0,754	0,134	0,780	0,844	As
																	1,000	-0,415	-0,189	0,555	-0,130	-0,246	-0,535	Sr
																		1,000	0,419	-0,279	-0,061	0,328	0,215	Mo
																			1,000	-0,047	0,506	0,456	0,160	Ag
																				1,000	-0,124	-0,437	-0,771	Ba
																					1,000	0,122	0,139	Pb
																						1,000	0,689	Bi
																							1,000	T

Tableau 9: Matrice de corrélation pour le groupe de témoins K.

*- Un pôle où sont regroupés la plupart des éléments en traces avec des corrélations positives. Pour le groupe I nous avons essentiellement les éléments: Sr, Ba, V, Cr, Na et K, cette association serait liée à des fluctuations d'une phase minérale probablement phyllitique. Pour le groupe K, le pôle des corrélations positives est dominé par les éléments Co, Ni, Mo, As, Bi, V, Ba, Sr et Zn, cette association serait le résultat de fluctuations de la teneur en minéraux métalliques dans l'échantillon référence K, ceci pour les éléments Co, Ni, Mo, As et Bi. Quant aux éléments V, Ba, Sr et Zn il n'est pas à exclure qu'ils soient liés à des fluctuations de teneur en phyllites.

VII.2.6.2. Analyse factorielle sur les données témoins:

Dans le but de préciser les résultats de l'étude de la matrice de corrélation, nous avons utilisé l'analyse factorielle en composantes principales dont des notions ont été exposés au chapitre VI.

a) Résultats:

Les associations d'éléments obtenues par cette analyse sont illustrées par des cercles de corrélation. Les points représentatifs des analyses témoins dans l'espace constitué par les deux plus importants facteurs obtenus (figures 58 et 59). Le tableau 10 représente le taux de variance expliquée par les facteurs 1 et les associations d'éléments que ceux-ci regroupent.

Groupes de témoins	Variance expliquée	Associations d'éléments
I	46.57 %	Sr Al Ti Ca V Ba Cr P Mn Si Zn Cu B K Na As Pb
K	45.34 %	Ba Mg V Ti Sr Ca As Zn Co Fe Cr Ni K Bi Mo Cu Ag Pb Si Mn

Tableau 10: Associations géochimiques et taux de variance expliquée par le premier facteur de l'analyse en composantes principales pour les groupes I et K.

b) Interprétations:

Les facteurs 1 obtenus opposent les éléments majeurs les plus importants pour chaque groupe de témoin comme le montrent les cercles de corrélations. Ceci confirme l'hypothèse retenue à partir de l'étude de la matrice de corrélation. Cependant la projection des points représentatifs des analyses témoins dans le plan F1-F2 révèle un phénomène très important (figures 58 et 59): le facteur 1 discrimine bien les trois lots de témoins qui constituent chacun des groupe de témoin étudiés.

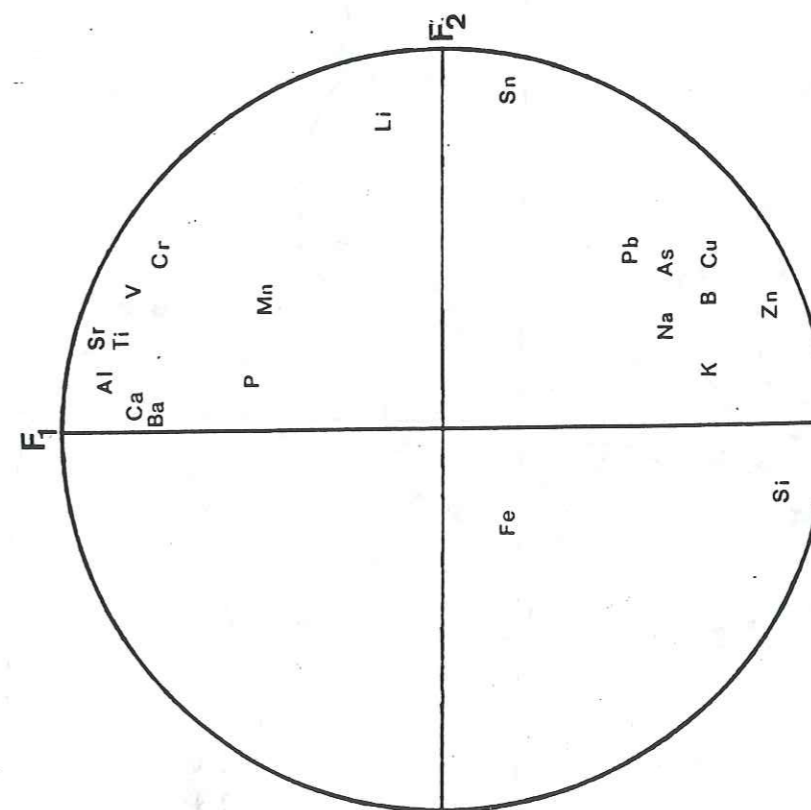
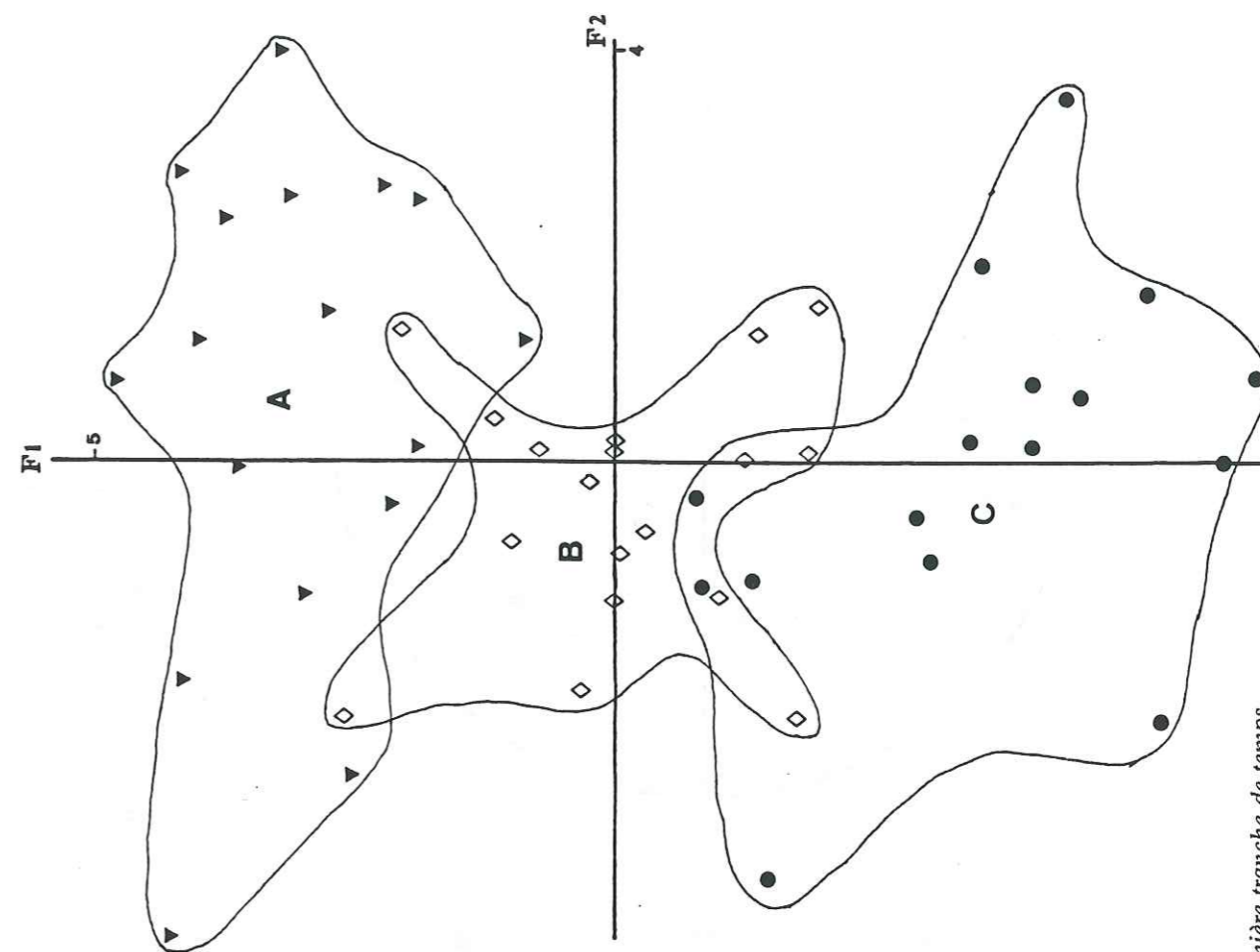


Figure 58: Analyse en composantes principales sur le groupe de témoins I, A : première tranche de temps, B : deuxième tranche de temps, C : troisième tranche de temps, \blacktriangledown = lot I, \diamond = lot II, \bullet = lot III.

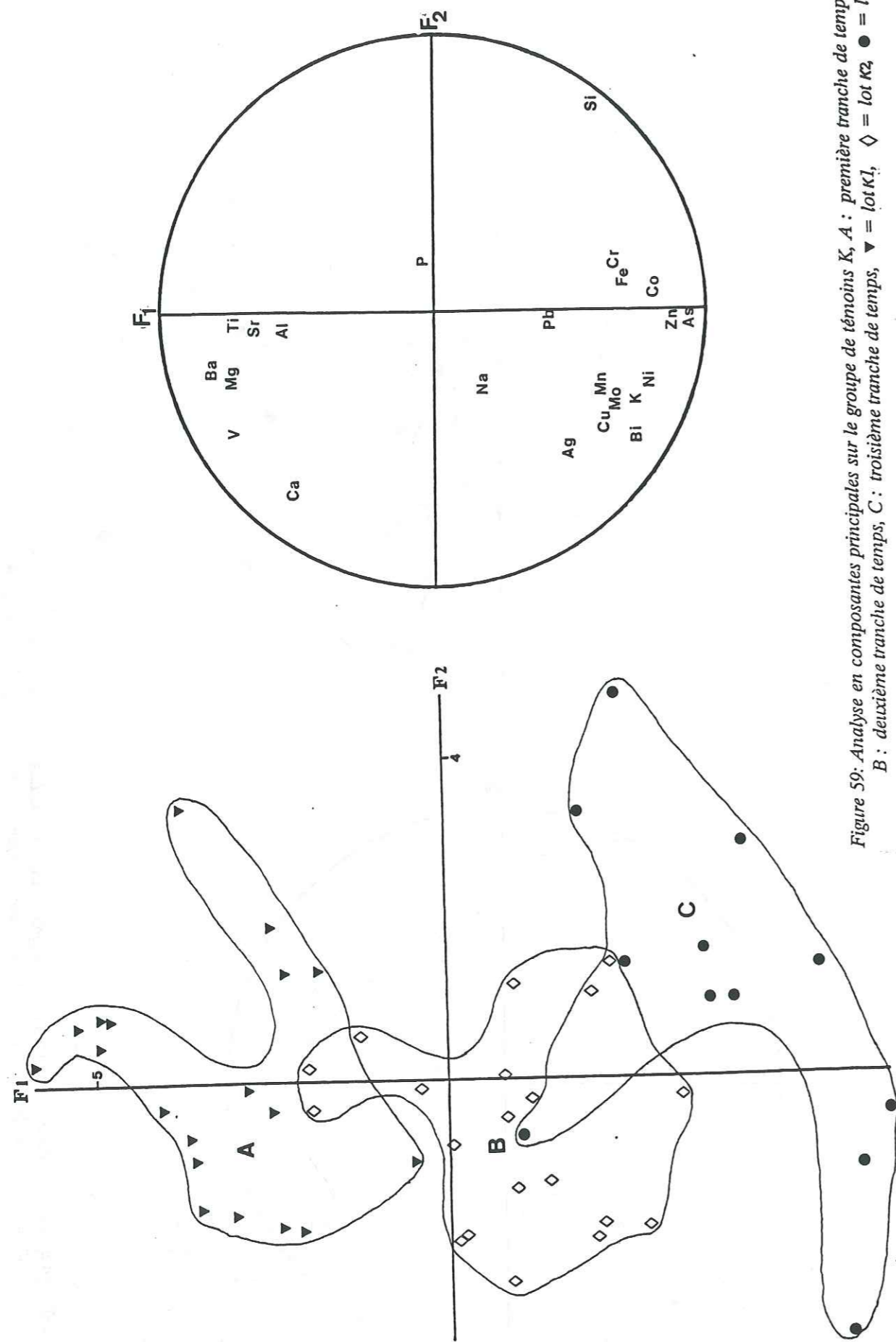


Figure 59: Analyse en composantes principales sur le groupe de témoins K, A : première tranche de temps, B : deuxième tranche de temps, C : troisième tranche de temps, \blacktriangledown = lot K1, \diamond = lot K2, \bullet = lot K3.

Ces trois lots de témoins étant composés d'analyses effectuées pendant trois tranches de temps successives, il faut noter que ces résultats ont été obtenus sans introduire la variable temps dans les calculs réalisés, ce qui nous amène à déduire que le facteur 1 qui explique 45 à 46 % de la variance, traduit surtout le phénomène de dérive dans le temps des teneurs mesurées des analyses témoins, déjà signalé par l'étude de l'évolution du coefficient de précision en fonction du temps.

VII.2.6.3. conclusion:

L'étude de la matrice de corrélation nous incite au premier abord à mettre les variations de teneur observées dans chaque groupe de témoins, sur le compte des imperfections d'homogénéisation de l'échantillon référence en amont.

L'analyse factorielle en composantes principales a permis de préciser les associations d'éléments et surtout d'attribuer une grande part de la variance observée au comportement de dérive dans le temps des teneurs mesurées.

Ces résultats nous conduisent donc à étudier l'évolution dans le temps des teneurs mesurées afin d'effectuer une estimation de ces variations pour chaque élément et dans le but de mettre au point une méthode de correction qui permettra d'éliminer la part de variance non négligeable mise en évidence ci-dessus.

VII.2.7. Evolution du niveau de teneur en fonction du temps:

VII.2.7.1. Analyse de la relation $C=f(t)$:

Le comportement du niveau de teneur pour chaque élément et dans chaque groupe de témoins est illustré par des diagrammes binaires C vs t (figures 60, 61 et 62 pour le lot de témoins I; figures 63, 64 et 65 pour le lot de témoins K). Sur ces diagrammes on trouvera les droites de régression qui donnent la tendance moyenne de la relation $C=f(t)$ ainsi que leurs équations.

Les tendances générales de cette relation sont présentés dans le tableau 14, trois types de comportement du niveau de teneur dans le temps sont à distinguer:

a) Augmentation du niveau de teneur en fonction du temps; on rencontre dans ce cas les éléments: SiO_2 , K_2O , B, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo et Bi.

b) Diminution du niveau de teneur en fonction du temps; c'est le cas des éléments. Al_2O_3 , CaO, TiO_2 , MnO, P_2O_5 , Li, V, Sr, Sn et Ba.

c) Stabilité du niveau de teneur dans le temps; ce cas est présenté par les éléments: Fe_2O_3 , MgO, Na_2O , Ag et Pb.

Il faut noter cependant les trois remarques suivantes:

* Au sein de chaque cas d'évolution du niveau de teneur en fonction du temps, énumérés ci-dessus, le degré d'augmentation ou de diminution du niveau de teneur est variable d'un élément à un autre et peut être apprécié par la pente de la droite de régression calculée pour chaque élément.

* Les éléments Ag et Pb présentent une faible augmentation du niveau de teneur dans le temps, ce qui nous permet de considérer que leur niveau de teneur présente un comportement relativement stable dans le temps.

* Dans le cas de l'élément Cr, la relation $C=f(t)$ est décroissante pour le groupe de témoins I, où le niveau de teneur est inférieur à 200 ppm, avec un coefficient de corrélation assez important ($r=0.80$); par contre dans le cas du groupe K de témoins, où le niveau de teneur est supérieur à 1000 ppm, la relation est plutôt croissante et le coefficient de corrélation

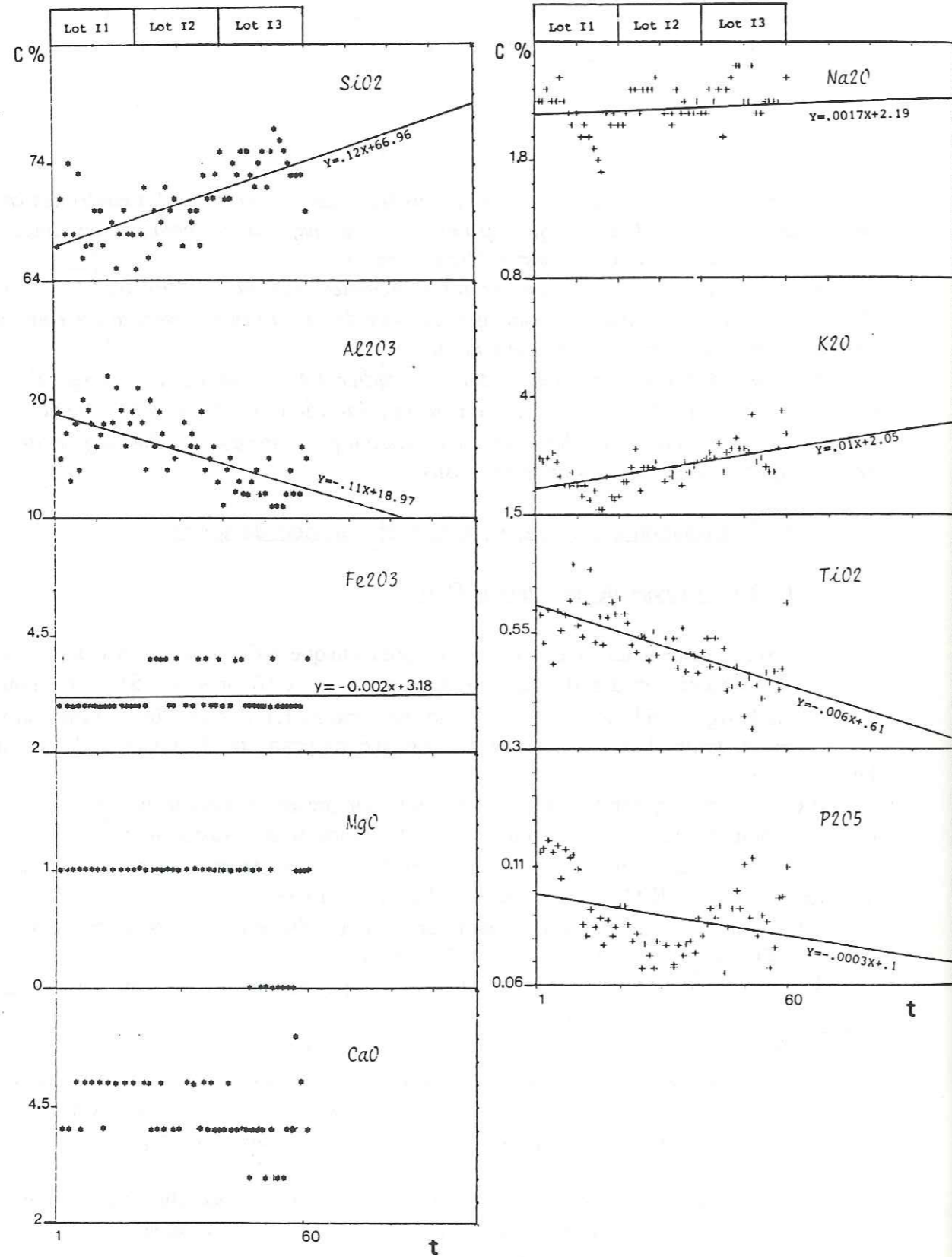


Figure 60: Evolution du niveau de teneur en fonction du temps pour le groupe de témoins I;

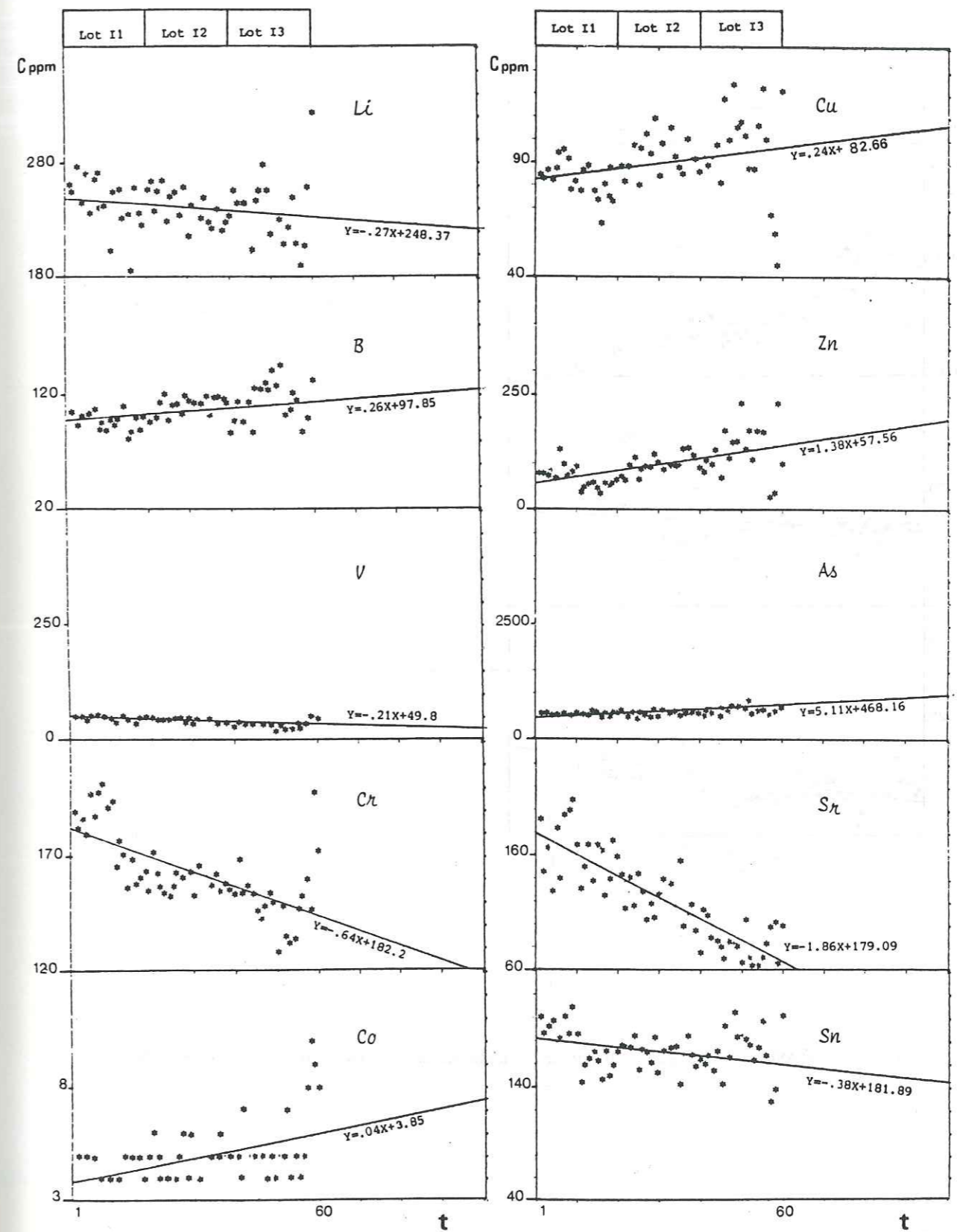


Figure 61: Evolution du niveau de teneur en fonction du temps pour le groupe de témoins I (suite);

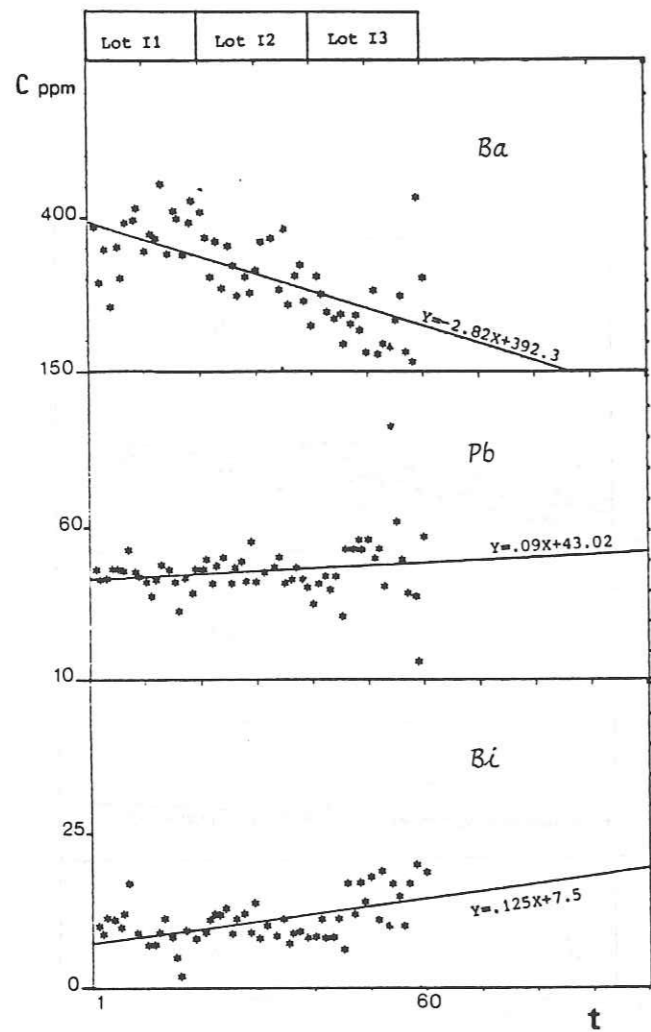


Figure 62: Evolution du niveau de teneur en fonction du temps pour le groupe de témoins I (suite).

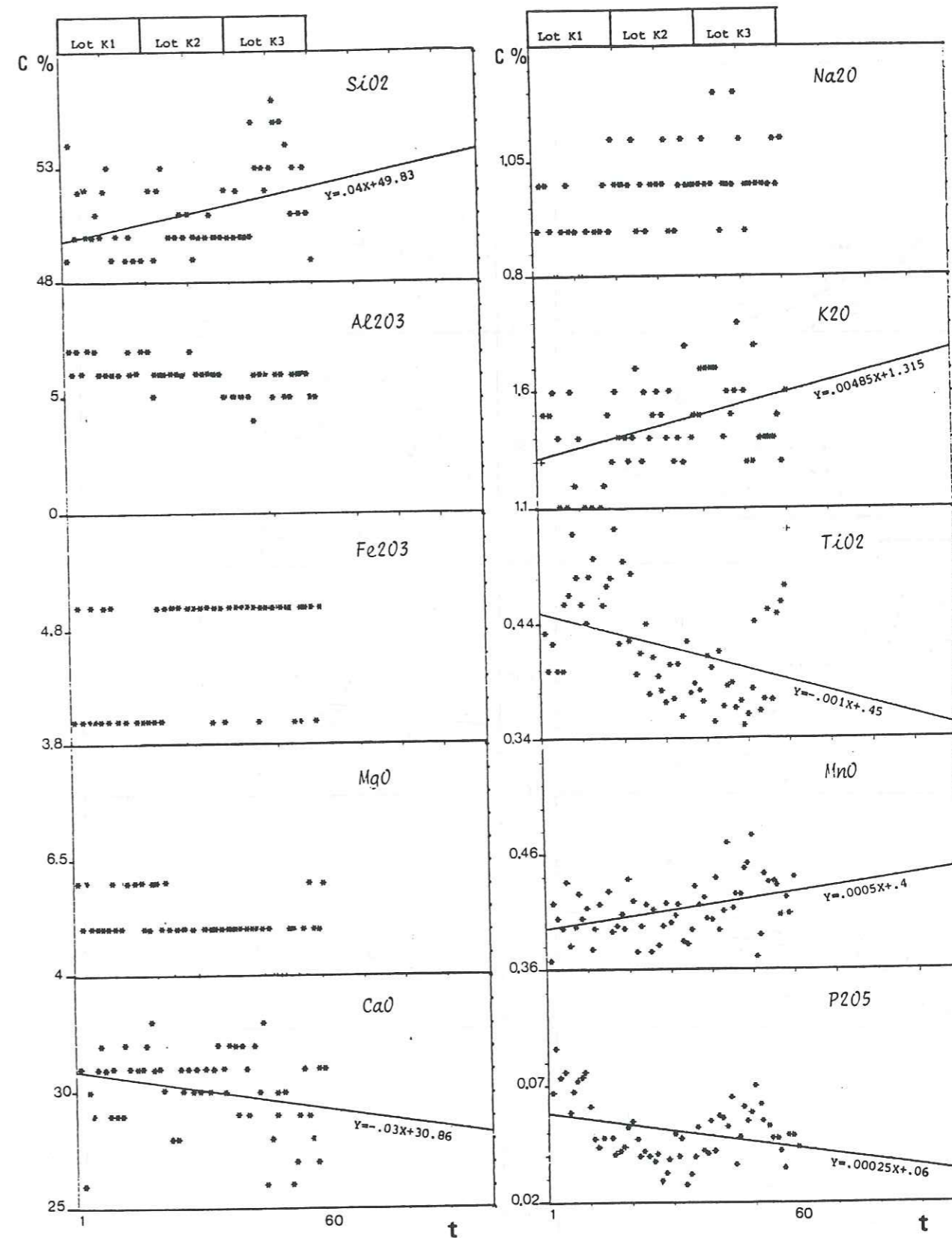


Figure 63: Evolution du niveau de teneur en fonction du temps pour le groupe de témoins K;

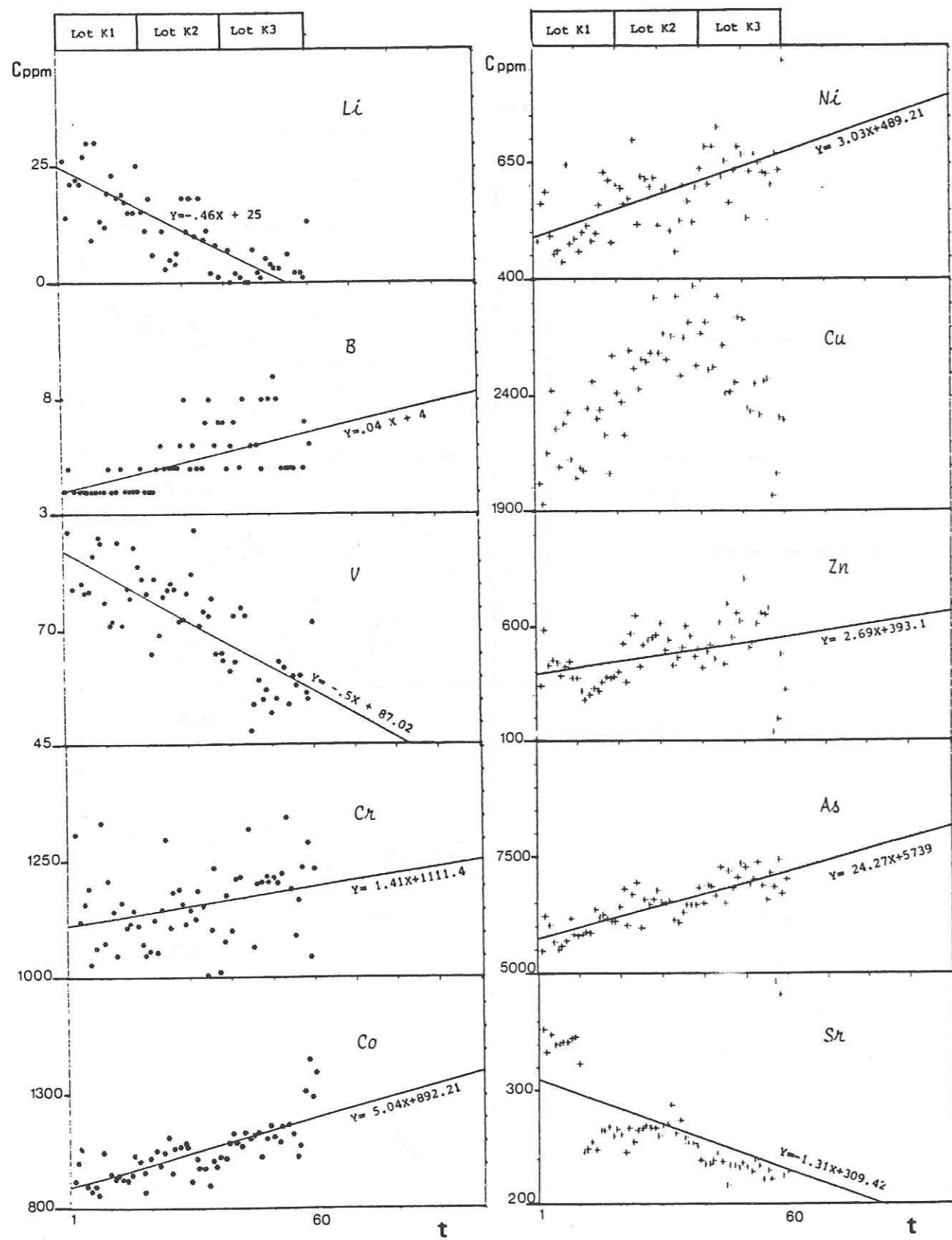


Figure 64: Evolution du niveau de teneur en fonction du temps pour le groupe de témoins K (suite);

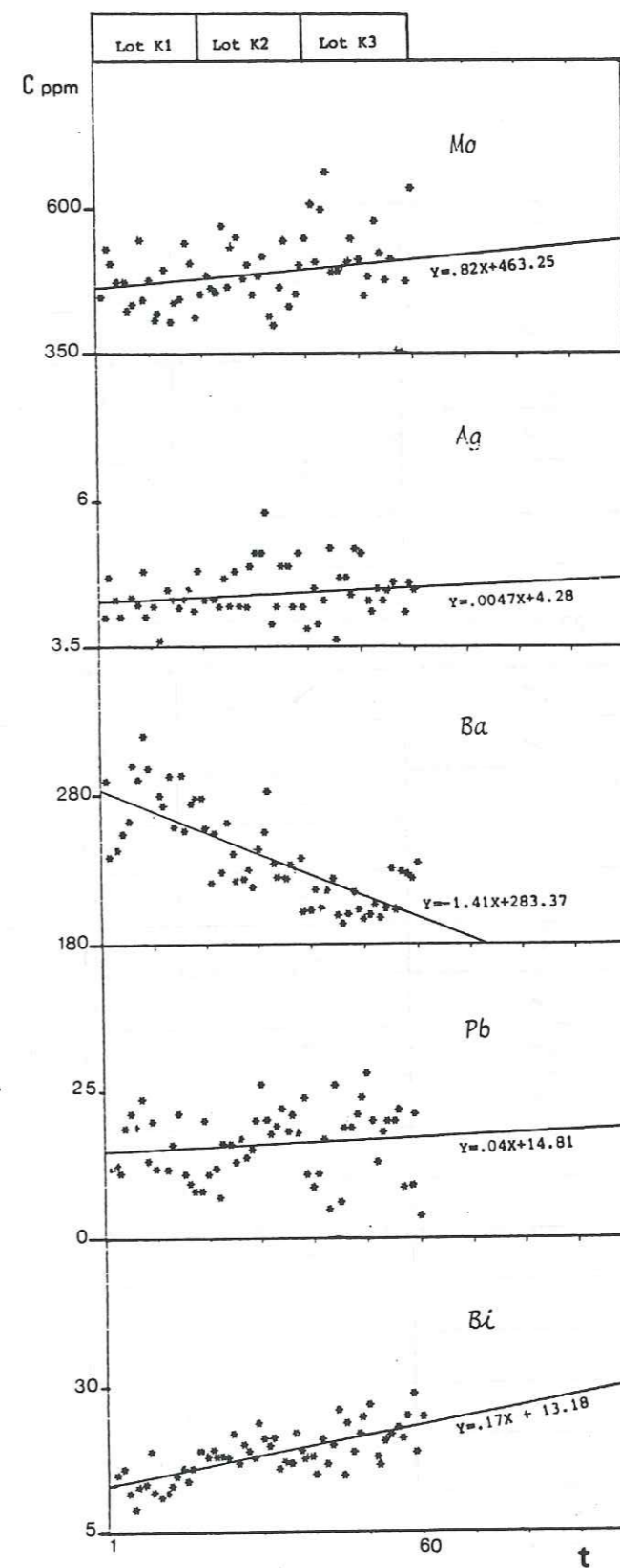


Figure 65: Evolution du niveau de teneur en fonction du temps pour le groupe de témoins K (suite).

Eléments	TENDANCE GENERALE			(+): sur estimé
	P vs C	P vs T	C vs T	(-): sous estimé
SiO2	↗	↘	↗	(-)
Al2O3	↗	↘	↘	(+)
Fe2O3	↘	↗	↗	(+)
MgO		↗	↘	(-)
CaO	↘	↗	↘	(-)
Na2O	↗	↗	↗	(+)
K2O	↗	↘	↗	(-)
TiO2	↗	↗	↘	(-)
MnO	↘	↘	↘	(+)
P2O5	↘			(+)
Li	↗	↗	↘	(-)
B	↘	↗	↗	(+)
V	↘	↗	↘	(-)
Cr	↘	↘	↘	(+)
Co	↘	↗	↗	(+)
Ni		↘	↗	(-)
Cu	↘	↗		(+)
Zn	↘	↗	↗	(+)
As	↘	↗	↗	(+)
Sr	↘	↘	↘	(+)
Mo		↗	↗	(+)
Ag		↘	↗	(-)
Sn	↘	↗	↘	(-)
Ba	↗	↗	↘	(-)
Pb	↘	↗	↗	(+)
Bi	↘	↗	↗	(+)

Tableau 11: Tendence générale des relations $P=f(m)$ et $C=f(t)$, pour chaque élément.

est plus faible, ce qui traduit la grande dispersion des points représentatifs des témoins dans le diagramme C_{Cr} vs t pour ce groupe K. Cette inversion serait liée au comportement de P, qui quoique relativement stable dans le temps, augmente avec le niveau de teneur, ce qui donne une précision moins bonne pour les niveaux de teneur élevés. Ce qui est le cas dans le groupe K d'analyses témoins.

Par ailleurs, si on combine les deux relations $P=f(t)$ et $C=f(t)$ nous pouvons répartir les éléments analysés en deux catégories (Tableau 11):

*) si les deux relations évoluent dans le même sens, la teneur mesurée serait sur-estimée.

*) dans le cas contraire, la teneur mesurée serait sous-estimée.

VII.2.7.2. Conclusion:

L'évolution du niveau de teneur C dans le temps paraît régie par des relations dont la linéarité et la continuité permettent de prévoir l'évolution de l'erreur analytique dans le temps et indiquent surtout l'absence de procédure de correction simultanément aux analyses. La détermination de cette relation pour chaque élément et pour chacune des deux matrices étudiées, nous permet d'envisager une méthode de correction des analyses qui sera appliquée aux données traitées ultérieurement. Cependant nous ne pouvons envisager de correction pour les éléments Fe_2O_3 et MgO dans le cas des deux matrices et pour CaO dans le cas de la matrice aluminosilicatée, car les teneurs témoins obtenues dans ces cas varient très faiblement contrairement aux autres éléments et qu'on ne peut contrôler si ces teneurs sont attribuables à autre chose qu'à des seuils de quantification.

VII.2.8. Méthode de correction des analyses géochimiques:

VII.2.8.1. Principe:

En considérant qu'au cours d'une séance d'analyse (1 séance correspond à environ 200 analyses), tous les éléments varient comme ils le font dans l'échantillon référence et que les courbes $C=f(t)$ des teneurs obtenues sur les échantillons références en plusieurs séances suivent une loi linéaire, il nous est possible d'envisager une correction des analyses de roches effectuées dans la même période.

VII.2.8.2. Méthode:

a) Régression linéaire sur les teneurs mesurées des analyses témoins:

Soit:

e: l'échantillon référence,

A: l'élément dosé,

t: le numéro d'ordre d'un témoin,

T: le nombre de témoins (=analyses issues d'un même échantillon référence),

C_{Act} : la teneur mesurée lors de la séance t

Sur le diagramme schématique C_A vs t (figure 66), la régression linéaire permet de tracer la loi de variation de la teneur en A de l'échantillon référence e dans le temps, cette loi a pour équation:

$$C_{Actc} = at + C_{Ae}$$

où: C_{Actc} est la valeur calculée (par régression linéaire) de la teneur mesurée C_{Act} .

C_{Ae} est l'ordonnée à l'origine de la droite de régression.
 a est le coefficient directeur de la droite de régression.
 La quantité C_{Ae} sera retenu comme étant la teneur en A de l'échantillon référence e.

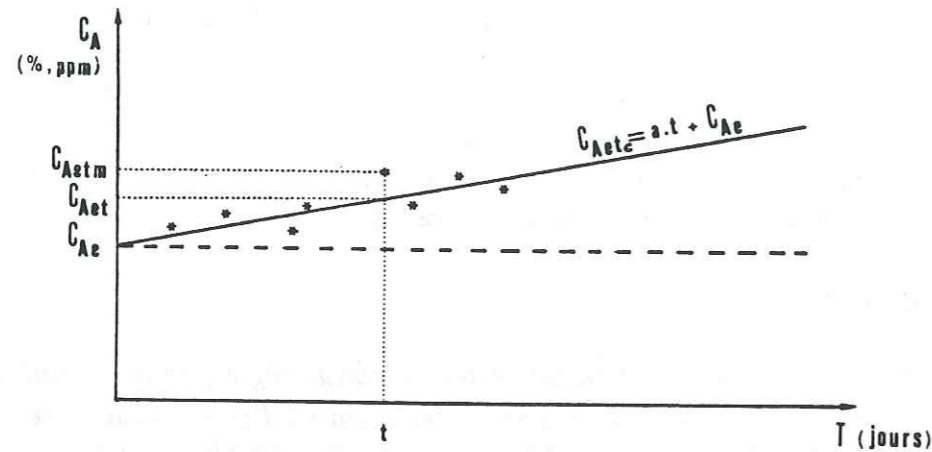


Figure 66: Régression linéaire sur les teneurs mesurées en un élément "A" des témoins issus d'un même échantillon référence.

b) Correction de la teneur en A d'un échantillon quelconque:

soit:

x: l'échantillon quelconque,

i: le numéro d'ordre d'analyse d'un échantillon quelconque,

N: le nombre total d'échantillons analysés (à l'exclusion des témoins),

C_{Axi} la teneur mesurée de l'échantillon i,

C_{Axic} la teneur correspondante corrigée.

Etant donné que l'évolution de l'erreur est linéaire et qu'entre deux témoins successifs sont analysés environs 200 échantillons quelconques, la régression linéaire sur les témoins nous permet de calculer la valeur du témoin théorique correspondant à chaque échantillon quelconque. Pour ce faire nous procédons à la détermination de l'abscisse (ordre de passage théorique à l'analyse) du témoin théorique correspondant à l'échantillon quelconque xi. Cette abscisse est calculée par la formule $(T*i)/N$, ensuite en utilisant la droite de régression calculée sur les témoins nous pouvons déduire la teneur calculée du témoin théorique:

$$C_{Aeic} = (a (T/N) * i) + C_{Ae}$$

En principe pour les mêmes conditions d'analyse, l'erreur enregistrée pour les échantillons quelconques serait proportionnelle à celle observée sur les témoins, d'où:

$$C_{Axic} / C_{Axi} = C_{Ae} / C_{Aeic}$$

Dans le cas d'un échantillon x on aurait donc:

$$C_{Axic} = C_{Axi} * C_{Ae} / C_{Aeic}$$

soit:

$$C_{Axic} = (C_{Axi} * C_{Ae}) / ((a * (T/N) * i) + C_{Ae})$$

Autrement dit:

$$C_{Axic} = C_{Axi} * (C_{Ae} / ((a * (T/N) * i) + C_{Ae}))$$

En simplifiant:

$$C_{Axic} = C_{Axi} / ((K_A * i) + 1)$$

où $K_A = (a * (T/N)) / C_{Ae}$ est une constante spécifique à chaque élément A.

Dans le tableau 12, on trouvera pour chacune des deux matrices étudiées et pour chaque élément: le coefficient directeur de la droite de régression calculée sur les teneurs mesurées des témoins, l'ordonnée à l'origine de cette droite et la constante K de correction.

	G.I.			G.K.		
	a	C_{Ae}	$K(10^{-6})$	a	C_{Ae}	$K(10^{-6})$
SiO ₂	0.12	66.96	840	04	49.83	376
Al ₂ O ₃	0.11	18.97	27.0	-	-	-
Fe ₂ O ₃	-0.002	3.18	-2.9	-	-	-
CaO	--	--	-	-0.3	30.86	-45.6
Na ₂ O	0.0017	2.19	3.60	-	-	-
K ₂ O	0.01	2.05	22.8	0.00485	1.315	17.2
TiO ₂	-0.006	0.61	-46.0	-0.001	0.45	-10.2
MnO	--	-	-	0.0005	0.4	5.7
P ₂ O ₅	-0.0003	0.10	-14.0	0.00025	0.06	18.3
Li	-0.27	248.37	-5.1	0.46	25	86.4
B	0.26	97.85	12.4	0.04	4	46.9
V	-0.21	49.80	-19.8	-0.5	87.02	-26.9
Cr	-0.64	182.20	-16.4	1.41	111.4	5.9
Co	0.04	3.85	48.7	5.04	829.29	28.5
Ni	--	-	-	3.03	489.21	29.0
Cu	0.24	82.66	13.6	-	-	-
Zn	1.38	57.56	112.5	2.69	39.31	32.1
Str	-1.86	179.09	-48.7	-1.31	309.42	-19.9
As	5.11	468.16	51.2	24.27	57.39	19.8
Sn	-0.38	181.89	-9.8	-	-	-
Ag	--	-	-	0.0047	4.28	5.1
Mo	--	-	-	0.82	463.25	8.3
Ba	-2.82	392.3	-33.7	-1.41	283.37	-23.3
Pb	0.09	43.02	9.8	0.04	14.81	12.6
Bi	0.125	7.5	78.2	0.17	13.18	60.5

Tableau 12: Facteur de correction pour chaque élément et pour chacune des deux matrices étudiées I et K.

VII.2.9. Conclusions:

L'étude de la précision à partir des analyses témoins, nous a permis d'examiner les relations entre le coefficient de variation P d'une part et le niveau de teneur et le temps d'autre part. L'étude des matrices de corrélation et l'analyse en composantes principales des données témoins, autorisent à mettre une grande part de la variation observée sur le compte de problèmes d'homogénéisation des échantillons références et d'une dérive dans le temps probablement liée à des défauts de fonctionnement.

Cependant, l'évolution du niveau de teneur C_A dans le temps paraît régie par des relations dont la linéarité et la continuité permettent de prévoir l'évolution de l'erreur analytique dans le temps et indiquent l'absence de procédure de correction simultanément aux analyses.

La détermination des lois qui régissent l'évolution de l'erreur analytique, permet d'envisager une correction des mesures obtenus par matrice et par élément, augmentant ainsi la fiabilité de la méthode analytique utilisée. Nous proposons ici une méthode de correction adaptée au spectromètre de Bou Azzer, pour lequel l'automatisation des corrections nécessiterait l'incorporation d'un logiciel approprié. L'amélioration à notre avis sera encore meilleure lorsque cette procédure de correction sera appliquée à l'échelle de la séance d'analyse.

Oùre l'intérêt purement technique des corrections proposées, celles-ci par les rectifications qu'elles impliquent sur le niveau de teneur, entraîneraient une amélioration de l'information géochimique en prospection.

Chapitre VIII:

Analyse statistique des données géochimiques de prospection
et sélection de la composante anormale

- VIII.1. Introduction 163
- VIII.2. Corrections des données géochimiques 163
- VIII.3. Analyse exploratoire des données géochimiques de prospection 163
 - VIII.3.1. Analyse des distributions élémentaires 168
 - VIII.3.2. Cartographie géochimique 172
 - VIII.3.2.1. Cartes géochimiques élémentaires..... 172
 - VIII.3.2.2. Cartes des linéaments géochimiques..... 173
 - VIII.3.2.3. Compilation des anomalies positives..... 173
 - VIII.3.3. Conclusion..... 178
- VIII.4. Traitement statistique conventionnel des données géochimiques
de prospection..... 179
 - VIII.4.1. Statistiques élémentaires..... 179
 - VIII.4.2. Cartographie géochimique des teneurs brutes..... 184
 - VIII.4.3. Etude de l'influence de la lithologie sur les variations des teneurs..... 184
 - VIII.4.4. Conclusion..... 188
- VIII.5. Modélisation de l'influence de la lithologie sur la variation des teneurs.... 189
 - VIII.5.1. Analyse discriminante..... 189
 - VIII.5.1.1. Résultats avant rotation..... 189
 - VIII.5.1.2. Résultats après rotation..... 190
 - VIII.5.2. Cartes des facteurs scores avant et après rotation..... 192
- VIII.6. Sélection du signal géochimique anomal 195
 - VIII.6.1. Régression factorielle linéaire..... 195
 - VIII.6.2. Comparaison des composantes de variation des teneurs..... 195
 - VIII.6.3. Cartes géochimiques des teneurs estimées et des teneurs résiduelles... 196
- VIII.7. Conclusion..... 198

Chapitre VIII: ANALYSE DES DONNEES GEOCHIMIQUES ET SELECTION DU SIGNAL ANOMAL.

VIII.1. INTRODUCTION:

Nous allons dans ce chapitre procéder à la correction des données géochimiques suivant la méthode retenue dans le chapitre VII, nous examinerons aussi l'importance des transformations entraînées par cette correction.

Les teneurs ainsi calculées, feront l'objet d'analyses statistiques, dont le but sera l'étude de la structure des données, l'interprétation des variations observées et la sélection de la composante anormale dans ces variations.

VIII.2. CORRECTION DES DONNEES GEOCHIMIQUES:

La méthode de correction mise au point dans le chapitre précédent, est appliquée aux teneurs mesurées, en tenant compte des deux types de matrices alumo-silicatée et silico-carbonatée. Cette opération aboutit à des teneurs calculées, qui elles seront utilisées pour la suite des traitements statistiques. Cependant, nous allons dans ce paragraphe, effectuer une étude des relations entre les teneurs mesurées et celles corrigées, dans le but de montrer l'importance des transformations entraînée par la correction et ce pour chaque élément.

La relation teneur mesurée-teneur corrigée est illustrée par des diagrammes binaires, teneur mesurée vs teneur corrigée (figures 67 à 70). Dans le cas d'une reproductibilité parfaite, les points s'aligneraient suivant la première bissectrice, la dispersion du nuage de points autour de cette droite, caractérise le degré de transformation des mesures. D'une manière plus quantitative, le coefficient de corrélation permet d'estimer le degré de similitude entre les teneurs mesurées et celles calculées pour le même échantillon. La disposition des points par rapport à la première bissectrice indique si les teneurs mesurées ont été sur ou sous-estimées, conformément au modèle de correction retenu. Le nuage de points obtenu est généralement régulier autour de cette bissectrice, il est particulièrement étalé pour les éléments TiO_2 et Zn, pour lesquels on obtient les plus faibles coefficients de corrélation entre teneurs mesurée et teneurs calculée. Les coefficients de corrélation obtenus pour l'ensemble des éléments sont de l'ordre de 0.84 pour TiO_2 ; 0.89 pour Zn; 0.92 pour CaO; 0.94 pour Sr; 0.96 pour Ba; 0.97 pour Al_2O_3 et As; 0.98 pour SiO_2 , K_2O , Co et Ni; 0.99 pour Na_2O , P_2O_5 , MnO, Li, B, V, Cr, Cu, Sn, Bi et Pb. Les valeurs élevées de ce coefficient confirment la validité du modèle linéaire retenu pour la correction des données géochimiques.

VIII.3. ANALYSE EXPLORATOIRE DES DONNEES GEOCHIMIQUES:

Il s'agit ici, d'une étape préliminaire de l'analyse des données géochimiques, dont le but est l'étude de la structure des données, en dehors de tout modèle de distribution à priori. Cette démarche est rendue possible par la méthode des cinq paramètres de TUKEY (1977), dont le principe a été exposé au chapitre VI.

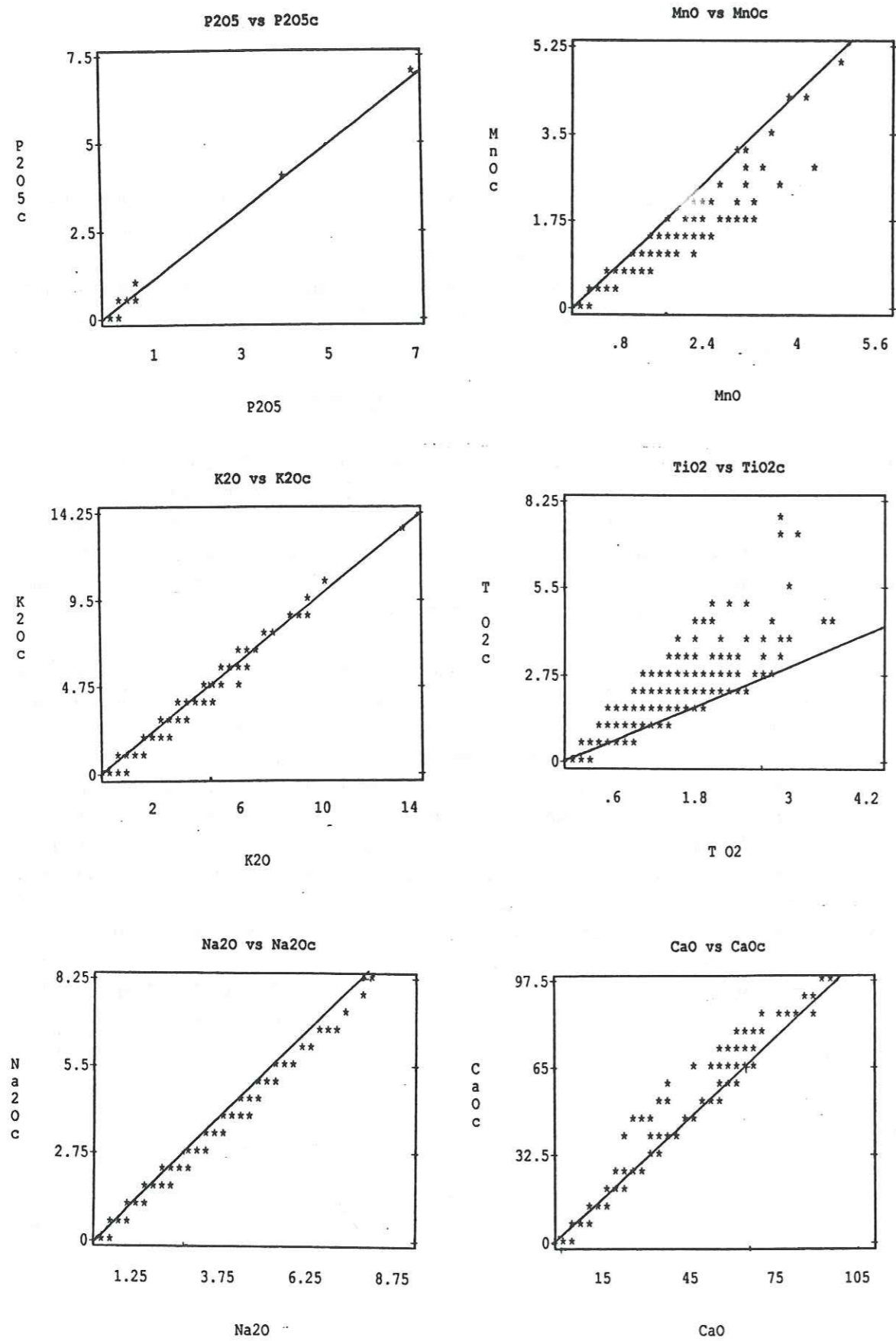


figure 67: Diagramme binaire des teneurs corrigées en fonction des teneurs mesurées.

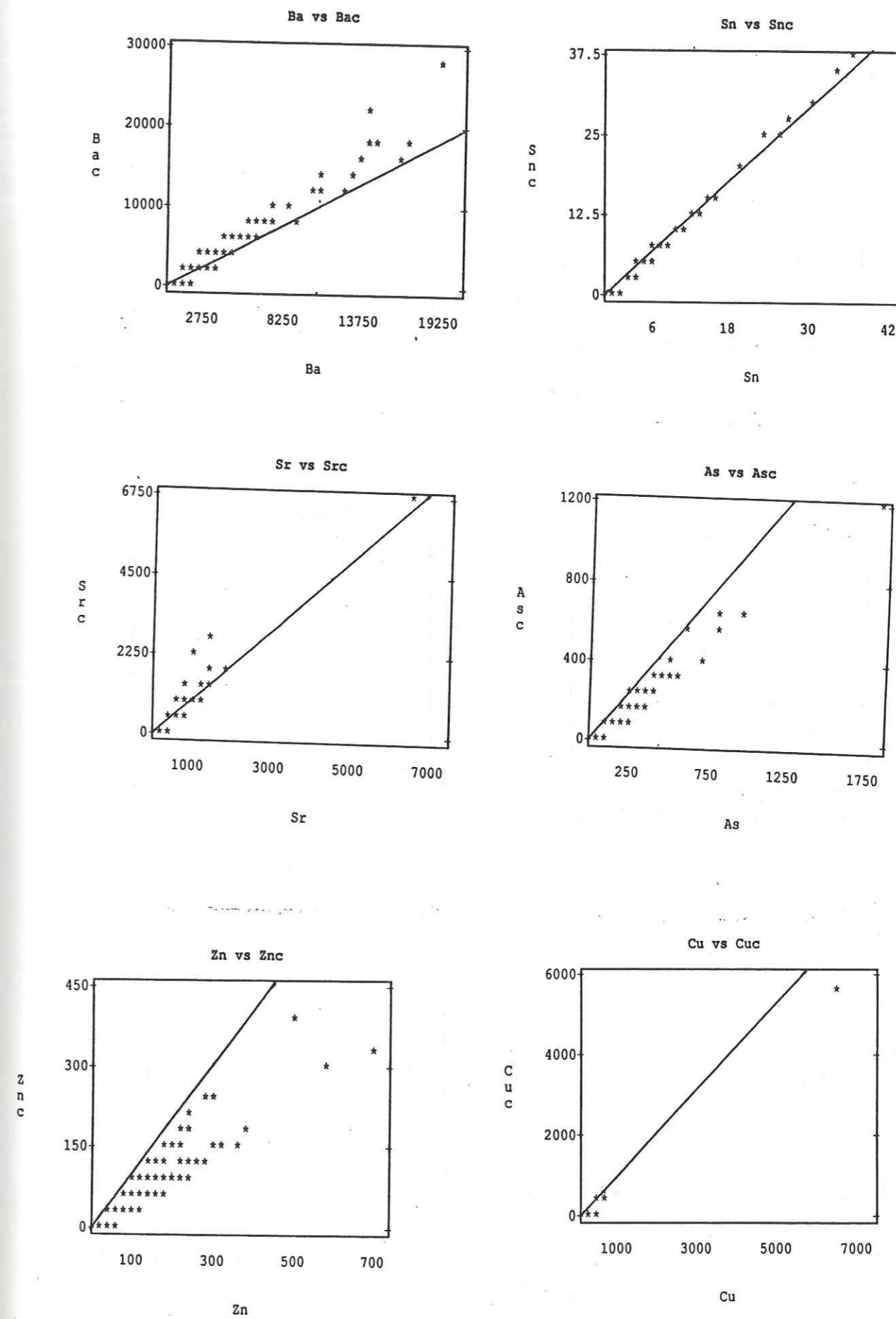


figure 68: Diagramme binaire des teneurs corrigées en fonction des teneurs mesurées (suite).

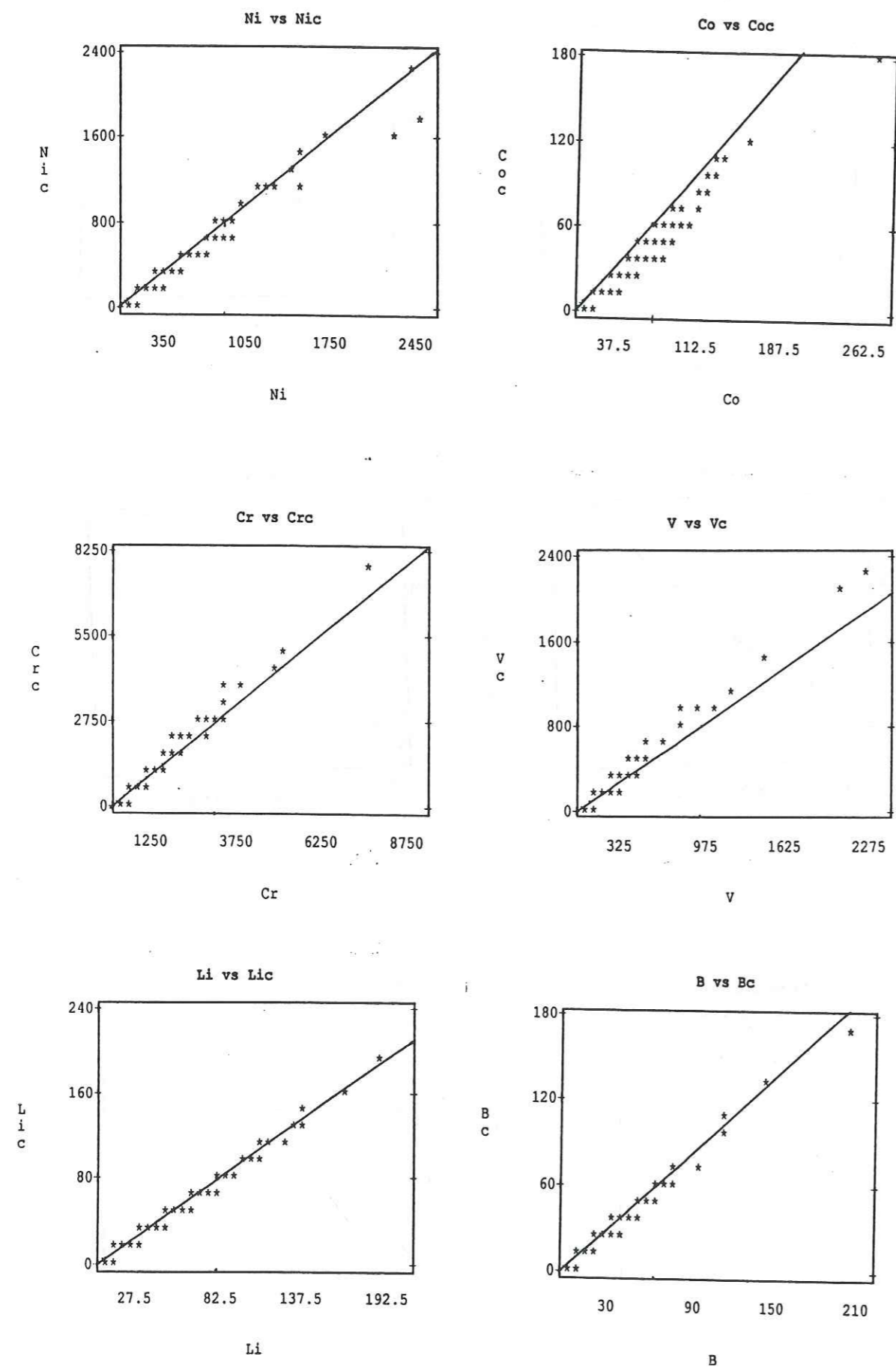


figure 69: Diagramme binaire des teneurs corrigées en fonction des teneurs mesurées (suite).

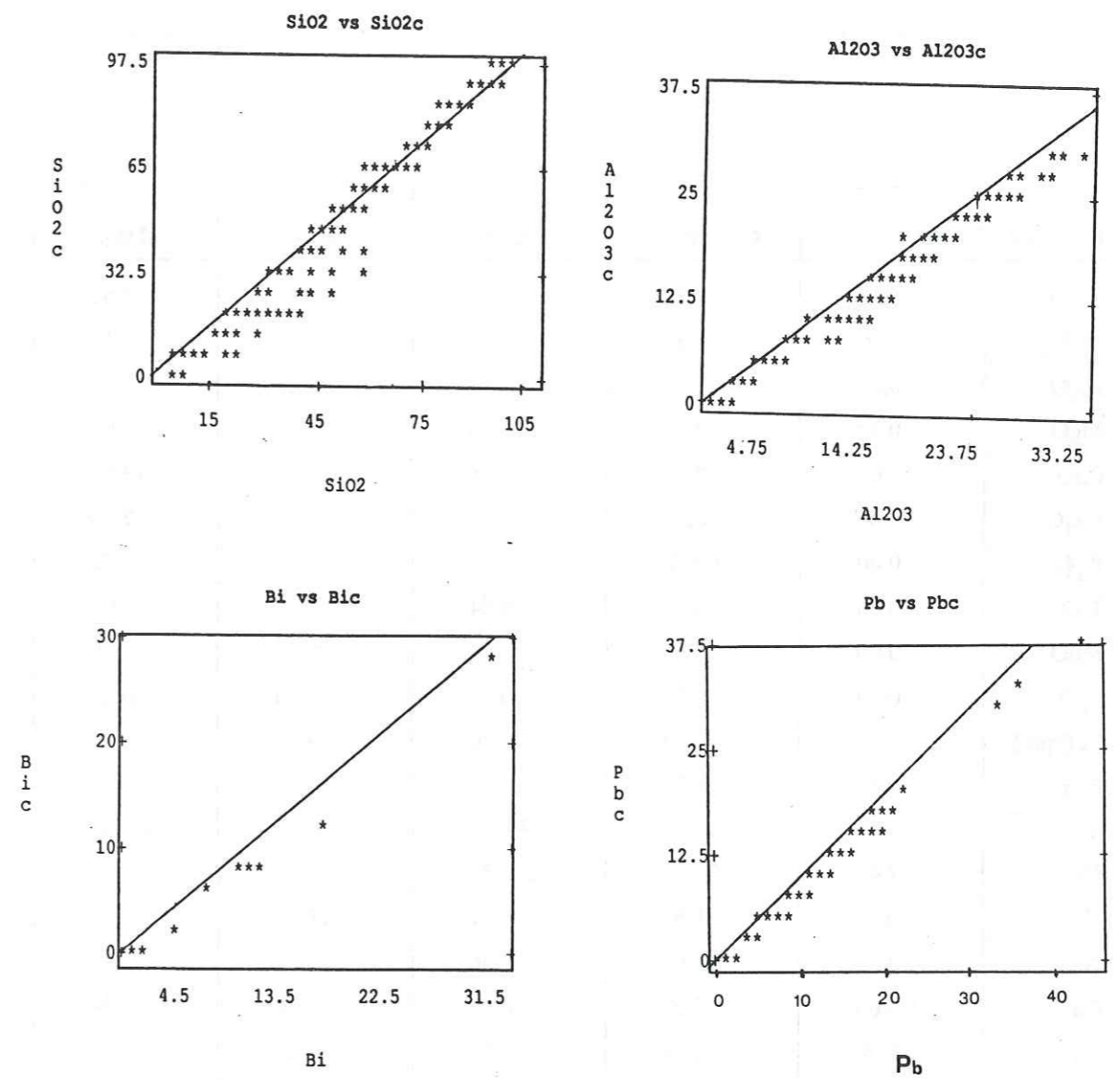


figure 70: Diagramme binaire des teneurs corrigées en fonction des teneurs mesurées (suite).

VIII.3.1. Analyse des distributions élémentaires:

Les cinq paramètres (médiane, les «charnières» inférieure et supérieure, les seuils d'anomalie inférieur et supérieur) calculés pour chaque élément sont regroupés dans le tableau 13.



Éléments	Seuil inf.	Char. inf.	Médiane	Char. sup.	Seuil sup.
SiO ₂ (%)	25.11	57.42	70.14	79.15	98.54
Al ₂ O ₃	0.00	7.65	10.56	15.19	26.17
Fe ₂ O ₃	0.00	2.15	3.34	8.24	16.85
MgO	0.00	0.97	1.96	4.22	8.92
CaO	0.00	0.97	1.95	6.11	13.93
Na ₂ O	0.00	0.29	1.85	3.17	7.13
K ₂ O	0.00	0.78	1.84	2.75	5.52
TiO ₂	0.00	0.36	0.64	1.42	3.01
MnO	0.00	0.03	0.06	0.12	0.28
P ₂ O ₅	0.00	0.04	0.07	0.20	0.44
Li (ppm)	0.93	5.19	13.40	29.44	64.76
B	0.88	6.22	12.62	20.45	41.64
V	3.32	27.03	98.19	206.26	469.85
Cr	14.48	77.72	109.35	188.41	346.52
Co	0.60	1.67	4.87	11.27	25.43
Ni	0.00	0.62	5.36	14.85	33.82
Cu	0.00	0.00	0.94	2.92	5.39
Zn	0.00	4.67	11.79	25.85	55.72
Sr	5.43	23.21	46.93	100.30	223.53
As	0.83	23.36	39.96	65.79	126.95
Ba	0.65	235.69	455.91	892.45	1882.04
Pb	0.00	0.05	0.20	0.92	2.03
Bi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50

Tableau 13: Paramètres statistiques de Tukey, calculés par la méthode des "box and whiskers" sur l'ensemble des données

La structure des données, abordée par cette technique est visualisée par les graphiques des figures 71 à 73. Nous pouvons constater sur ces graphiques que la distribution centrale (50% des échantillons) est variable d'un élément à l'autre, ainsi:

pour SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O, Li, B et V, la distribution centrale est symétrique (par rapport à la médiane);

elle est par contre dissymétrique avec un étalement sur les teneurs supérieures à la médiane pour les éléments: Fe₂O₃, MgO, CaO, TiO₂, MnO, P₂O₅, Cr, Co, Zn, Sr, As, Ba et Pb.

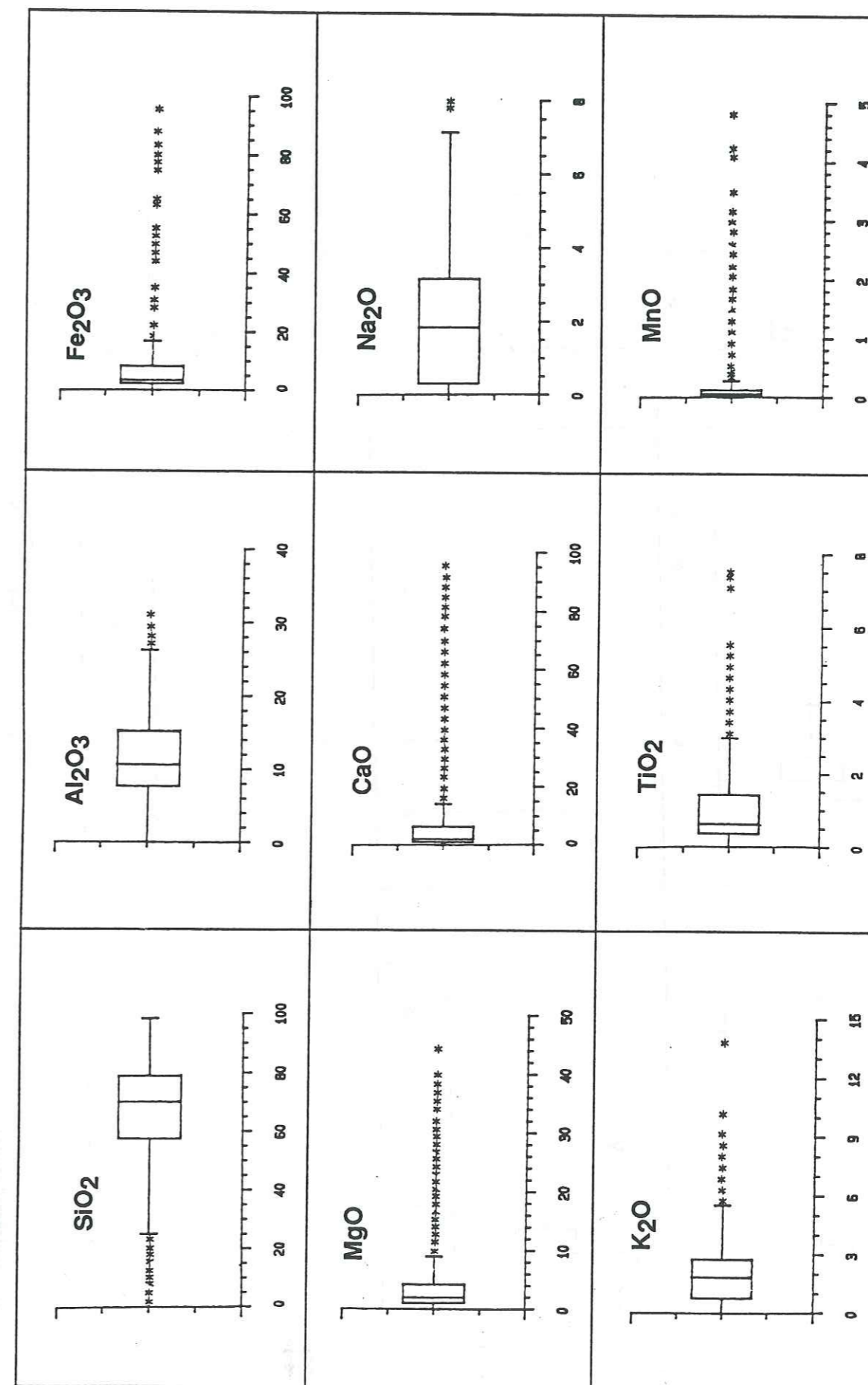


Figure 71: Distributions statistiques élémentaires représentées par le "boxplot" de la méthode des "box and whiskers";

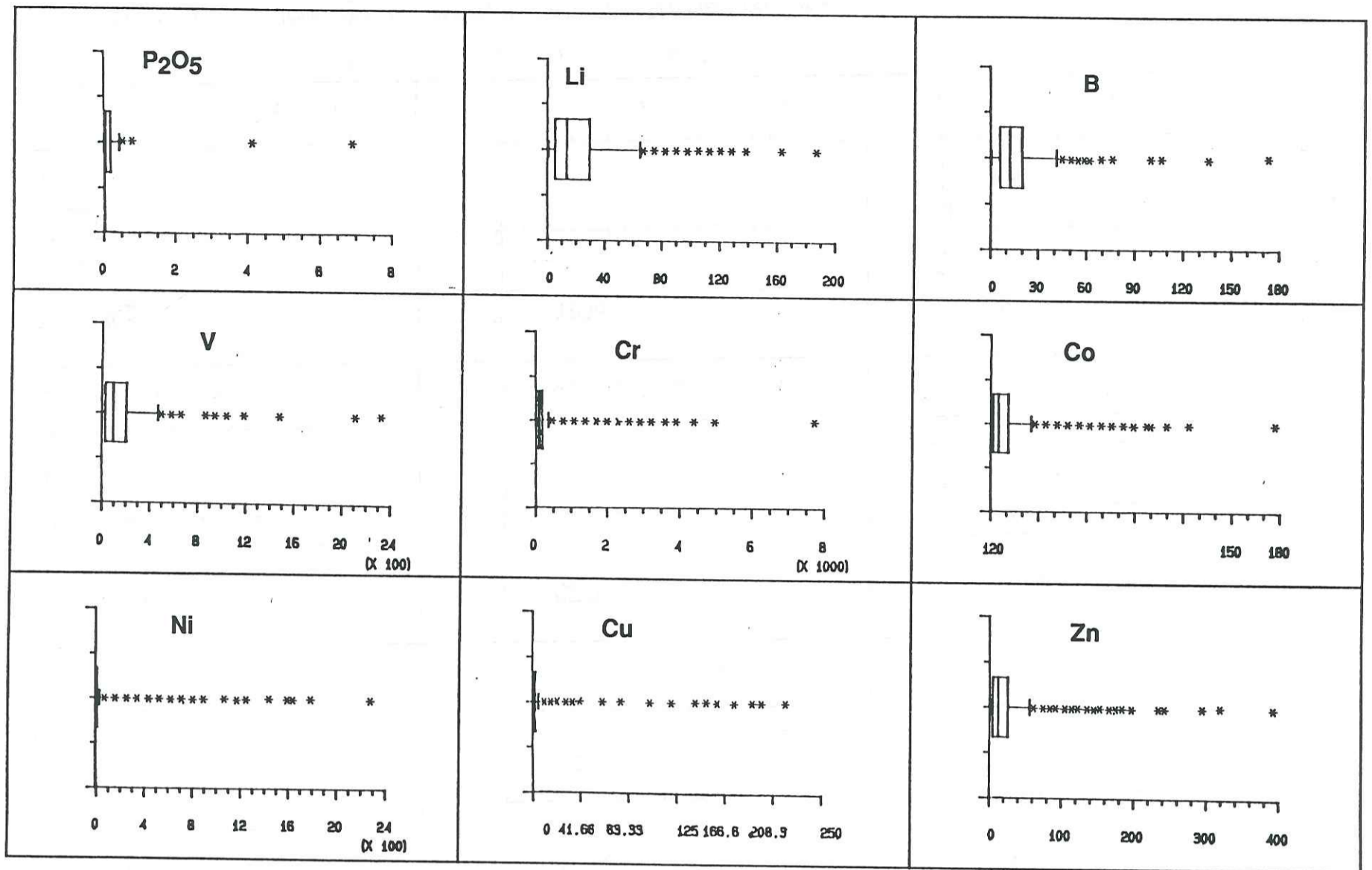


Figure 72: Distributions statistiques élémentaires représentées par le "boxplot" de la méthode des "box and whiskers" (suite);

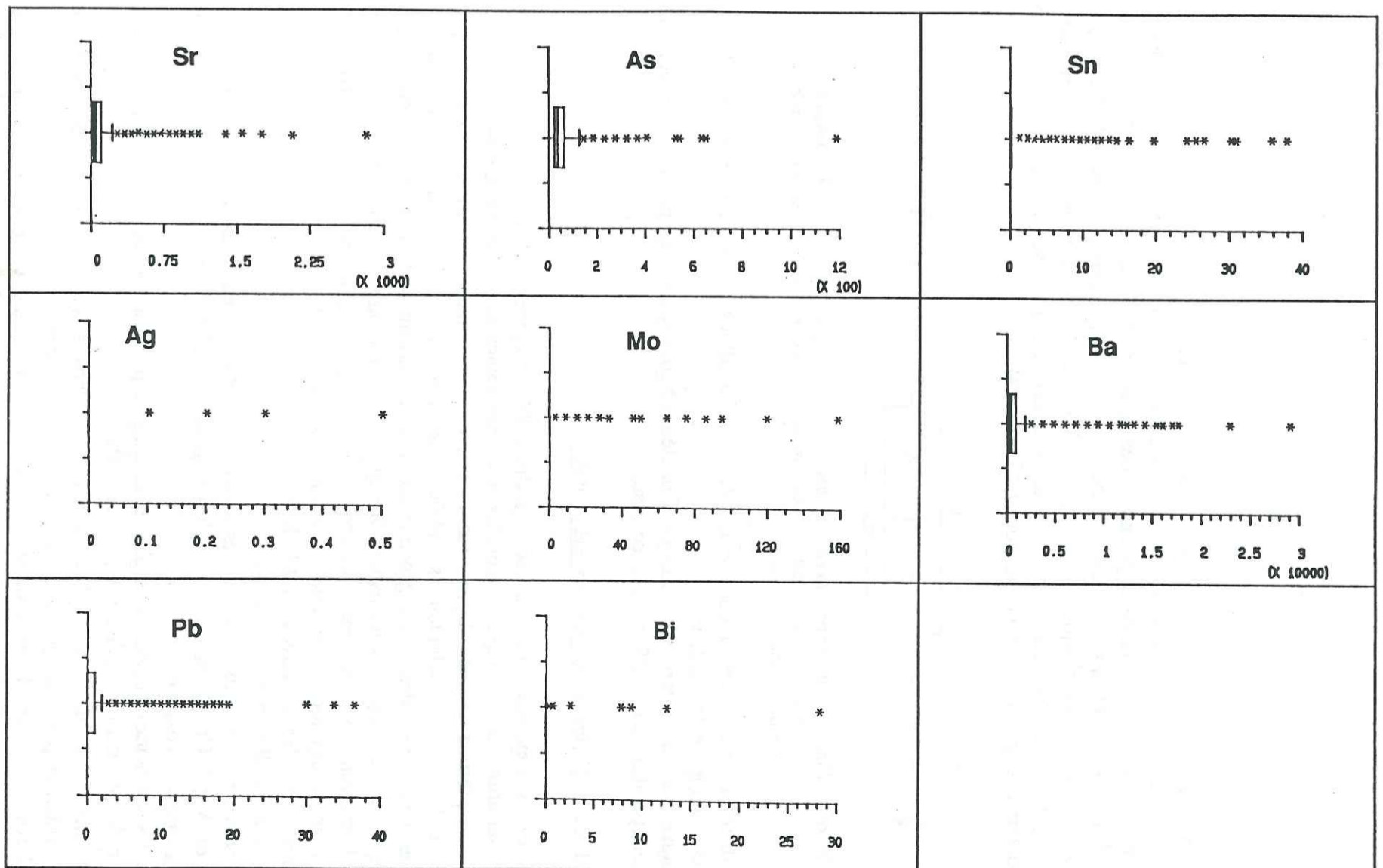


Figure 73: Distributions statistiques élémentaires représentées par le "boxplot" de la méthode des "box and whiskers" (suite).

tel-00708240, version 1 - 14 Jun 2012

Les teneurs anormales sont exclusivement positives (supérieures à la médiane), sauf pour SiO₂ qui ne présente que des teneurs anormales négatives (inférieures à la médiane).

Notons aussi que pour les éléments Ni, Cu, Sn, Ag, Mo et Bi, la distribution centrale est très étroite ce qui s'explique par la prépondérance de teneurs nulles ou voisines de zéro. Ceci se répercute sur le seuil d'anomalie qui dans ce cas est très faible.

VIII.3.2. Cartographie géochimique:

Différentes méthodes de cartographie géochimique ont été exposées par Howarth (1983), la différence réside dans le choix des classes à représenter et le mode de visualisation adopté.

Pour les résultats de l'analyse exploratoire des données géochimiques, nous adoptons avec Tukey and Tukey (1981) la combinaison d'une visualisation par symboles avec la distinction des classes définies pour chaque élément par le "box-plot" correspondant. Six classes sont ainsi distinguées grâce aux paramètres de Tukey, chacune des classes est représentée sur la carte géochimique par un symbole différent (figure 74).

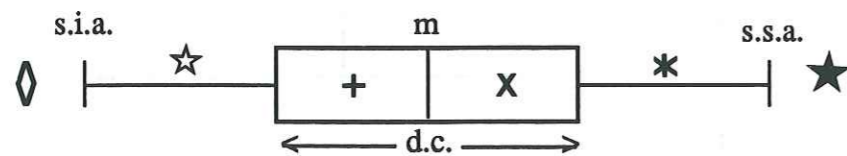


figure 74: Symboles utilisés pour la cartographie des classes définies par les "Box and whiskers"
m = médiane, s.i.a. = seuil inférieur d'anomalie, s.s.a. = seuil supérieur d'anomalie, d.c. = distribution centrale.

La distribution centrale qui comprend 50% des échantillons, est subdivisée en deux classes de part et d'autre de la médiane.

Chaque point de la carte géochimique d'un élément correspond à un point de prélèvement, aucune interpolation n'est effectuée à ce stade.

VIII.3.2.1. Cartes géochimiques élémentaires:

Les cartes sont reproduites à l'échelle du 1:20000^e (annexe 2).

Des variations géochimiques régionales sont observables sur les cartes mono-élémentaires obtenues. Un premier examen de ces variations en tenant compte des différentes lithologies en présence (une carte géologique simplifiée, sur transparent, est prévue comme support géologique à la lecture des cartes géochimiques, cf. document hors texte n° 2), montre des contrastes d'une part entre les formations basiques et les formations acides et d'autre part au sein des formations basiques entre les roches vertes du PII et les andésites du PIII.

L'ensemble des roches basiques se caractérise par:

- * des anomalies négatives en Li, B et As,
- * des anomalies positives en Zn.

Au sein de cet ensemble les roches basiques du PII se caractérisent par des anomalies positives en MgO, Cr, Co et Ni. Les roches basiques du PIII quant à elles, se caractérisent par des anomalies positives en TiO₂ et Pb.

Les roches acides du PIII sont bien discriminées par des anomalies négatives en V et Co et par des anomalies positives en K₂O et Ba.

Les formations filoniennes carbonatées semblent caractérisées par une anomalie négative en SiO₂, Al₂O₃ et par une anomalie positive en MgO, MnO et Sr.

Malgré l'influence observée de la lithologie sur les variations régionales des classes de teneur distinguées par les "box and whiskers", certains éléments présentent des classes de teneurs anormales séchantes sur les différentes lithologies.

La carte de l'élément As retient particulièrement l'attention, elle présente une prépondérance régionale des valeurs anormales négatives qui contraste avec les valeurs anormales positives moins nombreuses. Les teneurs correspondant à la distribution centrale représentative du fond géochimique, sont limitées terrains du PIII.

VIII.3.2.2. Carte des linéaments géochimiques:

Des cartes géochimiques synthétiques, représentent une compilation des anomalies positives obtenues pour les éléments présentant un intérêt en prospection minière.

Une première synthèse est obtenue en reportant sur la même carte l'ensemble des linéaments géochimiques, correspondant ici aux grands axes des anomalies positives considérées. Sur la carte des linéaments (figure 75), se distinguent les principales directions suivantes:

- des directions N100 à N120°E étroitement liées aux affleurements des roches basiques du PII, ou dans le prolongement de ceux-ci. C'est le cas notamment des éléments Cr, Co, Ni et partiellement Cu, Zn et Sr.

- une direction N50 à N70°E, dans le cas des éléments As, B, Ba et partiellement Cu, Zn et Pb.

- une direction N-S, de moindre importance, où l'on retrouve des anomalies en B, As et Pb.

Ces linéaments peuvent être regroupés en structures géochimiques majeures dans des directions N100° à N120°E; N140°E et NE-SW.

VIII.3.2.3. Compilation des anomalies positives:

Par commodité de présentation et dans un but de comparaison, les anomalies géochimiques positives sont regroupées par répartition géographique voisine et/ou par affinité géochimique. Ces cartes permettent ainsi l'examen détaillé des rapports entre les principales anomalies positives obtenues.

La carte des anomalies des éléments Cr, Co et Ni (figure 76) montre un lien géographique étroit entre ces anomalies, avec une structure plus ou moins concentrique. Le Cr présente les anomalies positives les plus étalées qui englobent celles du Ni puis celles du Co. Cette carte permet de définir des anomalies multiélémentaires correspondant aux zones de juxtaposition des trois anomalies Cr, Ni et Co. Ces anomalies multiélémentaires représentent des guides intéressants en terme de prospection géochimique.

Sur la figure 77, ont été regroupées les anomalies positives des éléments Cu, Pb et Zn, le Pb y présente une anomalie positive très étendue qui domine le tiers Ouest de la carte. Deux types d'anomalies positives peuvent être distingués pour ces éléments:

- des anomalies qui s'alignent dans la zone d'anomalie des éléments Cr, Ni et Co, liées aux deux bandes de roches basiques du PII.

- des anomalies au niveau des affleurements des roches du PIII.

Les anomalies multiélémentaires sont généralement limitées à deux éléments: Pb-Zn, Pb-Cu et Cu-Zn. Une seule anomalie multiélémentaire avec Pb-Zn-Cu est présente.

La carte des anomalies positives des éléments As, Sr et Ba (figure 78) montre des étendues étroites. Les anomalies du Sr paraissent plus prépondérantes au niveau des deux bandes de roches vertes du PII, contrairement au Ba et As. Quelques anomalies multiélémentaires peuvent être distinguées: As-Sr-Ba, As-Sr, As-Ba et Ba-Sr.

Notons que pour As, même si les anomalies positives sont relativement étroites, elles sont en contraste avec un fond géochimique très faible dominé par des anomalies négatives.

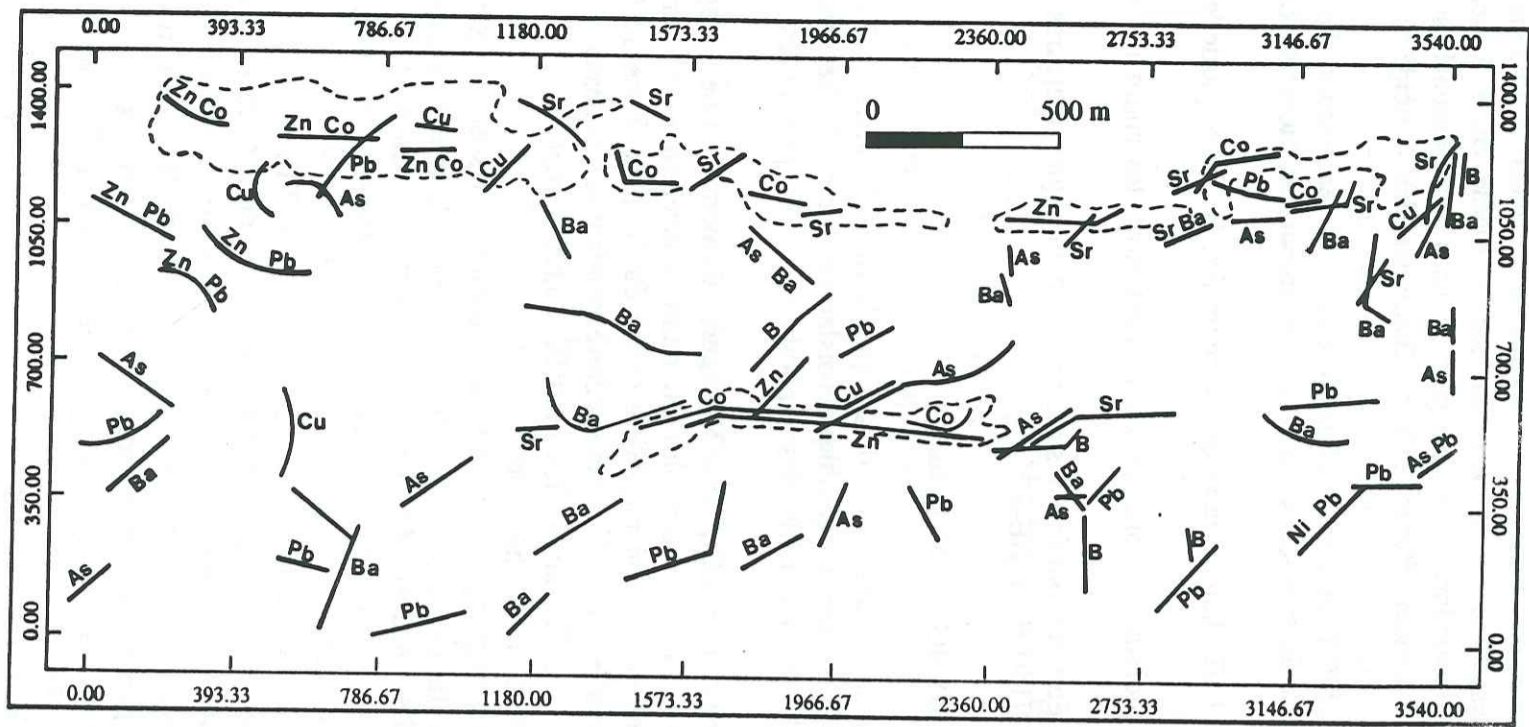


Figure 75: Carte des linéaments géochimiques.

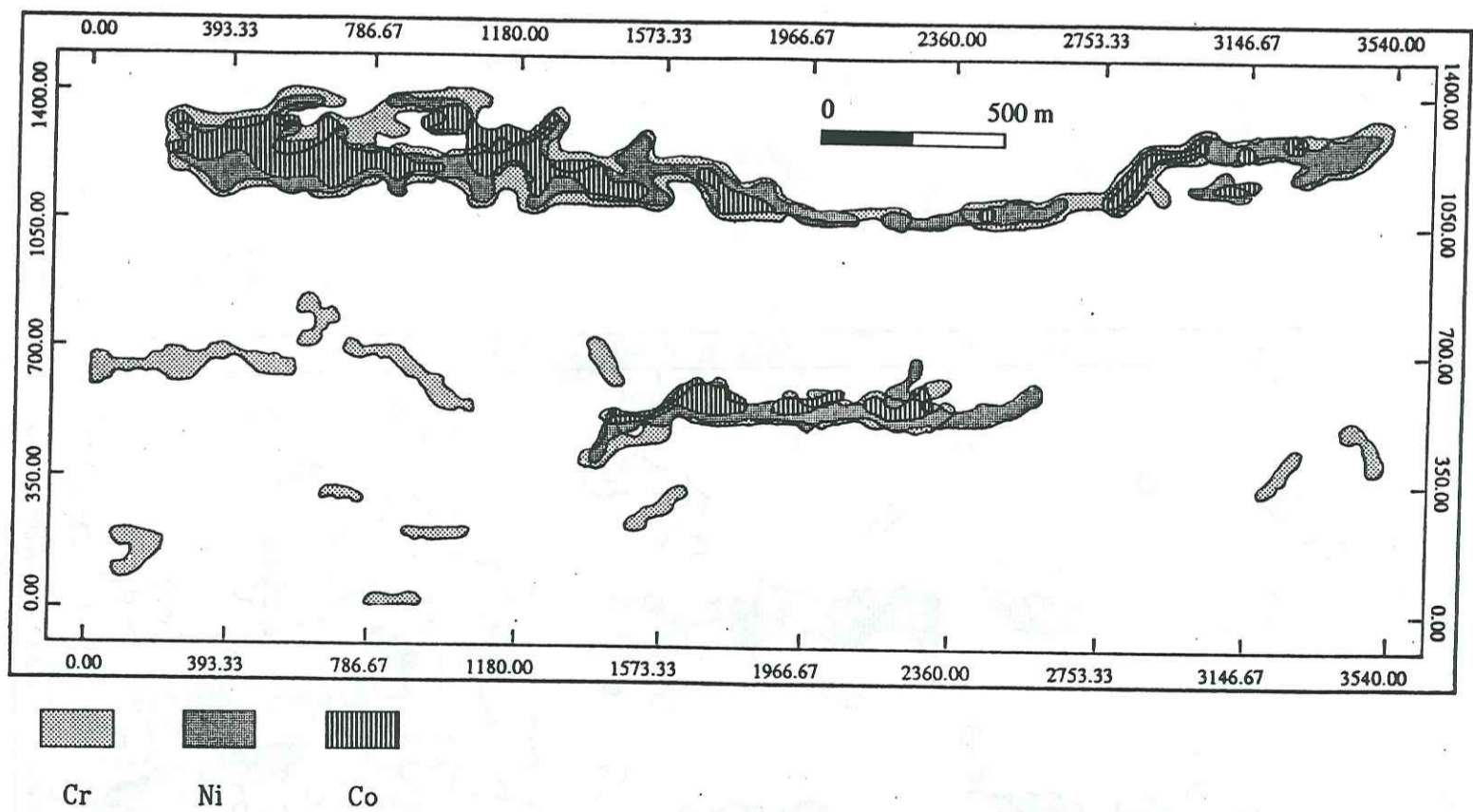


Figure 76: Carte des anomalies géochimiques positives des éléments Cr, Ni et Co.

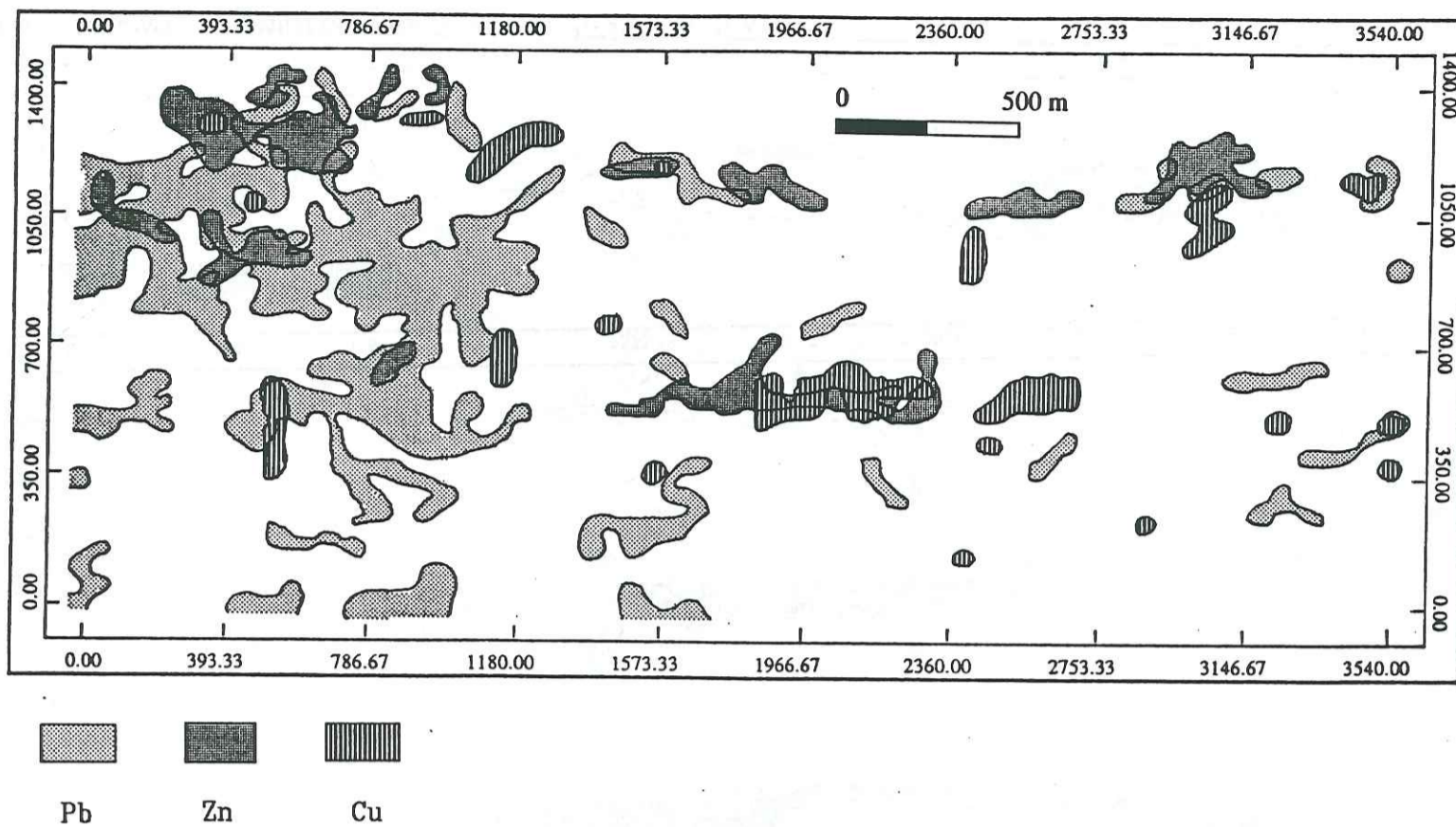


Figure 77: Carte des anomalies géochimiques positives des éléments Pb, Zn et Cu.

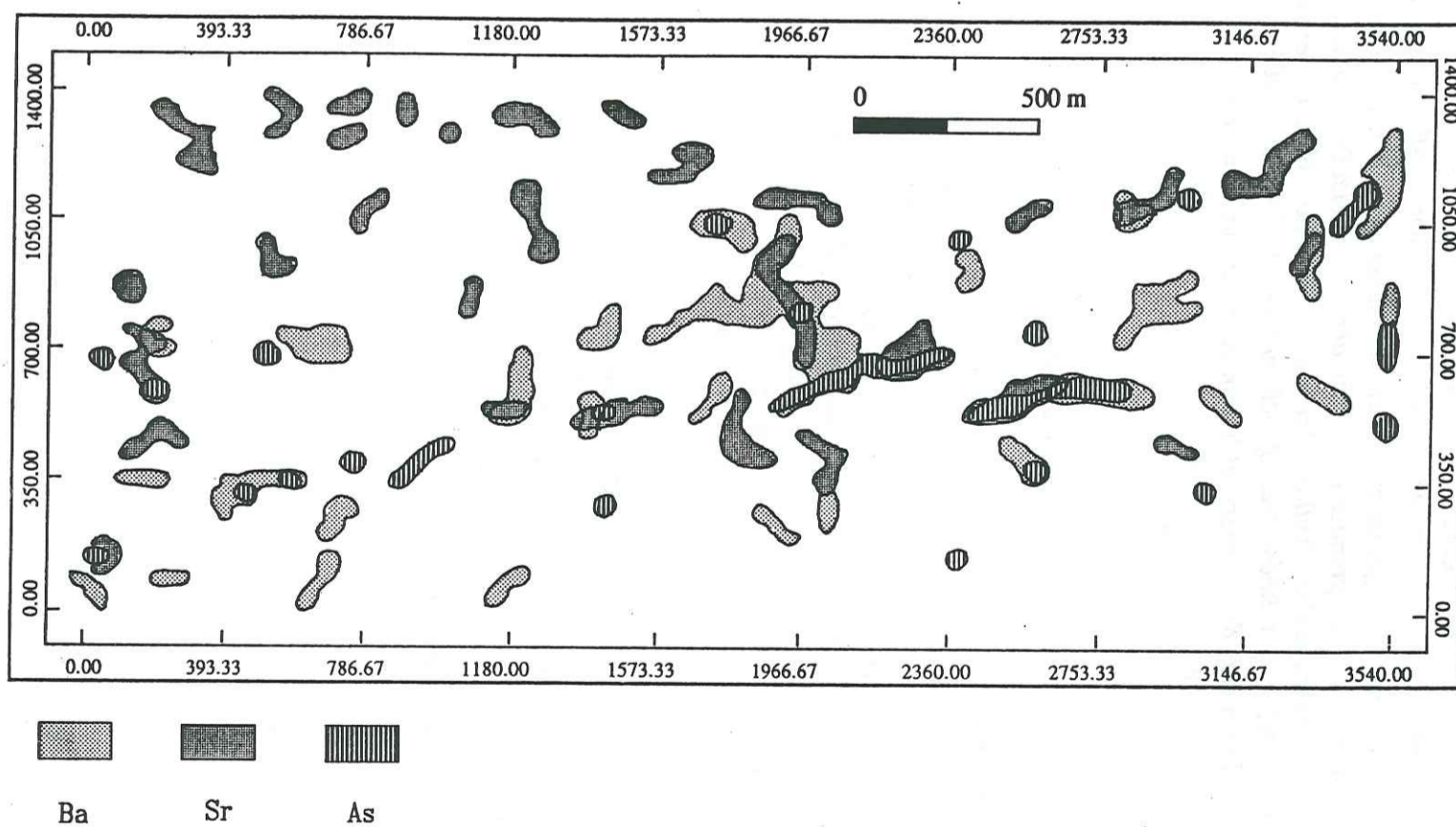


Figure 78: Carte des anomalies géochimiques positives des éléments As, Sr et Ba.

VIII.3.3 Conclusion:

L'application de la technique des "Box and Whiskers" dans la description des données géochimiques de prospection, offre un outil non conventionnel qui permet l'analyse de l'information géochimique indépendamment de tout modèle statistique à priori.

Conformément aux but fixé pour cette étude il est obtenu une description de la structure des données élément par élément. La cartographie des classes de teneur définies permet de repérer les variations spaciales du fond géochimique et notamment des teneurs anormales positives qui intéressent le prospecteur au premier chef. Une démarche sélective et synthétique m'a été possible grâce à la compilation des résultats obtenus pour chaque élément, permettant de proposer une carte synthétique des linéaments géochimiques et des cartes d'anomalies positives multiélémentaires, documents de première utilité en prospection minière géochimique.

VIII.4. TRAITEMENT STATISTIQUE CONVENTIONNEL DES DONNEES GEOCHIMIQUES DE PROSPECTION:

Cette deuxième étape du traitement de données est effectuée à l'aide des méthodes statistiques classiques. L'influence du facteur lithologique sur la variation des teneurs est étudiée par analyse factorielle sur les médianes des teneurs des 32 entités géologiques distinguées sur le terrain, qui seront ensuite réparti en 4 groupes lithologiques.

Une analyse discriminante est alors effectuée sur l'ensemble des données en tenant compte des 4 groupes lithologiques définis par l'analyse en composantes principales sur les médianes. Le but de cette analyse est d'extraire le modèle factoriel qui explique le mieux les variations de teneur liées à la lithologie. Les teneurs sont ensuite traitées par régression factorielle.

La cartographie géochimique des teneurs estimées par le modèle factoriel et des teneurs résiduelles susceptibles d'être anormales, permet alors de repérer la composante du signal géochimique indépendante de la lithologie. Ces anomalies sont comparées avec celles obtenus par les «box and whiskers». Ces résultats sont compilés sur une carte de synthèse pour les éléments les plus importants en prospection.

VIII.4.1. Statistiques élémentaires:

Les distributions des teneurs des éléments sont représentées par les histogrammes et les courbes de fréquences cummulées sur les figures 79, 80 et 81. Pour la plupart des éléments en traces d'intérêt en prospection, deux types d'histogrammes sont présentés: d'une part les histogrammes des teneurs naturelles et d'autre part les histogrammes des logarithmes des teneurs (figures 79, 80 et 81).

La plupart des distributions des éléments majeurs ne peuvent pas être rattachées à une loi simple de type normal ou lognormal; ceci est principalement dû à une distribution polymodale de ces éléments qui traduit l'influence de la lithologie. Les distributions des éléments en traces, à l'exception du Cu, peuvent être rattachées à un type lognormal. Pour plusieurs éléments, une forte proportion des teneurs est en-dessous du seuil de détection; c'est le cas notamment de Co, Ni, Cu et As.

Le calcul des paramètres statistiques des teneurs des éléments est effectué en excluant les échantillons dont l'une des teneurs est supérieure à $m+3\sigma$.

Les principaux paramètres statistiques (minimum, maximum, médiane et écart-type), sont rassemblés dans le tableau 14. Les coefficients de corrélations sont calculés après transformation logarithmique des teneurs (tableau 15). Les associations d'éléments sont déduites en retenant pour chaque élément le coefficient de corrélation le plus élevé en valeur absolue. Sur la figure 82, où sont représentées ces associations, nous pouvons distinguer:

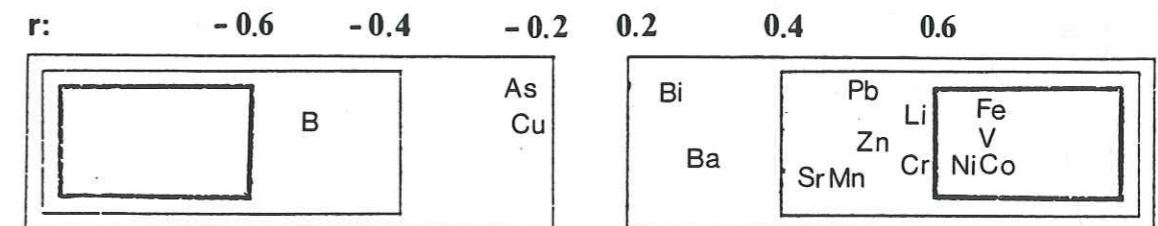


Figure 82: Associations géochimiques déduites de la matrice de corrélation; r = coefficient de corrélation.

- le regroupement des éléments Fe₂O₃, V, Co, Ni et Cr avec les plus importants coefficients de corrélation positifs (supérieurs à 0.60) auxquels on peut rattacher les éléments MnO, Li, Zn, Sr, Pb et Ba, avec des coefficients positifs moins élevés.

- le B avec le coefficient de corrélation négatif le plus important en valeur absolue.

- les éléments As, Cu et Bi varient d'une manière assez indépendante, ils présentent des

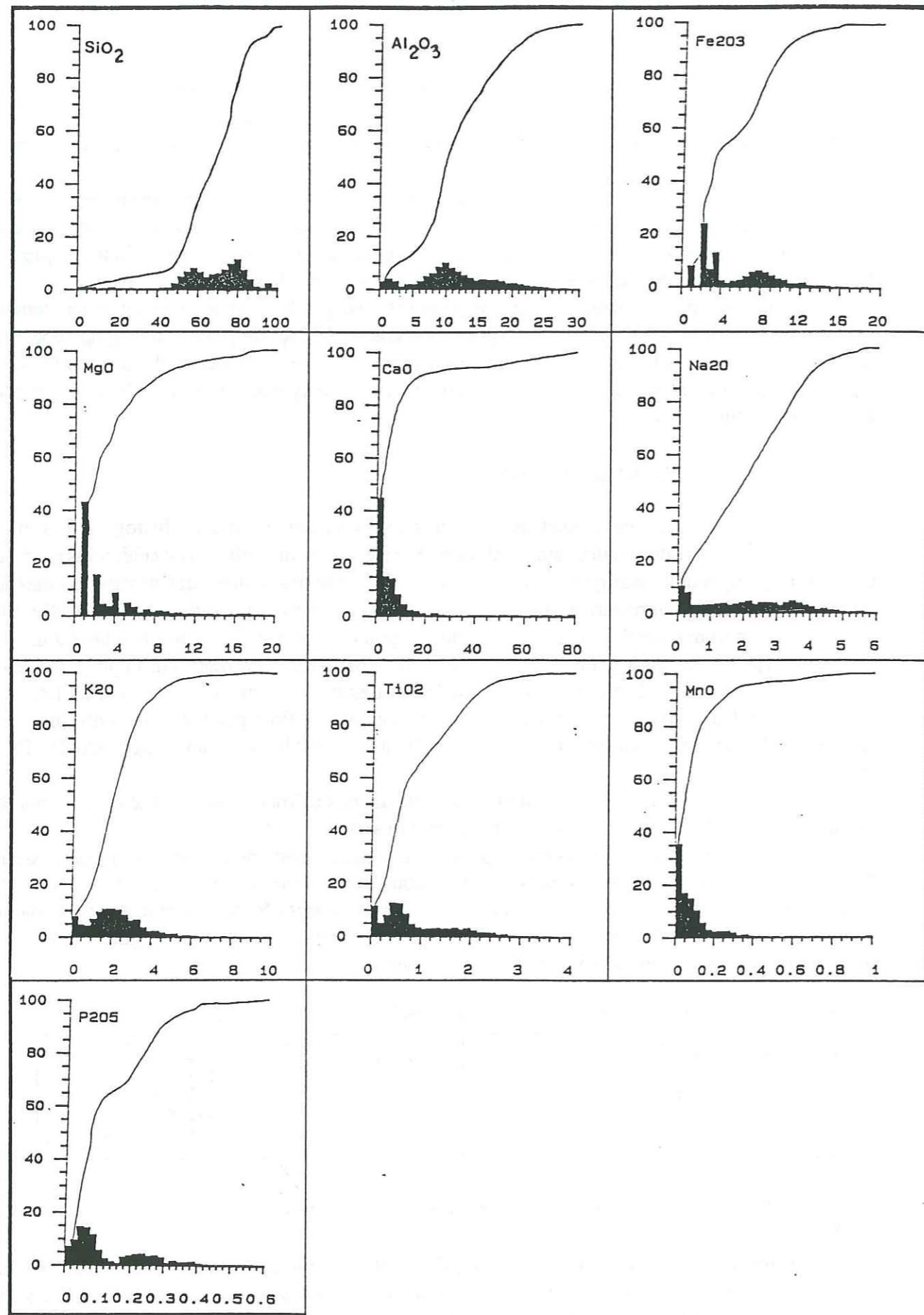


Figure 79: Histogrammes et courbes de fréquence cumulée des teneurs brutes, barres pleines: teneurs naturelles; barres vides: logarithme des teneurs.

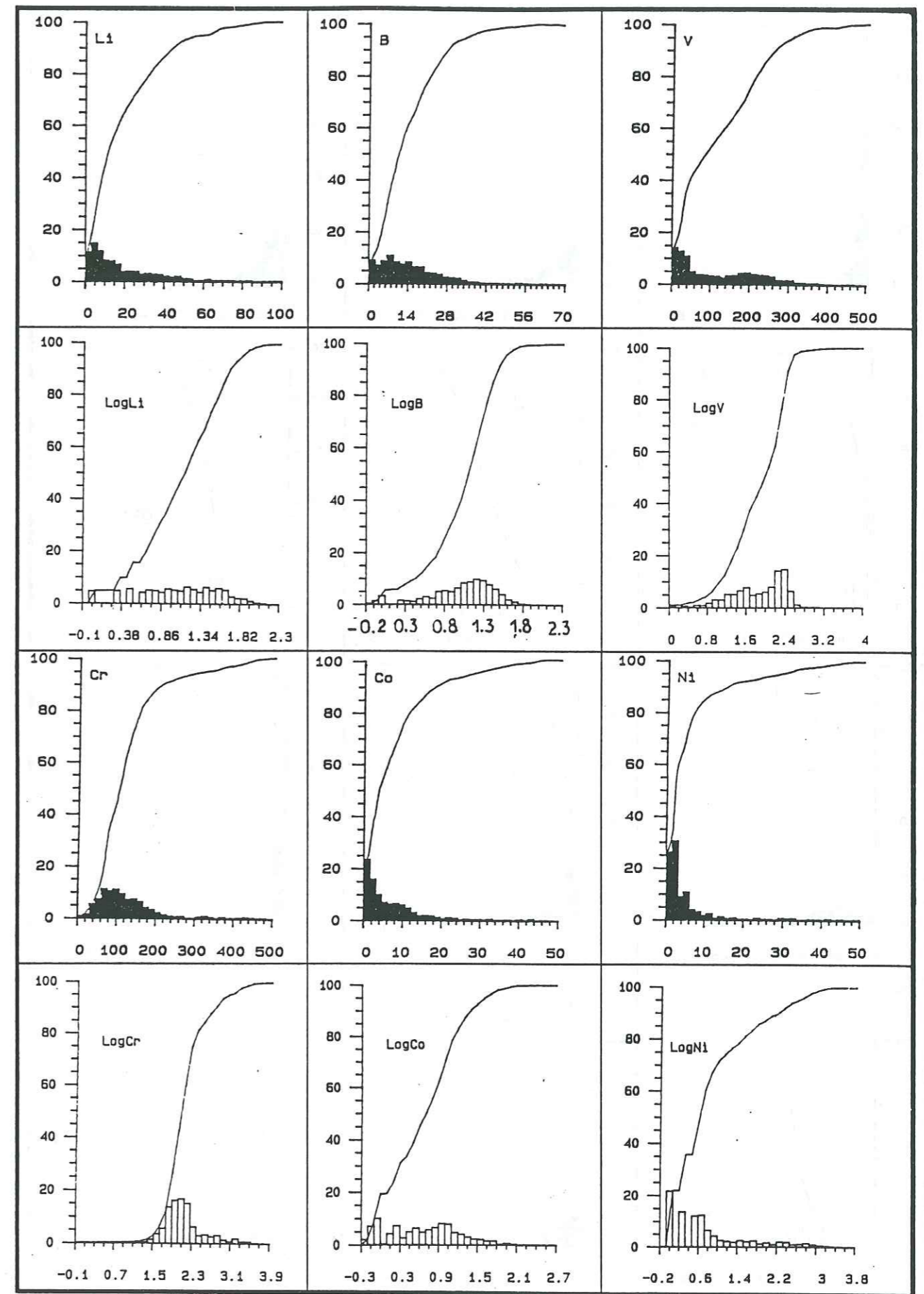


Figure 80: Histogrammes et courbes de fréquence cumulée des teneurs brutes; barres pleines: teneurs naturelles; barres vides: logarithme des teneurs; (suite).

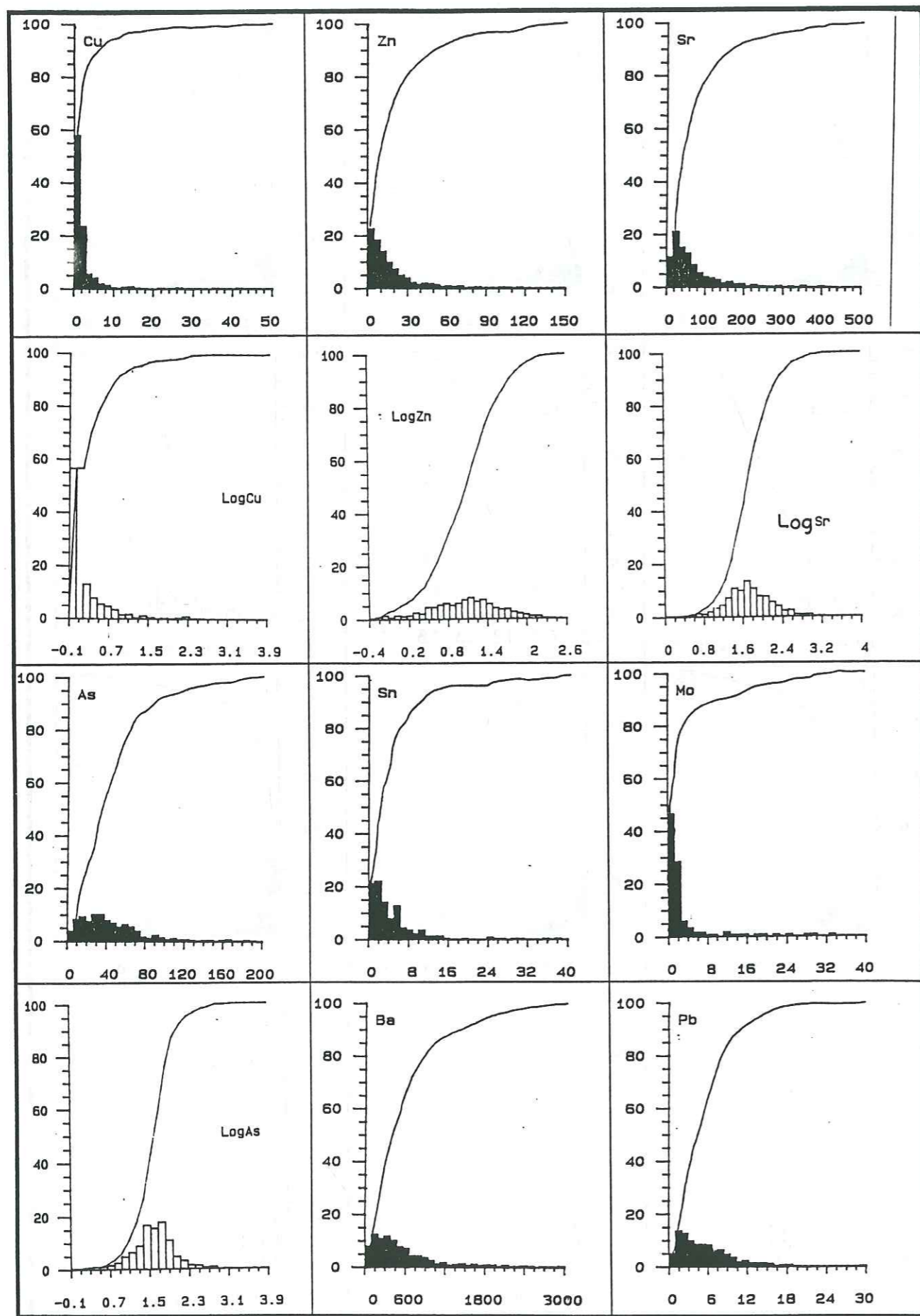


Figure 81 : Histogrammes et courbes de fréquence cumulée des teneurs brutes; barres pleine: teneurs naturelles; barres vides: logarithme des teneurs; (suite).

Eléments	Min.	Max.	Moyenne	Ecart-type
Fe	0.00	29.85	2.37	5.12
Mn	0.00	1.27	0.00	0.15
Li	1.00	79.04	12.58	2.8
B	0.67	51.12	13.50	2.30
V	1.01	543.63	83.17	3.16
Cr	0.96	1665.90	109.60	2.00
Co	0.62	53.56	3.80	3.01
Ni	0.76	612.10	3.00	3.90
Cu	0.85	219.04	1.00	2.50
Zn	0.43	110.57	10.66	3.09
Sr	1.31	788.03	47.9	2.5
As	0.85	318.35	39.80	2.40
Ba	0.00	5996.00	213.80	12.6
Pb	0.00	11.00	0.00	2.44

Tableau 14: Paramètres statistiques élémentaires calculés après exclusion des échantillons à teneurs extrêmes (>+3σ).

Fe*	MnO	Li	B	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	As	Ba	Pb	Bi	Fe*
1.00	0.38	0.51	-0.16	0.66	-0.13	0.66	0.33	-0.15	0.37	0.41	-0.11	-0.22	0.32	0.28	Fe*
	1.00	0.14	-0.31	0.18	0.08	0.47	0.44	0.27	0.39	0.44	-0.01	-0.17	0.15	0.01	MnO
		1.00	-0.16	0.58	-0.05	0.56	0.15	-0.05	0.22	0.35	0.03	-0.02	0.51	0.04	Li
			1.00	-0.26	-0.52	-0.44	-0.52	-0.20	-0.21	-0.27	0.18	0.31	-0.07	-0.04	B
				1.00	0.08	0.62	0.29	-0.10	0.22	0.35	-0.14	-0.19	0.39	-0.02	V
					1.00	0.25	0.58	0.13	0.10	-0.02	-0.10	-0.06	-0.05	0.014	Cr
						1.00	0.65	-0.01	0.50	0.39	-0.22	-0.27	0.51	0.01	Co
							1.00	0.16	0.42	0.19	-0.15	-0.29	0.14	0.02	Ni
								1.00	0.09	0.10	0.20	-0.03	0.01	-0.09	Cu
									1.00	0.27	0.04	-0.17	0.24	0.05	Zn
										1.00	0.05	0.27	0.28	0.12	Sr
											1.00	0.18	-0.04	0.02	As
												1.00	-0.02	0.17	Ba
													1.00	0.02	Pb
														1.00	Bi

Tableau 15: Matrice de corrélation des éléments après transformation logarithmique des teneurs.

tel-00708240, version 1 - 14 Jun 2012

coefficients de corrélation faibles.

L'association géochimique la plus importante autour des éléments Fe₂O₃, V, Co, Ni et Cr est caractéristique des faciès basiques. La prépondérance des coefficients de corrélations faibles s'expliquerait par les fortes variations de la composition lithologique des roches analysées.

VIII.4.2. Cartographie géochimique des teneurs brutes:

La visualisation de la répartition des teneurs géochimiques dans le secteur étudié, a été réalisée pour chaque élément sous forme de cartes en valeurs de gris proportionnel au niveau des teneurs représentées. Pour la réalisation de ces cartes, j'ai utilisé le logiciel graphique Uniras, qui offre plusieurs possibilités d'interpolation. J'ai utilisé la plus simple qui conduit à une image peu lissée du relief géochimique. Cette visualisation est effectuée en deux étapes:

- une première interpolation, permet d'estimer les teneurs aux noeuds d'un réseau régulier;
- une deuxième interpolation guide le tracé des courbes isoteneurs séparant les différents niveaux de gris sur la carte.

L'impression globale, que donne un premier examen des cartes de teneurs brutes, est celle d'une répartition géographique variable (annexe 3) : soit une répartition régionale bien graduée (Fe₂O₃, MnO, Cr, Ba), reflétant un certain fond géochimique commun; soit un contraste important entre différentes zone de la carte (Li, B, V, Co, Ni, Zn, Sr). Par ailleurs les éléments Cu, As et Pb présentent une répartition spatiale très réduite. Dans tous les cas, les classes de teneur élevée (supérieure à $m+3\sigma$), occupent des superficies réduites qui définissent des structures géochimiques liées à des structures géologiques, tectoniques ou lithologiques.

L'influence de la lithologie s'observe très bien dans le cas des éléments MnO, V, Cr, Co, Ni, Zn, par contre pour les éléments Fe₂O₃, B, Cu, Sr, As, Ba et Pb, les structures définies par les classes anomales sont séquentes sur les limites lithologiques.

Nous nous sommes également intéressés aux structures linéaires qui apparaissent sur les cartes des différents éléments. Ces alignement correspondent en fait à des crêtes du relief géochimique, formées par une succession de teneurs élevées ou bien à des limites entre deux plages de teneurs contrastées.

Une carte synthétique des structures géochimiques déterminées à ce stade de l'analyse (figure 83) permet de distinguer:

- des linéament de direction N100°E se situant au niveau des failles de même direction qui traversent le secteur. Cette direction est associée à des anomalies en MnO, B, V, Cr, Co, Ni et Zn;
- des linéaments de direction NE-SW, sont associés à des anomalies en Fe₂O₃, Li, B, V, Sr, et Ba;
- des linéaments dans la direction N20°E, sont constitués des anomalies de Fe₂O₃, MnO, B, Zn, Sr, As et Pb;
- des linéaments orientés N140°E, soulignés par des anomalies en MnO, B, Cu et As.

A ce stade de l'étude statistique classique des données géochimiques de prospection, nous pouvons considérer, que nous obtenons les mêmes informations sur la structure des données, que celles obtenues par la méthode non conventionnelle des «box and whiskers».

VIII.4.3. Etude de l'influence de la lithologie sur la variation des teneurs:

La teneur du fond géochimique pour chaque entité lithologique, est caractérisée par la médiane, valeur centrale de la distribution de chaque élément. Le tableau des médianes (Tableau 16) est étudié par l'analyse factorielle en composantes principales.

La projection des unités lithologiques sur le premier plan factoriel (73% de variance expliquée) fait apparaître quatre ensembles bien différenciés (figure 84):

- 1) les roches basiques et ultrabasiqes du PII;

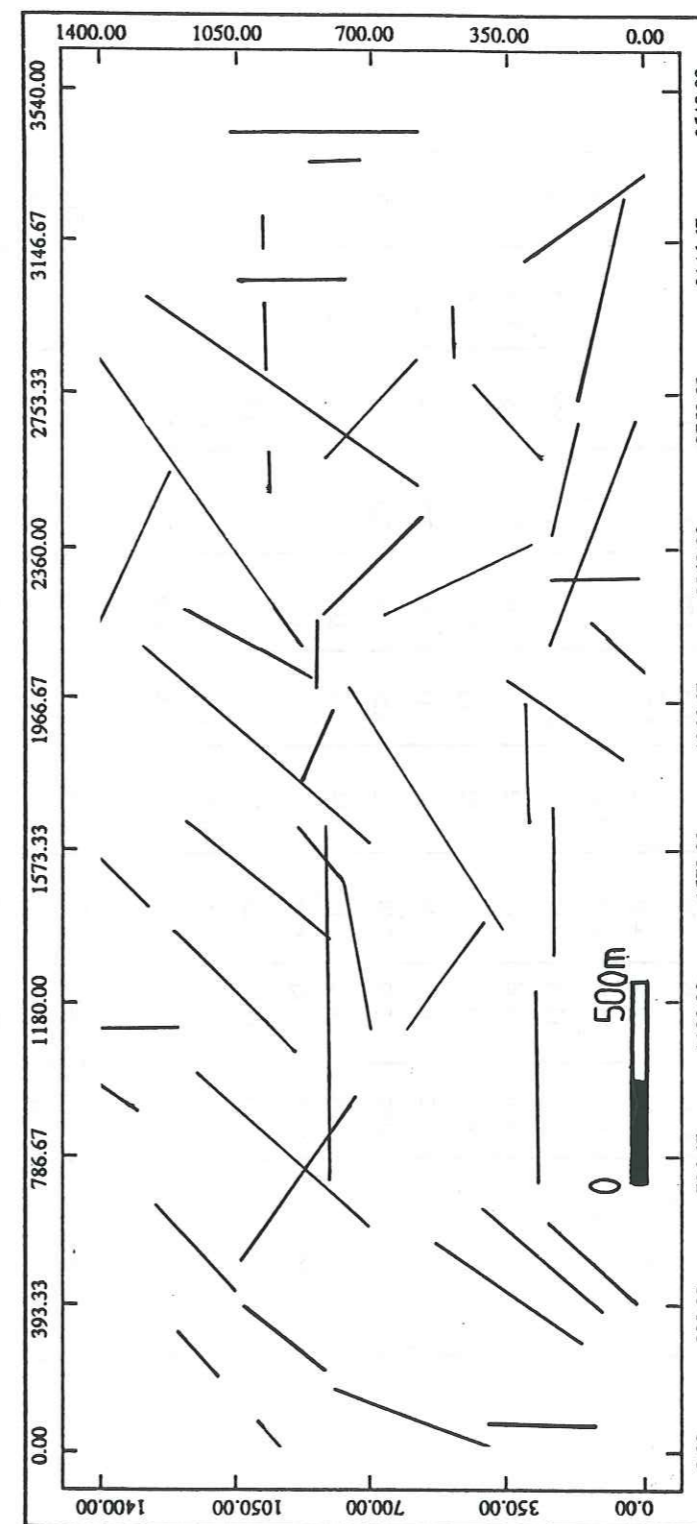


Figure 83: Carte synthétique des linéaments géochimiques, compilés à partir des cartes de teneurs brutes.

Eléments (%) Formations	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅
	r.v.	56.03	8.06	10.53	12.87	9.53	1.52	0.22	0.89	0.27
birb.	49.23	9.81	11.82	8.17	17.74	1.76	0.17	0.69	0.51	0.07
A2	78.32	11.24	2.92	0.76	1.45	1.53	2.94	0.73	0.03	0.05
A3	79.85	9.70	2.58	0.67	1.68	0.92	3.74	0.74	0.05	0.06
A4	81.38	9.02	2.39	1.13	1.01	1.41	2.49	1.03	0.07	0.06
A5	75.29	14.72	2.66	1.48	0.65	1.61	2.71	0.71	0.02	0.12
B	59.36	15.76	7.82	3.73	5.83	3.67	1.53	1.92	0.09	0.25
C1	82.43	8.38	2.36	0.94	0.75	1.72	2.78	0.80	0.07	0.09
C2	81.22	9.32	2.53	1.15	0.51	1.51	2.58	1.04	0.05	0.07
C3	76.89	12.38	2.59	0.90	0.78	2.50	2.93	0.87	0.03	0.08
C4	77.27	12.28	2.49	1.07	0.60	1.17	4.25	0.74	0.02	0.08
D	74.10	14.56	2.91	1.42	0.86	1.79	3.53	0.64	0.04	0.10
E1	78.89	10.31	3.01	1.52	1.69	1.67	2.58	1.17	0.03	0.10
E2	79.65	9.59	3.05	0.87	1.11	1.44	3.26	0.84	0.06	0.11
F	60.29	15.79	7.68	4.46	4.20	3.05	2.06	2.10	0.08	0.26
G1	69.69	9.12	7.45	3.84	2.19	2.92	1.70	2.64	0.08	0.34
G2	69.72	9.54	6.63	2.41	1.96	4.48	1.31	3.44	0.05	0.45
I	78.00	11.13	2.03	1.01	1.00	0.10	5.90	0.70	0.09	0.07
J1	77.00	12.21	2.15	0.00	1.00	0.10	6.90	0.67	0.10	0.06
J2	77.17	12.03	2.14	0.00	0.00	0.10	7.10	0.63	0.04	0.06
J3	76.26	11.23	3.14	2.00	1.00	0.10	6.40	0.76	0.07	0.11
J4	74.43	12.18	4.32	1.00	2.00	0.30	6.20	0.61	0.21	0.09
J5	65.59	13.48	4.27	2.62	10.13	2.00	3.20	0.90	0.15	0.16
J6	80.27	11.51	1.00	1.00	3.18	0.10	3.40	0.15	0.12	0.02
Dy	56.06	15.90	10.03	5.77	4.04	2.76	2.07	2.84	0.12	0.39

Tableau 16 : Médianes des teneurs par entité lithologique distinguée sur le terrain.

Eléments (ppm) Formations	Li	B	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Ba	Pb	Zr
	r.v.	26	2	233	1077	29	263	1	56	1	154	367	1
birb.	42	1	216	641	21	170	1	73	0	429	250	0	0
A2	4	31	17	105	0	1	0	8	16	108	2245	0	112
A3	8	15	23	128	1	1	2	5	19	120	1764	2	100
A4	7	20	22	148	1	2	3	8	26	110	1672	1	59
A5	8	15	55	142	1	1	1	6	10	65	1455	0	136
B	30	11	203	93	6	3	1	20	14	133	677	4	10
C1	7	20	19	82	0	0	1	14	36	56	1247	0	28
C2	6	15	10	131	0	3	2	9	20	58	1422	0	39
C3	6	9	22	146	1	2	1	8	27	84	981	0	90
C4	7	21	14	123	0	0	0	7	15	38	822	0	72
D	7	19	28	123	1	1	1	8	15	71	1214	0	40
E1	8	18	27	88	10	12	11	6	73	33	595	0	38
E2	3	23	19	92	1	1	0	15	12	37	560	0	37
F	42	12	196	87	7	5	1	13	8	91	398	4	4
G1	30	10	112	111	4	8	0	20	30	40	334	8	0
G2	28	7	40	128	3	5	1	28	12	46	201	1	13
I	6	6	0	17	1	0	1	37	0	6	600	0	197
J1	2	16	0	10	0	0	1	28	0	181	12903	0	263
J2	0	11	0	3	0	0	0	32	0	2	291	0	202
J3	8	9	0	11	3	1	2	78	0	7	958	0	159
J4	0	10	0	9	0	0	2	20	0	13	1250	0	194
J5	36	8	12	7	4	0	16	55	73	40	52	2	145
J6	0	33	3	4	0	0	2	16	0	3	358	0	17
Dy	50	9	183	160	8	12	0	15	7	164	578	5	22

Tableau 16 : Médianes des teneurs par entité lithologique distinguée sur le terrain. (Suite).

- 2) les roches basiques du PIII;
- 3) les roches acides du PIII;
- 4) les roches filoniennes quartzo-carbonatées.

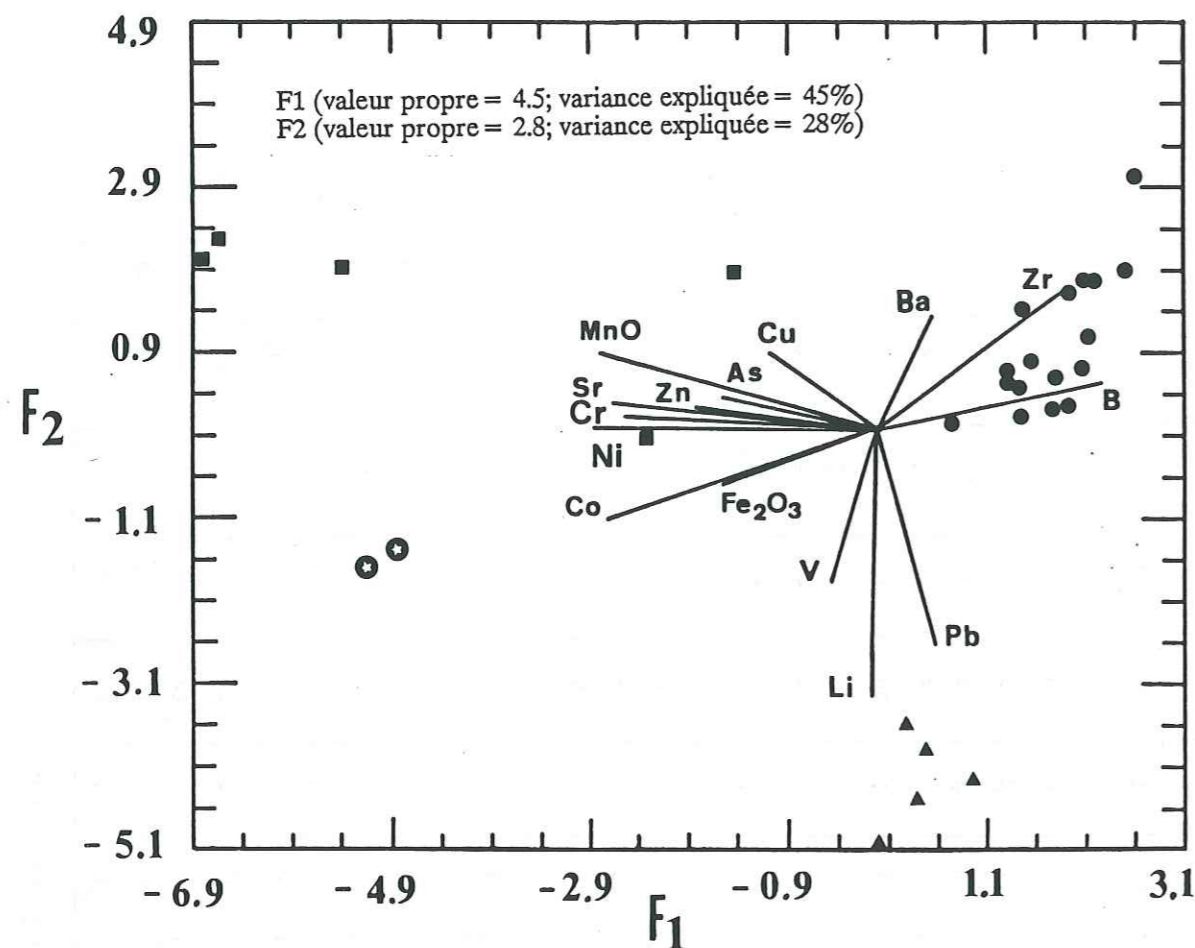


Figure 84: Analyse en composantes principales sur les médianes desteneurs des entités lithologiques.
 ☆ : groupe 1, roches basiques et ultrabasiques du PII; ▲ : groupe 2, roches basiques du PIII;
 ● : groupe 3, roches acides du PIII; ■ : groupe 4, roches filoniennes quartzo-carbonatées.

En effet:

- le groupe des roches basiques et ultrabasiques du PII se distinguent par un fond géochimique élevé en Co, Cr et Ni; et par un déficit en B (facteur 1).
- Le groupe des roches basiques du PIII se caractérise par un fond géochimique riche en Pb, Li, V; et par un déficit en Ba, Zr (facteur 2).
- Les roches acides du PIII, présentent un fond géochimique riche en B, Zr, Ba; et en même temps déficitaire en Co, Ni, Cr (facteur 1) et en Li, Pb (facteur 2).
- Le groupe des roches filoniennes quartzo-carbonatées se distingue par une richesse en Sr, Cu, As (facteur 1); un déficit en B, Zr, Ba (facteur 1) et en Li, Pb (facteur 2).

VIII.4.4. Conclusion:

L'étude statistique élémentaire a permis d'examiner la structure des données élément par élément. Ceci facilite l'interprétation de l'analyse multivariée en effectuant une transformation adaptée des données.

Les associations d'éléments, obtenues à partir de la matrice de corrélation révèlent un contrôle de la lithologie sur le comportement des teneurs. Ce résultat est confirmé par la cartographie des teneurs brutes.

L'analyse factorielle en composantes principales sur les médianes des entités géologiques distinguées sur le terrain, aboutit à une classification simple des données en quatre groupes lithologiques principaux. Cette simplification de la structure des données, rend possible l'accès aux traitements statistiques multivariés sur l'ensemble des données, sans perdre l'information géologique initiale, précieuse pour l'interprétation et l'exploitation des résultats de ces traitements.

VIII.5. MODELISATION DE L'INFLUENCE DE LA LITHOLOGIE SUR LA VARIATION DES TENEURS

VIII.5.1. Analyse discriminante:

Les principes mathématiques de cette méthode sont exposés dans le chapitre VI. Le but de cette analyse est l'élaboration d'un modèle factoriel simple, qui explique le mieux les variations de teneurs associées à la lithologie. Cette information géologique étant désormais simplifiée en quatre groupes principaux grâce à l'analyse en composantes principales sur les médianes. Une analyse discriminante appliquée à la totalité des analyses livre une série de facteurs (de formes linéaires) F1, F2, F3 («avant rotation»), qui caractérise le mieux le nuage des analyses dans leur espace initial des éléments à p=34 dimensions. Une rotation par rapport à ce repère permet de visualiser l'influence de certains éléments et définit un nouveau repère (F'1, F'2, F'3), qui permet d'interpréter la signification géologique des facteurs F1, F2, F3. Cette analyse discriminante est effectuée sur les valeurs logarithmiques des teneurs, à l'aide du logiciel de statistiques "SPSS" (Statistical Package of Social Sciences), et en adoptant la métrique de Mahalanobis.

VIII.5.1.1. Résultats avant rotation:

Les corrélations entre facteurs (ou fonctions) obtenus et éléments initial sont présentés dans le tableau 17. Le premier facteur (F1) représente 61% de variance expliquée, il associe les éléments Co, Fe2O3, V, MnO et Zn (association d'éléments à caractère basique), qu'il oppose au Ba. Le deuxième facteur (F2) avec 28% de variance expliquée, oppose les éléments Ni et Cr aux éléments Li et Pb. Le troisième facteur (F3) avec 10% de variance expliquée associe les éléments Cu, Sr et As.

	F1 (61%)	F2 (28%)	F3 (11%)
Co	.72173*	.14777	-.27945
Fe2O3	.54189*	-.14464	.03140
V	.51392*	-.23624	-.08432
MnO	.37489*	.29196	.35423
Zn	.33039*	.12309	-.22772
Ba	-.23517*	-.15242	.00518
Ni	.45522	.64146*	-.18719
Cr	.13567	.49503*	-.25078
Li	.36211	-.46278*	-.26833
Pb	.27304	-.37108*	.23488
Cu	.00714	.22987	.44493*
Sr	.18862	-.04424	.35217*

Tableau 17: Matrice de corrélation entre les facteurs et les variables.

La projection de l'ensemble des échantillons dans le plan F1-F2 (figure 85), qui correspond à 90% de variance expliquée, montre que le premier facteur discrimine le groupe 1 (roches basiques du PII), le groupe 4 (roches filoniennes) et une partie du groupe 3 (roches acides du PIII) d'une part, et d'autre part le groupe 2 (roches basiques du PIII) et le groupe 3 (roches acides du PIII). Le deuxième facteur discrimine surtout le groupe 2 des groupes 1 et 4. Le troisième facteur (F3), discrimine essentiellement le groupe 4 en l'opposant au groupe 1.

Ces observations sont complétées par les facteurs-scores (coordonnées en repère des facteurs) au niveau des médianes des quatre groupes (tableau 18).

Groupe	F1	F2	F3
1	2.35076	-1.85552	-.08851
2	1.38625	1.21519	-.69778
3	-1.59228	-.09470	-.11812
4	.26567	-.52204	1.95854

Tableau 18: Coordonnées du barycentre (moyenne) de chaque groupe dans l'espace F1-F2-F3.

La reclassification des échantillons dans le modèle factoriel de l'analyse discriminante (Tableau 18), montre la validité des groupements effectués à partir des médianes, avec 86% de bonnes affiliations initiales.

Groupe initial	N	Groupe estimé			
		1	2	3	4
Groupe 1	177	135	20	13	9
		76.3%	11.3%	7.3%	5.1%
Groupe 2	402	10	359	15	18
		2.5%	89.3%	3.7%	4.5%
Groupe 3	643	4	13	592	34
		.6%	2.0%	92.1%	5.3%
Groupe 4	190	25	22	21	122
		13.2%	11.6%	11.1%	64.2%
éch. non classés	14	1	5	5	3
		7.1%	35.7%	35.7%	21.4%

Pourcentage de classification initiale bonne: 86%

Tableau 19: Comparaison de la classification par analyse discriminante avec la classification initiale de terrain.

VIII.5.1.2. Résultats après rotation:

Les résultats obtenus après rotation montrent une redistribution de certains éléments et un rééquilibrage du taux de variance expliquée, essentiellement au détriment du facteur 2, qui passe de 29% à 22% en faveur du facteur 3 qui passe de 10% à 17%. Le taux de variance expliquée par le facteur 1 reste pratiquement inchangé à 61%. La matrice de rotation varimax est donnée dans le tableau 20, alors que la matrice de corrélation entre les facteurs et les éléments, obtenue après rotation est donnée dans le tableau 21.

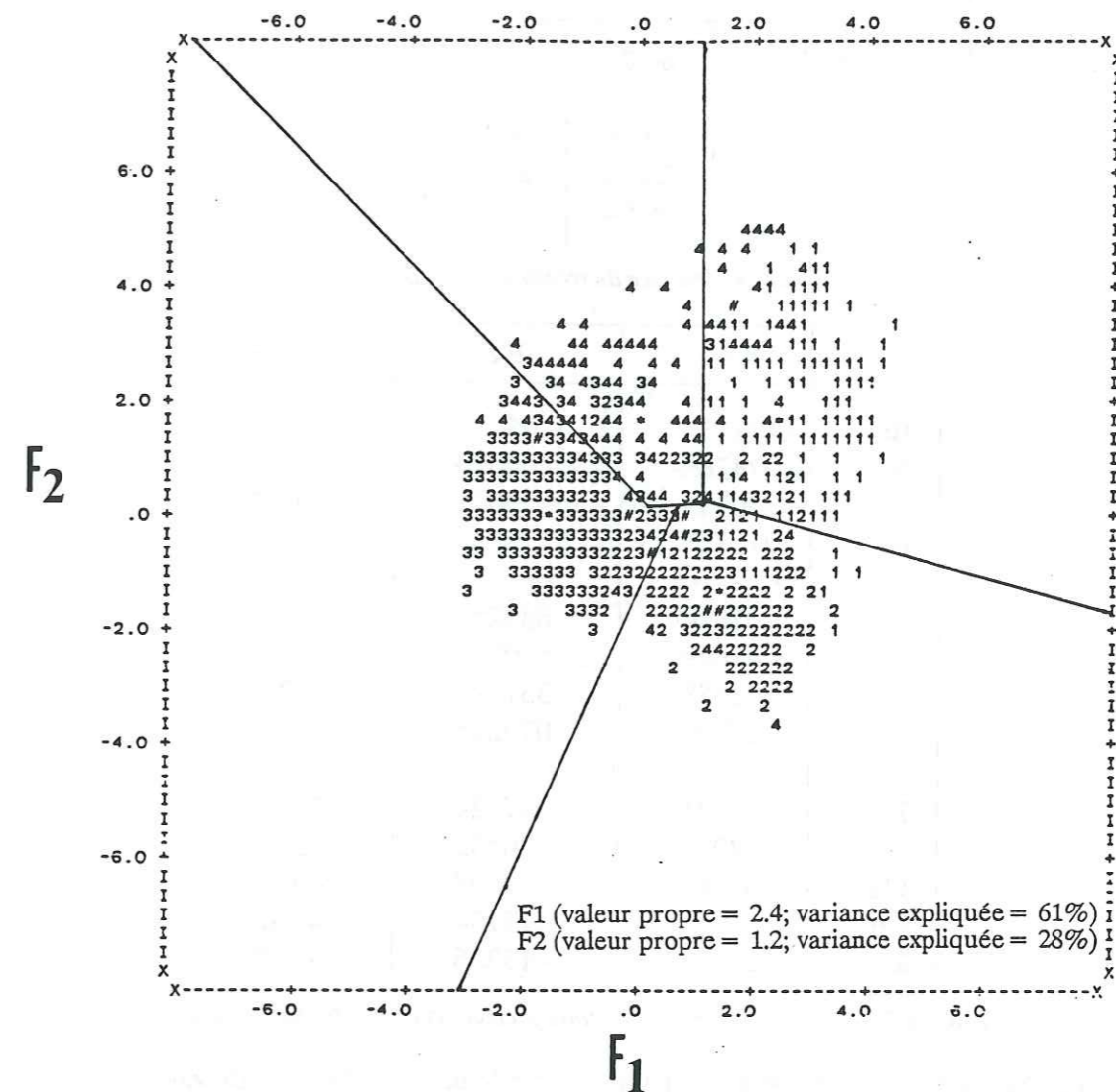


Figure 85: Projection des échantillons dans le plan F1-F2 de l'analyse discriminante, avant rotation.

	F'1	F'2	F'3
% VARIANCE	60.72	22.55	16.73
F1	.99639	.00836	-.08452
F2	.05590	-.81380	.57846
F3	.06394	.58109	.81132

Tableau 20: Matrice de rotation Varimax.

	F'1	F'2	F'3
Ba	-.42113*	-.05113	-.35834
MnO	.37426*	.04070	.28965
V	.34058*	.20085	.02307
Fe2O3	.27685*	.25339	-.00673
Pb	.02684	.68825*	.28166
Ni	.03699	-.51931*	.25775
Cr	.01688	-.33709*	.27457
As	-.03200	.07921*	.05871
Li	.16871	-.07924	-.56979*
Sr	.27939	.20482	.53384*
Cu	.04781	.10698	.49349*
Co	.40344	-.17134	-.40563*
Zn	-.00957	-.13286	-.35108*

Tableau 21: Matrice de corrélation entre facteurs et éléments après rotation.

La redistribution des éléments se manifeste par le passage du Co et du Zn du facteur 1 au facteur 3 et par l'échange du Li et de As entre les facteurs 2 et 3.

La projection des échantillons dans le plan F'1-F'2, qui représente maintenant 83% de variance expliquée (figure 86), montre que le facteur F'1 discrimine bien les roches acides du PIII d'une part et les roches basiques d'autre part. Le facteur F'2 discrimine au sein des roches basiques celles du PII de celles du PIII.

VIII.5.2. Cartes des facteurs-scores avant et après rotation:

Ces cartes sont présentées en annexe 4. Elles montrent une bonne régionalisation des facteurs obtenus par l'analyse discriminante, elles sont réduites et compilées sur la figure 87, pour faciliter les comparaisons.

La répartition géographique du facteur 1 est pratiquement la même avant et après rotation. Elle correspond dans les deux cas aux affleurements des roches basiques du PII et du PIII, qu'elle met en contraste avec les zones d'affleurement des roches acides. Ce facteur traduit donc fondamentalement le caractère pétrographique de basicité souligné par les éléments Fe2O3, V et MnO.

La cartographie des scores du facteur 2, retrace avant rotation les affleurements de roches basiques du PII, avec une importante corrélation au éléments Cr et Ni opposés au Pb et Li; la rotation se traduit pour ce facteur par le remplacement du Li par As, élément à faible corrélation avec le facteur 2 qui souligne maintenant les affleurements des roches basiques du PIII, mettant ainsi en évidence le rôle important du Pb dans la discrimination de ces roches par rapport aux roches basiques du PII.

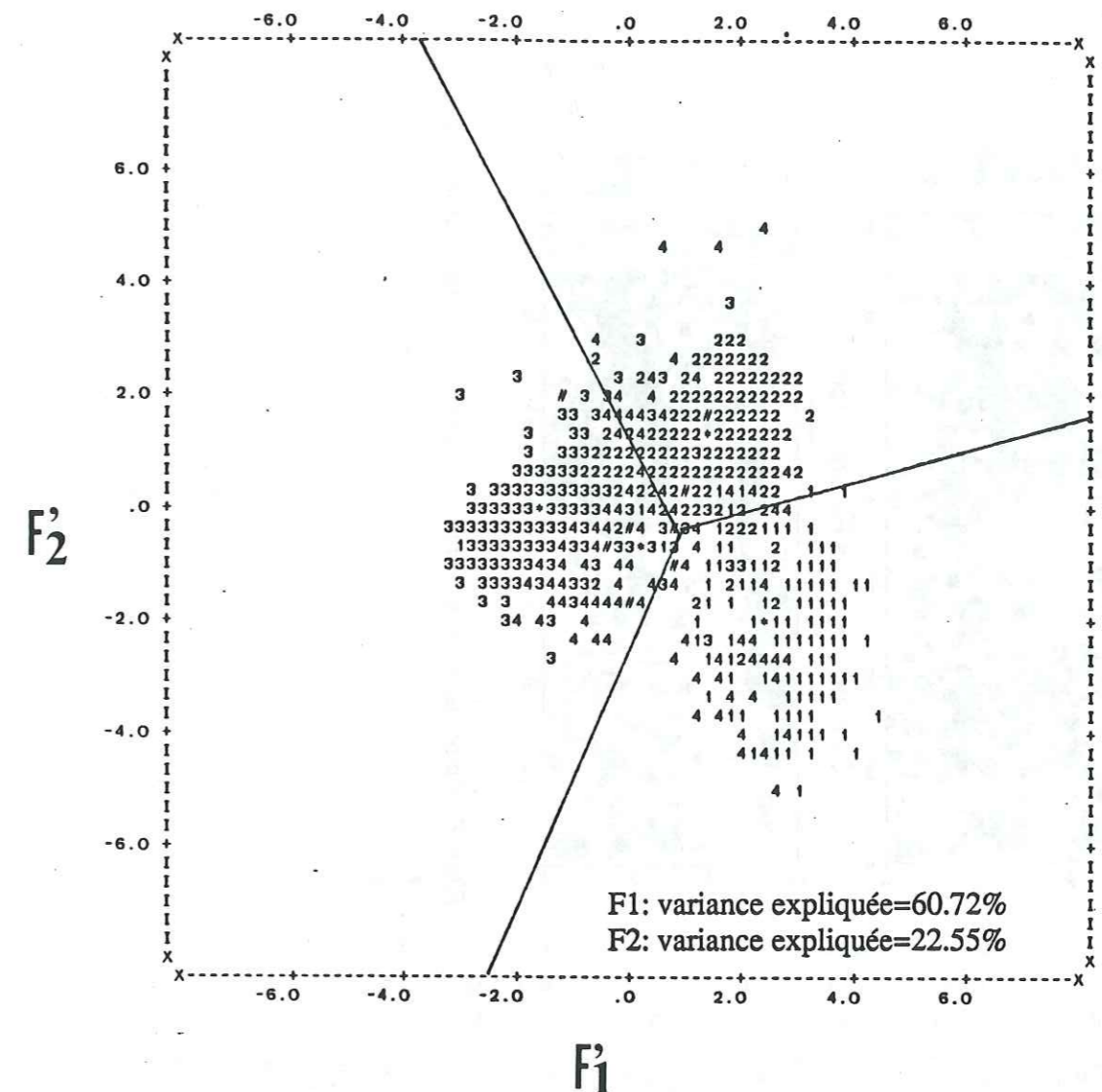


Figure 86: Projection des échantillons dans le plan F'1-F'2 de l'analyse discriminante, obtenus après rotation.

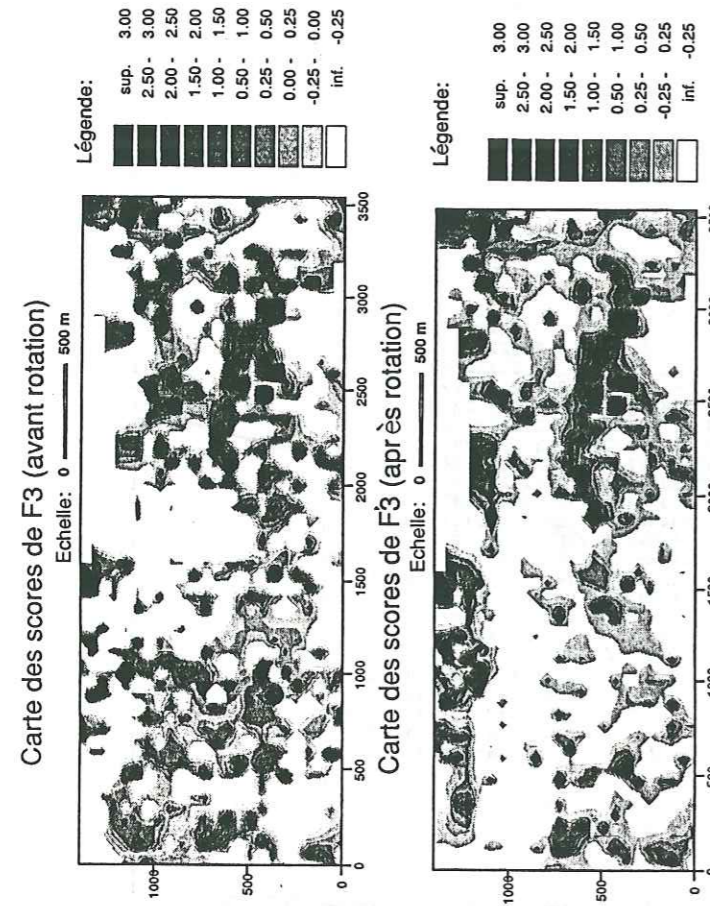
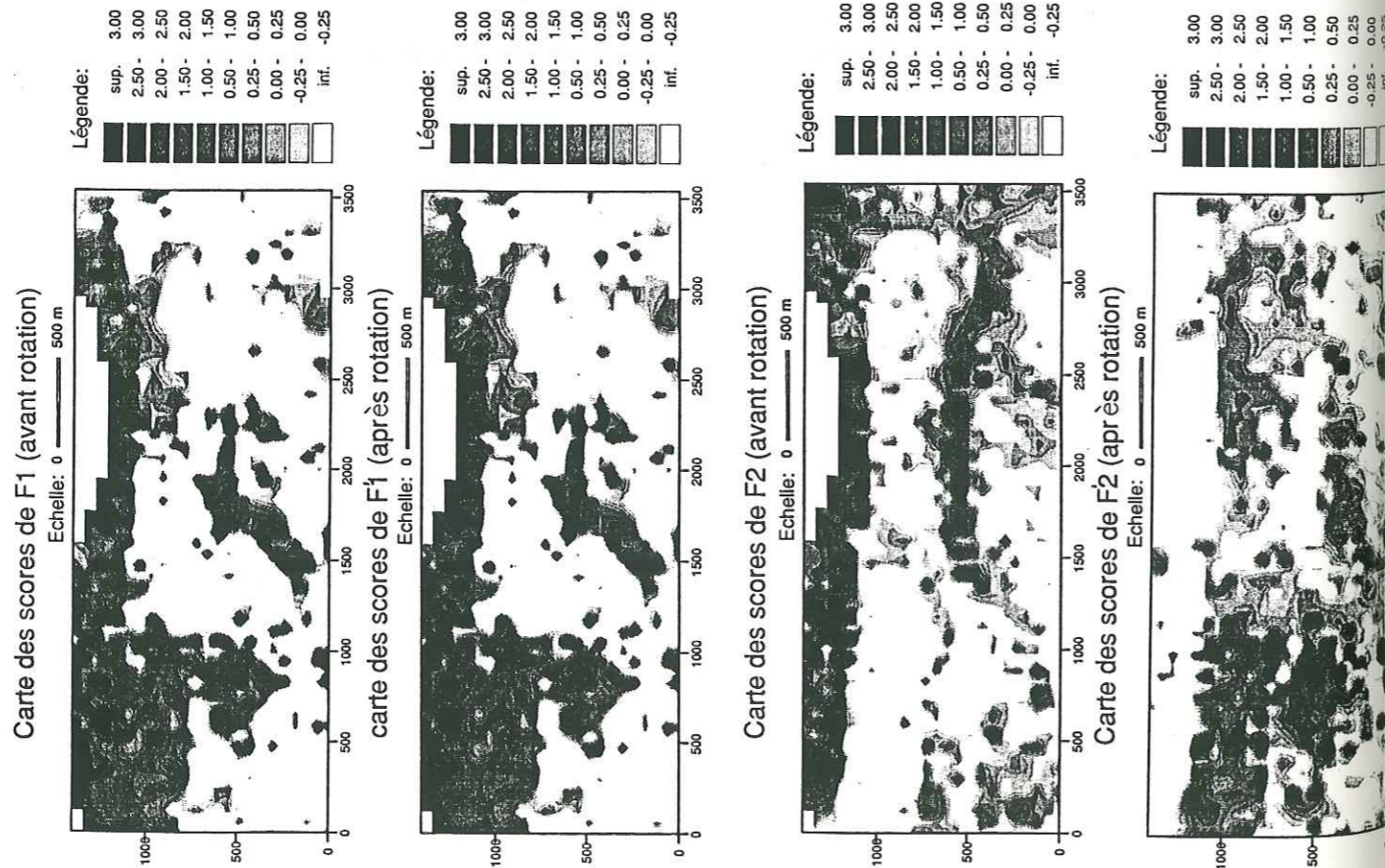


Figure 87: Cartes des facteurs scores de l'analyse discriminante, avant et après rotation.

La cartographie du facteur 3, montre une répartition assez disparate des scores avant rotation, correspondant aux éléments Cu, Sr et As; après rotation, ces éléments jouent toujours un rôle prépondérant, mais ils sont cette fois opposés aux éléments Li, Co et Zn, caractérisant ainsi les roches filoniennes quartzo-carbonatées du groupe 4. On obtient donc une meilleure adéquation des scores du facteur 3 avec la lithologie de ces roches.

VIII.6. SELECTION DU SIGNAL GEOCHIMIQUE ANOMAL:

L'analyse descriptive de la structure des données géochimiques permet de proposer un modèle statistique de variation du fond géochimique pour chaque élément. Ce modèle s'appuie à la fois sur les observations de terrain et sur l'information analytique multi-élémentaire. La performance de ce modèle peut être mesurée par le taux important (86%) d'échantillons correctement affiliés à l'un des groupes lithologiques distingués.

En revanche le fond géochimique étant expliqué par le modèle factoriel de l'analyse discriminante. Il suffira donc de retrancher la part de ce fond géochimique par régression factorielle pour faire apparaître les anomalies discordantes.

VIII.6.1. Régression factorielle linéaire:

Une régression linéaire multiple est effectuée pour chacun des éléments Cr, Co, Ni, Cu, Pb et As; sur les trois facteurs qui constituent le modèle statistique du fond géochimique. Nous aboutissons pour chaque élément à une décomposition en teneurs estimées (expliquées par le modèle factoriel) et en teneurs résiduelles (anomales).

VIII.6.2. Comparaison des composantes de variation des teneurs:

On peut apprécier la qualité des corrections obtenues par la régression factorielle, sur les diagrammes de corrélation entre les composantes de variation des teneurs notamment les diagrammes: teneurs brutes vs teneurs estimées (annexe 5), ces diagrammes sont présentés avec des axes standardisés (centrés et réduits), permettant des comparaisons entre les différentes variables utilisées et surtout un découpage de l'intervalle de variation en fonction de l'écart-type de la variable considérée. Ce découpage permet de fixer facilement les seuils d'anomalie sur les diagrammes. A titre d'exemple nous avons tracé des seuils d'anomalie $m+2\sigma$, ce qui permet d'examiner l'importance des améliorations apportées par la correction factorielle. Ces seuils partagent le nuage des échantillons en quatre domaines correspondant:

- aux anomalies élevées mises en évidence avant et après correction;
- aux anomalies initiales qui disparaissent après régression;
- aux anomalies nouvelles caractérisées au niveau des teneurs résiduelles;
- aux teneurs de fond géochimiques qui n'atteignent pas le seuil de coupure fixé avant ou après régression.

Les diagrammes binaires de l'annexe 5, s'apprennent très bien à la comparaison des différentes composantes de la variation des teneurs géochimiques et de l'évolution de celles-ci en fonction des facteurs-scores du modèle factoriel obtenu par analyse discriminante, par le système d'axes adopté. Notons essentiellement la corrélation positive des teneurs brutes des éléments avec les teneurs estimées, confirmant la validité du modèle factoriel pour expliquer le fond géochimique.

VIII.6.3. Cartes géochimiques des teneurs estimées et des teneurs résiduelles:

Ces cartes sont présentées sur la figure 88, pour les éléments: Cr, Co, Ni, Cu, Pb et As. Elles sont accompagnées à titre de comparaison, des cartes des teneurs estimées. Les classes de valeurs adoptées pour la présentation de ces cartes respectent un découpage en fonction de la moyenne et de l'écart-type des valeurs reportées, ceci permet la comparaison entre la répartition géographique du fond géochimique (modélisé par les teneurs estimées) et la composante anormale (représentée par les teneurs résiduelles) d'une part et d'autre part la comparaison de ces composantes entre différents éléments. L'examen de ces documents, montre que les teneurs estimées des éléments Cr, Co, Ni, Pb et As retracent des zones d'affleurement caractérisant ainsi le fond géochimique d'une lithologie particulière. Par contre, les teneurs résiduelles présentent une répartition géographique séquante sur les facies lithologiques et ce sont elles qui présentent un intérêt en prospection.

Pour le Cr, les teneurs résiduelles présentent une prépondérance géographique dans la partie NW, séparée du reste du secteur par un linéament NE-SW, les anomalies significatives pour cet élément restent cependant ponctuelles.

Les teneurs résiduelles du Co ne présentent pas une ségrégation géographique aussi nette que celle présentée par le Cr, néanmoins, les anomalies significatives sont plus abondantes dans la partie NW du secteur, notamment au niveau des affleurement de roches basiques du PII, en dehors desquels il faut noter une importante anomalie dans le sud du secteur et une autre à l'est, dans la zone d'affleurement des roches du PIII.

Les teneurs estimées du Ni, montrent un linéament qui part de l'extrémité orientale de l'affleurement central des roches basiques du PII, et se dirige vers le sud dans une direction N140°E. Ce linéament se retrouve au niveau de la carte des teneurs résiduelles.

La répartition géographique des teneurs estimées du Cu semble ponctuellement liée aux roches basiques, elle est particulièrement développée au niveau du linéament N140°E, cité ci-dessus. Les teneurs résiduelles présentent une répartition bien contrastée, avec des anomalies ponctuelles qui soulignent des linéaments N20°E, N100°E et notamment le linéament N140°E de la partie est du secteur.

Pour l'élément Pb, la répartition spatiale des teneurs résiduelles est plus prononcée dans la partie NW du secteur, plus riche en anomalies ponctuelles. La limite de cette zone avec le reste du secteur trace un linéament NE-SW.

Les teneurs estimées de As présentent une répartition géographique assez régulière sur une grande étendue du secteur. Cette répartition retient particulièrement l'attention par le très faible fond géochimique en cet élément au niveau des roches basiques du PII. La répartition des teneurs résiduelles est plus dispersée, les anomalies sont souvent ponctuelles ou alors légèrement orientées N20°E. les limites entre les zones d'affleurement des roches du PII et celles du PIII (failles N100° à N110°E), sont soulignées par un important contraste du niveau des teneurs résiduelles entre les deux zones. Le linéament N140°E dans la partie orientale de la carte, est souligné par de très faibles teneurs résiduelles en As.

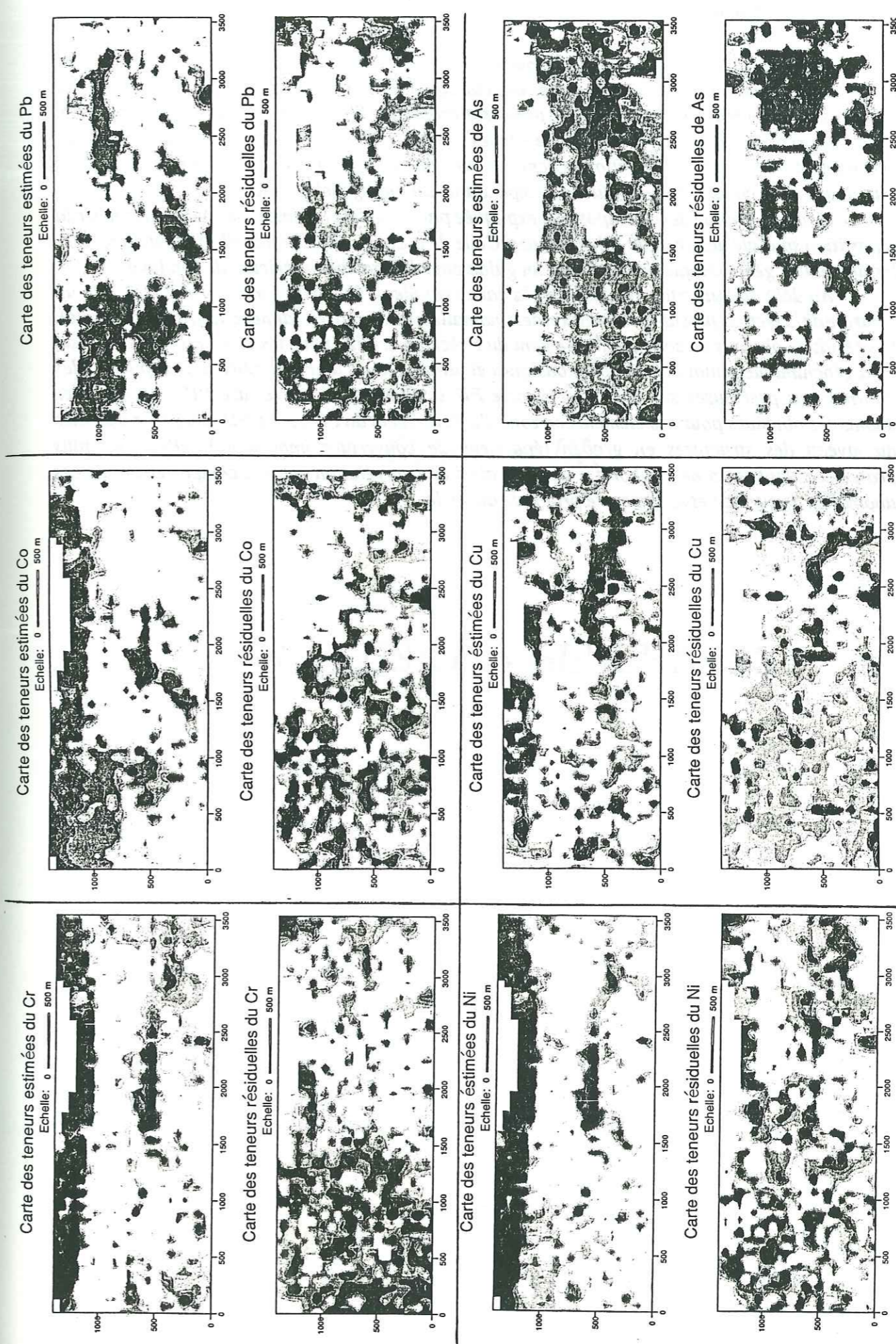


Figure 88: Cartes géochimiques des teneurs estimées et des teneurs résiduelles, regroupées, (cf. annexe 6 pour légende)

tel-00708240, version 1 - 14 Jun 2012

VIII.7. Conclusions:

Une modélisation du fond géochimique a été obtenue par analyse statistique discriminante sur la totalité des échantillons. Le pourcentage des classifications initiales bonnes (86%), apporte une confirmation géochimique du découpage lithostratigraphique retenu sur le terrain (cf. chapitre II).

La régression factorielle effectuée sur les teneurs brutes, par rapport au modèle obtenu, permet de décomposer l'information géochimique en une composante liée à la lithologie (teneurs estimées) et une composante résiduelle indépendante du fond géochimique.

La cartographie de la composante expliquée par le modèle (estimée) permet de retrouver la répartition spatiale des groupes lithologiques. Celle de la composante résiduelle permet de repérer les anomalies géochimiques, constituant un guide pour les travaux ultérieurs de sondage.

Au delà du but strictement minier, la cartographie de la composante anormale, montre un contrôle de la tectonique sur la répartition des anomalies (cf. chapitre V, annexe 6, carte géologique). Les résultats obtenus en zone d'affleurement du Précambrien III, pour les éléments présentant un fond géochimique plutôt lié aux roches basiques et ultrabasiques du Précambrien II, apportent des informations précieuses sur le rapport: socle PII sousjacent et couverture PIII. En effet, les anomalies obtenues pour ces éléments en zone d'affleurement du PIII, sont atténuées voir absentes au niveau des structures en graben (épaisseur de couverture importante); elles sont plus prononcées dans les zones en horst, indiquant ainsi une corrélation entre le comportement de ces anomalies de surface et la structure profonde du socle.

Chapitre IX:

CONCLUSIONS GENERALES

CONCLUSIONS GENERALES:

La prospection géochimique minière fait appel à un grand nombre d'analyses multi-élémentaires. L'exemple traité dans ce travail correspond à des données lithogéochimiques de surface avec une densité très élevée (13000 échantillons sur 10 Km² de terrain prospecté dans ce travail). La spectrométrie d'émission qui a été utilisée pour ces analyses, est une des méthodes les plus adaptées dans ce cas, car elle permet le dosage rapide et simultané de 34 éléments majeurs et en traces.

Le but initial de ce travail était l'exploitation de ces données de prospection géochimique minière, recueillies dans le district de Tamdrost-Ambed dans la boutonnière précambrienne de Bou Azzer-El Graara, par des méthodes de traitement statistique. Une démarche critique nous a permis d'étudier d'abord la qualité de ces données. L'insertion des échantillons références toutes les 200 analyses, nous a permis d'obtenir une quantification de la précision analytique et la mise au point d'une méthode de correction pour éliminer la part de variation due à la dérive analytique. Cette procédure de correction a été appliquée en amont du traitement statistique proprement dit. Elle peut être appliquée en routine aux analyses effectuées à Bou Azzer, par l'intégration d'un logiciel approprié.

Les données corrigées sont ensuite traitées par différentes méthodes statistiques:

1) La méthode non-conventionnelle des "box and whiskers" permet l'analyse de l'information géochimique indépendamment de tout modèle de distribution a priori. L'application de cette méthode nous a livré une description de la structure des données élément par élément. La cartographie des classes de teneur définies a permis de présenter les variations spatiales des teneurs, notamment les anomalies positives intéressant la prospection. Une carte synthétique des linéaments géochimiques est réalisée par compilation des résultats obtenus pour chaque élément. Des cartes d'anomalies positives multi-élémentaires sont aussi établies en regroupant les anomalies élémentaires par répartition géographique proche: (Cr, Co, Ni); (Pb, Zn, Cu); (Ba, Sr, As). Ces cartes montrent un contrôle de la lithologie et de la tectonique sur la répartition des anomalies.

2) La seconde étape des traitements, basée sur des méthodes statistiques classiques multivariées, est effectuée dans le but d'affiner l'analyse de variation des teneurs tenant compte de la globalité de l'information géochimique simultanément. Ces techniques sont fondées sur un modèle de distribution normale. Les paramètres statistiques élémentaires déduits de cette analyse nous montrent une prédominance de distributions de type log-normal. Ceci nous amène à effectuer une transformation des données en valeurs logarithmiques préalablement à l'analyse multivariées.

L'analyse des corrélations entre éléments révèle une association principale d'éléments à caractère basique: Fe, V, Cr, Co, Ni. La faible valeur de nombreux coefficients de corrélation dénote d'importantes fluctuations qui s'expliquent par la diversité lithologique des données analysées. Une cartographie des teneurs brutes est prescrite à ce stade en tenant compte des caractéristiques statistiques, elle révèle un contrôle important du comportement des teneurs par la lithologie.

Une carte géologique détaillée au 1/4000e du district a été réalisée dans le but d'élaborer un support géologique à l'interprétation du traitement des données géochimiques. L'influence de la lithologie sur la variation des teneurs est étudiée par analyse factorielle en composantes principales, sur les médianes des teneurs des 32 entités géologiques distinguées sur le terrain. Elle abouti à un regroupement de ces entités en quatre grands ensembles lithologiques:

- 1) les roches basiques et ultrabasiques du PII;
- 2) les roches basiques du PIII;
- 3) les roches acides du PIII;
- 4) les roches filoniennes quartzo-carbonatées.

Nous avons donc retenu ce découpage qui simplifie la structure des données, rendant possible l'accès aux traitements statistiques multivariés, sur l'ensemble des données, sans perte de l'information géologique initiale.

L'utilisation de l'analyse discriminante -technique qui prend en compte la classification a priori des données- est adoptée dans le but d'intégrer l'information géologique. Une analyse discriminante a donc été effectuée sur l'ensemble des données en tenant compte des quatre groupes lithologiques obtenus par analyse en composantes principales. Elle conduit à un modèle factoriel du fond géochimique qui explique le mieux les variations de teneurs, liées à la lithologie.

L'information géochimique est ensuite décomposée par régression factoriel sur le modèle de l'analyse discriminante. On distingue alors une composante de la variation des teneurs, expliquée par le modèle factoriel, liée à l'influence de la lithologie et une composante résiduelle indépendante de l'erreur analytique et de l'influence de la lithologie. La cartographie de cette composante résiduelle (anomale), permet de repérer les anomalies géochimiques (indices miniers), constituant un guide pour les travaux ultérieurs de sondages. Elle révèle aussi un contrôle de la tectonique sur la répartition des anomalies.

Les résultats obtenus en zone d'affleurement du Précambrien III, pour les éléments présentant un fond géochimique plutôt lié aux roches basiques et ultrabasiques du Précambrien II, apportent des indications particulièrement intéressantes sur le rapport: socle PII et couverture PIII. En effet, les anomalies obtenues pour ces éléments en zone d'affleurement du PIII, sont corrélées aux structures en horst ou graben de la couverture et donc à l'épaisseur de celle-ci. Ce résultat élargit la portée

de l'outil de prospection géochimique développé ici et permet de valoriser d'avantage les données géochimiques de surface pour lesquelles j'ai déjà proposé une méthode de correction.

Cette approche de l'exploitation des données géochimiques de prospection, peut être appliquée à d'autres prospectes, ce qui permettra de mettre à l'épreuve cet outil de prospection. Par ailleurs, la même démarche peut servir à l'analyse objective des données géochimiques en vue des corrélations à l'échelle régionale.

Au delà du but initial, l'étude géologique a été étendue au Précambrien Terminal (III) de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara, dont les résultats sont situés dans le cadre géodynamique de la suture panafricaine.

L'étude lithostratigraphique et pétrologique de l'ensemble volcanogène du PIII dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara a permis de rattacher ces matériaux à un magmatisme calco-alcalin et de proposer une stratigraphie détaillée de cet ensemble. Il sera intéressant de voir dans quelle mesure cette lithostratigraphie du Précambrien Terminal (PIII), peut être étendue à des régions où affleurent des séries comparables, comme le Siroua, le Saghro, le Kerdous, l'Ougarta, Damrane, l'Ahnet et l'Adrar des Iforas.

L'analyse des déformations subies par l'ensemble volcanogène du PIII, a permis de caractériser un contexte géodynamique de coulissement-extension pendant sa mise en place.

Les résultats de l'étude pétrologique et structurale sont discutés par rapport aux phases panafricaines, antérieures à la mise en place des terrains du PIII dans la même région et par rapport aux événements géodynamiques contemporains connus dans les régions voisines. Il en découle un modèle géodynamique, qui explique l'activité volcanique et tectonique du PIII par une dynamique globale d'interférence entre les derniers stades de la collision oblique tardi-panafricaine dans la chaîne Trans-Saharienne et les premiers stades de l'ouverture du proto-Atlantique sur le bord occidental du craton ouest-africain.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques:

- Ahrens, L.H. 1954. Lognormal distribution of the elements. *Geoch. Cosmochim. Acta*, 5, p. 49-73, 6, p. 121-131.
- Angelier, J. et Mechler, P. 1977. Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisables en tectonique et en sédimentologie: la méthode des dièdres droits. *Bull. Soc. Géol. France*, (7), t. XIX, no. 6, p. 1309-1318.
- Angelier, J. 1979. Néotectonique de l'arc égéen. *Thèse doc. état, ParisVI*, 417p.
- Austria, V. and Chorc, C. Y. 1976. A study of the application of regression analysis for trace element data from stream sediments in New Brunswick. *Jour. Geoch. Explor. Vol. 6, no. 1/2*, p. 212-232.
- Azizi Samir, M. R. 1983. Contribution à l'étude lithostratigraphique, pétrographique et tectonique du secteur Guelb Tassaout et à l'étude de la minéralisation cuprifère Adoudounienne, (Anti-Atlas, Bleida), Maroc. *Mem. D.E.A. Univ. Marrakech*, 41 p.
- Azizi Samir, M. R. 1986. Méthodes statistiques de contrôle de la précision et de correction des analyses géochimiques. Comptes-rendus du congrès: Application de techniques mathématiques, physiques et chimiques à la géologie minière. Marrakech, Maroc, (rapport inédit).
- Azizi Samir, M. R., Ferrandini, J. et Tane, J. L. 1986. Mise en évidence d'un épisode distensif au Précambrien III dans la région de Bou-Azzer (Anti-Atlas central, Maroc). *11è Réunion. Annu. Sci. Terre, Clermont-Ferrant*, p. 6.
- Azizi Samir, M. R., Ferrandini, J. et Tane, J. L. 1990. Tectonique et volcanisme tardi-Pana-Africains (580-560 Ma) dans l'Anti-Atlas central (Maroc). Interprétation géodynamique à l'échelle du NW de l'Afrique. *Jour. Afric. Earth Sci., Vol. 10, no. 3*, p. 549-563.
- Baouch, S. 1984. Etude des ignimbrites et roches associées du massif de Tircht (Haut-atlas occidental, Maroc). Contribution à l'étude des relations "Volcanisme-plutonisme du PIII". *Thèse 3ème cycle, Nancy*, 144p.
- Bachacou, J., Masson, J. P. et Miller, C. 1981. Manuel de la programmation statistique. *AMANCE. INRA*, p. 516.
- Barbier, J. et Lecuyer, P. 1976. Une technique de cartographie automatique à partir de données géochimiques. *Résumés scientifiques du BRGM. 1975*, p. 54.
- Barbier, J. et Wilhelm, E. 1978. Superficial geochemical dispersion around sulphide deposits: some examples in France. *Jour. Geoch. Explor., Vol. 10*, p. 1-39.
- Barbier, J. 1979. Images géochimiques du socle hercynien dans le massif français. *Bull. BRGM., (2), II, 2-3*, p. 175-194.

- Benzecri, J. P. 1973.** Analyse des données: 1- La taxinomie, 2- Analyses des correspondances. *Dunod. Ed., Paris, 2vol., 619 p. et 615 p.*
- Benziane, F. 1974.** Etude pétrographique et géochronologique des granites de la boutonnière précambienne d'Ifni (Maroc). *Thèse 3ème Cycle, Grenoble, 122 p.*
- Benziane, F., Jeannette, D. et Yazidi, A. 1981.** Lihostratigraphie et datation du Protérozoïque de la boutonnière d'Ifni (Anti-Atlas). *Prec. Res., 14, p. 363-378.*
- Benziane, F., Prost, A. E. et Yazidi, A. 1983.** Le passage du Précambrien au Cambrien précoce volcanique et sédimentaire de l'Anti-Atlas oriental; comparaison avec l'Anti-Atlas occidental. *Bull. Soc. Géol. France, XXV, 4, p. 549-556.*
- Bertin, J. 1967.** Sémiologie graphique. *Mouton - Gauthier - Villars Ed., Paris, LaHaye, p.431.*
- Billaud, P. 1977.** Structures tectoniques panafricaines du gisement de cuivre de Bleida (Anti-Atlas, Maroc). *Thèse 3ème cycle, Montpellier, 90 p.*
- Black, R., Caby, R., Moussine-Pouchkine, A., Boyer, R., Bertrand, J. M. L., Boullier, A. M., Fabre, J. and Lesquer, A. 1979.** Evidence for late Precambrian plate tectonics in West Africa. *Nature, 278, 223-227.*
- Black, R. 1980.** Precambrien of West Africa. *Episodes, Ottawa, 4, 3-8.*
- Black, R. 1980.** The Pan-African event in the geological framework of Africa, p. 6-16, *Pangea, Paris.*
- Bodinier, J. L., Dupuy, C. et Dostal, J. 1984.** Geochemistry of Precambrien ophiolites from Bou-Azzer, Morocco. *Contrib. Mineral. Petrol., 87, p. 43-50.*
- Bonin, B. 1987.** From orogenic to anorogenic magmatism: A petrological model for the transition Calc-alkaline complexes. *Rev. Bras. Geoc., 17 (4), p. 366-371.*
- Boucarut, M. 1971.** Etude volcanologique et géologique de l'Esterel. *Thèse Doc. Etat, Nice, 2 t., 487 p.*
- Bouladon, J. et Jouravsky, G. 1954.** Les ignimbrites du Précambrien III de Tiouine et du Sud Marocain. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, no. 120, p. 37-59.*
- Bouladon, J., Destombes, J. P., Van Daalhof et Bonnici, J. P. 1963.** Etude géologique de la boutonnière précambienne du Graara (Bou-Azzer, Maroc). *Rapport BRGM. (inédit).*
- Boullier, A. M., Liégeois, J. P., Black, R., Fabre, J., Sauvage, M. and Bertrand, J. M. 1986.** Late Pan-African tectonics marking the transition from subduction-related calc-alkaline magmatism to within-plate alkaline granitoids (Adrar des Iforas, Mali). *Tectonophysics, 132, p.233-246.*

- Boyer, C. et Leblanc, M. 1977.** Les appareils émissifs de la formation volcanique infracambrienne de Ouarzazate, Anti-Atlas (Maroc). *C. R. Acad. Sci. Paris, 285, p. 641-644.*
- Boyer, C., Chikhaoui, M., Dupuy, C. et Leblanc, M. 1978.** Le volcanisme calco-alkalin précambrien terminal de l'Anti-Atlas (Maroc) et ses alterations. Interprétation géodynamique. *C. R. Acad. Sci. Paris, 287, p. 427-430.*
- Bracewell, R. 1965.** The fourier transform and its applications. *Mc Graw Hill Ed., New-York, 381 p.*
- Brundin N. H. and Nairis, B. 1972.** Alternative sample types in regional geochemical prospecting. *Jour. Geochem. Explor., vol. 1, p. 7-46.*
- Bruynooghe, M. 1978.** Classification ascendante hiérarchique des grands ensembles de données. Un algorithme rapide fondé sur la construction des voisinages réductibles. *Les cahiers de l'analyse des données, no. 1, p. 7-33.*
- Buffet-Croix-Blanche G. 1984.** Variabilité des caractères spilitiques et magmatiques du volcanisme alcalin Triasique du massif des Ecrins-Pelvoux (Alpes Françaises). *Sci. Terre, série Informatique Géologique, no. 19, 254 p., Nancy, 1984.*
- Caby, R. 1970.** La chaîne Pharusienne dans le Nord Ouest de l'Ahaggar (Sahara central, Algérie); sa place dans l'orogénèse du Précambrien Supérieur en Afrique. *Thèse D. Sc. Montpellier. Publ. Dir. Mines et Géol., Alger, nouvelle ser. no. 47, 1983, 288 p.*
- Caby, R. et Leblanc, M. 1973.** Les ophiolites précambriennes sur les bords Est et Nord du craton Ouest-Africain. *In: 1ère Réun. Annu. Sci. Terre, Paris, p.112.*
- Caillez, F. et Pages, J. P. 1976.** Introduction à L'analyse des données. *SMASH, Société de Math. Appl. et de Sci. Humaines, 9 rue Durban 75016, Paris, 616 p.*
- Carpentier, R. H., Pope, T. A. and Smith, R. L. 1975.** Fe-Mn oxide coatings in stream sediment geochemical survey. *Jour. Geoch. Explor. vol. 4, no. 3, p. 349-363.*
- Carpentier, R. H. and Hayes, W. B. 1978.** Fe-Mn oxide coatings in routine geochemical survey. *Geoch. Explor. Proc. 7th. Inter. Geoch. Explor. Symp. Golden, Colorado, p. 277-288.*
- Chabane, A. 1978.** Les séries volcaniques du Précambrien de la boutonnière de Tanguerfa et les minéralisations cuprifères stratiformes (Anti-Atlas, Maroc). Sédimentologie et paléogéographie. *Thèse 3ème Cycle, Paris, 177 p.*
- Chabane, A. et Boyer, C. 1979.** Séries volcaniques et minéralisations cuprifères du Précambrien supérieur de Tanguerfa, Anti-Atlas, Maroc. *C. R. Acad. Sci. Paris, 288, D, p. 5-8.*

- Chalot-Pratf et Le Gall, J. 1978. Pétrographie des ignimbrites et des dépôts volcanoclastiques associés dans le Cambrien du massif armoricain. *Bull. BRGM. 2ème série, section I, no. 3, p. 187-205.*
- Chandon, J. L. et Pinson, S. 1981. Analyse typologique. Théorie et applications. *Masson, 254 p.*
- Chapman, R. P. 1976. Limitations of correlations and regression, analysis in geochemical exploration. *Inst. Min. Met. Trans. B, p. 279-283.*
- Charlot, R., Choubert, G., Faure-Muret, A. et Tisserant, D. 1970. Etude géochronologique du Précambrien de l'Anti-Atlas (Maroc). *Notes serv. géol. Maroc, 30, 225, p. 99-134.*
- Charlot, R. 1978. Caractérisation des événements éburméens et panafricains dans l'Anti-Atlas marocain. Apport de la méthode géochronologique Rb-Sr. *Thèse, Univ. Renne I.*
- Chikhaoui, M. 1974. Les ignimbrites et les roches basiques du Précambrien supérieur des monts d'Ougarta (Saoura). *Thèse 3ème cycle, Alger, 154 p.*
- Chikhaoui, M. 1981. Les roches volcanique du Protérozoïque Supérieur de la chaîne panafricaine dans le NW de l'Afrique (Hoggar, Anti-Atlas, Adrar des Iforas). Caractérisation géochimique et minéralogique. Implications géodynamiques. *Thèse Doc. Etat, Montpellier, 183 p.*
- Chiles, J. P. et Mtheron, G. 1975. Interpolation optimale et cartographie. *Annales des Mines, no. XI, p. 19-26.*
- Choubert, G. 1947. L'accident majeur de l'Anti-Atlas. *C. R. Acad. Sci. Paris, 224, p. 1172-1173.*
- Choubert, G. et Marçais, J. 1952. Géologie du Maroc. 1ère partie: Aperçu structural. 2ème partie: Histoire géologique du domaine de l'Anti-Atlas. *Notes et Mém. no. 100.*
- Choubert, G. 1936. Essai de mise au point du problème des ignimbrites. *Bulletin volcanologique, T. XXV, 1963, p. 123-140.*
- Choubert, G. 1963. Histoire géologique du Précambrien de l'Anti-Atlas. *Notes et Mém. serv. Géol., Maroc, 162, 352 p.*
- Choubert, G. et Faure-Muret, A. 1970. Principales caractéristiques du Précambrien de l'Anti-Atlas, in livret guide-excursion Anti-Atlas occidental et central. Colloque int. Corrélations Précambriennes. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, 229, p. 7-49.*
- Chorc, C. Y. and Govett, G. J. S. 1979. Interpretation of geochemical soil survey by block averaging. *Jour. Geoch. Explor. 11, p. 53-71.*

- Clauer, N. 1974. Utilisation de la méthode Rb-Sr pour la datation d'une schistosité de sédiments peu métamorphisés: application au Précambrien II de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara (Anti-Atlas, Maroc). *Earth planet. Sci. Lett., 22, p. 404-412.*
- Clauer, N. et Leblanc, M. 1975. Implications stratigraphiques d'une étude géochronologique Rb-Sr sur métasédiments précambriens de Bou Azzer (Anti-Atlas, Maroc). *Notes Mém. serv. géol., Maroc, 38, p. 7-12.*
- Clauer, N. 1976. Géochimie isotopique du strontium des milieux sédimentaires. Application à la géochronologie de la couverture du craton Ouest-Africain. *Mém. Sci. Géol., Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, no. 45.*
- Clavel, M. et Leblanc, M. 1970. Les minéralisations de Bou-Azzer-Elgraara, in livret guide- excursion. Coll. Intern. Corrélations Précambriennes. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, 229, p. 219-229.*
- Clavel, M. et Leblanc, M. 1971. Liaison entre tectonique et minéralisations cuprifères dans les dolomies infra-Cambriennes de la région du jbel N'Zourk (Anti-Atlas central, Maroc). *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, 31, 273, p. 229-232.*
- Clochiatti, R. et Brousse, R. 1972. Pétrogénèse des reliquats magmatiques des quartz pyroclastiques. *C. R. Acad. Sci. Paris, 274, p. 349-351.*
- Dahlberg, E. C. 1969. Use of model for relations geochemical prospections data to geological attributes of a region South Mountain. *Quat. Color. Sch. Mines, vol. 64, no. 1, p. 195-216.*
- Davis, J. C. 1973. Statistics and data analysis in geology. *John Wiley, Int. New-York, 550 p.*
- De Geoffroy, J., Wu, S. M. and Heins, R. W. 1968. Selection of drilling targets from geochemical data in the southwest Wisconsin zinc area. *Econ. Geol. vol. 63, p. 787-795.*
- Delfiner, P. 1973. Analyse du géopotential et du vent géostrophique par krigeage universel. *Revue de la météorologie, no. 25, p. 1-56.*
- Delfiner, P., Delhome, J. P. 1975. Optimum interpretation by kriging. In: J. C. Davis, M. J. Mc Cullagh 5Ed.), *Display and analysis of spatial data. NATO Adv. Study Inst., John Wiley & Sons, p. 96-114.*
- Delhomme, J. P. 1978. Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. *Bull. BRGM., (2), sect. III, no. 4, p. 341-375.*
- Diday, E. 1971. La méthode des nuées dynamiques. *Rev. Stat. Appl., vol. 19, no. 2, p. 19-34.*
- Diday, E., Lebart, L. 1977. L'analyse des données. *La Recherche, no. 74, 8, p. 15-25.*

- Draper, N. R. and Smith, H. 1966. Applied regression analysis. *J. Wiley & Sons, New-York*, 407 p.
- Ducrot, J., Leblanc, M. et Lancelot, J. R. 1976. Datation U-Pb du volcan du Jbel Boho (Anti-Atlas, Maroc). Problème de la limite Précambrien-Cambrien. *4è Réunion. Annu. Sci. Terre, Paris*, p. 146.
- Ducrot, J. et Lancelot, J. R. 1977. Problème de la limite Précambrien-Cambrien: étude radiochronologique par la méthode U-Pb sur zircons du volcan du Jbel Boho. *Can. J. Earth Sci.*, 14, p. 2771-2777.
- Ducrot, J. et Lancelot, J. R. 1978. Age panafricain de la granodiorite de Bleïda (Anti-Atlas, Maroc) et conséquences. *6è Réunion. Annu. Sci. Terre, Orsey*, p. 150.
- Ewart, A. 1979. A review of the mineralogy and chemistry of tertiary-recent dacitic, latitic, rhyolitic and related salic volcanic rocks. In: *Trondhjemites, dacites and related rocks*, (Ed.) Barker, Elsevier Scientific Publishing Company, p. 13-120.
- Fabre, J. 1971. Structure de l'Algérie saharienne, éléments pour une carte tectonique. *Bull. Serv. Géol., Algérie*, 41.
- Fersman, A. E. 1955. Selected works. Vol. I, Publishing House of the An. SSSR. Moscow.
- Full, W. E., Ehrlich, R. and Klovan, J. E. 1981. Extended Q-Model, objective definition of external and members in the analysis of mixture. *Jour. Internat. Assoc. Mathematical Geology*, vol. 13, no. 4, p. 331-344.
- Garrett, R. G. 1969. The determination of sampling and analytical errors in exploration geochemistry. *Econ. Geol.*, vol. 64, p. 568-574.
- Garrett, R. G. 1973. The determination of sampling and analytical errors in exploration geochemistry. *Econ. Geol.*, vol. 68, p. 281-284.
- Garrett, R. C. and Goss, T. I. 1979. The evaluation of sampling and analytical variation in regional geochemistry surveys. In: *J. R. Watterson and P. K. Theobald (Ed.)*, *Geochemical Exploration, Association of exploration geochemists*, p. 371-378.
- Garrett, R. G. 1983. Sampling methodology. In: *Statistics and data analysis in geochemical prospecting*, Howarth, R. J., (Ed.) *Handbook of exploration geochemistry*, Govett, G. J. S. (Ed.), vol. 2, Elsevier, p. 83-110.
- Goldschmidt, V. M. 1954. *Geochemistry*. Calrendon Press, 730 p.
- Goloubibow, R. 1956. Prospection géochimique du cobalt à Bou-Azzer (Maroc). *Sc. Terre, Nancy*, 4, 3-4, 211-226.
- Green, T. H. and Ringwood, A. E. 1968. Genesis of the calc-alkaline igneous rocks suites. *Beitr. Mineral. Petrol. Dtsch.*, 18, 105-162.

- Harbaugh, J. W. and Merriam, D. F. 1968. Computer application in stratigraphic analysis. *John Wiley, Inc., New-York*, 282 p.
- Harvey, D. 1969. Exploration in geography. *Arnold (Ed.)*, 521 p.
- Hassenforder, B. Jeannette, D. 1974. Rapports entre le Précambrien supérieur et l'Infracambrien dans la boutonnière du Kerdous (Anti-Atlas Occidental). *C. R. Acad. Sci., Paris*, 278, D, p. 3287-3290.
- Hassenforder, B. 1987. La tectonique panafricaine et varisque de l'Anti-Atlas dans le massif du Kerdous (Maroc). *Thèse Doc. Etat, Strasbourg*, 249 p.
- Hawkes, H. E., Webb, J. S. 1962. Geochemistry in mineral exploration. *Harper and Row (Ed.)*, New-York, 415 p.
- Henry, B., Lecuyer, P., Roquin, C. 1979. Exploitation sélective: essai de discrimination géochimique des complexes minéralisés échantillonnés. In: *Besson (Coord.)*, *Facteurs contrôlant les minéralisations sulfurées de Nickel*, *Memoire BRGM*, no. 97, p. 127-142.
- Howarth, R. J. 1967. Trend-surface fitting to random data - An experimental test. *Amer. Jour. of Science*, vol. 265, p. 619-625.
- Howarth, R. J. and Lowenstein, P. L. 1971. Sampling variability of stream sediments. In: *Broad-scale regional geochemical reconnaissance*, *Trans. Inst. Min. Metall., Section B.*, 82, p. 363-372.
- Howarth, R. J., Koch, G. S., Jr., Chork, C. Y., Carpenter, R. H. and Schuenemeyer, J. H. 1980. Statistical map analysis technics applied to regional distribution of Uranium in stream sediment samples from the Southeastern United States for the national uranium resource evaluation program. *Jour. Internat. Assoc. Mathematical Geology*, vol. 12, no. 4, p. 339-366.
- Howarth, R. J. 1983. Mapping. In: *Howarth, R. J. (Ed.) Statistics and data analysis in geochemical prospecting, Handbook of exploration geochemistry*, Govett, G. J. S. (Ed.), vol. 2, Elsevier, p. 110-205.
- Howarth, R. J., Sinding-Larsen, R. 1983. Multivariate analysis. In: *Howarth, R. J. (Ed.)*, *Statistics and data analysis in geochemical prospecting, Handbook of exploration geochemistry*, Govett, G. J. S. (Ed.), Elsevier, p. 207-283.
- Isnard, P., Mallet, J. L., Cazes, P. and Sattran, V. 1971. Corrélations géologiques. Méthodes statistiques de traitement de données. In: *Laffitte, P. (Ed.)*, *Traité d'informatique géologique*, Masson et Cie, p. 379-533.
- Isnard, P. 1982. Etude chimique du massif granitique du Sidobre (Tarn) - Contribution à la méthodologie des grand échantillonnages. *Sci. de la Terre, Mémoire no. 41*, 419p.

- Jambu, M. 1978. Classification automatique pour l'analyse des données: 1- Méthodes et algorithmes, 2 - logiciels. *Dunod, Paris, 1978.*
- Jeannette, D. et Tisserant, D. 1987. Les épisodes tectoniques et intrusifs du Précambrien supérieur de l'Anti-Atlas occidental. *Estud. Geol., 33, (44), p. 315-326.*
- Jones, T. A. 1972. Multiple regression with correlated independent variables. *Jour. Int. Assoc. Mathematical Geology, vol. 4. p. 203-218.*
- Joreskog, K. G., Klovan, J. E. and Reyment, R. A. 1976. Geological factor analysis in methods in geomathematics (1). *Elsevier Sci. Publ. Co., 178 p.*
- Jouravsky, G. 1949. Aperçu géologique et métallogénique sur la région minéralisée de Bou-Azzer. *Notes et Services géolog. Maroc, 2, 74, p. 183-192.*
- Jouravsky, G. 1963. Filons de manganèse dans les formations volcaniques du Précambrien III de l'Anti-Atlas. Etude métallogénique. *Notes Serv. Géol., Maroc, 22, 170, p. 81-92.*
- Juery, A., Lancelot, J. R., Hanet, J., Proust, F. et Allegre, C. J. 1974. L'âge des rhyolites du Précambrien III du Haut-Atlas et le problème de la limite Précambrien-Cambrien. *2è Réunion. Annu. Sci. Terre, Nancy, p. 230.*
- Klovan, J. E. and Imbrie, J. 1971. An algorithm and FORTRAN IV program for large scale Q-mode factor analysis and calculation of factor scores. *Jour. Internati. Assoc. Mathematical Geology. vol. 3, no. 1, p. 61-77.*
- Klovan, J. E. 1975. R and Q-mode factor analysis in concepts in geostatistics. *Springer-Verlag, New-York, p. 21-69.*
- Krumbein W. C. and Graybill, F. A. 1965. An introduction to statistical models in geology. *Wiley, New-York, 475p.*
- Krutov, G. A. 1970. Nickel-Cobalt ore deposits in the Bu-Azzer (Morocco). *Géologie des gîtes minéraux, Moscou, p. 27-40.*
- Kürzl, H. 1988. Exploratory data analysis: recent advances for the interpretation of geochemical data. *Jour. Geoch. Explor. 30, p. 309-322. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam.*
- Lancelot, J. R., Boullier, A. M., Maluski, H. and Ducrot, J. 1983. Deformation and related radiochronology in a late-Pan-African mylonitic shearzone, Adrar des Iforas (Mali). *Contrib. Mineral. Petrol., 82, p. 312-326.*
- La Roche, H. de. and Isnard, P. 1978. A comparison between conventional and statistical processing of 330 rock analysis on a regular net work sampling in an association of biotite granites and two mica leucogranites. *Sci. Terre, Nancy, Série Informatique géologique, no. 12, p. 65-98.*

- Laville, E. et Petit, J. P. 1984. Role of synsedimentary strike-slip faults in the formation of Moroccan Triassic basins. *Geology, vol. 12, p. 424-427.*
- Lebart, L., Morineau, A. et Fenelon, J. P. 1979. Traitement des données statistiques. *Dunod, 510 p.*
- Leblanc, M. 1970. Roches à pyrophyllites, zunyite et diasprore dans le Précambrien II du Graara oriental (Anti-Atlas central). *Notes Service géolog. Maroc, 30, 225, p. 153-154.*
- Leblanc, M. 1972. Sur le style disharmonique des plis hercyniens à la base de la couverture dans l'Anti-Atlas central (Maroc). *C. R. Acad. Sci., Paris, 275, D, p. 803-807.*
- Leblanc, M. 1973a. Un complexe ophiolitique dans le Précambrien II de l'Anti-Atlas central (Maroc): description, interprétation et position stratigraphique. In: Coll. Int. sur les corrélations du Précambrien (Anti-Atlas occidental et central). *Notes Mém. Serv. Géol., Maroc, 236, p. 119-144.*
- Leblanc, M. 1973 b. La tectonique du Précambrien II dans la région de Bou Azzer (Anti-Atlas central). *Notes Serv. Géol., Maroc, 33, 249, p. 59-82.*
- Leblanc, M. 1973 c. Les formations infra-cambriennes de Bou-Azzer (Anti-Atlas central, Maroc): Lithostratigraphie, tectonique et position structurale. *Notes et Mém. Serv. Géolog. T 34, no. 254, p.7-14.*
- Leblanc, M. 1974. Minéralisations cuprifères et volcanisme albitophyrique dans les ophilités précambriennes de Bou-Azzer (Anti-Atlas, Maroc). *Int. Symp. Volc. Metall. Bucarest, Bull. Volc. Naples, 38, 4, p. 1095-1109.*
- Leblanc, M. 1975. Ophiolites précambriennes et gîtes de Cobalt: Bou Azzer (Maroc). *Thèse Doc. Etat, Paris VI, Mém. Cent. Géol. Géophys. Montpellier, 329 p.*
- Leblanc, M. et Billaud, P. 1978. A volcano-sedimentary upper deposit on a continental margin of upper Proterozoic age: Bleida (Anti-Atlas, Morocco). *Econ. Geol., t. 73, p. 1101-1111.*
- Leblanc, M. et Lancelot, J. R. 1980. Interprétation géodynamique du domaine panafricain (Précambrien terminal) de l'Anti-Atlas (Maroc) à partir de données géologiques et géochronologiques. *Can. J. Earth Sci., 17, p. 142-155.*
- Leblanc, M. 1981. The late Proterozoic ophiolites of Bou Azzer (Morocco): evidence for Pan-African plate tectonics. In: A Kroner (Editor), Precambrian plate tectonics. *Elsevier, Amsterdam, p. 435-451.*
- Lecomte, P., Sondag, F. and Martin, H. 1975. Geochemical soil survey over Cambrien and Lower Devonian formations in the Belgian Ardennes as a tool for geological mapping. *Jour. Geoch. Explor. 4, p. 215-229.*

Lecomte, P. and Sondag, F. 1980. Regional geochemical reconnaissance in Belgian Ardennes: secondary dispersion patterns in stream sediments. *Mineral. Deposit (Berl)*. 15, p. 47-60.

Leymarie, P. 1978. L'utilisation de l'analyse factorielle en géochimie des éléments majeurs: une application à l'étude des réactions deutériques dans les granites du nord Millevaches (Massif Central). *Sci. de la Terre, Fr.*, 21, p. 151-186.

Lifermann, J. 1977. Théorie et application de la transformation de Fourier rapide. *Masson, Paris*, 142 p.

Lowenstein, P. L. and Howarth, R. J. 1973. Automated colour-mapping of three-component systems and its application to regional geochemical reconnaissance. *Geochemical Exploration*, p. 297-304.

Malmquist, L. 1978. An iterative regression analysis procedure for numerical interpretation of regional exploration geochemistry data. *Jour. Internat. Assoc. Mathematical geology*, vol. 10, no. 1, p. 23-42.

Marcotte, D. and David, M. 1981. Target-definition of kuroko-type deposits in Abitibi by discriminant analysis of geochemical data. *CIM Bull.* vol. 74, no. 828, p. 102-108.

Mark, D. M. and Church, M. 1977. On the misuse of regression in Earth Science. *Jour. Int. Assoc. Math. geol.*, 9, p. 63-75.

Marshal, P. 1935. Acid rocks of the Taupo-Rotorua volcanic district. *Roy. Soc. New-Zeland Trans.* 64, p. 323-366.

Masset, J. M. 1973. Un système de visualisation des variations géographiques d'un paramètre géologique. *Thèse Nancy, Scièces de la Terre, Informatique géologique*, no. 1, 171 p.

Matheron, G. 1965. Les variables régionalisées et leur estimation. *Masson et Cie*, 212 p.

Matheron, G. 1967. Kriging or polynomial procedures? A contribution to polemics in mathematical geology. *Transactions*, v. LXX, p.240-244.

Matheron, G. 1970. La théorie des variables régionalisées et ses applications. *Les cahiers du C.M.M.*, Fasc. 5.

Matheron, G. 1982. Pour une analyse krigéante des données régionalisées. *Note C.G.M.M.*, no. 732, 22 p.

Max, J. 1977. Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques. *Masson Ed.*, Paris, 2ème Ed., 379 p.

Meindre, M. 1955. Etude géologique du massif de Bou Kais. *Bull. Scient. écon. BRMA.*, Alger, 2, p. 8-45.

Mercier, J. L. 1984. La déformation des continents au voisinage des marges convergentes. *Bull. Soc. Géol. France*, 1984, (7), T. XXVI, no. 3, p. 551-556.

Michard, A. 1976. Elément de géologie marocaine. *Notes et Mémoires. Sér. Géol. Maroc*, 252, 408 p.

Miesch, A. T. 1975. Variograms and variance components in geochemistry and ore evaluation in: E. H. T. Whitten (Ed), *Quantitative studies in the Earth Sciences. Geol. Soc. Am. Mem.*, 142, p. 333-340.

Miesch, A. T. 1976. Q_mode factor analysis of geochemical and petrologic data matrices with constant row-sums. *U. S. Geol. Survey Prof. Paper 574-G*, 47 p.

Miesch, A. T. 1976. Q_mode factor analysis of compositional data. *Comput. Geosci.*, Vol. 1, no. 3, p. 147-159.

Miesch, A. T. 1976. Interactive computer programs for petrologic modeling with extended Q_mode factor analysis. *Comput. Geosci.*, vol. 2, p. 439-492.

Miesch, A. T. 1979. Vector analysis of chemical variation in the lavas of paricutin volcano, Mexico. *Jour. Internat. Assoc. Mathematical Geology*, vol. 11, no. 4, p. 345-371.

Miesch, A. T. 1980. Scalin variable and interpretation of eigenvalues in principal component analysis of geologic data. *Jou. Internat. Assoc. Mathematical Geology*, v. 12, no. 6, p. 523-538.

Miesch, A. T. 1981. Computer methods for geochemical and petrologic mixing problems in computer applic. in the Earth Sciences - an update of 70's, D. F. Merriam (Ed), *Plenum Press*, p. 199-209.

Mifdal, A. 1981. Etude systématique par les méthodes Rb-Sr et U-Pb du volcanisme acide de l'Anti-Atlas marocain (région de Ouarzazate). *Thèse 3è cycle, Rennes*, 73 P.

Mifdal, A. et Peucat, J. 1985. Datation U-Pb et Rb-Sr du volcanisme acide de l'Anti-Atlas marocain et du socle sous-jacent dans la région de Ouarzazate. Apport au problème de la limite Précambrien-Cambrien. *Sci. Géol. Bull.*, 38, 2, Strasbourg, p. 185-200.

Miyashiro, A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *Am. J. Sci.*, 274, 4, p. 321-355.

Miyashiro, A. and Shido, F. 1975. Tholeitic and calc-alkaline series in relation to the behaviors of Ti, V, Cr and Ni. *Am. J. Sci.*, 275, p. 265-277.

Moussat, E., Mascle, G. et Angelier, J. 1985. Régimes de paléocontraintes et déformation de l'arc Tyrrhénien. *C. R. Acad. Sc. Paris, T. 300, Série II*, no. 9, p. 417-422.

Mugnier, J. L. 1984. Déplacements et déformations dans l'avant-pays d'une chaîne de collision. Méthodes d'étude et modélisation. Exemple du Jura. *Thèse Doc. Ing., Grenoble*, 163 p.

Neltner, L. 1938. Etude géologique dans le sud Marocain (Haut-Atlas et Anti-Atlas). *Notes et Mém. Services des Mines et carte géol. Maroc*, 42, 298 p.

Nichol, I., Garrett, R. G. and Webb, J. S. 1969. The role of some statistical and mathematical methods in the interpretation of regional geochemical data. *Econ. Geol.*, 64, p. 204-220.

Nowlan, G. A. 1976. Concentrationary manganese-iron oxides in stream and their use fullness as sample medium for geochemical prospecting. *Jour. Geochem. Explor.*, vol. 6, no. 1/2, p. 193-210.

Peccerillo, A. and Taylor, S. R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamom Area, Northern Turkey. *Contr. Mineral. Petrol.*, 58, p. 63-81.

Plant, J. Jeffery, K., Gill, E. and Fage, C. 1975. The systematic determination of accuracy and precision in geochemical exploration data. *Jour. Geochem. Explor.*, vol. 4, p. 467-486.

Proust, F. 1961. Etude stratigraphique, pétrographique et structurale du bloc oriental du massif ancien du Haut-Atlas (Maroc). *Thèse Doc. Etat, Montpellier*, 272 p.

Proust, F. 1973. Etude stratigraphique, pétrographique et structurale du bloc oriental du massif ancien du Haut-Atlas. *Notes Mém. Serv. Géol., Maroc*, 254, p. 15-35.

Remichi, L. 1987. Etude géologique du Précambrien du Damrane (chaîne de l'Ougarta, Algérie). Le volcanisme et les minéralisations associées. *Thèse Doc. Ing., Paris VI*, 170 p.

Rittmann, A. 1963. Les volcans et leur activité. *Ed. Masson, Paris*, 457 p.

Romeder, J. M. 1973. Méthodes et programmes d'analyse discriminante. *Dunod*, 274 p.

Roquin, C. et Solety, P. 1977. Application de l'analyse des tableaux de contingence au traitement des résultats de prospection alluvionnaire à la batée. *5è. R. A. Sci. Terre, Renne*, 412 p.

Roquin, C. 1985. Traitement des données en prospection géochimique: Facteurs de variation du signal et sélection de la composition anormale. *Thèse Doc. Etat, Univ. Orléans, Document du BRGM., no. 86*, 315 p.

Rose, A. W., Dahlberg, E. C. and Keith, M. L. 1970. A multiple regression technic for adjusting background values in stream sediment geochemistry. *Econ. geol.*, vol. 65, p. 156-165.

Royle, A. G., Clausen, F. L. and Frederiksen, P. 1981. Practical universal kriging and automatic contouring. *Geoprocessing*, v. 65, p. 156-165.

Russo, P. 1934. Observations sur la région de contact entre le socle saharien et les zones des plissements atlasien. Conséquence pour la tectonique générale du Maroc et de l'Afrique du Nord. *Bull. Comité Et. Eaux souterr., Rabat, 1934, Congr. d'Erfoud*, p. 99-101.

Saadi, M. 1973. Les gisements de cuivre de Bleida (Graara, Anti-Atlas, Maroc) in les roches plutoniques dans leurs rapports avec les gîtes minéraux. *Coll. Sci. Intern. E. Raguin, Masson Ed.*, p. 288-290.

Sandjivy, L. 1983. The factorial kriging analysis of regionalised data. Its application to geochemical prospecting. *Congrès de Géostatistique "2nd NATO - ASI Geostat-Tahoe"*.

Saquaque, A., Admou, H., Karson, J., Hefferan, K. and Reuber, I. 1989. Precambrian accretionary tectonics in the Bou Azzer-El Graara region, Anti-Atlas, Morocco. *Geology*, v. 17, p. 1107-1110.

Schenk, P. 1971. Southern atlantic Canada, Northwestern Africa and continental drift. *Can. J. Earth Sci.*, 8, p. 1218-1251.

Schermerhorn, L. J. G., Wallbrecher, E. and Huch, K. M. 1986. Der subduktionskomplex, Granit plutonismus und schertektonik im Grundgebirge des Sirwa-Doms (Anti-Atlas, Marokko). *Berliner Geowiss. Abh. (A)*, v. 66, p. 301-332.

Schmid, R. 1981. Descriptive nomenclature and classification of the pyroclastic deposits and fragments. *Geol. Rund.*, 2, p. 794-799.

Shaw, D. M. 1964. Interprétation géochimique des éléments en traces dans les roches cristallines. *Masson et Cie*, 237 p.

Sokal, R. R. and Sneath, P. H. 1963. Principles of numerical taxonomy. *San Francisco: W. H. Freeman and Co.*

Temple, J. T. 1978. The use of factor analysis in geology. *Jour. Intern. Assoc. Mathematical Geology*, vol. 10, p. 379-387.

Thoughts on the use of principal component analysis in petrogenetic problems. *Jour. Intern. Assoc. Mathematical Geology*, vol. 5, p. 341-350.

Tripathi, V. S. 1979. Factor analysis in geochemical exploration. *Jour. Geochem. Explor.*, vol. 11, p. 263-275.

Tukey, J. W. 1977. Exploratory data analysis. *Addison-Wesley, Reading, MA.*, 506 p.

Tukey, P. A. and Tukey, J. W. 1981. Summarisation; Smoothing; Supplemented Views. In: *Barnet, V. (Ed), Interpreting multivariate data, John Wiley and Sons, Chichester*, p. 245-275.

Valenchon, F. 1982. The use of correspondance analysis in geochemistry. *Jour. Intern. Assoc. Mathematical Geology*, vol. 14, no. 4, p. 331-342.

Vernadskii, V. I. 1930. Geochemie. Akad Verlagsbuchlandlg, Leipzig.

Vialon, P., Rumland, M. et Grollier, J. 1976. Eléments de tectonique analytique. *Masson Ed., Paris*, 118 p.

Vincent, P. M. 1963. Des volcans Tertiaires et Quaternaires du Tibesti occidental et central (Sahara du Tchad). *Mém. BRGM. no. 23*, 307 p.

Whitehead, R. E. S. and Govett, G. J. S. 1974. Exploration rock geochemistry detection of trace element haloes at Heat Steel Mines. (N.B., Canada) by discriminant analysis. *Jour. Geoch. Explor.*, vol. 3, p. 371-386.

Whitney, P. R. 1975. Relationship of manganese - iron oxides and associated heavy metals to grain size in stream sediments. *Jour. Geoch. Explor.*, vol. 4, no. 2, p. 251-264.

Whitten, E. H. T. 1975. The practical use of trend - surface analysis in the geological sciences. In: Davis, J. C., McCullagh, M. J. (Ed.), Display and analysis of spatial data. *NATO Adv. Study Inst., John Wiley and Sons*, p. 282-297.

Wilhelm, E. and Kosakevitch, A. 1979. Utilisation des chapeaux de fer comme guide de prospection. *Bull. BRGM., sect.II, no. 2-3*, p. 109-140.

Yazidi, A. 1976. Les formations sédimentaires et volcaniques de la boutonnière d'Ifni. (Maroc). *Thèse 3è Cycle, Univ. Grenoble*, 127 p.

ANNEXES

1. Tectonique et volcanisme tardi-Pan Africains ...
Journ. African Earth Sci. 10, p. 549-563
2. Cartes géochimiques mono-élémentaires des classes de teneur distinguées par les "box and whiskers"
3. Cartes géochimiques mono-élémentaires des teneurs brutes
4. Cartes des scores des facteurs F_i
5. Comparaison des différentes composantes de la variation des teneurs
6. Cartes des teneurs estimées et résiduelles

ANNEXE

1.

Tectonique et volcanisme

tardi-Pan Africains ...

Journ. African Earth Sci. 10, 3, p. 549-563, 1990

Tectonique et volcanisme tardi-Pan Africains (580-560 M.a.) dans l'Anti-Atlas Central (Maroc) : interprétation géodynamique à l'échelle du NW de l'Afrique

M. R. AZZI SAMIR*, J. FERRANDINI** et J. L. TANE*

*Institut Dolomieu, rue, Maurice Gignoux, 38031 Grenoble Cedex, France

**Departement de Géologie, Faculté des Sciences de Marrakech, Bd de Safi, Marrakech, Maroc

Abstract- The structural analysis of the Precambrian III (Infracambrian) volcanic formations that outcrop in the Bou Azzer-El Graara anticlinal has revealed two complementary phases:

i) a NW-SE distension, ii) N100° to N120°E left-lateral strike-slip to normal faults, parallel to the Pan-African suture. Microtectonic and stratigraphic criteria establish that the tectonic activity is syn-volcanic, while the determination of the principal stress directions prove the genetic relationship between the two phases. Evidences of NW-SE oriented distension in the PIII volcanics of other areas of south Morocco show the regional extension of the tectonic setting. Our model suggests a left-lateral strike-slip between two cratonic blocks that collided during a previous B2 phase (around 600 M.a.). During this strike-slip movement, the principal stress axis s_1 tilted from horizontal to 50°N while the vertical plane $s_1 - s_2$ slightly rotated from N30° to N40°E. The PIII volcanic production was triggered by the extensive wrenching-distending movement and accompanied the reactivation of WNW-ESE faults of the Panafrican basement. Coeval extension along NE-SW faults is marked by the emplacement of numerous andesitic porphyritic dykes along this direction. This rift evolution is part of the global framework that includes two major events at the extremities of the Anti-Atlasic range: (1) to the west, opening of the Proto-Atlantic or Iapetus, (2) to the east, in the Trans-Saharan range, the E-W late-Panafrican compression with N-S left-lateral strike-slip. The extension leads to thinning of the crust, existence of a gulf during the Adoudounien transgression and emplacement of alkali magmatism at the base of these transgressive series.

Résumé- L'analyse structurale de la série volcanique du Précambrien III (Infracambrien), affleurant dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara a révélé deux phénomènes complémentaires: i) une distension orientée NW-SE, ii) des décrochements-extension sénestres de direction N100° à N120°E, parallèles à la suture panafricaine. Des critères microtectoniques et stratigraphiques permettent d'établir que cette activité tectonique est synvolcanique, par ailleurs la détermination des directions des axes de contraintes principales, nous a permis de retenir un lien génétique entre les deux phénomènes. La présence en d'autres secteurs du sud marocain, d'indices de distension orientée NW-SE au sein de la série volcanique du PIII, permet d'envisager une extension régionale à cette activité tectonique. Notre modèle suggère un coulissement sénestre entre les blocs cratoniques mis en collision lors de la phase B2 (vers 600 M.a.), avec un redressement de l'axe de contrainte σ_1 , qui passe de l'horizontale à un plongement de 50°N et une légère rotation du plan vertical ($\sigma_1 - \sigma_2$) de N30° à N40°E. La mise en place de la série volcanique du PIII serait déterminée et accompagnée par ce coulissement extensif, lequel réactive les accidents orientés WNW-ESE du socle panafricain, hérités des phases antérieures. Ces épanchements volcaniques sont accompagnés aussi de mouvements de simple extension le long de failles orientées NE-SW et de la mise en place d'un essaim de dykes de porphyrite andésitique, de même direction (NE-SW). Cette évolution de rifting s'insère dans un cadre global qui intègre deux événements majeurs aux extrémités de la chaîne anti-atlasique: (1) à l'Ouest, l'ouverture du Proto-Atlantique ou Iapetus, (2) à l'Est, dans la chaîne Trans-Saharienne, la compression E-W tardi-panafricaine avec des cisaillements sénestres N-S. L'extension aboutira à un amincissement de la croûte, à l'installation d'un golfe lors de la transgression adoudounienne et à la mise en place de magmatisme alcalin à la base de cette série transgressive.

INTRODUCTION

La chaîne anti-atlasique fait partie de la ceinture orogénique pan-africaine (Caby et Leblanc, 1973; Black *et al.*, 1979; Black, 1980, 1984). Elle est interprétée en termes de tectonique de plaques comme le résultat du cycle orogénique pan-africain et de la collision entre le craton ouest-africain et un continent septentrional hypothétique Leblanc et Lancelot, 1980).

Deux phases tectoniques majeures ont été mises en évidence par Leblanc (1975) pour ce cycle orogénique: la phase majeure B1 (685 ± 15 M.a.) responsable de l'obduction du complexe ophiolitique de Bou Azzer sur la marge nord du craton ouest africain et la phase tardive B2 (608 ± 7 M.a.) responsable du plissement de la série de Tiddiline (post B1 et anté B2). Cette dernière phase marque l'entrée en collision directe du craton ouest-

africain avec le «continent septentrional» (Leblanc, 1981).

Les ophiolites de Bou Azzer ainsi que celles du Siroua situées sur le même alignement, représentent dans cette hypothèse des vestiges de croûte océanique (Bodinier *et al.*, 1984; Schermerhorn *et al.*, 1986).

Un important volcanisme post-orogénique (formation de Ouarzazate ou PIII) à prédominance calco-alcaline (Boyer *et al.*, 1978) est mis en place 25 à 35 M.a. plus tard, en discordance majeure sur les terrains antérieurs. Cette série est surmontée par les dépôts dolomitiques de l'Adoudounien (ou Infracambrien supérieur) qui présente à sa base les intercalations volcaniques alcalines du Jbel Boho.

La mise en place de la série volcanique du PIII est associée à une activité tectonique distensive qui contraste avec le régime compressif de la phase B2.

Le présent article centré sur la zone de Bou Azzer El Graara ou la situation géodynamique à la fin du cycle Pan-Africain semble bien établie, à pour but: 1) de caractériser l'évolution tectonique contemporaine du volcanisme post orogénique du PIII. 2) de situer cette évolution par rapport aux événements

géologiques connus pour la même période dans d'autre segments de la chaîne pan-africaine du NW africain.

CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le socle précambrien de l'Anti-Atlas (Choubert, 1947), comprend deux domaines structuraux (Figure 1): 1) un domaine éburnéen stable depuis 2000 M.a. (Charlot, 1978) qui constitue la bordure nord du craton Ouest-africain, dans la partie SW. 2) un domaine Pan africain (680-580 M.a.) dans la partie NE (Caby, 1970; Clauer, 1974, 1976; Leblanc, 1975; Charlot, 1978).

Ces deux domaines sont séparés par l'accident majeur de l'Anti-Atlas de direction WNW-ESE. Ce linéament majeur a été interprété comme une suture grâce à l'identification comme ophiolites des roches ultrabasiques de Bou Azzer (Leblanc, 1973a). Il s'étend sans interruption du Maroc au Hoggar Ouest et marque la limite NE du craton Ouest-africain (Caby, 1970; 1981).

Le secteur étudié (Bou Azzer-El Graara) est situé le long de ce linéament majeur, entre les deux domaines.

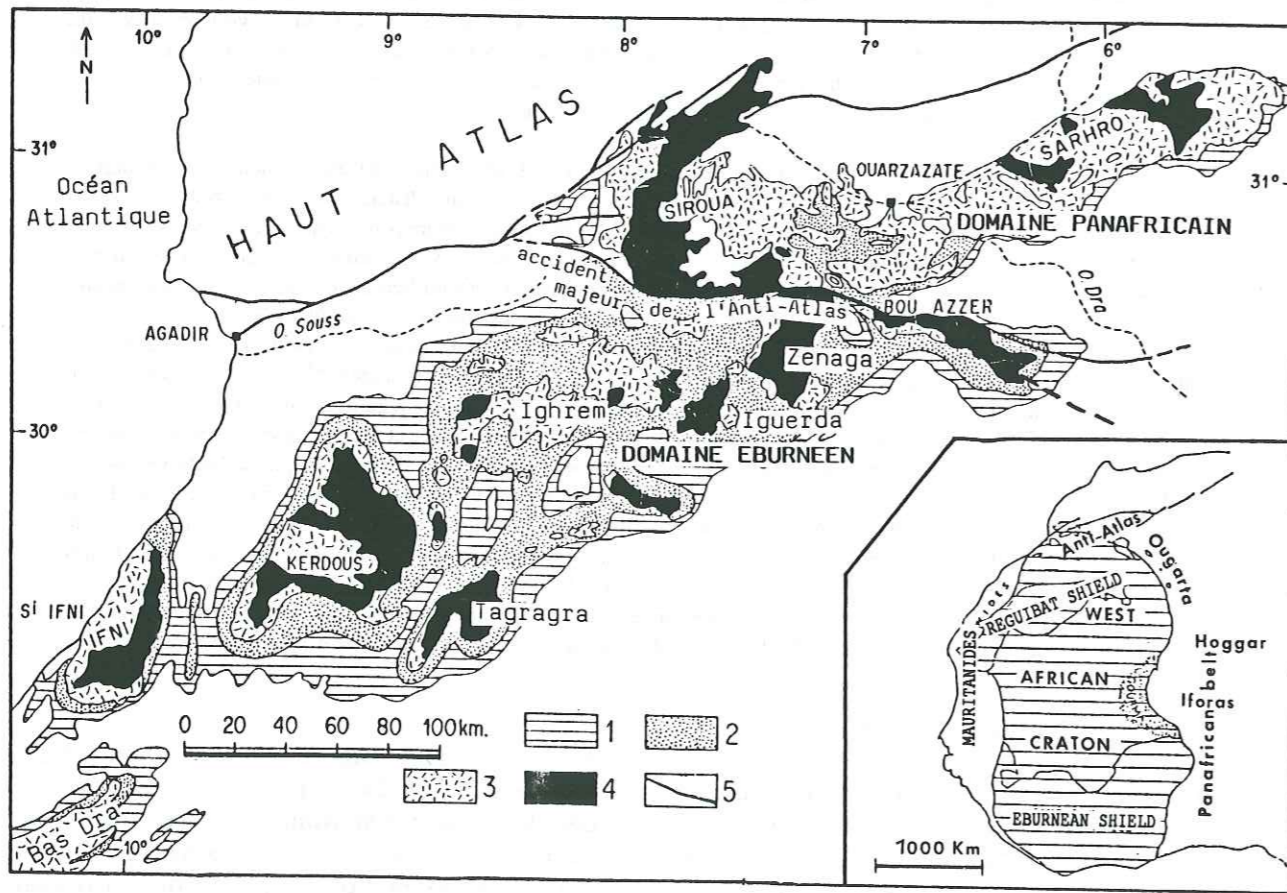


Figure 1. Schéma géologique de l'Anti-Atlas d'après Choubert (1963) et position par rapport à la ceinture panafricaine. 1: Cambrien inférieur fossilifère; 2: série à dominante sédimentaire (Adoudounien); 3: série à dominante volcanique (PIII ou série de Ouarzazate); 4: Protérozoïque; 5: accidents tectoniques majeurs.

A- Les grands ensembles géologiques:

Plusieurs grandes unités lithostratigraphiques sont distinguées dans la région de Bou Azzer (Figure. 2):

1) un socle ancien constitué de gneiss éburnéen (Choubert, 1963; Charlot *et al.*, 1970), affleure dans la partie SW de la boutonnière.

2) une épaisse séquence de plateforme, à Bleida et à Tachdamt, formée de quartzites, de calcaires stromatolitiques, de laves basiques tholéitiques, de matériaux volcanosédimentaires (porteurs de

minéralisations de Cu) et de grès arkosiques. Cette séquence est recoupée par des intrusions de diorites et diorites quartziques.

3) un complexe ophiolitique à Bou Azzer constitué de roches basiques et ultrabasiques, de dykes basiques et de niveaux volcanosédimentaires avec des intrusions de diorites quartziques (ce complexe est associé aux gisements de Co-Ni). Les unités 2 et 3 affectées par la phase panafricaine majeure B1 et recoupés par la granodiorite de Bleida, sont attribuées au PII inférieur.

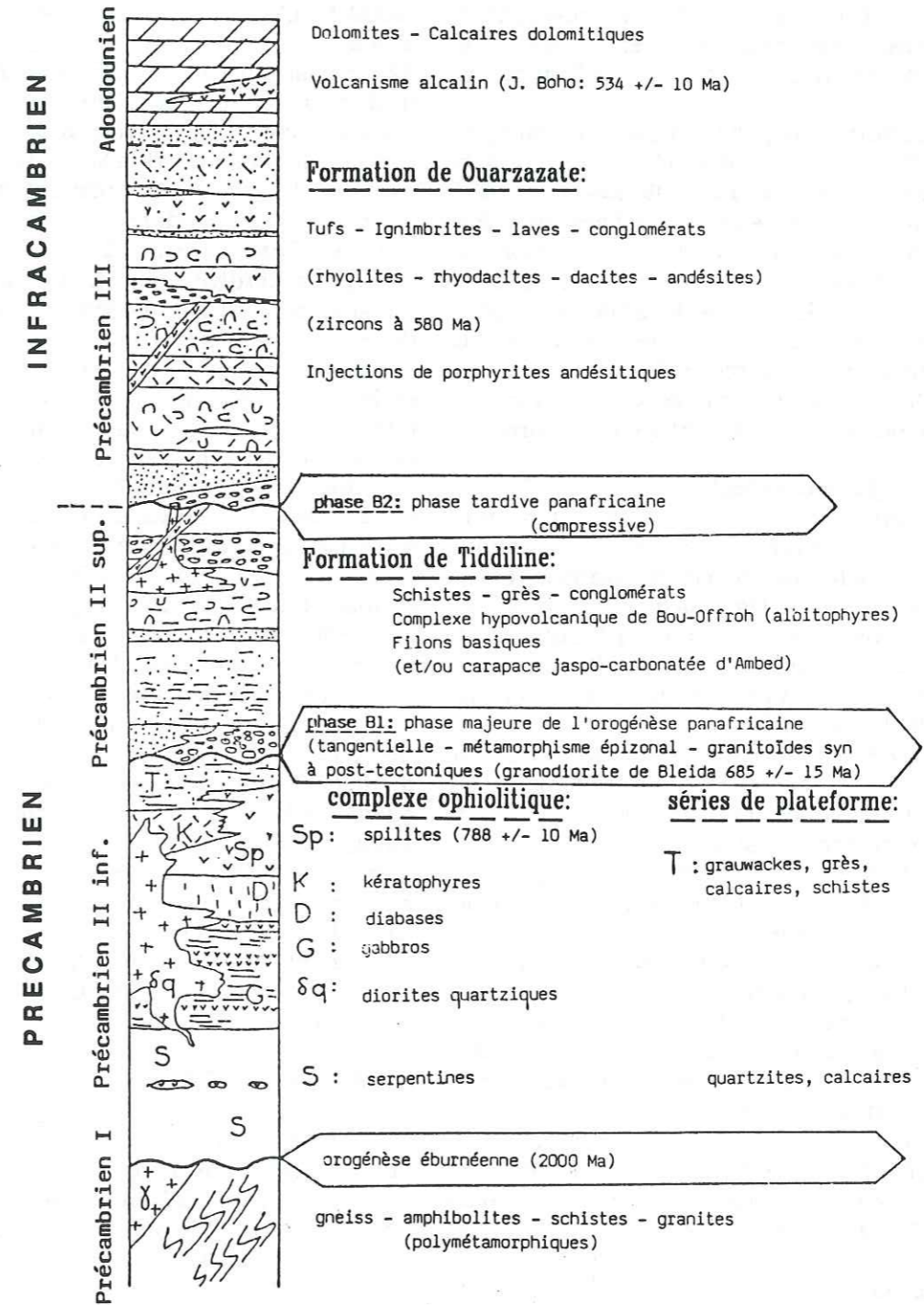


Figure 2. Les grands ensembles géologiques de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara d'après Leblanc (1975).

tel-00708240, version 1 - 14 Jun 2012

4) la formation de Tiddiline à prédominance détritique: conglomérats, greywackes et grès feldspathiques, associée à des coulées de spilités et de kératophyres et des intrusions de plagiogranites. Cette formation qui repose en discordance sur les terrains antérieurs est affectée par la phase pan africaine tardive B2 et elle est attribuée au PII supérieur.

5) la formation volcanosédimentaire de Ouarzazate ou PIII (Choubert, 1963; Choubert et Faure-Muret, 1970) constituée de basaltes, d'andésites, d'abondants produits volcaniques acides et de conglomérats (Boyer *et al.*, 1978), est discordante sur les terrains antérieurs affectés par les déformations B2; elle présente des minéralisations en Cu-Mn-Mo.

Le PIII est surmonté par les dépôts dolomitiques de l'Adoudounien (Choubert, 1963), dont la base présente localement des intercalations de coulées de trachytes et d'andésites rattachées au volcanisme alcalin du Jbel Boho (Ducrot *et al.*, 1976; Leblanc et Lancelot, 1980). Le contact de l'Adoudounien sur le PIII est généralement considéré comme concordant (Jeannette et Tisserant, 1977); cependant des discordances de ravinement, voire des discordances angulaires sont observées localement à Bou Azzer-El Graara.

B- Repères géochronologiques:

Les âges radiométriques obtenus dans le secteur étudié sont suivant la succession des événements: (a) l'âge du métamorphisme de contact lié aux dykes basiques associés à la mise en place du complexe ophiolitique (Leblanc, 1973b), est de l'ordre de 787 ± 10 M.a. (Rb-Sr, Clauer, 1974, 1976). Cet âge daterait l'ouverture océanique pan africaine (Leblanc, 1981).

(b) l'âge de 685 ± 15 M.a. (Rb-Sr, Clauer, 1976), date le métamorphisme lié à la phase majeure B1, responsable de l'obduction des ophiolites sur la bordure du craton Ouest africain.

(c) l'âge de 615 ± 12 M.a. (U-Pb sur zircon, Ducrot et Lancelot, 1978), a été obtenu sur la granodiorite post-tectonique de Bleida.

(d) l'âge de 623 ± 10 M.a. (Rb-Sr, Leblanc et Lancelot, 1980), obtenu pour la fermeture des illites métamorphiques des séricitoschistes de Bleida, permet de dater la phase tardive B2 à Bleida (Clauer, 1976) et donne un âge maximum pour la formation de Tiddiline.

(e) la formation de Ouarzazate a livré des âges (U-Pb sur zircon), qui s'échelonnent entre 580 ± 12 M.a. à la base et 563 ± 10 M.a. au sommet (Juéry *et al.*, 1974; Ducrot et Lancelot, 1978; Mifdal et Peucat, 1985).

(f) l'âge de 534 ± 10 M.a. (U-Pb sur zircon a été obtenu (Oucrot *et al.*, 1976; 1977), sur la syénite du Jbel Boho auquel sont associées les trachytes et

andésites interstratifiées dans les dolomies inférieures de l'Adoudounien.

L'influence de l'orogénèse hercynienne est marquée par des âges Rb-Sr à 320-310 M.a. obtenus à la fois sur le PIII (Juéry *et al.*, 1974) et sur l'Adoudounien (Charlot, 1978).

C- Evolution tectonique:

Quatre principaux événements tectoniques ont marqué l'histoire de la région étudiée (Leblanc, 1975; Leblanc et Lancelot, 1980):

(a) l'événement éburnéen qui affecte les gneiss (2000 M.a.) de la bordure nord du craton Ouest africain.

(b) la phase majeure pan africaine B1, responsable de l'obduction des ophiolites sur la bordure du craton ancien, elle correspond à une phase de compression de direction WSW-ENE. Cette phase est associée au développement de plis à axes orientés NNW-SSE dans les terrains du PII inférieur (Leblanc, 1973b; Leblanc et Billaud, 1978).

(c) la phase tardive pan africaine B2 qui affecte les terrains post B1 (formation de Tiddiline), elle y développe des plis orientés WNW-ESE, des décrochements sénestres de direction WSW-ENE et réactive les accidents hérités de la phase B1 en failles inverses. Cette phase B2 marque l'entrée en collision directe du craton Ouest africain avec le "continent septentrional".

(d) la tectonique hercynienne peu développée dans la région, se traduit dans le PIII, rigide, par des structures cassantes. Des fractures plurikilométriques (N70° à N120°E) se superposent à d'anciens accidents précambriens (B2). Ces fractures auraient fonctionné en cisaillements sénestres et seraient responsables des décalages horizontaux des massifs de serpentines. Ces déformations hercyniennes se traduisent aussi dans l'Adoudounien, par des structures plissées, qui se distinguent par leur caractère disharmonique (Leblanc, 1972; 1975).

Comme dans l'Ougarta (Fabre, 1971), l'Anti-Atlas à cette époque, est assimilé à un aulacogène: ensemble de structures du socle, induisant des plissements de la couverture, en domaine structural peu profond et avec un faible taux de raccourcissement (Leblanc, 1975).

LA FORMATION DE OUARZAZATE OU PIII.

La formation de Ouarzazate ou PIII (ou encore Infracambrien inférieur), de nature volcanosédimentaire, riche en matériaux pyroclastiques (Jouravsky, 1963; Choubert et Faure-Muret, 1970), a été définie dans l'Anti-Atlas et y est subdivisée en trois ensembles: PIII inférieur, moyen et supérieur (Choubert, 1963).

Les terrains du PIII ou ceux présentant de fortes

analogies lithologiques et stratigraphiques avec ce premier affleurement sur une large étendue du NW africain: Au Maroc, en dehors du secteur étudié, le PIII affleure dans plusieurs autres régions comme le massif ancien du Haut-Atlas (Proust, 1973; Baouch, 1984); dans la boutonnière du Bas Dra (Charlot, 1978; Jeannette et Tisserant, 1977); dans la région du Kerdous (Hassenforder *et al.*, 1974; Hassenforder, 1987); dans la boutonnière d'Ifni (Benziane, 1974; Benziane *et al.*, 1981, 1983) ainsi que dans la boutonnière de Tangerfa (Chabane, 1978; Chabane et Boyer, 1979). Les terrains considérés de type PIII sont décrits dans le sud algérien, dans l'Ougarta (Chikhaoui, 1974; Remichi, 1987), dans la boutonnière de Bou Kaïs (Meindre, 1955), dans le Hoggar, ainsi que dans l'Adrar des Iforas au Nord du Mali (Chikhaoui, 1981).

A- Lithostratigraphie.

A l'échelle du sud marocain, le PIII présente des variations notables d'épaisseur, de 2000 m au nord, en domaine pan africain, à moins de 300 m au SW, sur le craton ancien. Cette formation volcanique mise en place en milieu continental, a été alimentée par des appareils hypovolcaniques, des stratovolcans et des appareils fissuraux (Boyer et Leblanc, 1977).

Dans la région étudiée (Figure 3), la série du PIII est incomplète; seuls le PIII moyen et supérieur sont représentés et reposent en discordance majeure sur les terrains du PI et du PII, sa puissance varie de 0 à 600 m.

Le PIII moyen est constitué de matériaux pyroclastiques et ignimbritiques avec d'importantes

coulées d'andésites, l'ensemble est intrudé par un essaim de dykes de porphyrites andésitiques alors que le PIII supérieur est à prédominance détritique.

Des coupes (Figure 4) ont été levées dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara, au niveau des localités de Bou Offroh, Bou Derga, Arouli n'azouguar et Guelb Tassaout. Malgré la possibilité de ravinements et de variations latérales des horizons volcaniques et volcanosédimentaires, la présence au sein de la série volcanique du PIII de niveaux détritiques mis en place au cours des arrêts de l'activité volcanique et les variations lithologiques et volcanologiques verticales, permettent d'établir des corrélations entre les différentes coupes.

On a pu ainsi mettre en évidence des lacunes importantes à la base et à l'intérieur même de certaines coupes. Les premières reflètent très probablement la présence de paléoreliefs au début de la mise en place de la formation volcanique et les secondes tradiraient plutôt une activité tectonique synvolcanique ou des ravinements.

B- Données pétrographiques et géochimiques:

Toutes les données analytiques auxquelles il est fait référence ici ont été acquises au laboratoire de spectrométrie de l'ONA (Omnium Nord Africain) à Bou Azzer. S'agissant d'analyses semi-quantitatives, nous avons recalculé pour chaque formation une composition moyenne (Azizi Samir, 1986). Le volcanisme de la formation de Ouarzazate comprend des laves calcoalcalines (Boyer *et al.*, 1978), associées à des basaltes tholéitiques, des

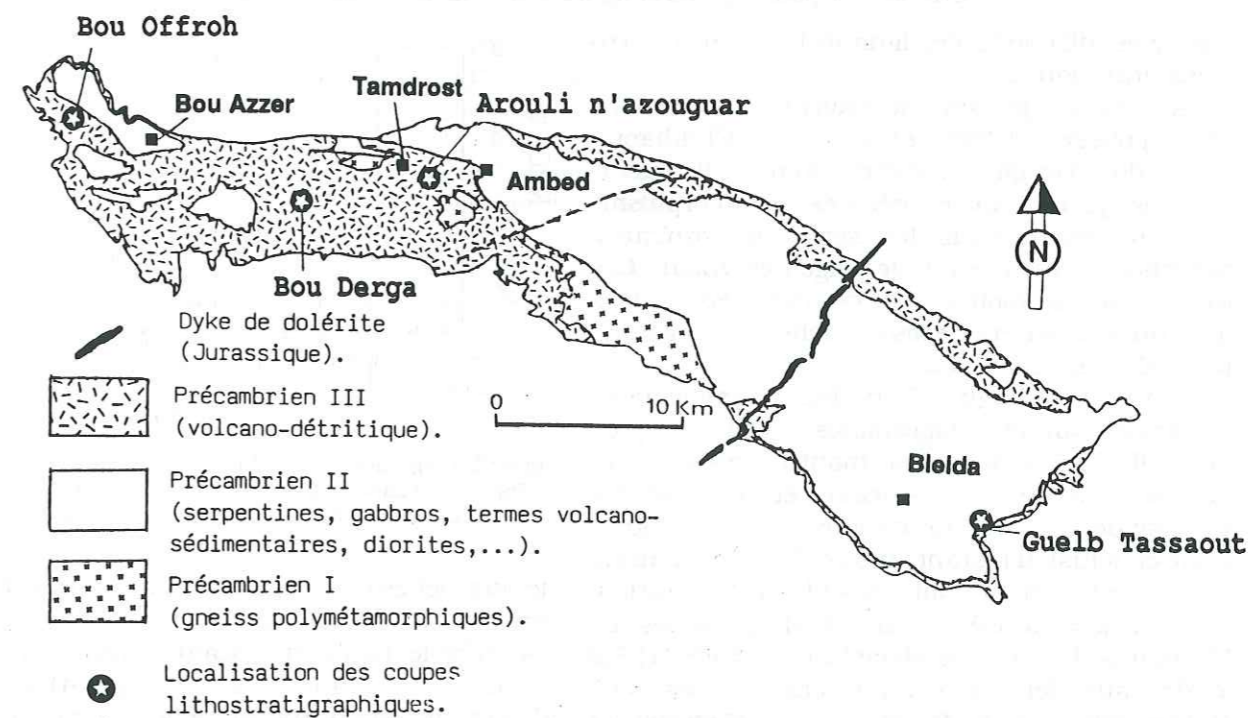


Figure 3. La formation de Ouarzazate ou PIII dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara.

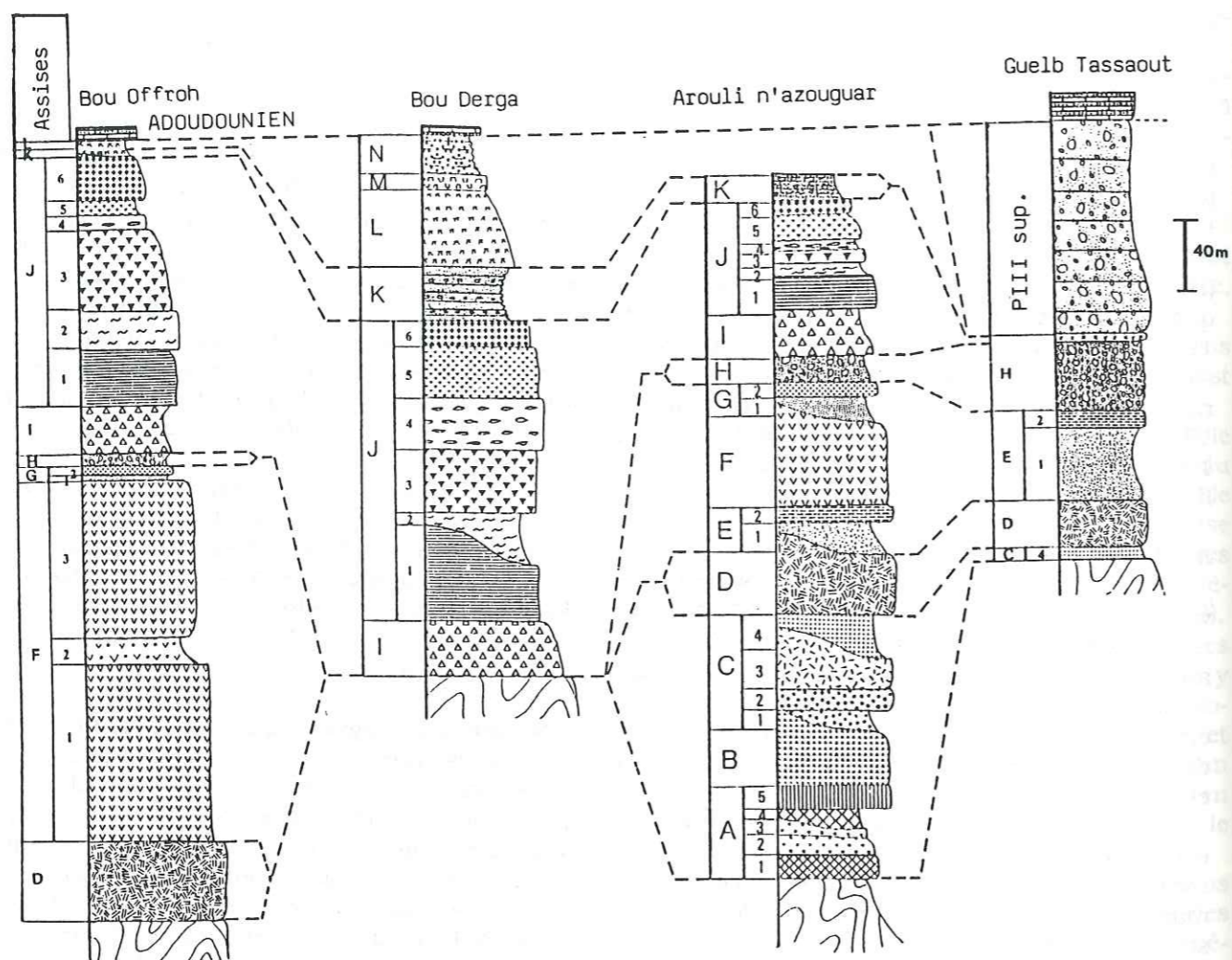


Figure 4. Coupes et corrélations lithostratigraphiques dans le PIII moyen de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara, (cf. Tableau 1 pour légende et figure 3 pour la localisation des coupes).

trachytes, d'abondantes ignimbrites et des intrusions granitiques.

Les volcanites présentent souvent des altérations assez poussées (Boyer *et al.*, 1978; Chikhaoui, 1981), dont l'origine peut être complexe (transformations hydrothermales précoces, métamorphisme d'enfouissement sous les séries paléozoïques, métamorphisme thermique d'âge hercynien). Ces roches ont néanmoins gardé des caractères chimiques qui permettent de les rattacher à un magmatisme de série calco-alcaline.

La projection (Figure 5) de leurs compositions moyennes sur les diagrammes K_2O vs SiO_2 de Peccerillo et Taylor (1976), montre un étalement dans les domaines calco-alcalins et une tendance potassique pour les formations les plus acides. Cette conclusion restant sujette à caution, dans la mesure où K et Si sont sensibles à l'altération, nous avons utilisé aussi les diagrammes de Miyashiro (1974) et de Miyashiro et Shido (1975) fondés sur des éléments traces réputés plus stables tels que: V, Cr et Ni. Ces diagrammes (Figure 6 et 7) confirment le caractère calco-alcalin

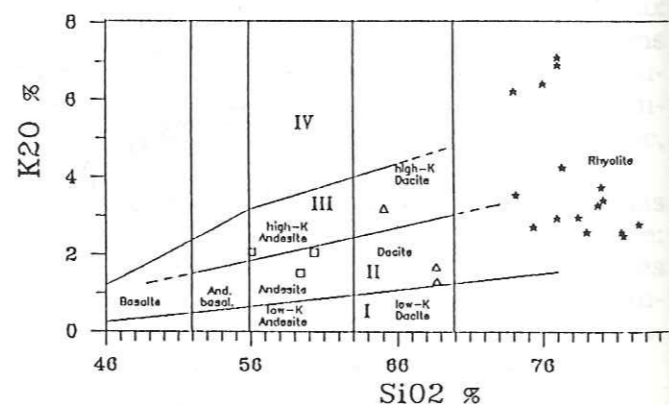


Figure 5. Diagramme K_2O vs SiO_2 (D'après Peccerillo et Taylor, 1976) I : domaine des séries tholéitiques; II : série calco-alcaline; III : série calco-alcaline potassique; IV : séries shoshonitiques

de nos roches avec cependant une affinité tholéitique pour les pôles basiques.

A l'échelle du sud marocain, deux origines différentes sont retenues pour ce magmatisme calco-alcalin: une origine crustale pour le magma acide et une origine mantellique pour le magma basique

Tableau 1. Légende de la figure 4, découpage lithostratigraphique et nature des constituants.

Ensemble	Unité	Assise	Nature	Observations		
3	5	N	grés, microconglomérat	lités		
		M	ignimbrite rhyolitique à lithophyses de quartz			
		L	coulée andésitique			
2	4	K	conglomérat et grés	lités		
		J6	ignimbrite rhyolitique aglomératique	gris claire à blanc		
		J5	ignimbrite dacitique aglomératique	violet		
		J4	ignimbrite rhyolitique à lithophyses en «galettes»	rouge lilas		
		J3	ignimbrite rhyolitique	violet		
		J2	tuf rhyolitique soude	gris violet		
		J1	ignimbrite rhyolitique à lithophyses très applaties	rouge lilas		
		I	andésite à sommet bulleux (amandes de quartz)	violet		
		1	3	H	conglomérat (lappilis, bombes, cinérites)	gris claire
				G2	ignimbrite dacitique à éléments de ponce	
G1	tuf dacitique					
F3	coulée d'andésitique					
F2	brèche volcanique à éléments d'andésite dans tuf andésitique					
2	F1		coulée andésitique porphyrique	gris		
	E2		ignimbrite rhyolitique porphyrique	grise		
	E1		tuf rhyolitique	rouge brique		
	D		ignimbrite et tuf soudé rhyolitiques à biotites	rouge violacé		
	C4		ignimbrite rhyolitique	rouge brique		
	C3		ignimbrite rhyolitique porphyrique	grise		
	C2		ignimbrite rhyolitique à lithophyses de quartz	rouge brique		
1	C1		tuf rhyolitique	rose grisâtre		
	B		coulée andésitique	grise violacé		
	A5		ignimbrite myolitique aglomératique	rouge brique		
	A4	ignimbrite rhyolitique hyperquartzéuse	rose grisâtre			
	A3	ignimbrite rhyolitique porphyrique	grise			
1	A2	ignimbrite rhyolitique	rose claire			
	A1	tuf et ignimbrite rhyolitique à lithophyses de quartz	rose violacé			

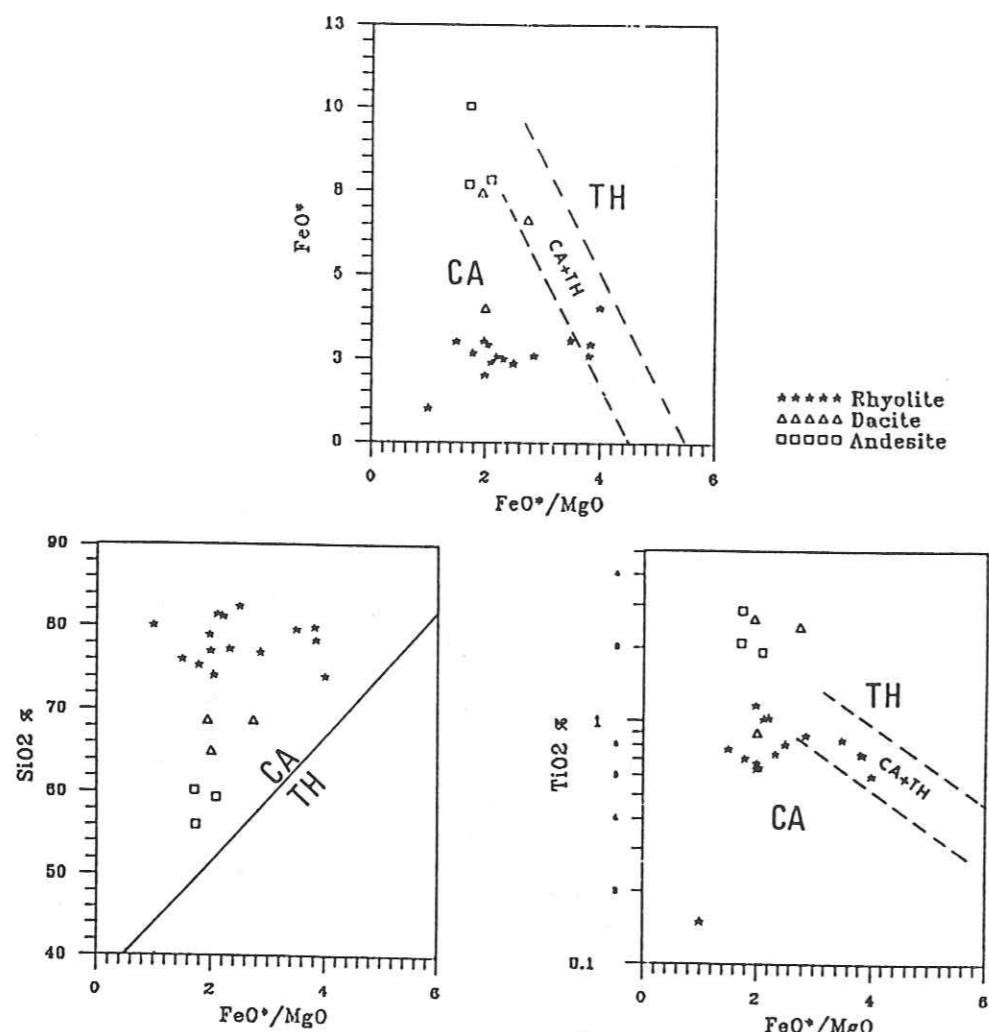


Figure 6. Diagrammes de variation de SiO_2 , de FeO et de TiO_2 en fonction de FeO/MgO (Miyashiro, 1974; Miyashiro et Shido, 1975). CA : domaine calco-alcalin; TH : domaine tholéitique.

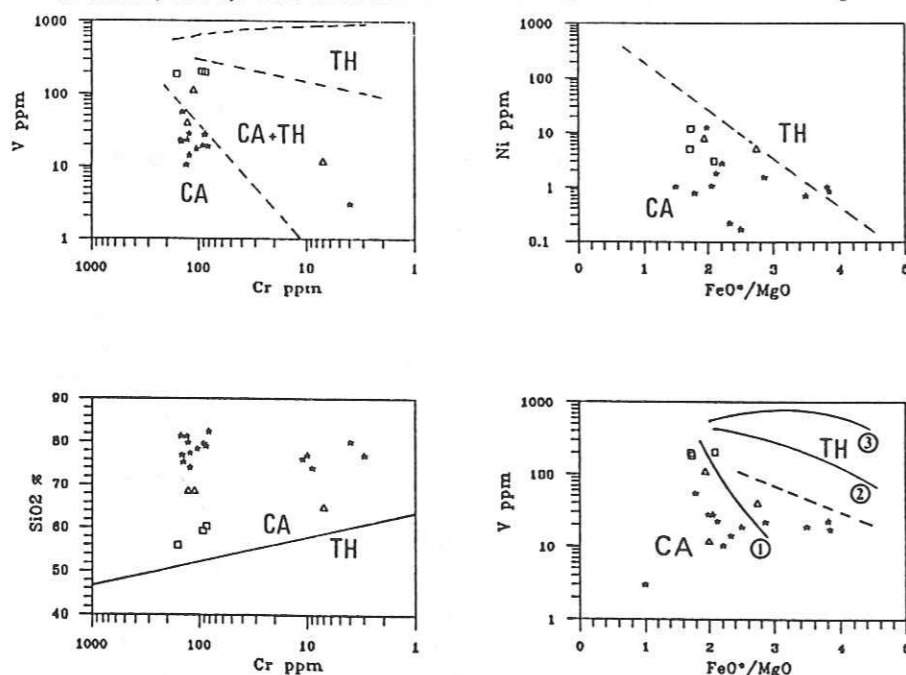


Figure 7. Diagrammes de variation de Miyashiro et Shido (1975) pour les éléments traces. CA : domaine calco-alcalin; TH : domaine tholéitique; 1 : lignée calco-alcaline pure; 2 : lignée à affinité tholéitique; 3 : lignée tholéitique pure.

(Baouch, 1984; Hassenforder, 1987). Cet important magmatisme calco-alcalin est mis en rapport avec la subduction du dernier fragment de croûte océanique lors de la collision panafricaine (Leblanc *et al.*, 1980), ou en rapport avec le sous charriage, lors de la même phase, du craton septentrional sous le craton ouest-africain (Schermerhorn *et al.*, 1986). Le magma basique serait produit soit directement par fusion partielle de la croûte océanique subductée, soit par fusion du manteau supérieur sous l'effet des fluides dégagés par celle-ci. La production du magma basique calco-alcalin peut continuer jusqu'à 30 à 50 M.a. après la fin du processus de subduction (Bonin, 1987), il est par ailleurs supposé avoir stationné suffisamment longtemps au sein de la croûte continentale pour entraîner sa fusion et la genèse du magma acide.

La distinction de deux origines différentes du magmatisme calco-alcalin du PIII ou de type PIII, se retrouve dans certaines régions de la chaîne Trans-Saharienne, dans l'Ougarta (Remichi, 1987), dans le Hoggar et l'Adrar des Iforas (Chikhaoui, 1981). Cependant la variabilité des proportions des différents types pétrographiques, de certains caractères géochimiques (spectres et teneurs absolues en REE), ainsi que la présence ou l'absence de roches à affinité tholéitique, sont attribuées à des variations de l'épaisseur de la croûte continentale d'une région à une autre lors de la mise en place des différentes séries.

TECTONIQUE

A- Fracturation:

L'analyse statistique des directions de fracturation relevées sur les cartes au 1/100000 de la boutonnière (Leblanc, 1975), nous a permis de caractériser trois principales familles de directions (Figure 8). ($N0^\circ$ à $N20^\circ E$), ($N40^\circ$ à $N70^\circ E$) et ($N100^\circ$ à $N130^\circ E$). Toutes ces fractures affectent la série volcanique du PIII, ce qui montre que ces failles ont probablement toutes joué lors d'activités tectoniques contemporaines ou postérieures à la mise en place de cette série volcanique.

La famille de directions ($N100^\circ$ à $N130^\circ E$), dite ougartienne comprend la direction de la suture de Bou Azzer. Il s'agit d'accidents considérées comme hérités de la phase tectonique majeure pan-africaine (B1), responsable de l'obduction du complexe ophiolitique. Des critères cartographiques (affleurement de la série de Tiddiline, d'âge PII supérieur, en bandes parallèles à cette direction), laissent présumer que ces accidents ont rejoué en failles normales lors du dépôt de cette série détritique.

Les observations microtectoniques effectuées sur certains de ces accidents, montrent qu'ils ont rejoué en décrochement sénestres avec une com-

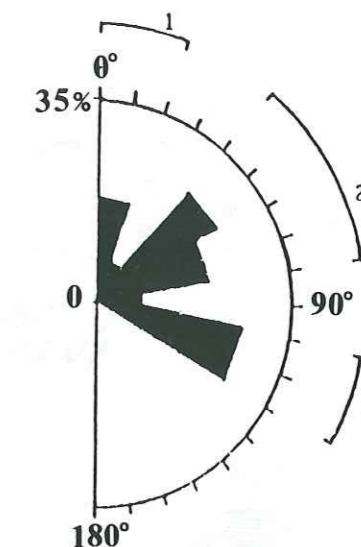


Figure 8. Rosace de la fracturation dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara, les pics 1, 2 et 3 représentent les principales familles de directions.

posante distensive lors de la mise en place de la série volcanique du PIII.

La famille de directions $N40^\circ$ à $N70^\circ E$ est constituée de décrochements sénestres rattachés à la phase B2, qui sont responsables des décalages des massifs de serpentine, et surtout de failles normales ayant déterminé une distension orientée NW-SE au PIII.

Les directions ($N0^\circ$ à $N20^\circ E$), de moindre importance statistique représentent des décrochements sénestres associés à des filons de quartz, carbonates et oligiste de même direction. Elles sont supposées être liées à l'orogénèse hercynienne (Billaud, 1977).

B- Modalités et marqueurs de distension dans le PIII:

Des failles normales orientées NE-SW et associées à des dykes de même direction déterminent des structures distensives en demi-horsts et demi-grabens. Le rejet vertical de ces failles normales varie de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Ces structures sont complètement scellées par les dépôts dolomitiques de l'Adoudounien (Infracambrien supérieur).

1) Les grabens et demi-grabens:

Des grabens et demi-grabens sont observés à différents niveaux de la série volcanique: par exemple les structures observées au sud d'Arouli n'azougar et à El Marghe (Figure 9). Des discordances progressives sont associées à ces structures distensives. La présence de ces structures à différents niveaux de la série volcano-détritique, témoigne d'une déformation continue se libérant en saccades dans un même champ de contraintes.

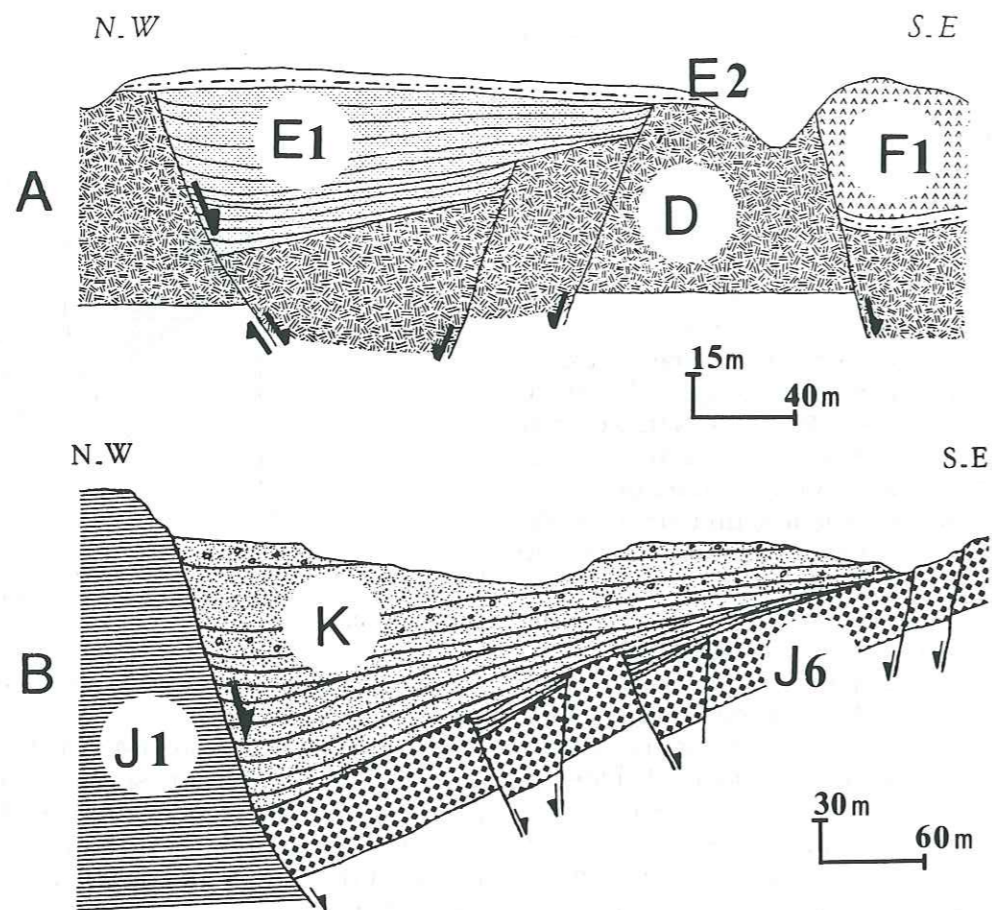


Figure 9. Structures distensives synvolcaniques PIII, (d'après photos). A: Hemigraben scellé par l'assise E2, dans la zone d'Arouli n'azouguar. (X=371.440 Y=391.160), B: Demigraben d'El Marghe, présentant des discordances progressives dans les niveaux détritiques K1, (X=369.600 Y=390.500).

2) Les indices de déformation hydroplastique:

De nombreux miroirs de failles normales, se caractérisent par l'abondance d'éléments striateurs intacts, par l'absence de toute recristallisation et localement par la néoformation de structures en «rouleaux». Ces dernières se développent sur certains miroirs de failles normales principales et se présentent sous forme d'une succession de rides ou rouleaux dissymétriques (Figure 10). Chaque rouleau est limité par des microfailles secondaires, elles-mêmes striées et courbées vers l'aval lors du déplacement du compartiment supérieur. Ceci implique un matériau non encore induré au moment de la déformation et surtout la persistance d'assez hautes températures. Des structures comparables ont été décrites dans des sédiments gréseux non indurés du Trias du Haut-Atlas (Laville et Petit, 1984) et interprétées comme le résultat d'une déformation synsédimentaire.

3) Des glissements sur paléopentes :

Les mouvements de blocs sont à l'origine, en particulier au sommet de la série, de glissements en masse de matériaux volcaniques. Ces glissements interviennent au niveau des surfaces inter-

bancs proprement dites et sont soulignés par des cannelures décimétriques en forme de coups de gouge. Ces cannelures observées en plusieurs points du secteur étudié montrent une direction moyenne de glissement orientée NW-SE.

4) Les dykes de porphyrite andésitique:

Des dykes de 1 à 3 mètres de largeur, et ne s'étendant que sur quelques centaines de mètres de longueur sont intrusifs dans la série volcanique. Ils sont scellés par les premiers dépôts Adoudouniens. Verticaux et de même direction que les failles normales, ces dykes peuvent être assimilés à des fentes de tension dans le plan Y-Z. La rosace de direction de ces dykes (Figure 11) est conforme à une extension orientée NW-SE.

5) Détermination des axes du paléochamp de contraintes:

Les mesures microtectoniques récoltées sur les failles normales à caractère précoce, nous ont permis, en utilisant la méthode des dièdres droits (Angelier, 1979; Mugnier, 1984), de déterminer les directions des axes de contraintes principales. La projection isoaire obtenue (Figure 12), montre les

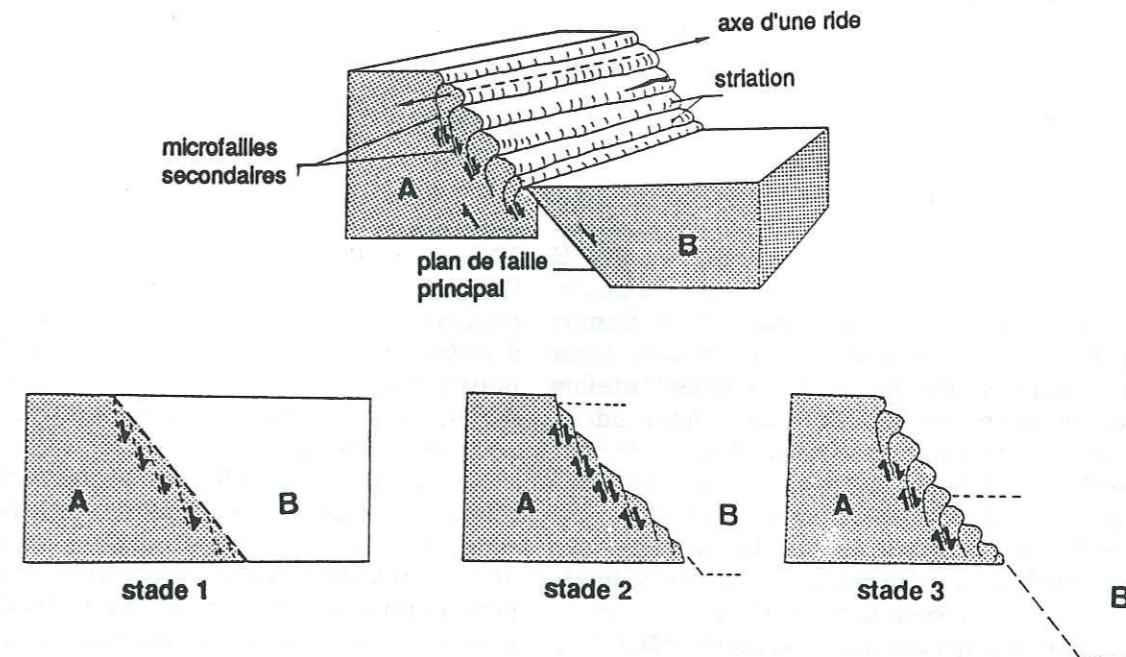


Figure 10. Morphologie et mécanisme (interprétatif) de formation des structures précoces en rouleaux, observées à Arouli n'azouguar. stade 1: formation d'un plan de néorupture avec initiation d'un système de microfailles secondaires; stade 2: début de basculement du compartiment B, associé à un jeu normal des microfailles; stade 3: étape avancée du basculement de B le long du plan de faille principale, avec torsion des microfailles secondaires et torsion conforme des lanières de matériau qu'elles séparent.

directions suivantes: σ_1 (vertical); σ_2 (N45, horizontal) et σ_3 (N135, horizontal). Ces directions reflètent une extension orientée NW-SE.

C- Caractère régional :

La grande étendue des affleurements des volcanites du P.III et la mise en place de celle-ci dans un contexte général distensif (Leblanc, 1981; Azizi Samir *et al.*, 1986; Hassenforder, 1987) confère à ce régime distensif un caractère régional. Il faut noter que des indices de distension ont été directement ou indirectement signalés dans la littérature consacrée au P.III, ainsi par exemple:

* Entre Bou Azzer et Ouarzazate, des filons manganésifères associés au volcanisme P.III (Jouravsky, 1963); sont orientés NE-SW dans une très large proportion.

* Au Sud de Ouarzazate Boyer et Leblanc (1977) décrivent un microprotorift allongé NE-SW.

* Dans le Haut-Atlas de Marrakech, sur la bordure nord de l'Anti-Atlas, de nombreux filons volcaniques ont été décrits (Proust, 1961). Ces filons font partie de la série du P.III, et sont orientés NE-SW.

* Enfin, les récents résultats obtenus par Hassenforder (1987) dans la boutonnière du Kerdous à l'extrémité Ouest de l'Anti-Atlas, mettent en évidence une direction d'extension orientée E-W au P.III, associée à des bassins allongés selon une direction méridienne. Ceci nous conduit à poser le problème du rapport entre les directions d'extension (NW-SE) observée dans notre secteur et (E-W) observée dans le Kerdous. Cette différence angulaire serait-elle due au contexte géologique local,

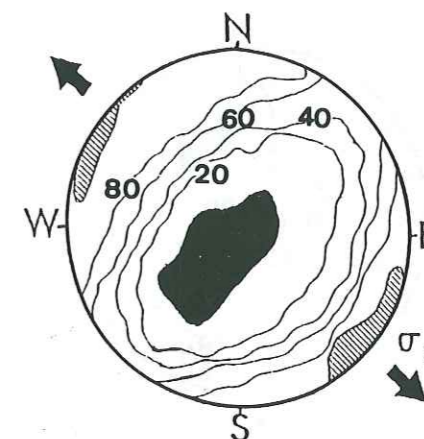


Figure 11. Rosace des dykes de porphyrite andésitique, les directions (bien réglées) sont conforme avec une extension orientée NW-SE.

Figure 12. Axes principaux des contraintes, σ_1 en noir, σ_3 en hachuré, projection isoaire sur hémisphère inférieure correspondant à la distension synvolcanique P.III, (92 mesures).

ou au contraire à des variations dans le temps?, cette question sera discutée dans le modèle géotectonique proposé.

D- Les décrochements-extension :

Des décrochements sénestres extensifs (rejet composite: horizontal et vertical avec prédominance du premier) de direction N100° à N120°E (parallèles à la direction de la suture pan-africaine) ont été observés à l'Est de Bleida (Azizi Samir, 1983). Ces accidents développent dans la série volcanique du PIII des plans striés, sans toutefois affecter les premiers dépôts dolomitiques adoudouniens (Infracambrien supérieur). Leur dernier jeu en décrochements-extension, est donc contemporain des dépôts volcaniques du PIII.

Le traitement statistique par la méthode des dièdres droits, des mesures microtectoniques récoltées dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara, sur les accidents de direction N100° à N120°E nous a permis de déterminer les directions des axes de contraintes principales correspondants. La projection isoaire (Fig. 13) correspondant à cet aspect tectonique, montre les directions des axes de contraintes principales suivantes: σ_1 (N40°E, 50°N), σ_2 (N40°E, 40°S) et σ_3 (N130°E, 10°W).

Outre son synchronisme avec la distension orientée NW-SE déjà décrite, ce phénomène de décrochement présente une grande compatibilité mécanique avec la dite distension, d'où nous retenons un lien génétique entre les deux aspects tectoniques. Les décrochements-extension sénestres auraient induit l'ouverture des structures distensives au fur et à mesure de la mise en place de la couverture volcanique. Les dykes de porphyrites andésitiques correspondraient dans ce schéma à des mégafentes de tension dans le plan σ_1 - σ_2 .

E- Interprétations :

La mise en place de la série volcanique calcoalca-

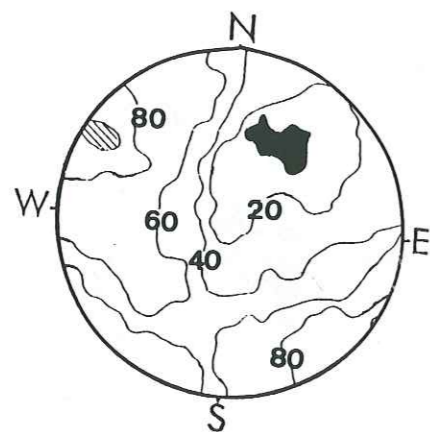


Figure 13. Axes principaux des contraintes, (σ_1 en noir et σ_3 en hachuré) correspondants aux décrochements-extension sénestres (hémisphère inf., 78 mesures).

line du PIII, s'effectue dans un contexte tectonique distensif marqué (Figure 14) par un coulisement sénestre le long des accidents de direction N100° à N120°E. Le dernier événement tectonique qui précède cette mise en place se traduit par la collision survenue lors de la phase tardive panafricaine B2, dont l'axe de contrainte principale σ_1 est orienté NNE-SSW et horizontal. L'activité volcanique du PIII succède donc à un changement du champ de contraintes, avec une rotation de l'axe σ_1 de N30° à N40°E et surtout un redressement de cet axe pour passer de l'horizontale à un plongement de 50° N, redressement qui est normal dans un contexte de relâchement des contraintes.

Cette évolution du champ de contraintes et les observations de terrain impliquent un mouvement de coulisement sénestre entre le craton Ouest-africain et le domaine panafricain, avec le développement au sein de ce dernier, d'un effondrement et une extension traduisant une évolution de rifting.

MODELE GEOTECTONIQUE

Les relations des phénomènes tectoniques PIII étudiés ci-dessus avec ceux observés (pour la même époque) dans d'autres régions du NW africain permettent de situer cette évolution dans un cadre global. Ainsi, dans le Siroua, le modèle de Schermerhorn *et al.* (1986), suppose que la subduction ne s'arrête pas avec la collision, mais que le continent nord plonge, à la suite de la croûte océanique, sous la bordure du craton Ouest-africain, entraînant ainsi un épaississement crustal. Celui-ci et l'élévation de température qui l'accompagne, sont à l'origine d'une fusion crustale partielle attestée par la présence de migmatites.

Un large couloir (6 km) de cisaillement dextre orienté E-W, tardi-panafricain mais anté PIII (Schermerhorn, 1986), est souligné par des mylonites dont l'importance augmente vers le Nord. Ceci montre que les deux blocs continentaux se déplacent latéralement l'un par rapport à l'autre,

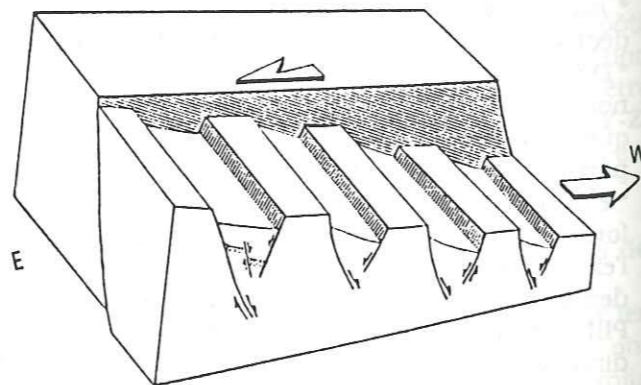


Figure 14. Schéma interprétatif du lien entre les décrochements-extension sénestres N100 à N120 E et la distension simple orientée NW-SE, tous deux synvolcaniques PIII.

en réponse à une composante oblique de la collision.

Dans le Kerdous à l'extrémité W de l'Anti-Atlas, la série post-tectonique et tardi-orogénique de Tanalt, est affectée au sommet du Protérozoïque supérieur, par des effondrements en horst et graben à allongement dominant subméridien. La série de Tanalt étant attribué au Précambrien III (Hassenforder, 1987) nous pouvons présumer que la différence angulaire constatée entre les directions d'extension (E-W) au Kerdous et (NW-SE) dans la boutonnière de Bou Azzer-El Graara serait due au contexte géologique local. Cette distension E-W à l'extrémité ouest de l'Anti-Atlas est peut-être à mettre en relation avec l'ouverture du Proto-Atlantique (Schenk, 1971).

Dans la chaîne Trans-Saharienne qui résulte d'une collision entre le craton Ouest-africain et les massifs de Tuareg et du Niger vers 600 M.a., on assiste au niveau des Iforas à un passage rapide d'un magmatisme calcoalcalin à un magmatisme alcalin vers 550 M.a. (Boullier *et al.*, 1986). Cette transition est liée de point de vue structural à un changement du champs de contraintes à la fin et après la collision. Pendant cette évolution, la direction de σ_1 varie de N135° à N90° autour de 600 M.a., avec des décrochements sénestres orientés N-S qui provoquent des déplacements latéraux sénestres de plusieurs centaines de kilomètres. Vers 550 Ma, σ_1 prend une direction de N50° à N60° (Lancelot *et al.*, 1983), avec des décrochements dextres orientés N-S à N20.

L'évolution tectonique dans ces différentes régions, toutes reliées par la suture panafricaine, pourrait s'inscrire schématiquement dans le modèle préliminaire suivant (Figure 15) :

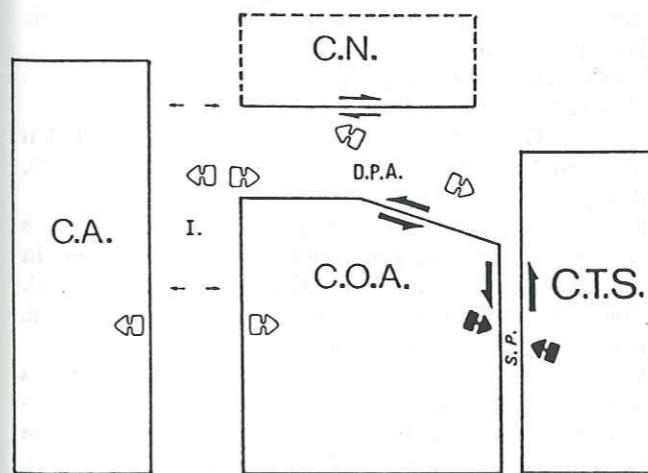


Figure 15. Modèle schématique préliminaire de la situation géotectonique dans le NW africain au PIII. D.P.A.: domaine panafricain de l'Anti-Atlas; C.T.S.: chaîne Trans-Saharienne; S.P.: suture panafricaine; I.: Iapetus; C.O.A.: craton Ouest-Africain; C.A.: cratons d'Amérique; C.N.: craton (s) nord «hypothétique (s)».

Les deux extrémités (occidentale et orientale) de la chaîne anti-atlasique connaissent deux événements majeurs: d'une part, à l'Ouest, l'ouverture d'un Proto-Atlantique ou Iapetus, marquée sur la bordure NW du craton Ouest-Africain par des bassins subméridiens et une extension E-W, et d'autre part, à l'Est (dans la chaîne Trans-Saharienne), la compression tardive panafricaine dont l'orientation évolue de SE-NW à E-W. Cette compression est accompagnée d'importants cisaillements sénestres N-S.

On assisterait donc au niveau de l'Anti-Atlas central (zone intermédiaire) à l'interférence des répercussions des ces deux événements majeurs. Ceci se traduit par le fonctionnement en décrochements sénestres des accidents N100° à N120°E, une extension NW-SE et des effondrements qui indiquent le début d'un processus de rifting intracontinental, au niveau du domaine panafricain. Cette évolution aboutira par la suite à un amincissement de la croûte, attesté par l'arrivée du magmatisme alcalin à la base de l'Adoudounien et à l'installation d'un golfe ouvert vers l'Ouest (Proto-Atlantique) au moment de la transgression adoudounienne.

CONCLUSIONS

Les principaux résultats qui se dégagent de cette étude portent sur trois points fondamentaux :

- 1) La contemporanéité des phénomènes tectoniques (décrochement et distension) et du volcanisme calcoalcalin du PIII. Nous soulignons notamment le caractère saccadé de ces mouvements tectoniques, mis en évidence par la présence de structures scellées à différents niveaux de la série volcanodétritique.
- 2) Le sens sénestre et le caractère extensif des décrochements ainsi que la direction générale NW-SE de la distension qui affecte la série du PIII au moment de sa mise en place.
- 3) Cette activité tectonique s'inscrit dans une dynamique globale de tectonique de plaques, dont les événements moteurs paraissent être, d'une part, la collision oblique tardi panafricaine, dans la chaîne Trans-Saharienne et d'autre part, les premiers stades de l'ouverture du Proto-Atlantique sur le côté occidental du craton Ouest-africain.

La série du PIII est interprétée comme mise en place dans un contexte tectonique de rifting intracontinental, annonçant déjà le début du cycle paléozoïque marocain.

Cette évolution de type rifting aboutira à l'installation progressive, d'un golfe ouvert vers l'Ouest, qu'envahira la transgression Adoudounienne, marquée à sa base par la mise en place d'un magmatisme alcalin.

tel-00708240, version 1 - 14 Jun 2012

Remerciements- Les auteurs adressent leurs plus vifs remerciements à M. Jean Fabre, Directeur de Recherches au C.N.R.S., pour ses critiques constructives de la première version manuscrite.

BIBLIOGRAPHIE

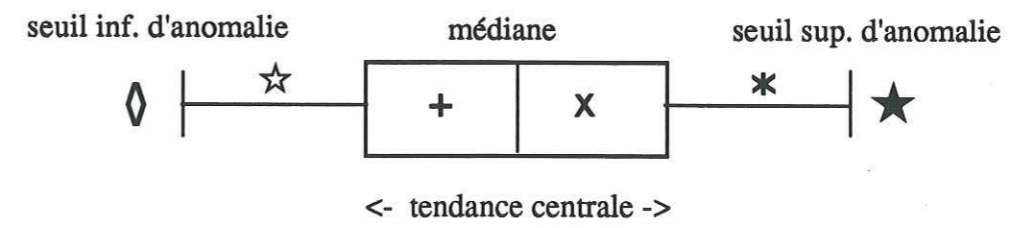
- Angelier, J. 1979. Néotectonique de l'arc égéen. Thèse doc. état, Paris VI, 417 p.
- Azizi Samir, M. R. 1983. Contribution à l'étude lithostratigraphique, pétrographique et tectonique du secteur Guelb Tassaout et à l'étude de la minéralisation cuprifère Adoudounienne, (Anti-Atlas, Bleida), Maroc. Mem. C.E.A. Univ. Marrakech, 41 p.
- Azizi Samir, M. R. 1986. Méthodes statistiques de contrôle de la précision et de correction des analyses géochimiques. Comptes-rendus du congrès: Application de techniques mathématiques, physiques et chimiques à la géologie minière. Marrakech, Maroc, (rapport inédit).
- Azizi Samir, M. R., Ferrandini, J. et Tane, J. L. 1986. Mise en évidence d'un épisode distensif au Précambrien III dans la région de Bou-Azzer (Anti-Atlas central, Maroc). 11^e Réunion. Annu. Sci. Terre, Clermont-Ferrand, p. 6.
- Baouch, S. 1984. Etude des ignimbrites et roches associées du massif de Tircht (Haut-Atlas occidental, Maroc). Contribution à l'étude des relations "Volcanisme-Plutonisme du PIII". Thèse 3^{ème} Cycle, Nancy, 144 p.
- Benziane, F. 1974. Etude pétrographique et géochronologique des granites de la boutonnière précambrienne d'Ifni (Maroc). Thèse 3^{ème} Cycle, Grenoble, 122 p.
- Benziane, F., Jeannette, D. et Yazidi, A. 1981. Lithostratigraphie et datation du Protérozoïque de la boutonnière d'Ifni (Anti-Atlas). *Prec. Res.*, **14**, 363-378 p.
- Benziane, F., Prost, A. E. et Yazidi, A. 1983. Le passage du Précambrien au Cambrien précoce volcanique et sédimentaire de l'Anti-Atlas oriental; Comparaison avec l'Anti-Atlas occidental. *Bull. Soc. Géol. France*, **XXV**, **4**, 549-556 p.
- Billaud, P. 1977. Structures tectoniques panafricaines du gisement de cuivre de Bleida (Anti-Atlas, Maroc). Thèse 3^{ème} Cycle, Montpellier, 90 p.
- Black, R., Caby, R., Moussine-Pouchkine, A., Boyer, R., Bertrand, J. M. L., Boullier, A. M., Fabre, J. and Lesquer, A. 1979. Evidence for late Precambrian plate tectonics in West Africa. *Nature*, **278**, 223-227.
- Black, R. 1980. Precambrian of West Africa. Episodes. *Ottawa*, **4**, 3-8.
- Black, R. 1980. The Pan-African event in the geological framework of Africa, 6-16 p., Pangea, Paris.
- Bodinier, J. L., Dupuy, C. et Dostal, J. 1984. Geochemistry of Precambrian ophiolites from Bou-Azzer, Morocco. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **87**, 43-50 p.
- Bonin, B. 1987. From orogenic to anorogenic magmatism: A petrological model for the transition Calc-alkaline - Alkaline complexes. *Rev. Bras. Geoc.*, **17**(4), 366-371.
- Boullier, A. M., Liégeois, J. P., Black, R., Fabre, J., Sauvage, M. and Bertrand, J. M. 1986. Late Pan-African tectonics marking the transition from subduction-related calc-alkaline magmatism to within-plate alkaline granitoids (Adrar des Iforas, Mali). *Tectonophysics*, **132**, 233-246.
- Boyer, C. et Leblanc, M. 1977. Les appareils émissifs de la formation volcanique infracambrienne de Ouarzazate, Anti-Atlas (Maroc). *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **285**, 641-644 p.
- Doyer, C., Chikhaoui, M., Dupuy, C. et Leblanc, M. 1978. Le volcanisme calco-alkalin précambrien terminal de l'Anti-Atlas (Maroc) et ses altérations. Interprétation géodynamique. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **287**, 427-430 p.
- Caby, R. 1970. La chaîne Pharusienne dans le Nord Ouest de l'Ahaggar (Sahara central, Algérie); Sa place dans l'orogénèse du Précambrien Supérieur en Afrique. Thèse D. Sc. Montpellier. *Publ. Dir. Mines et Géol., Alger, nouvelle ser.* No. **47**, 1983, 288 p.
- Caby, R. et Leblanc, M. 1973. Les ophiolites précambriennes sur les bords E et N du craton Ouest-Africain. In 1^{ère} Réunion. Annu. Sci. Terre, Paris, 112 p.
- Chabane, A. 1978. Les séries volcaniques du Précambrien de la boutonnière de Tanguerfa et les minéralisations cuprifères stratiformes (Anti-Atlas, Maroc). Sédimentologie et paléogéographie. Thèse 3^{ème} Cycle, Paris, 177 p.
- Chabane, A. et Boyer, C. 1979. Séries volcaniques et minéralisations cuprifères du Précambrien supérieur de Tanguerfa, Anti-Atlas, Maroc. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **288**, D, 5-8 p.
- Charlot, R., Choubert, G., Faure-Muret, A. et Tisserant, D. 1970. Etude géochronologique du Précambrien de l'Anti-Atlas (Maroc). *Notes serv. géol.*, Maroc, **30**, 225, 99-134.
- Charlot, R. 1978. Caractérisation des événements éburnéens et panafricains dans l'Anti-Atlas marocain. Apport de la méthode géochronologique Rb-Sr. Thèse, Univ. Rennes I.
- Chikhaoui, M. 1974. Les ignimbrites et les roches basiques du Précambrien supérieur des Monts d'Ougarta (Saoura). Thèse 3^e cycle, Alger, 154 p.
- Chikhaoui, M. 1981. Les roches volcaniques du Protérozoïque Supérieur de la chaîne panafricaine dans le NW de l'Afrique (Hoggar, Anti-Atlas, Adrar des Iforas). Caractérisation géochimique et minéralogique. Implications géodynamiques. Thèse Doc. Etat, Montpellier, 183 p.
- Choubert, G. 1947. L'accident majeur de l'Anti-Atlas. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **224**, 1172-1173 p.
- Choubert, G. 1963. Histoire géologique du Précambrien de l'Anti-Atlas. *Notes et Mém. serv. Géol.*, Maroc, **162**, 352 p.
- Choubert, G. et Faure-Muret, A. 1970. Principales caractéristiques du Précambrien de l'Anti-Atlas, in Livret-guide excursion Anti-Atlas occidental et central. Colloque int. corrélations Précambrien, *Notes et Mém. serv. géol.*, Maroc, No. **229**, 7-42 p.
- Clauer, N. 1974. Utilisation de la méthode Rb-Sr pour la datation d'une schistosité de sédiments peu métamorphisés: application au Précambrien II de la boutonnière de Bou Azzer-El Graara (Anti-Atlas, Maroc). *Earth planet. Sci. Lett.* **22**, 404-412.
- Clauer, N. et Leblanc, M. 1975. Implications stratigraphiques d'une étude géochronologique Rb-Sr sur métasédiments précambriens de Bou-Azzer (Anti-Atlas, Maroc). *Notes Mém. serv. géol.*, Maroc, **38**, 7-12.
- Clauer, N. 1976. Géochimie isotopique du strontium des milieux sédimentaires. Application à la géochronologie de la couverture du craton ouest-africain. *Mém. Sci. Geol., Univ. Louis Pasteur, Strasbourg*, no. **45**.
- Ducrot, J., Leblanc, M. et Lancelot, J. R. 1976. Datation U-Pb du volcan du Jbel Boho (Anti-Atlas, Maroc). Problèmes de la limite Précambrien-Cambrien. 4^e Réunion. Annu. Sci. Terre, Paris, 146 p.
- Ducrot, J. et Lancelot, J. R. 1977. Problème de la limite Précambrien-Cambrien: étude radiochronologique par la méthode U-Pb sur zircons du volcan du Jbel Boho. *Can. J. Earth Sci.* **14**, 2771-2777.
- Ducrot, J. et Lancelot, J. R. 1978. Age panafricain de la granodiorite de Bleida (Anti-Atlas, Maroc) et conséquences. 6^e Réunion. Annu. Sci. Terre, Orsay, 150 p.
- Fabre, J. 1971. Structure de l'Algérie saharienne, éléments pour une carte tectonique. *Bull. serv. Géol., Algérie*, **41**.
- Hassenforder, B. et Jeannette, D. 1974. Rapports entre le Précambrien Supérieur et l'Infracambrien dans la boutonnière du Kerdous (Anti-Atlas occidental). *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **278**, D, 3287-3290 p.
- Hassenforder, B. 1987. La tectonique panafricaine et varisque de l'Anti-Atlas dans le massif du Kerdous (Maroc). Thèse Doc. Etat, Strasbourg, 249 p.
- Jeannette, D. et Tisserant, D. 1987. Les épisodes tectoniques et intrusifs du Précambrien supérieur de l'Anti-Atlas occidental. *Estud. géol.* **33** (44), 315-326.
- Jouravsky, G. 1963. Filons de manganèse dans les formations volcaniques du Précambrien III de l'Anti-Atlas. Etude métallogénique. *Notes serv. géol.*, Maroc, **22**, **170**, 81-92.
- Juery, A., Lancelot, J. R., Hanet, J., Proust, F. et Allegre, C. J. 1974. L'âge des rhyolites du Précambrien III du Haut-Atlas et le problème de la limite Précambrien-Cambrien. 2^{ème} Réunion. Annu. Sci. Terre, Nancy, 230 p.
- Lancelot, J. R., Boullier, A. M., Maluski, H. and Ducrot, J. 1983. Deformation and related radiochronology in a late-Pan-African mylonitic shear zone, Adrar des Iforas (Mali). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **82**, 312-326.
- Laville, E. et Petit, J. P. 1984. Role of synsedimentary strike-slip faults in the formation of Moroccan Triassic basins. *Geology*, v. **12**, 424-427 p.
- Leblanc, M. 1972. Sur le style disharmonique des plis hercyniens à la base de la couverture dans l'Anti-Atlas central (Maroc). *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **275**, D, 803-807 p.
- Leblanc, M. 1973a. Un complexe ophiolitique dans le Précambrien II de l'Anti-Atlas central (Maroc): description, interprétation et position stratigraphique. In: Coll. int. sur les Corrélatons du Précambrien (Anti-Atlas occidental et central). *Notes Mém. Serv. Géol.*, Maroc, **236**, 119-144.
- Leblanc, M., 1973b. La tectonique du Précambrien II dans la région de Bou-Azzer (Anti-Atlas central). *Notes Serv. Geol.*, Maroc, **33**, **249**, 59-82 p.
- Leblanc, M. 1975. Ophiolites précambriennes et gîtes de cobalt: Bou-Azzer (Maroc). Thèse Doc. Etat, Paris VI, *Mém. Cent. Géol. Géophys.*, Montpellier, 329 p.
- Leblanc, M. et Billaud, P. 1978. A volcano-sedimentary upper deposit on a continental margin of upper proterozoic age: Bleida (Anti-Atlas, Morocco). *Economic Geology*, t. **73**, p. 1101-1111.
- Leblanc, M. et Lancelot, J. R. 1980. Interprétation géodynamique du domaine panafricain (Précambrien terminal) de l'Anti-Atlas (Maroc) à partir de données géologiques et géochronologiques. *Can. J. Earth Sci.*, **17**, 142-155.
- Leblanc, M. 1981. The late Proterozoic ophiolites of Bou-Azzer (Morocco): evidence for Pan-African plate tectonics. In: A. Kroner (Editor), *Precambrian Plate Tectonics*. Elsevier, Amsterdam, 435-451 p.
- Meidre, M. 1955. Etude géologique du massif de Bou Kais. *Bull. scient. écon. B.R.M.A.*, Alger **2**, 8-45.
- Mifdal, A. 1981. Etude systématique par les méthodes Rb-Sr et U-Pb du volcanisme acide de l'Anti-Atlas marocain (région de Ouarzazate). Thèse 3^{ème} Cycle, Rennes, 73 p.
- Mifdal, A. et Peucat, J. 1985. Datation U-Pb et Rb-Sr du volcanisme acide de l'Anti-Atlas marocain et du socle sous-jacent dans la région de Ouarzazate. Apport au problème de la limite Précambrien-Cambrien. *Sci. Géol. Bull.*, **38**, **2**, Strasbourg, 1985, 185-200 p.
- Miyashiro, A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *Am. J. Sci.*, **274**, **4**, 321-355 p.
- Miyashiro, A. and Shido, F. 1975. Tholeiitic and calc-alkaline series in relation to the behaviors of Ti, V, Cr and Ni. *Am. J. Sci.*, **275**, 265-277 p.
- Mugnier, J. L. 1984. Déplacements et déformations dans l'avant-pays d'une chaîne de collision. Méthodes d'étude et modélisation. Exemple du Jura. Thèse Doc. Ing., Grenoble, 163 p.
- Peccerillo, A. and Taylor, S. R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamom Area, Northern Turkey. *Contr. Mineral. Petrol.*, **58**, 63-81 p.
- Proust, F. 1961. Etude stratigraphique, pétrographique et structurale du bloc oriental du massif ancien du Haut-Atlas (Maroc). Thèse Doc. Etat, Montpellier, 272 p.
- Proust, F. 1973. Etude stratigraphique, pétrographique et structurale du bloc oriental du massif ancien du Haut-Atlas. *Notes Mém. Serv. Géol.*, Maroc, **254**, 15-53 p.
- Remichi, L. 1987. Etude géologique du Précambrien du Damrane (chane de l'Ougata, Algérie). Le volcanisme et les minéralisations associées. Thèse Doc. Ing., Paris VI, 170 p.
- Schenk, P. 1971. Southern atlantic Canada, Northwestern Africa and continental Drift. *Can. J. Earth Sci.*, **8**, 1218-1251 p.
- Schermerhorn, L. J. G., Wallbrecher, E. et Huch, K. M. 1986. Der subduktionskomplex, Granit plutonismus und schertektonik im Grundgebirge des Sirwa-Doms (Anti-Atlas, Marokko). *Berliner Geowiss. Abh.* (A), v. **66**, 301-332 p.

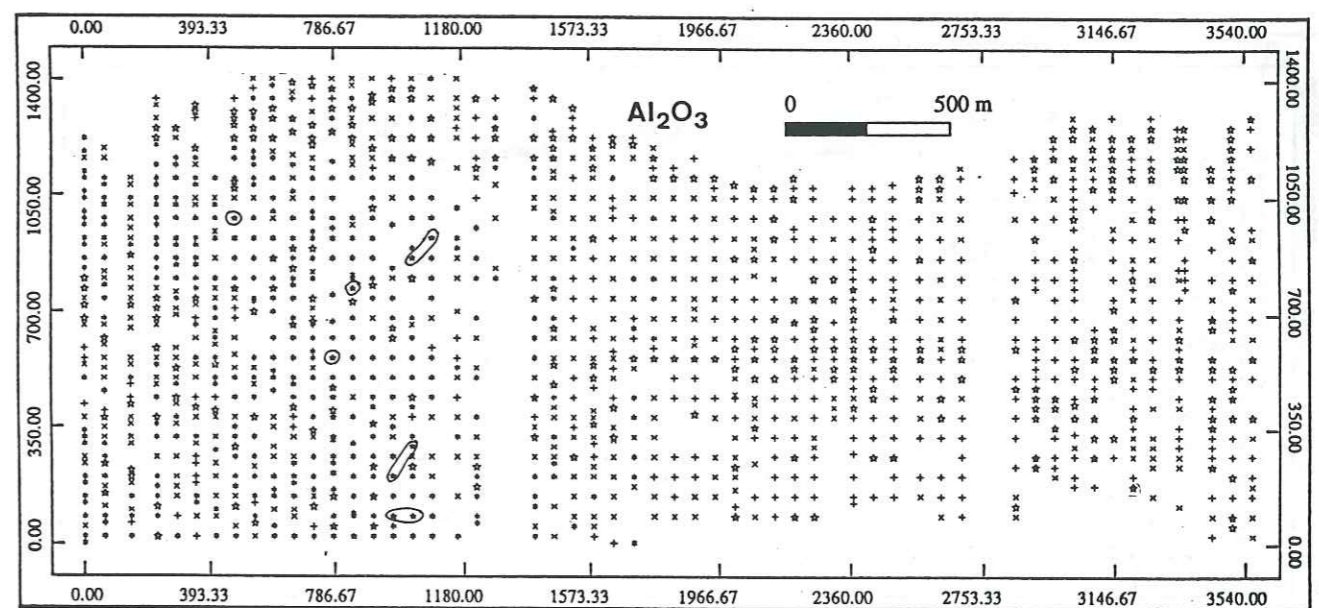
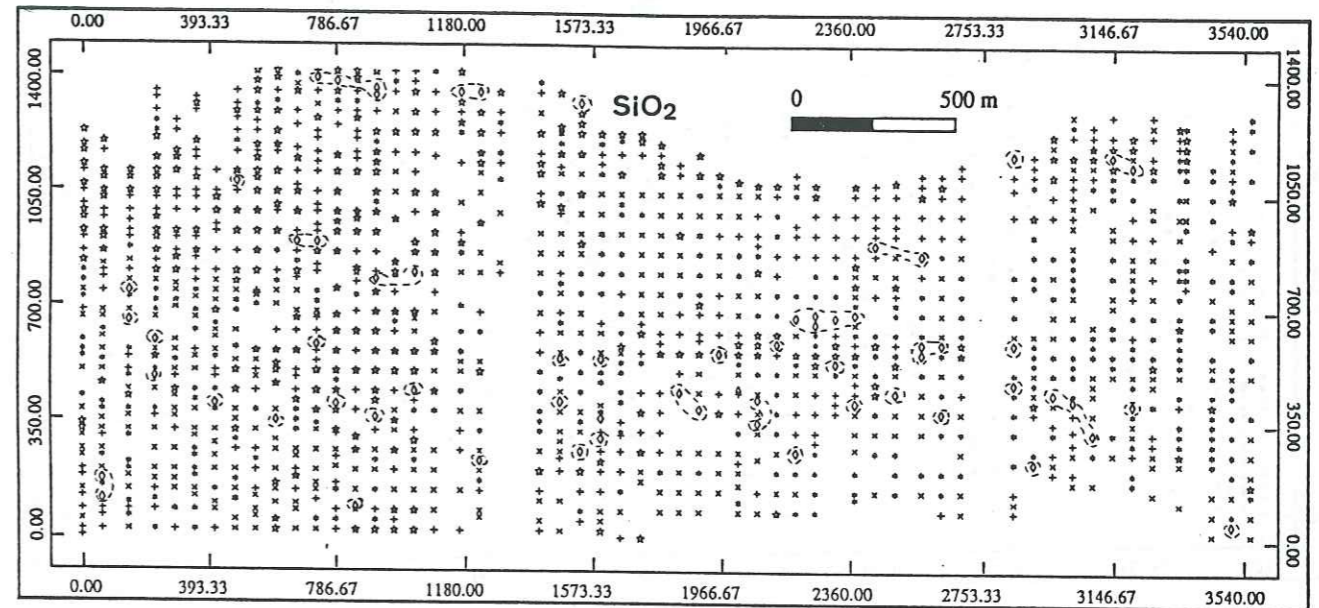
ANNEXE

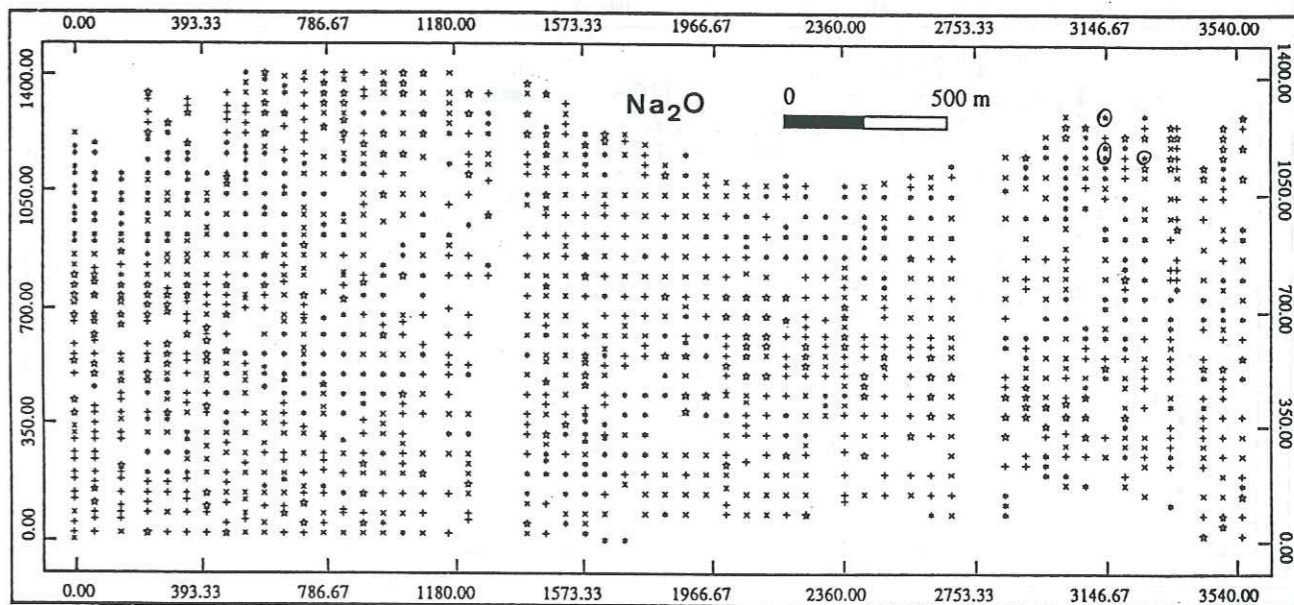
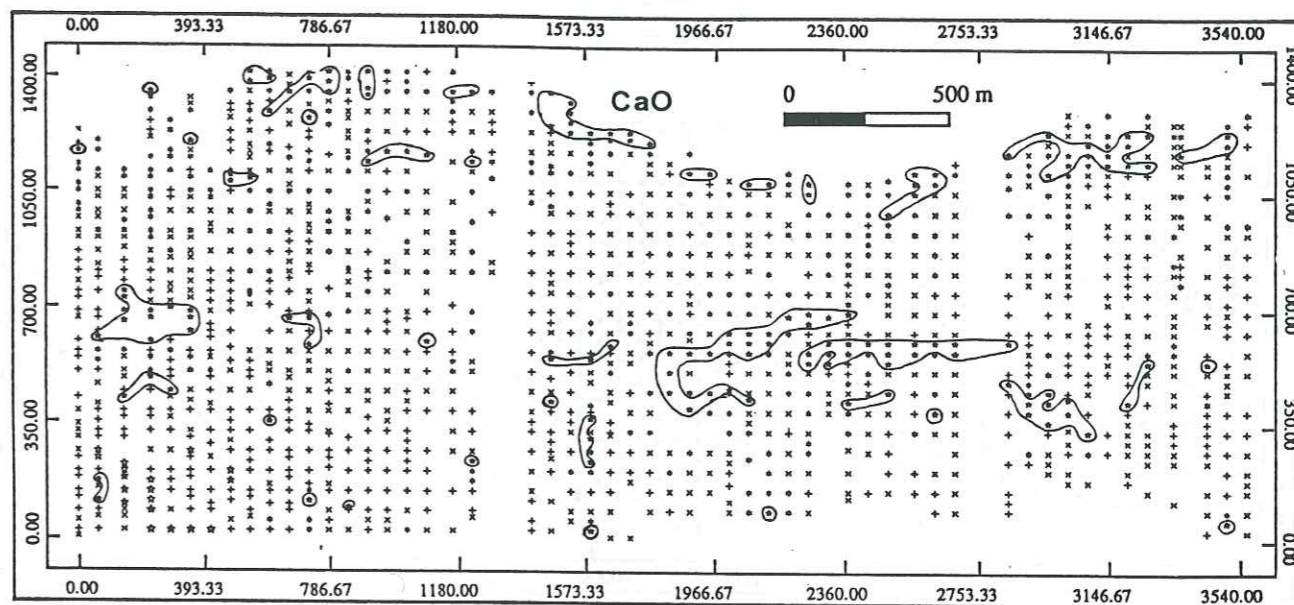
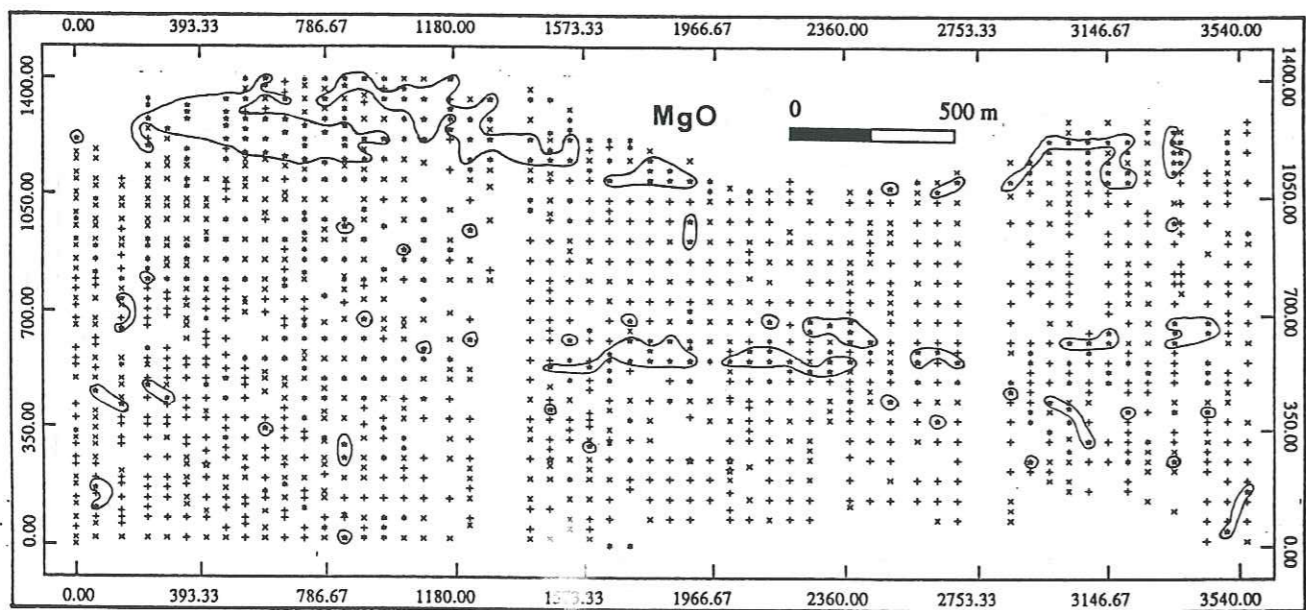
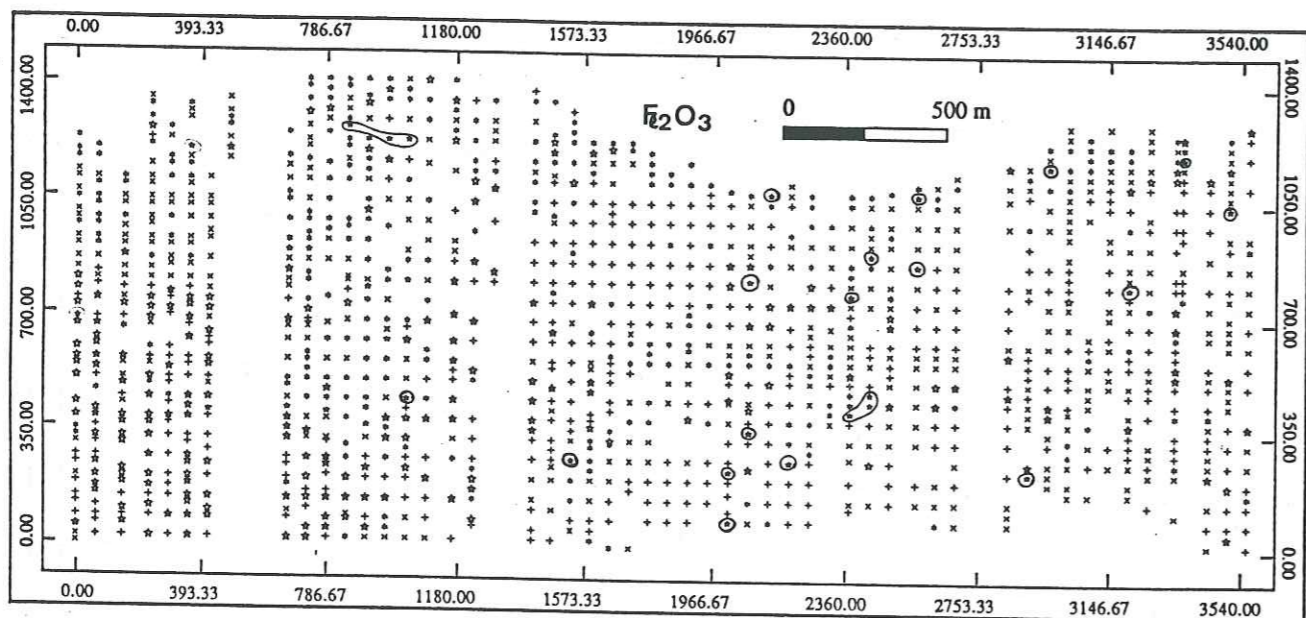
2.

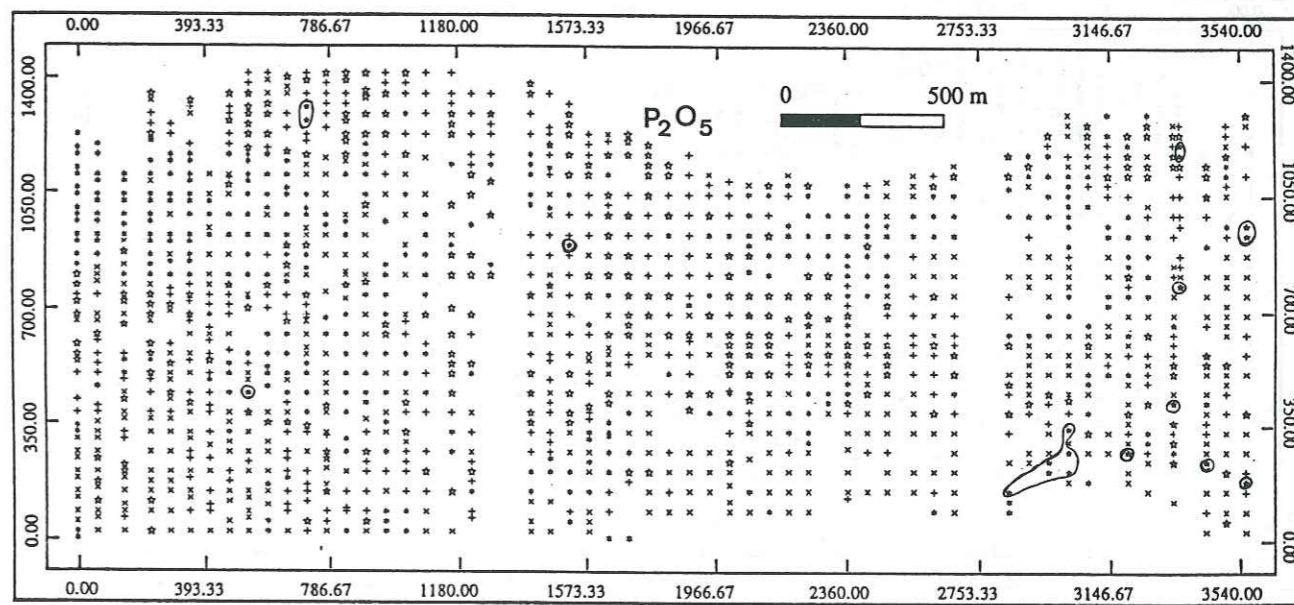
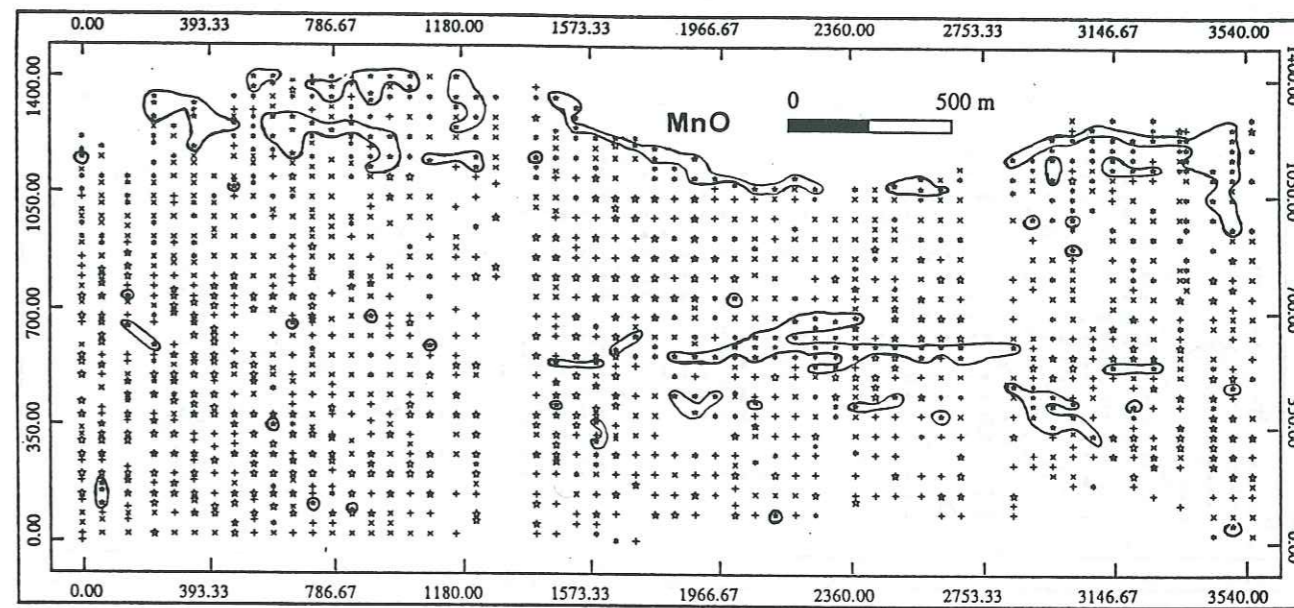
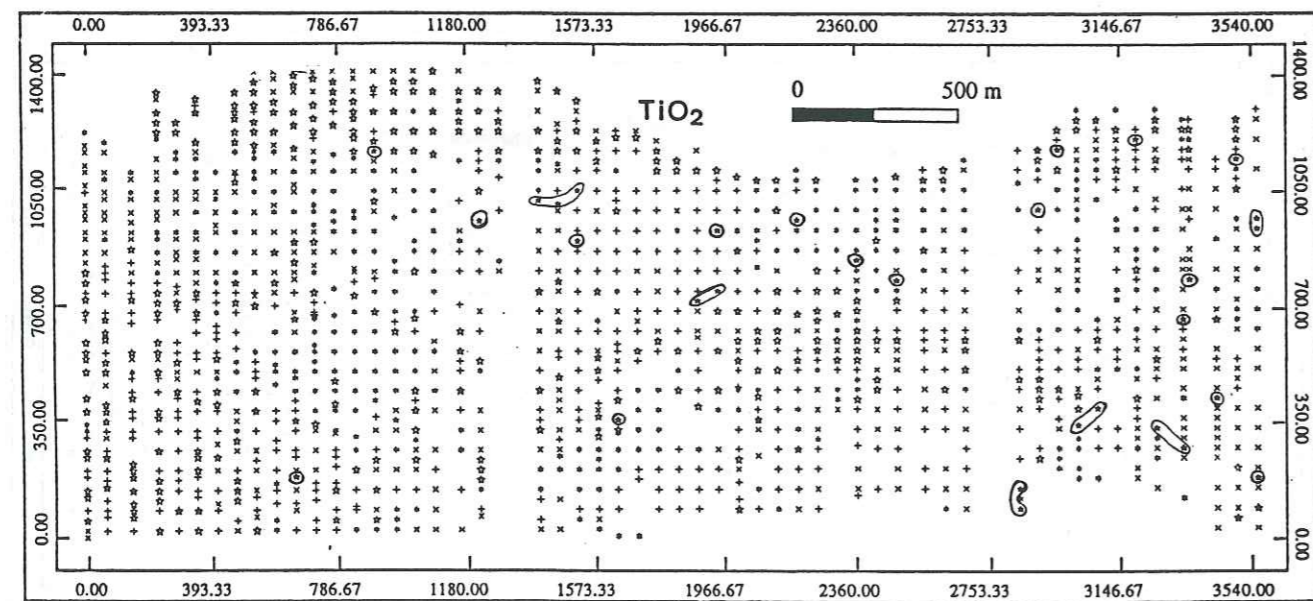
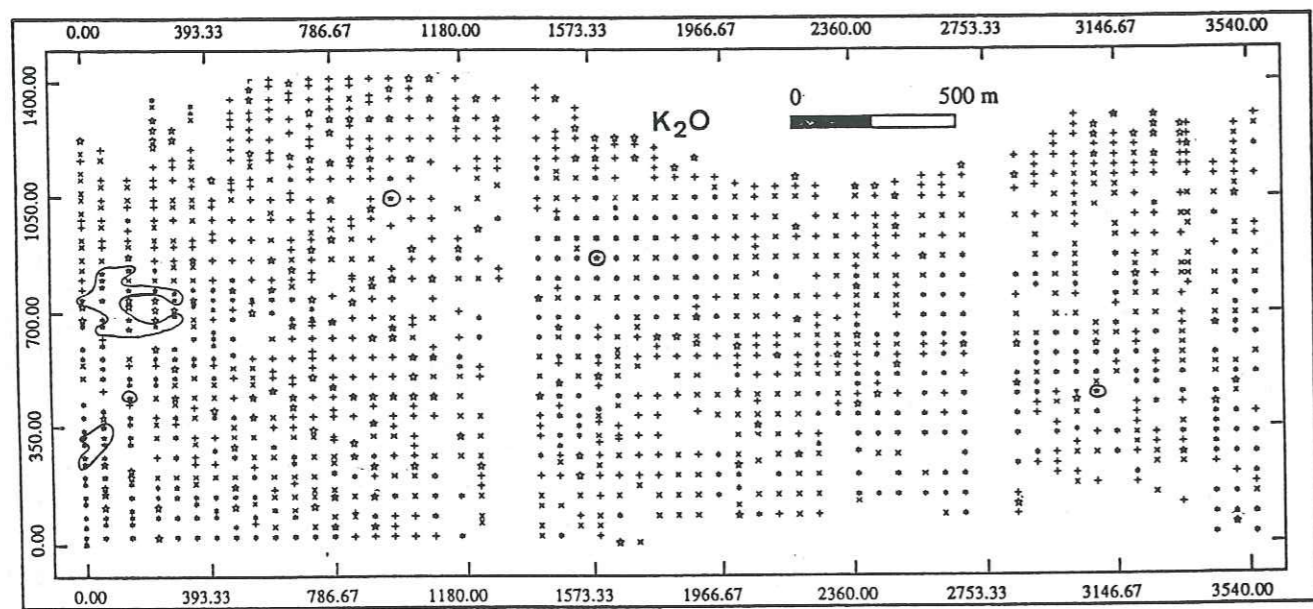
Cartes géochimiques mono-élémentaires des classes de teneur distinguées par les "box and whiskers"

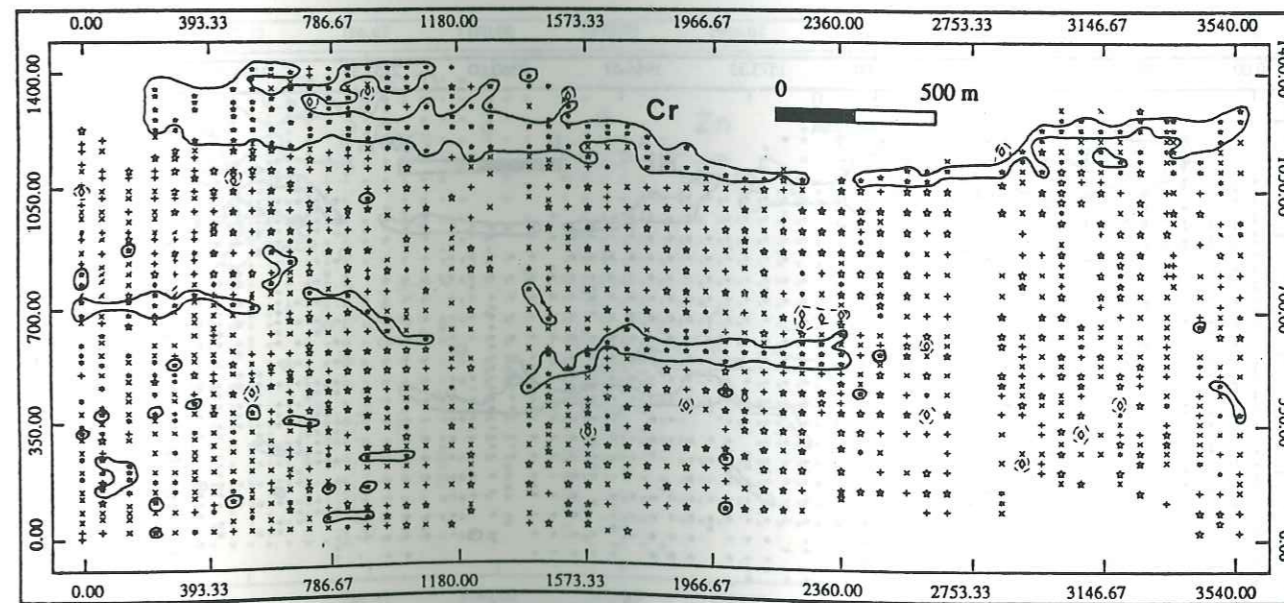
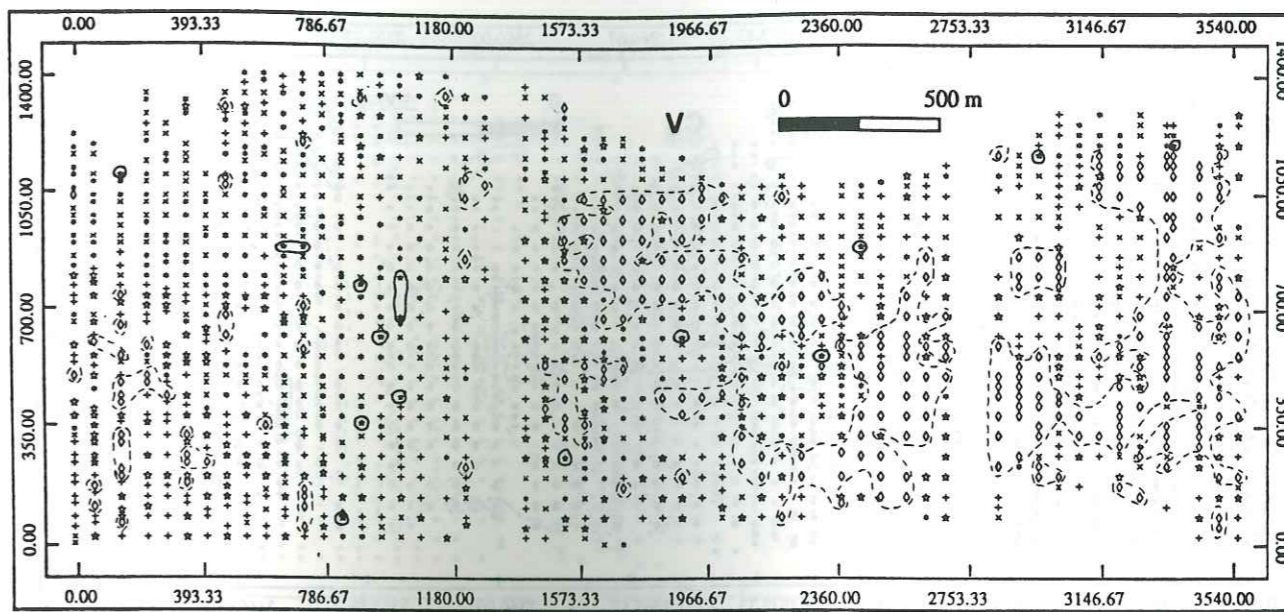
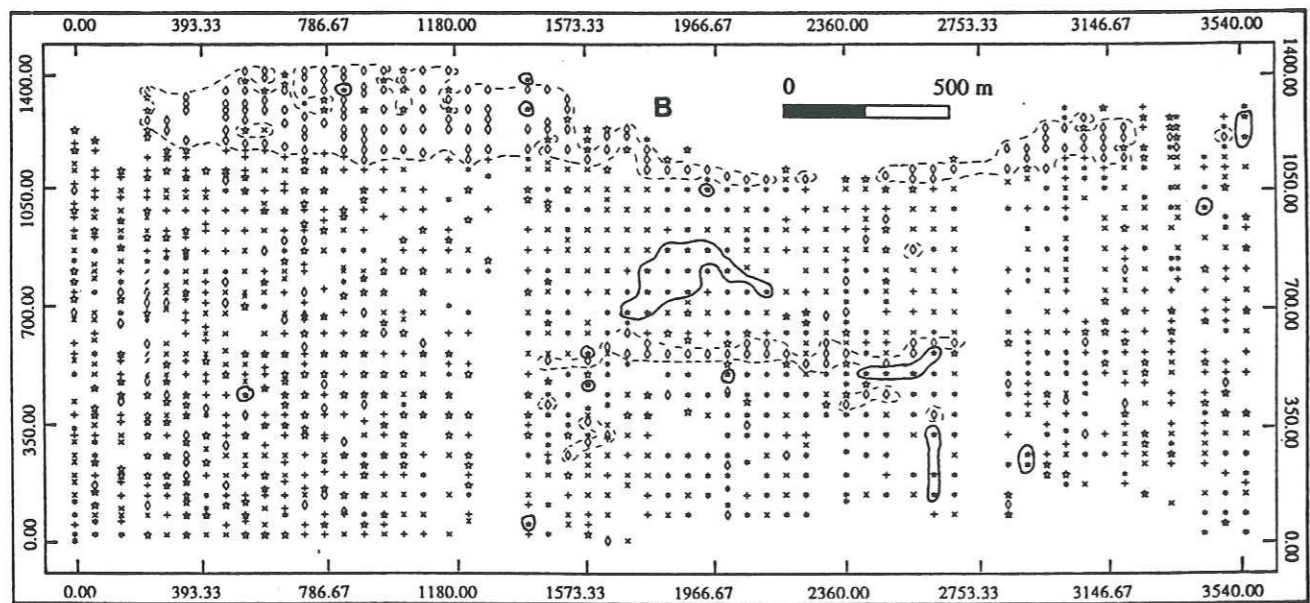
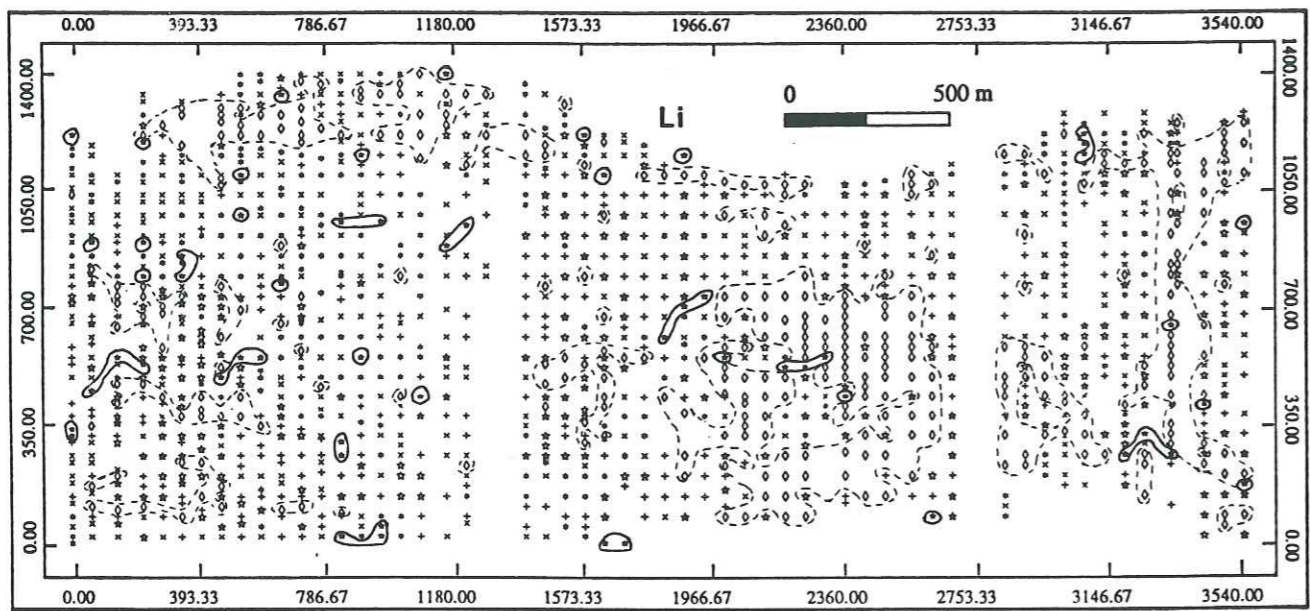
Symboles utilisés, représentés dans la partie correspondante du "box plot":

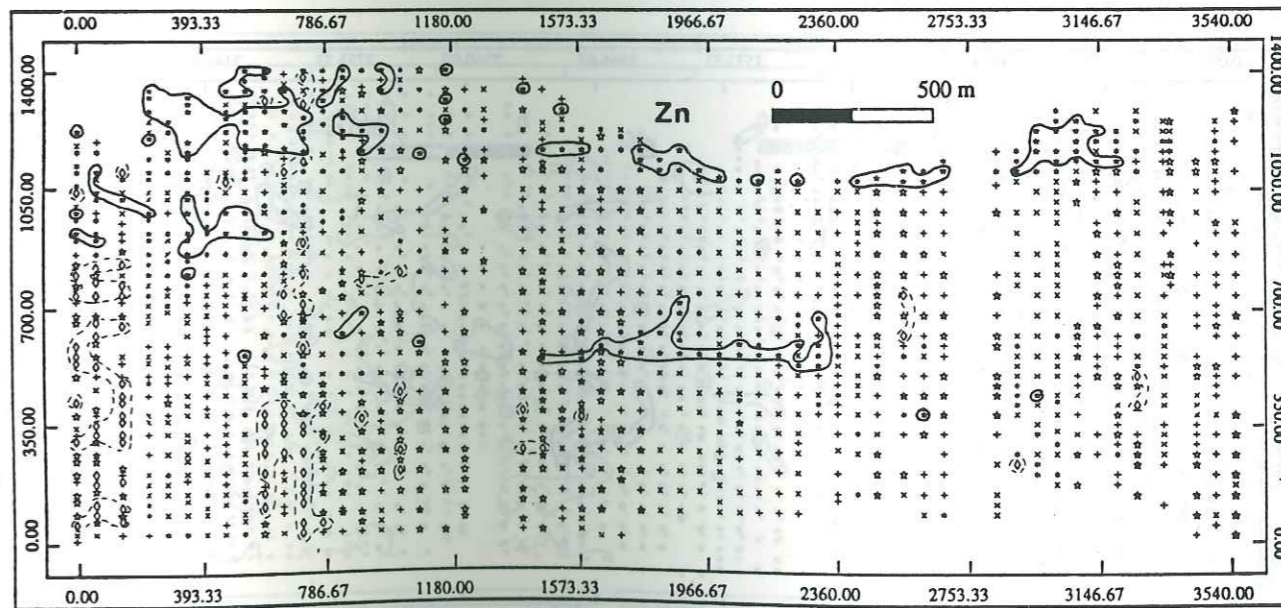
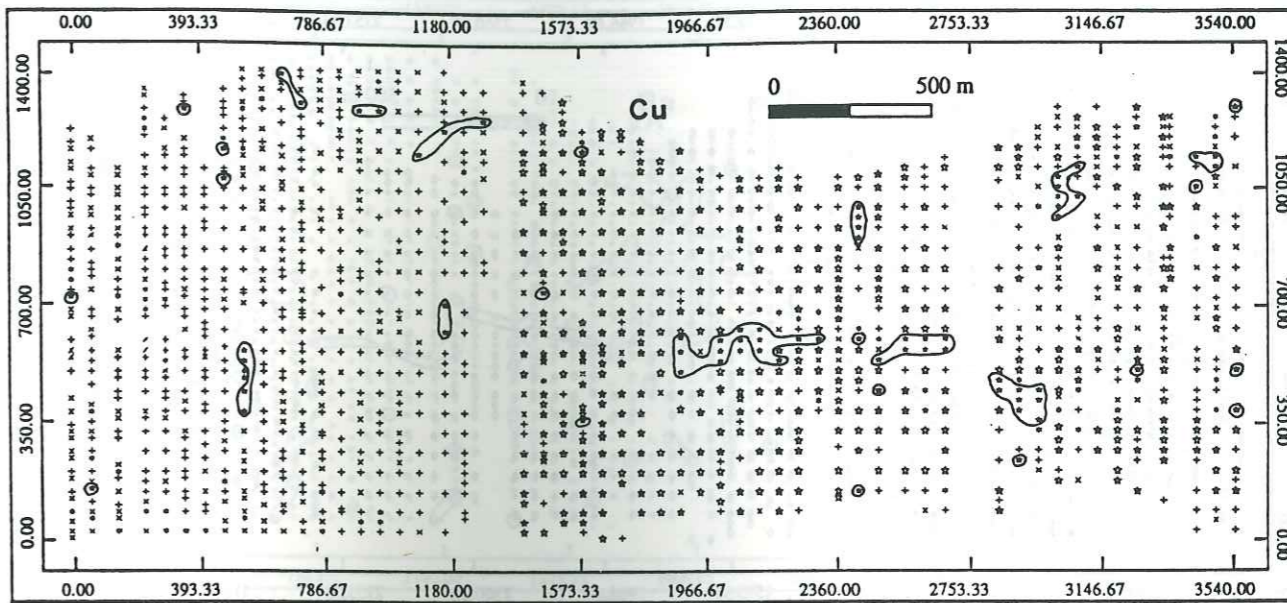
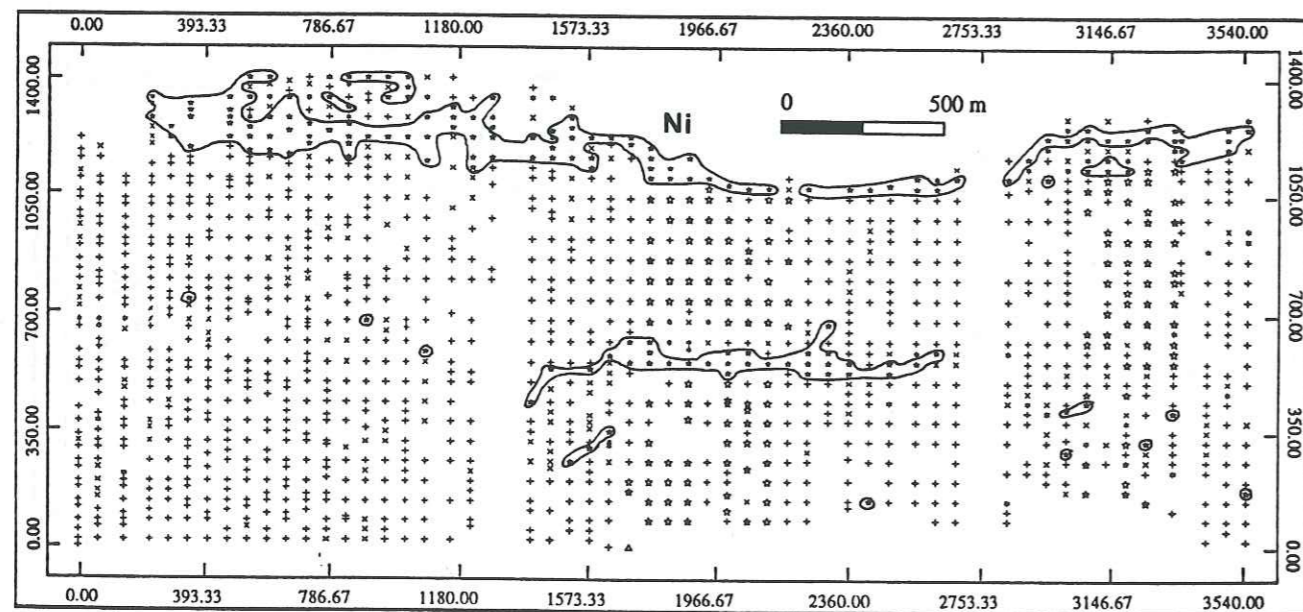
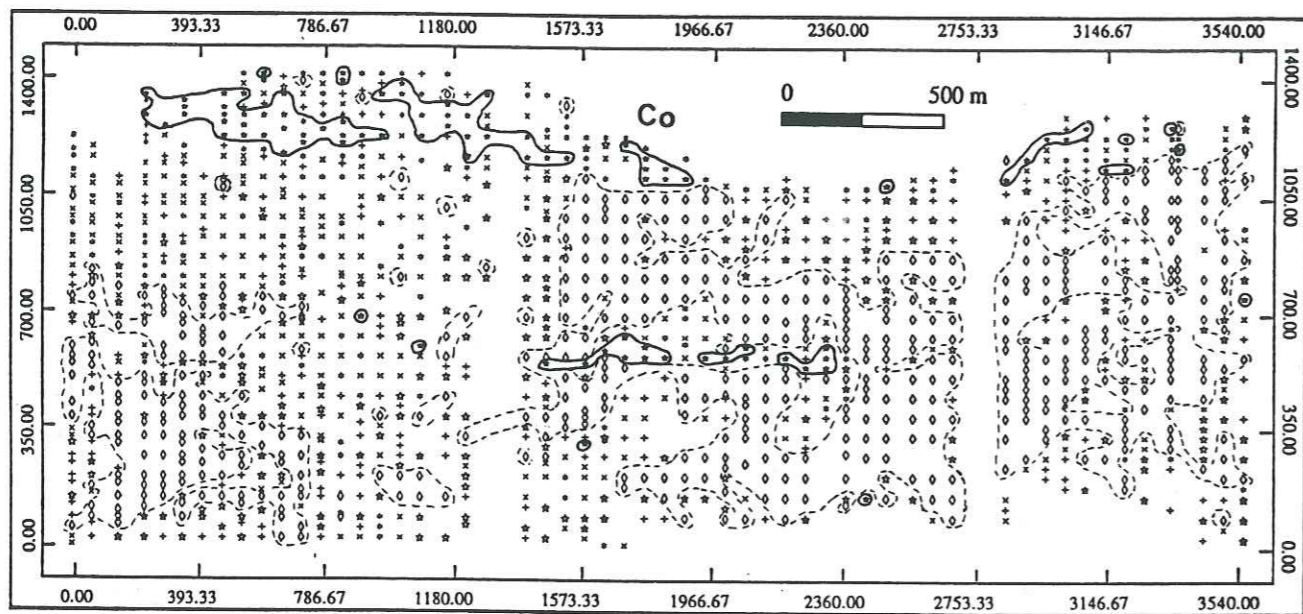


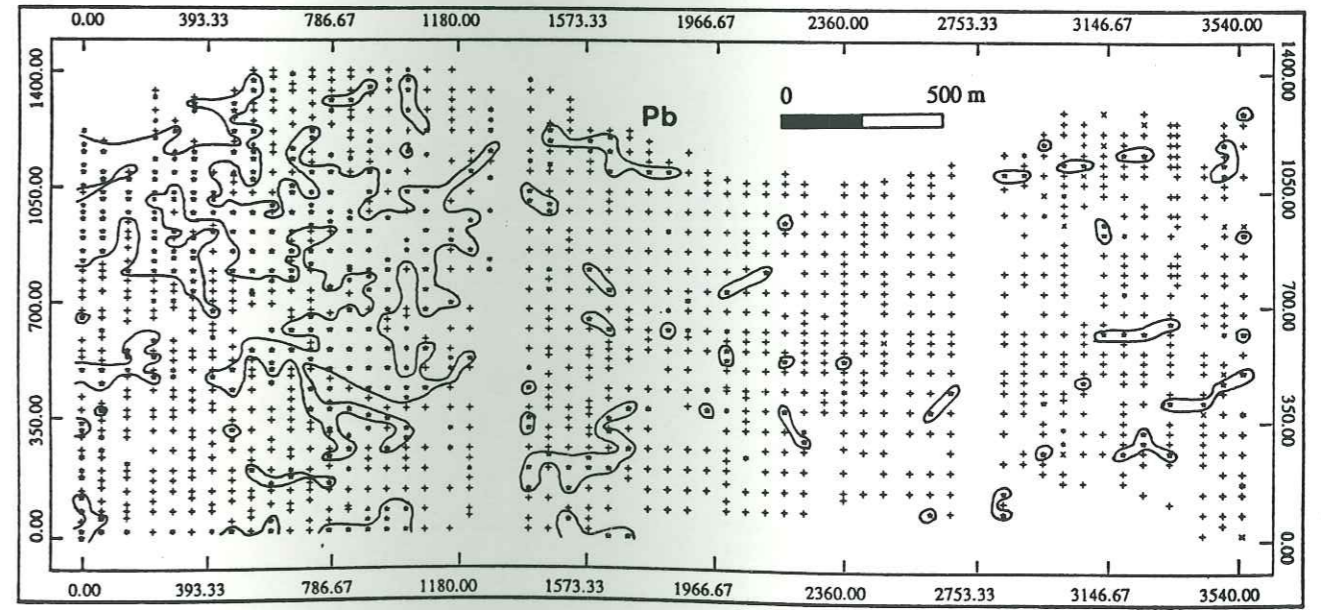
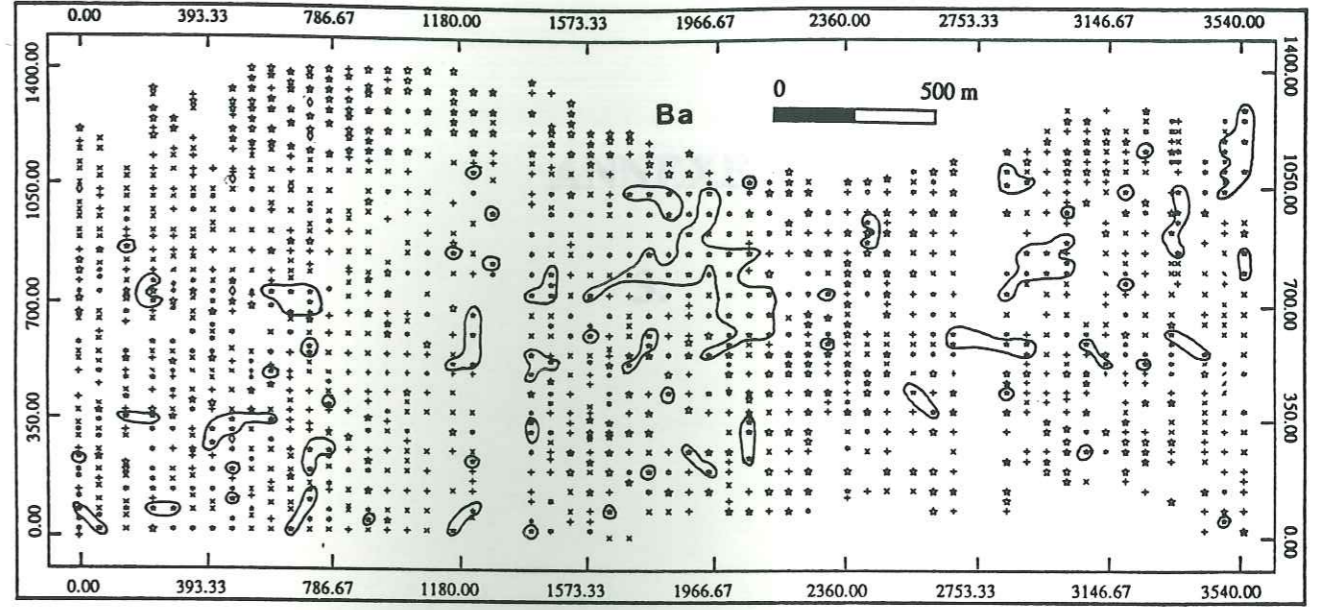
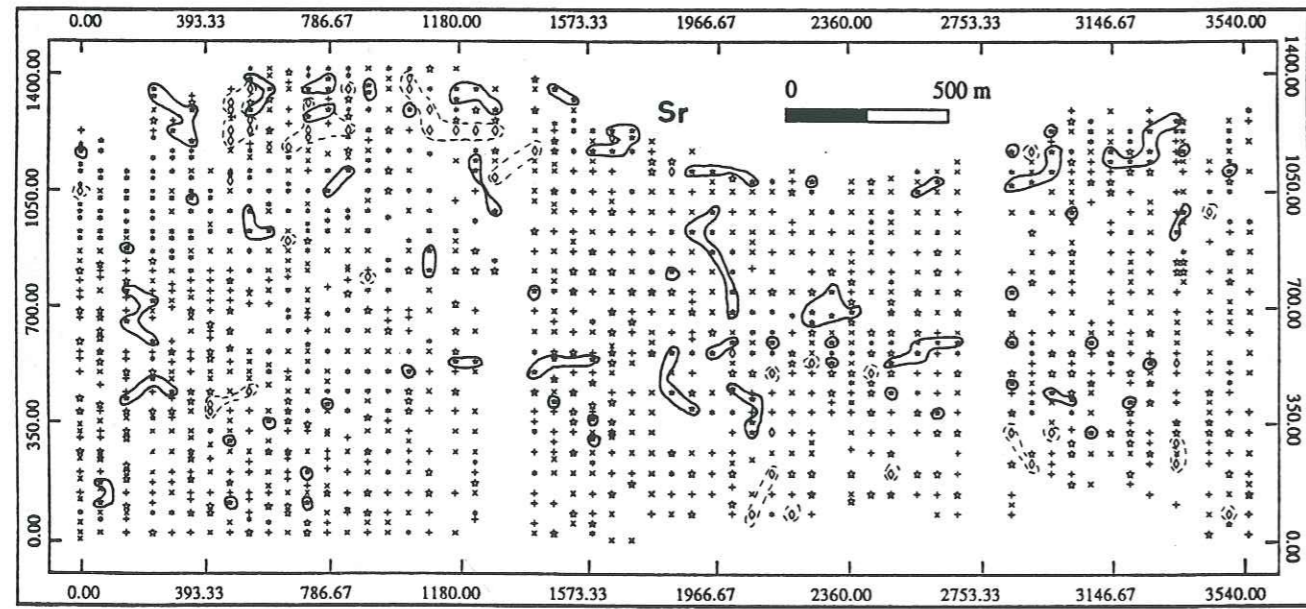
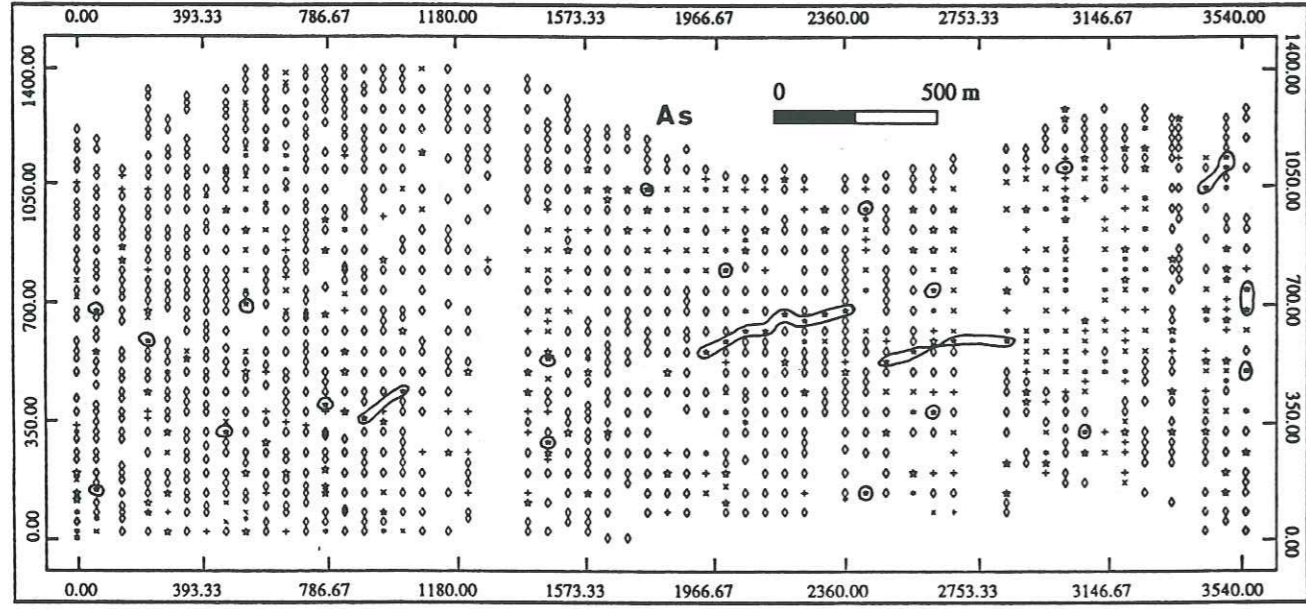












ANNEXE

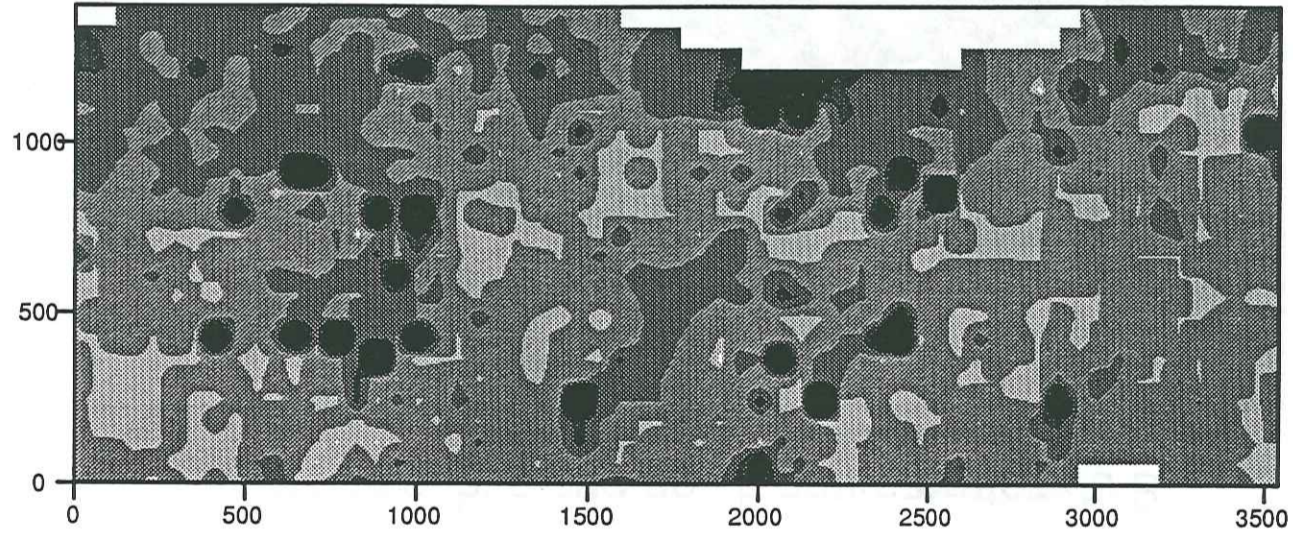
3.

Cartes géochimiques mono-élémentaires des teneurs brutes

tel-00708240, version 1 - 14 Jun 2012

Carte géochimique des teneurs brutes du Fe₂O₃

Echelle: 0 ————— 500 m

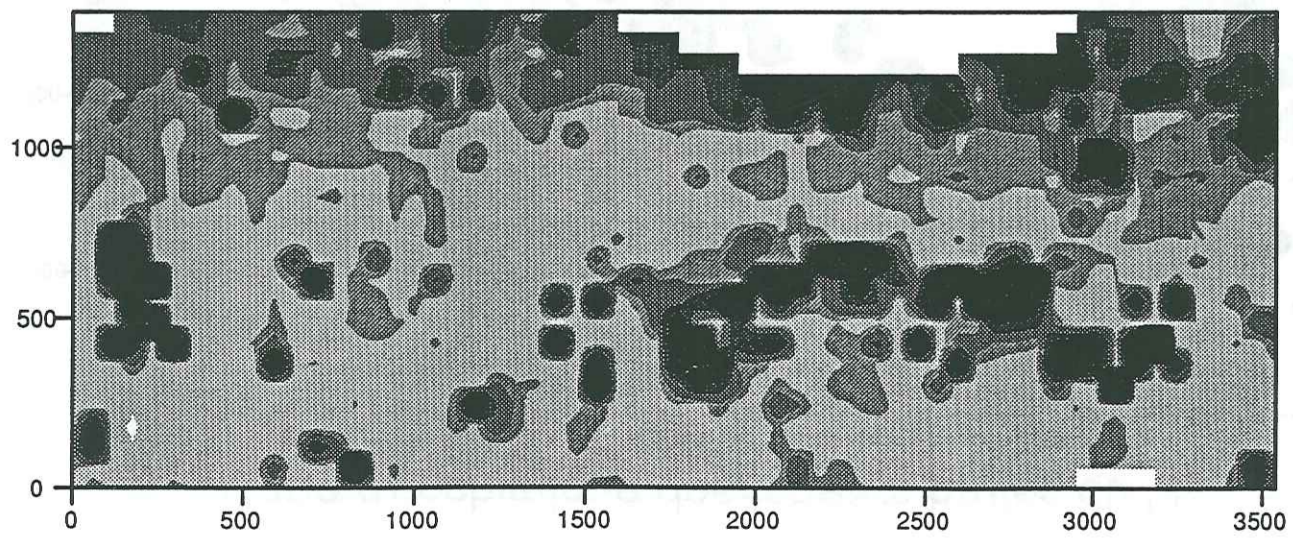


Légende: %

■	sup.	17.73
■	12.61 -	17.73
■	7.49 -	12.61
■	2.37 -	7.49
■	1.09 -	2.37
□	inf.	1.09

Carte géochimique des teneurs brutes du MnO

Echelle: 0 ————— 500 m

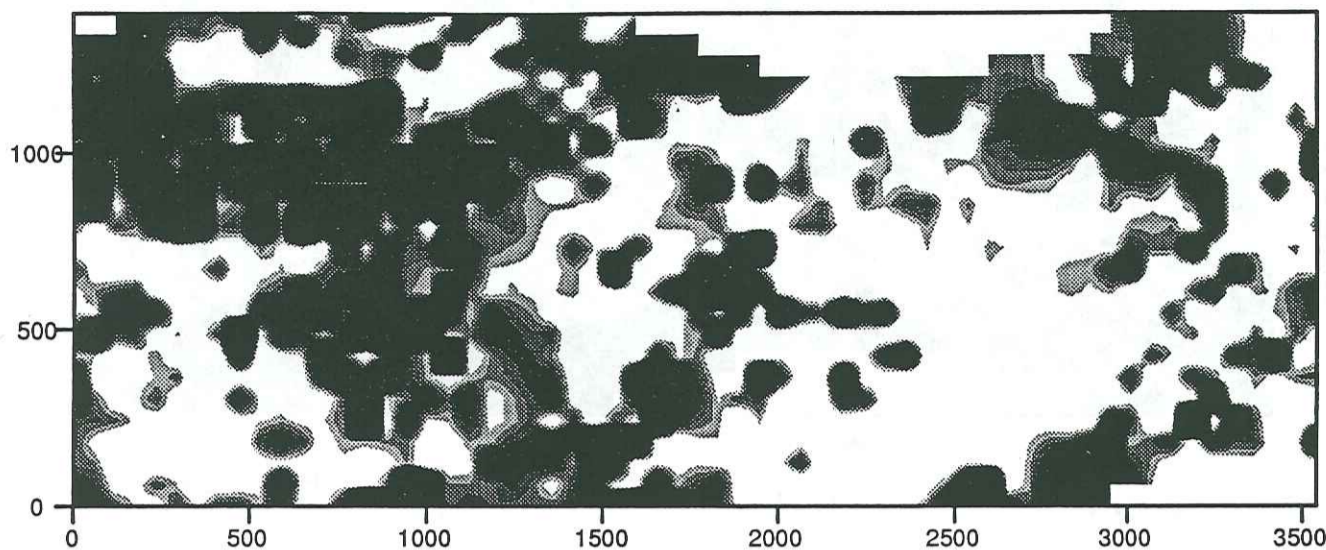


Légende: %

■	sup.	0.45
■	0.30 -	0.45
■	0.15 -	0.30
■	0.08 -	0.15
■	0.00 -	0.08
□	inf.	0.00

Carte géochimique des teneurs brutes du Li

Echelle: 0 — 500 m

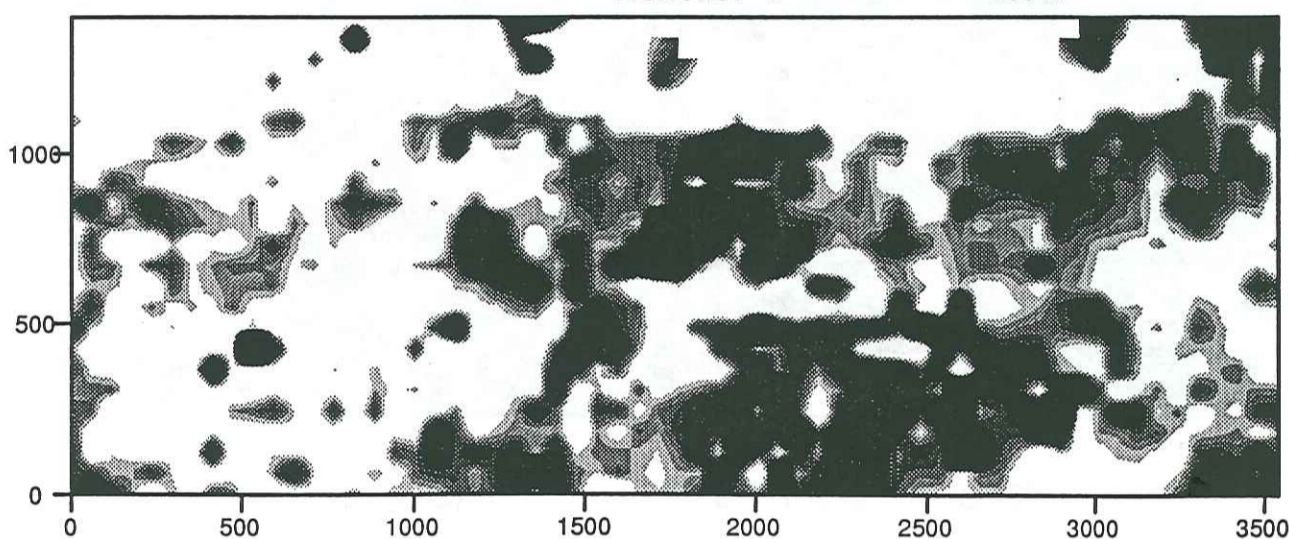


Légende:

ppm	
sup.	20.98
18.18 -	20.98
15.38 -	18.18
12.58 -	15.38
9.78 -	12.58
inf.	9.78

Carte géochimique des teneurs brutes du B

Echelle: 0 — 500 m

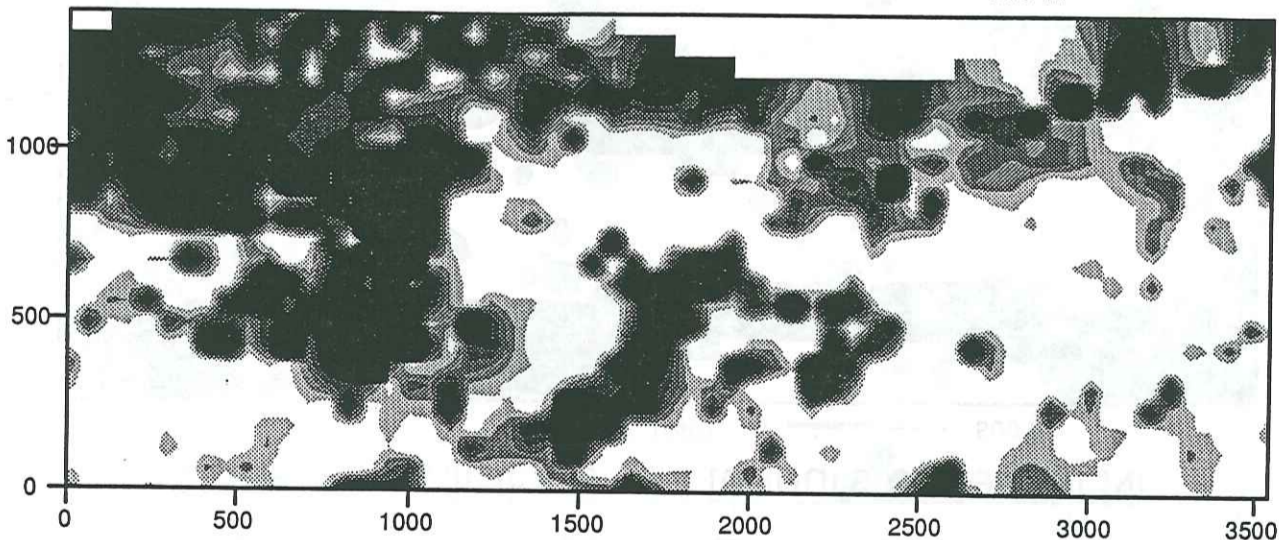


Légende:

ppm	
sup.	20.40
18.10 -	20.40
15.80 -	18.10
13.50 -	15.80
11.20 -	13.50
inf.	11.20

Carte géochimique des teneurs brutes du V

Echelle: 0 — 500 m

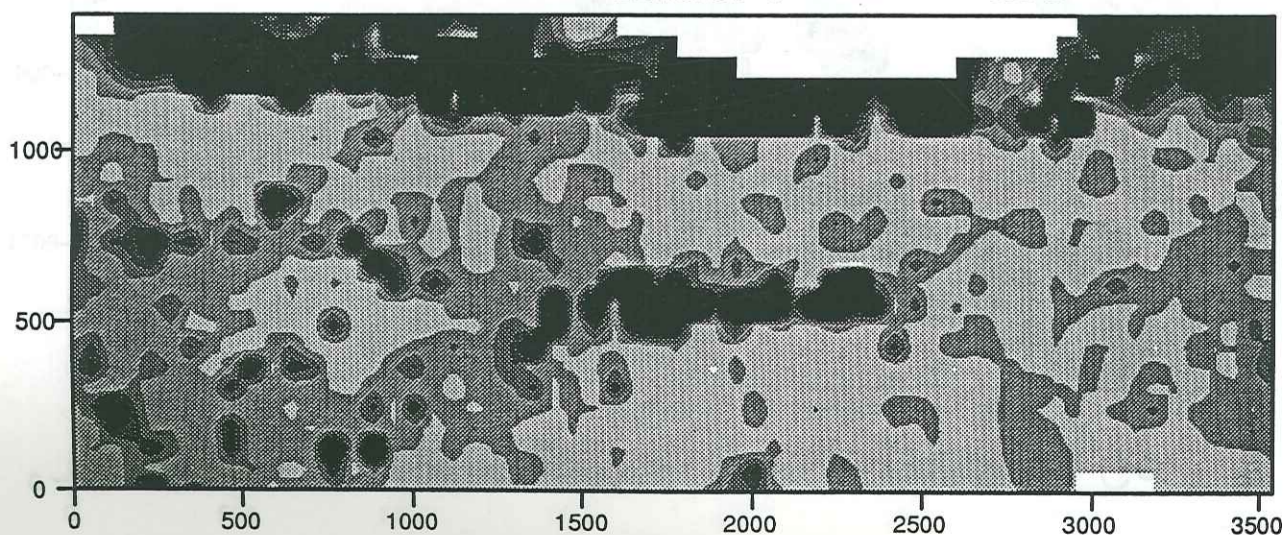


Légende:

ppm	
sup.	176.00
145.00 -	176.00
114.00 -	145.00
83.00 -	114.00
52.00 -	83.00
inf.	52.00

Carte géochimique des teneurs brutes du Cr

Echelle: 0 — 500 m

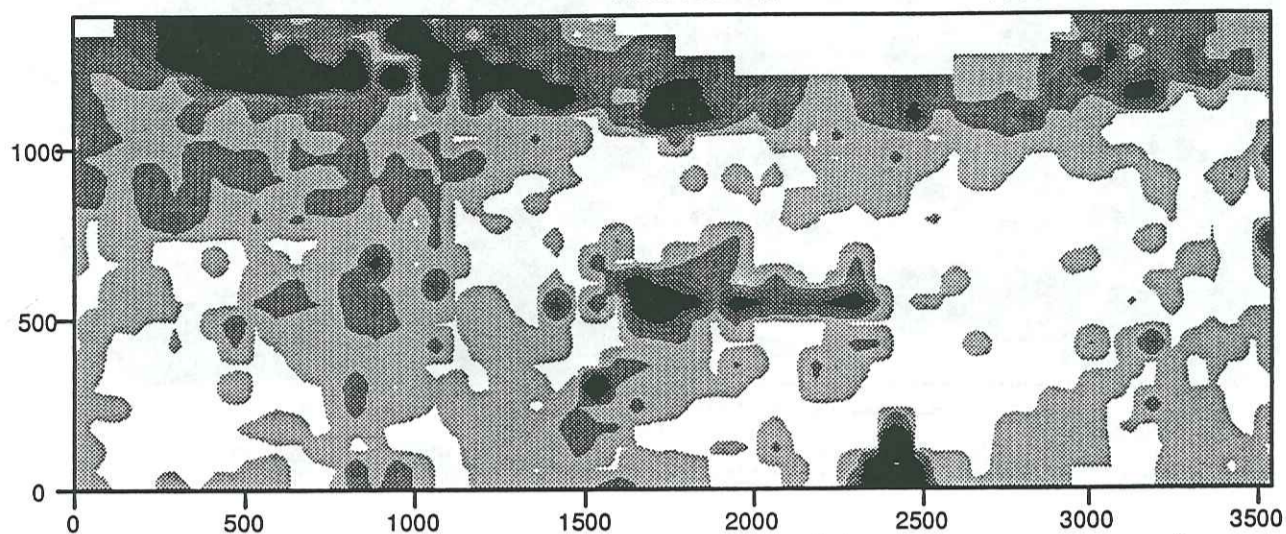


Légende:

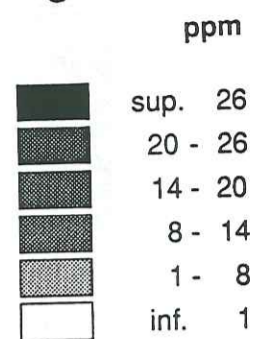
ppm	
sup.	410.00
310.00 -	410.00
210.00 -	310.00
110.00 -	210.00
10.00 -	110.00
inf.	10.00

Carte géochimique des teneurs brutes du Co

Echelle: 0 — 500 m

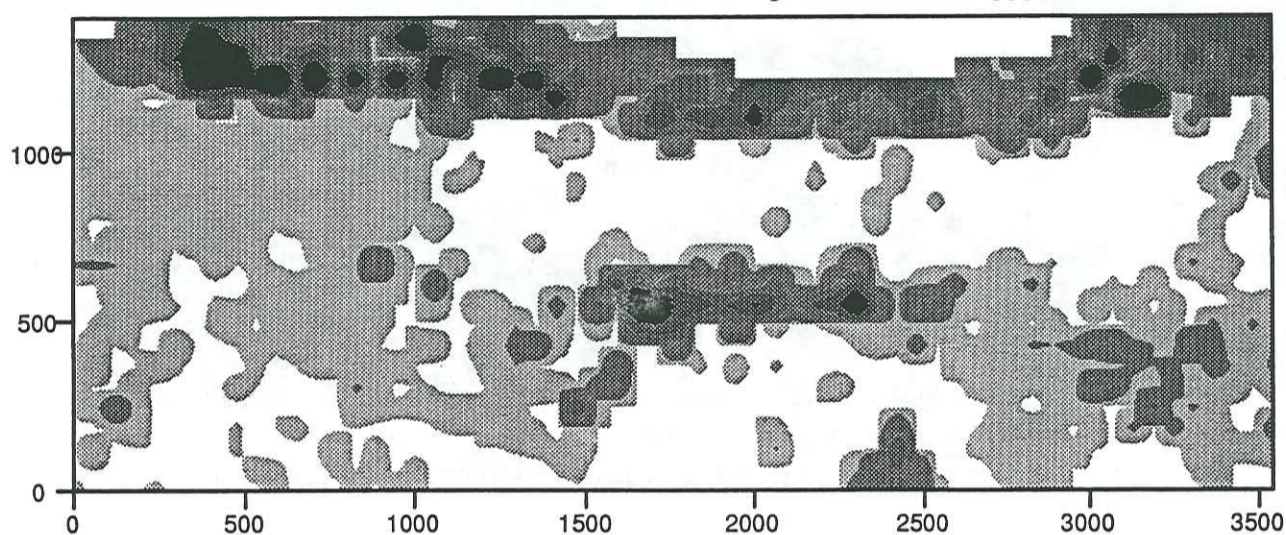


Légende:

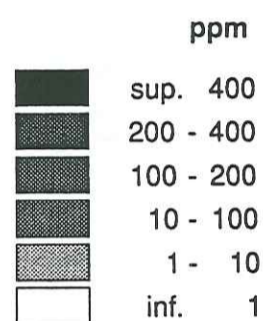


Carte géochimique des teneurs brutes du Ni

Echelle: 0 — 500 m

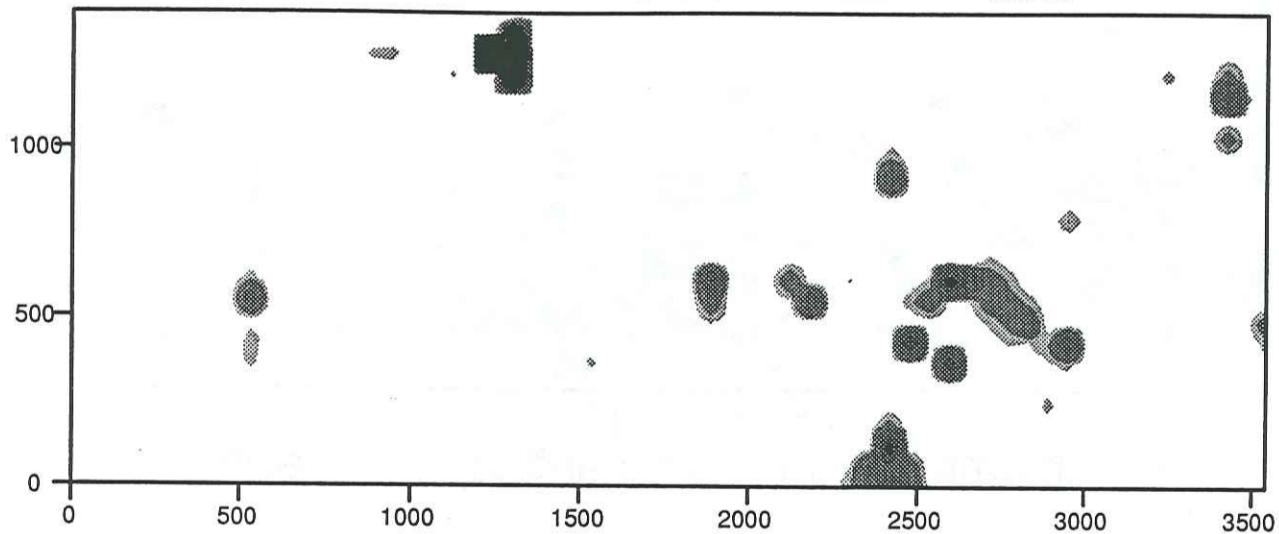


Légende:

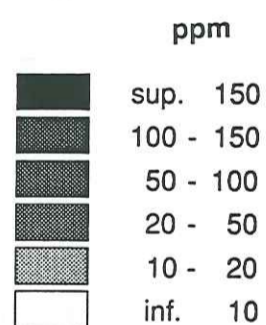


Carte géochimique des teneurs brutes du Cu

Echelle: 0 — 500 m

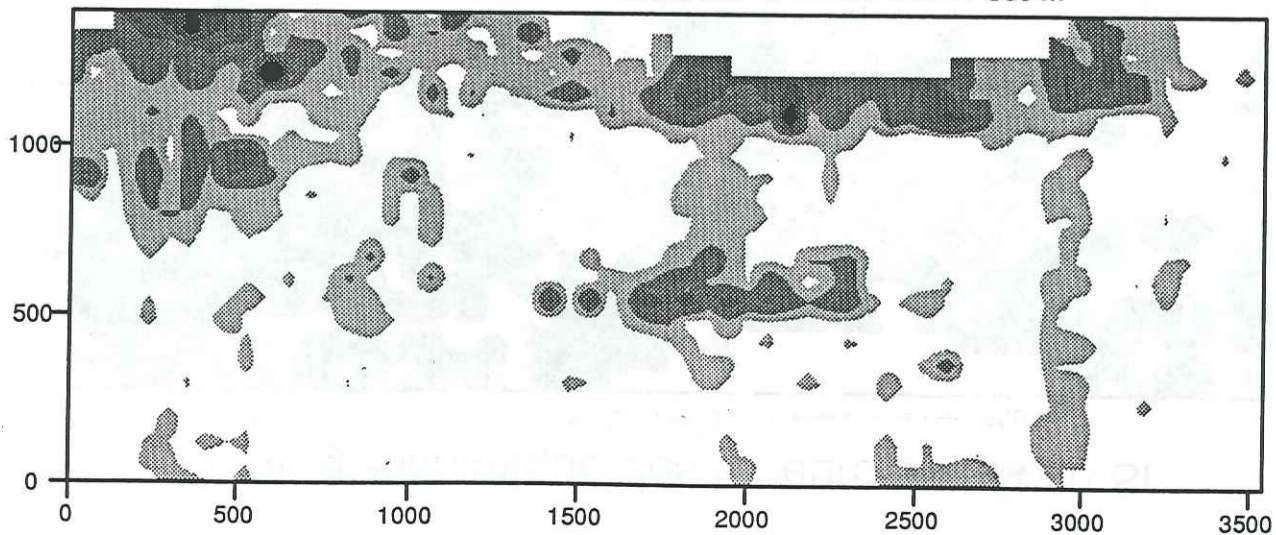


Légende:

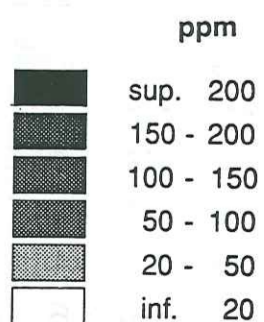


Carte géochimique des teneurs brutes du Zn

Echelle: 0 — 500 m

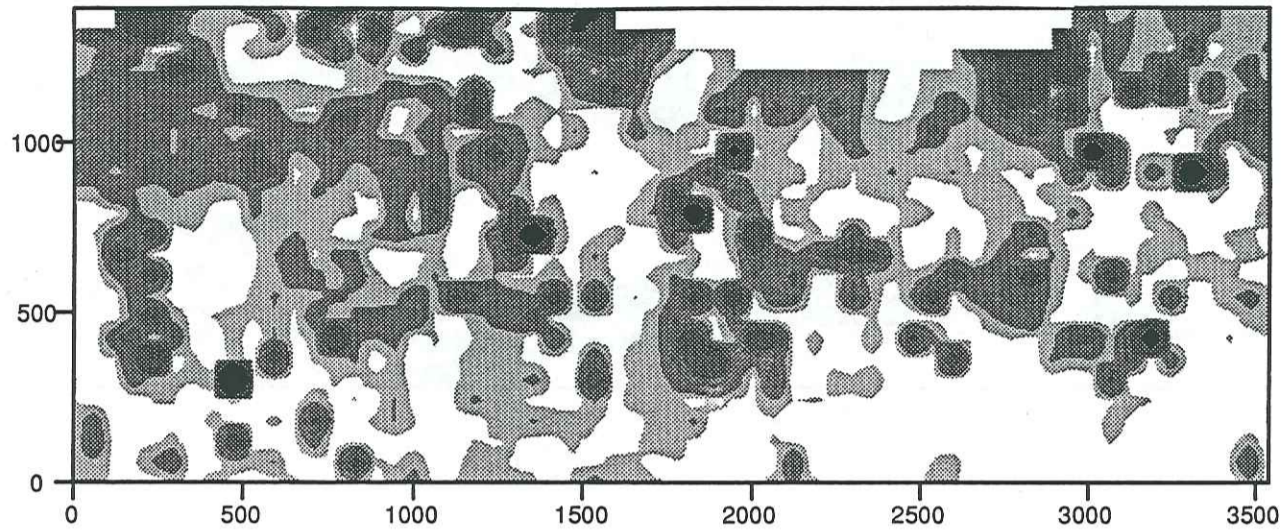


Légende:

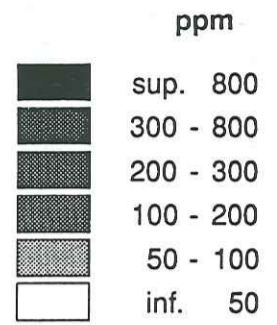


Carte géochimique des teneurs brutes du Sr

Echelle: 0 — 500 m

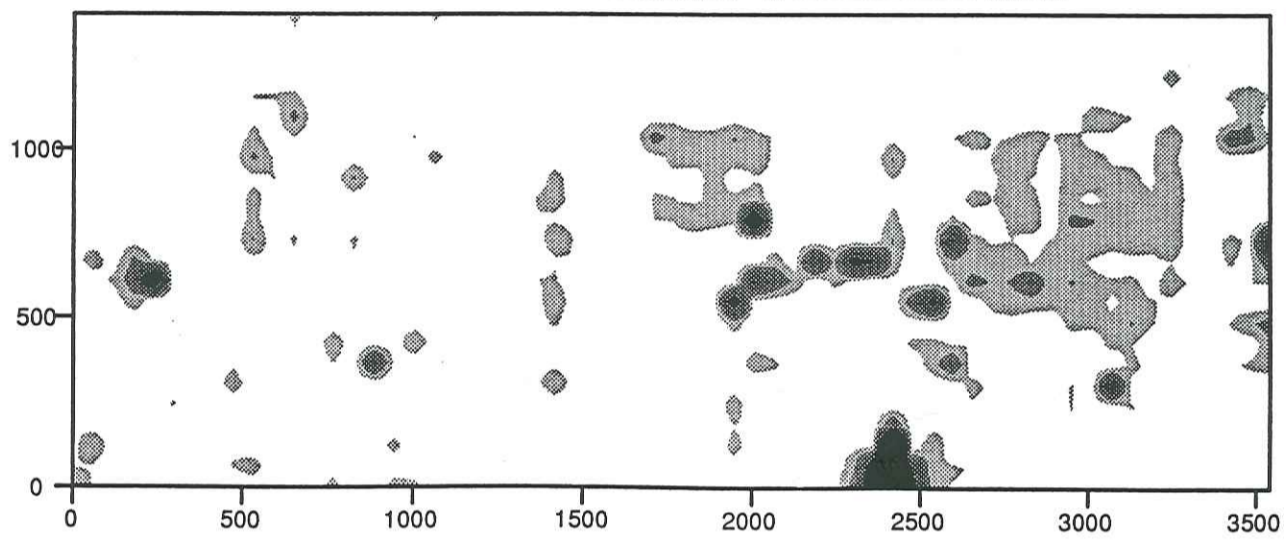


Légende:

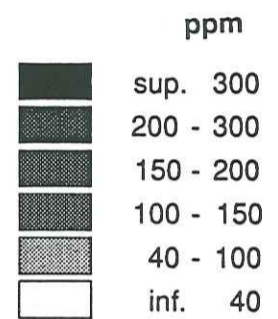


Carte géochimique des teneurs brutes du As

Echelle: 0 — 500 m

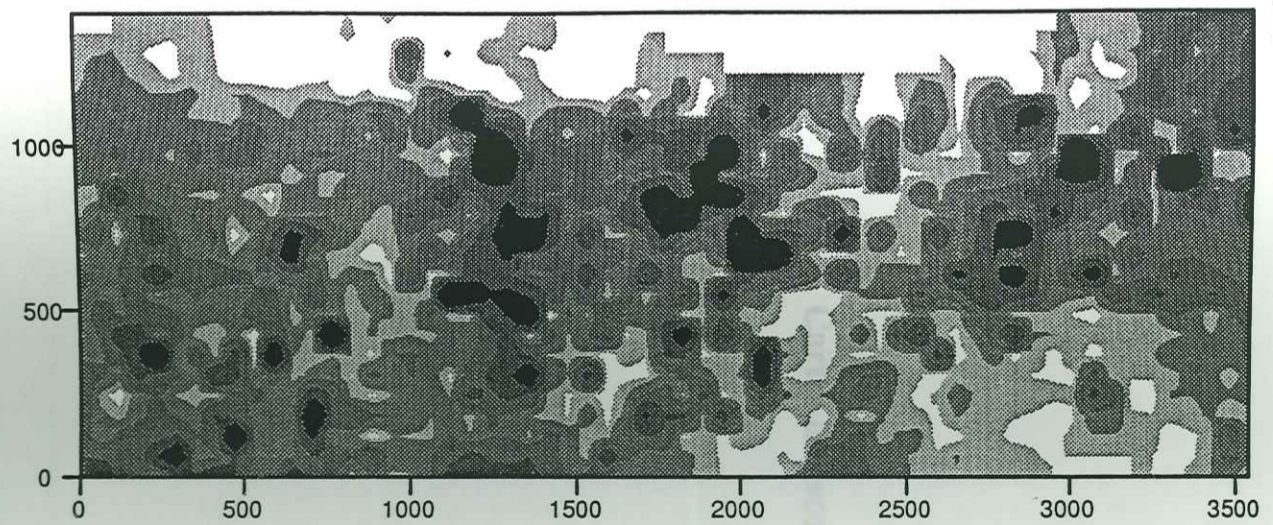


Légende:

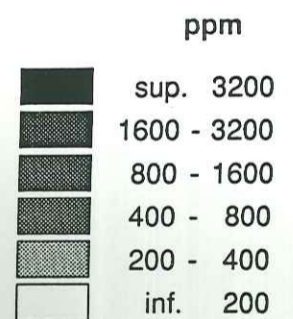


Carte géochimique des teneurs brutes du Ba

Echelle: 0 — 500 m

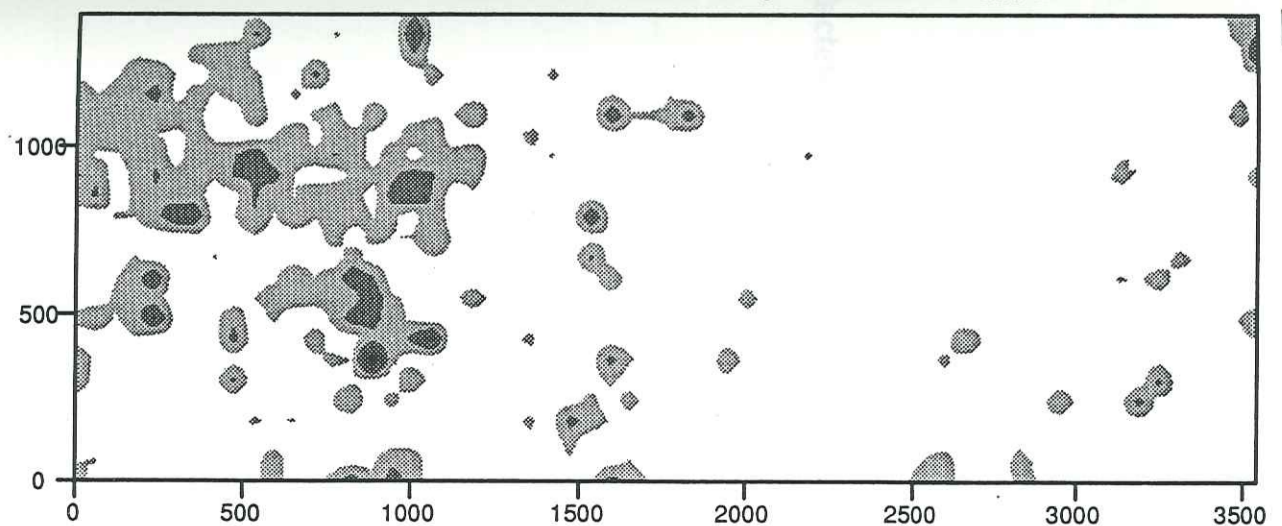


Légende:

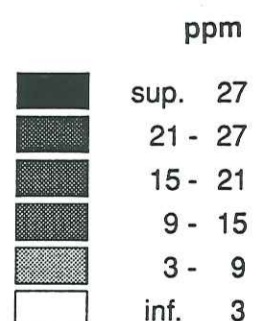


Carte géochimique des teneurs brutes du Pb

Echelle: 0 — 500 m



Légende:



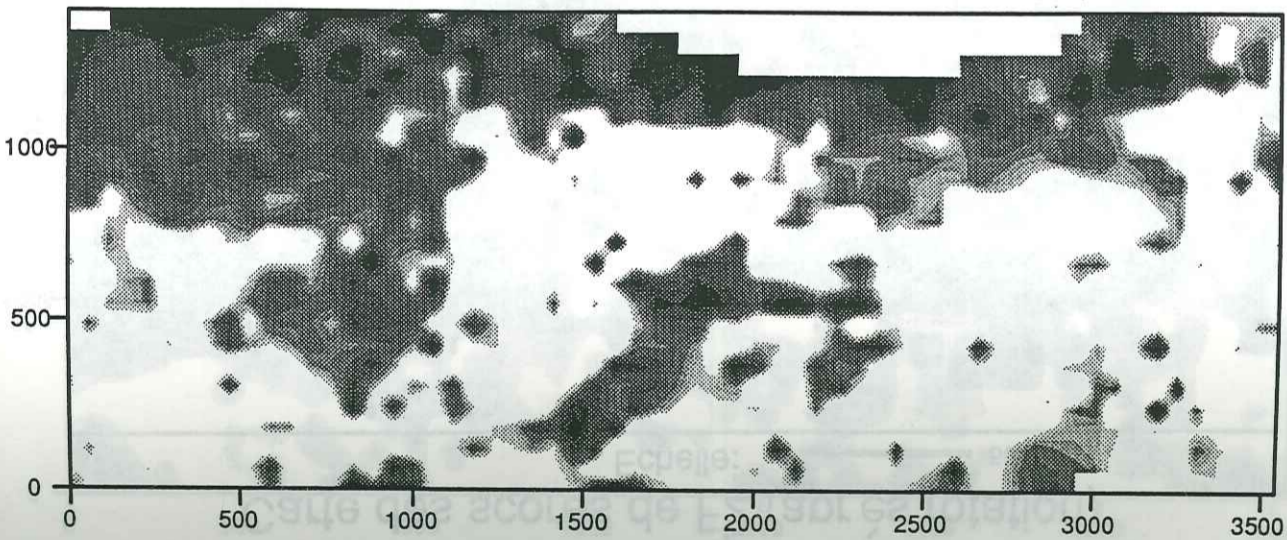
ANNEXE

4.

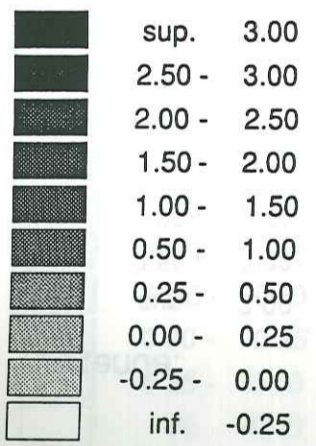
Cartes des scores des facteurs F₁

Carte des scores de F1 (avant rotation)

Echelle: 0 — 500 m

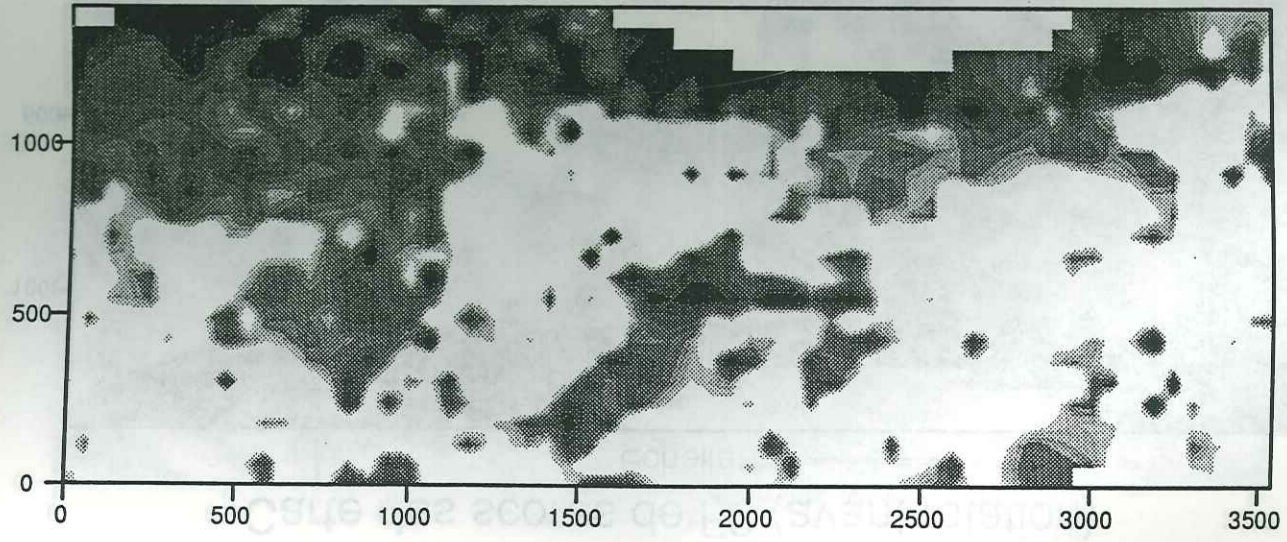


Légende:

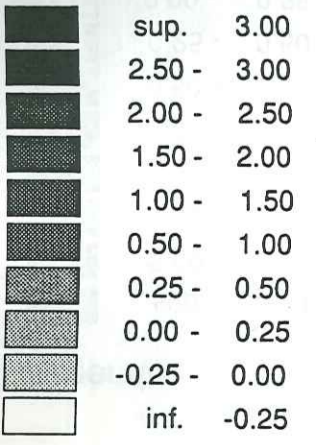


carte des scores de F1 (après rotation)

Echelle: 0 — 500 m

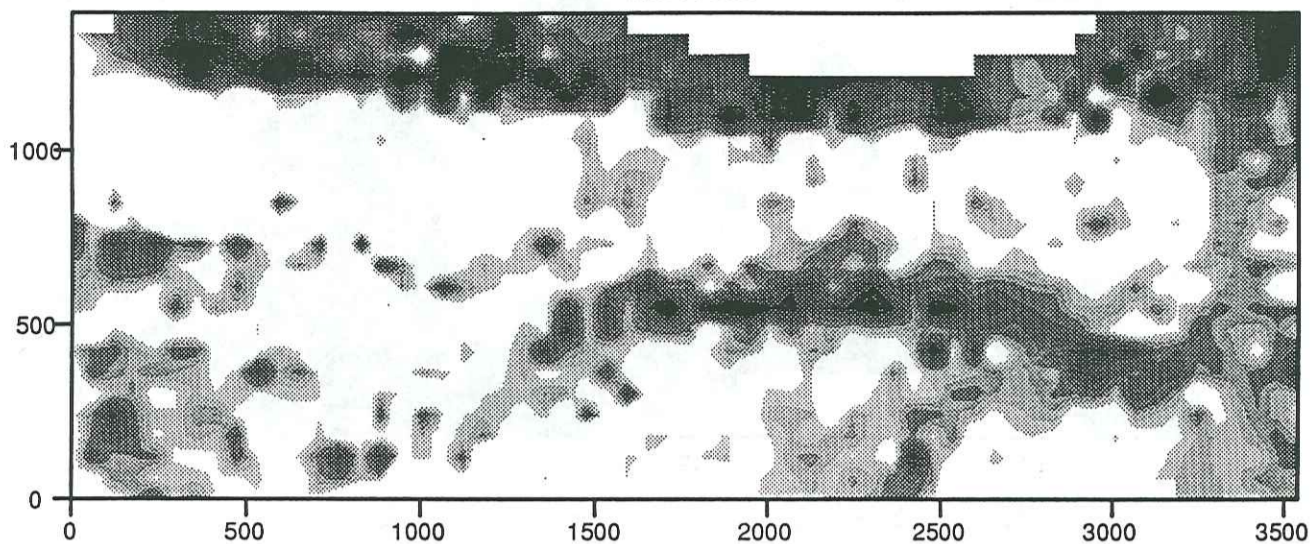


Légende:

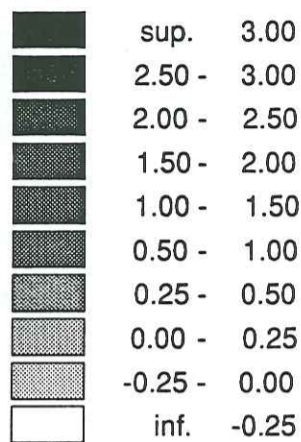


Carte des scores de F2 (avant rotation)

Echelle: 0 — 500 m

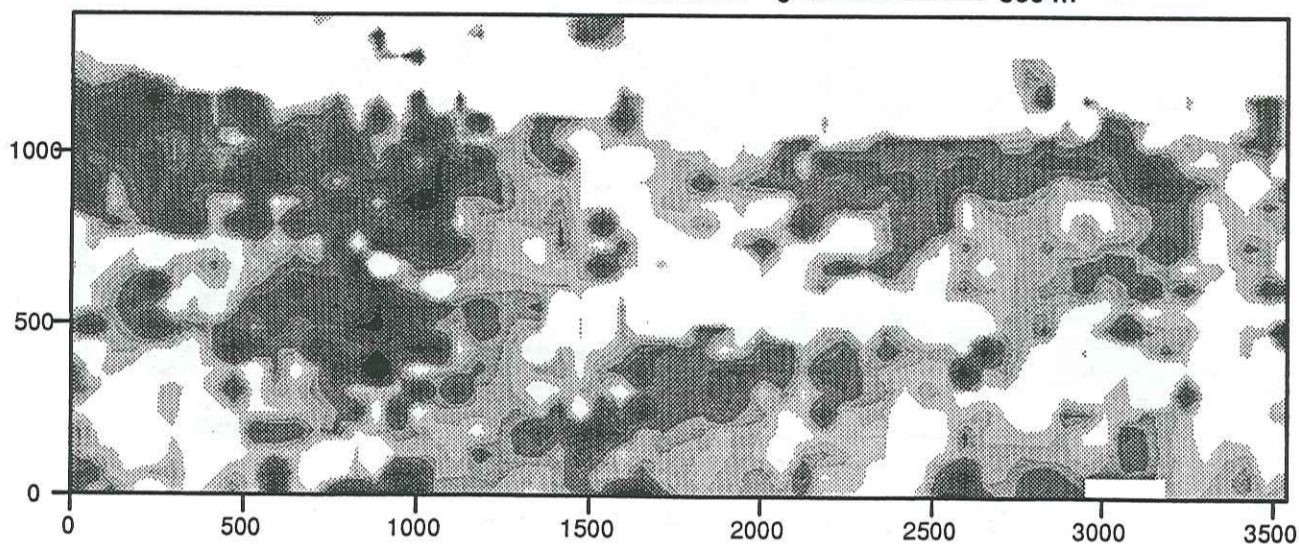


Légende:

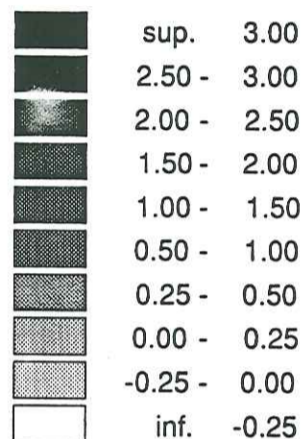


Carte des scores de F2 (après rotation)

Echelle: 0 — 500 m

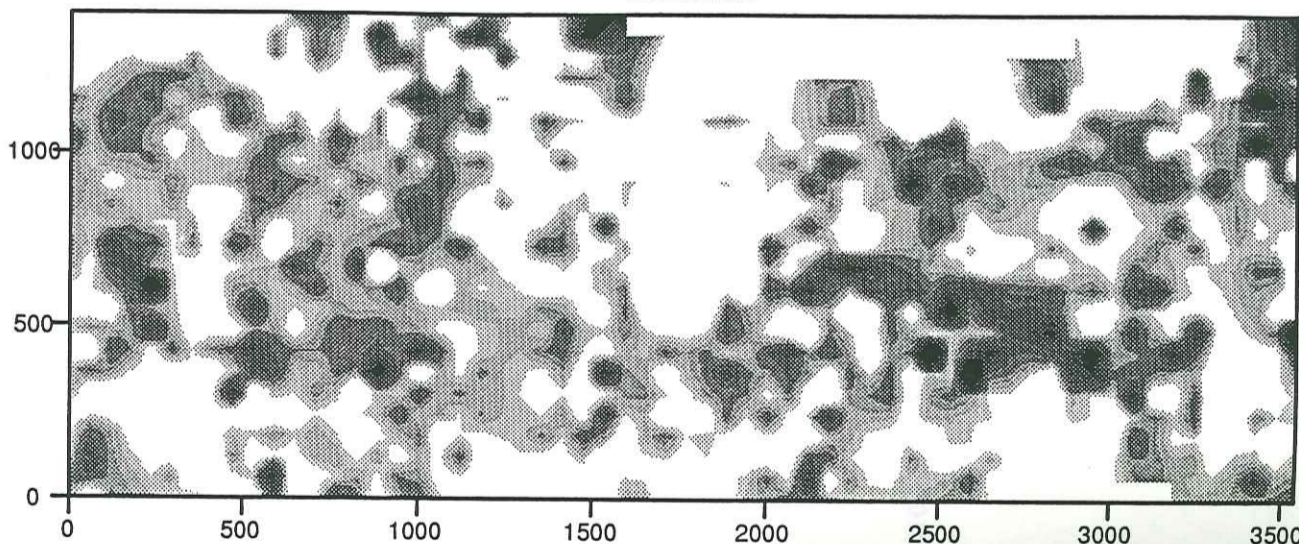


Légende:

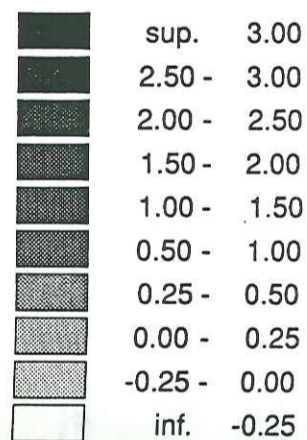


Carte des scores de F3 (avant rotation)

Echelle: 0 — 500 m

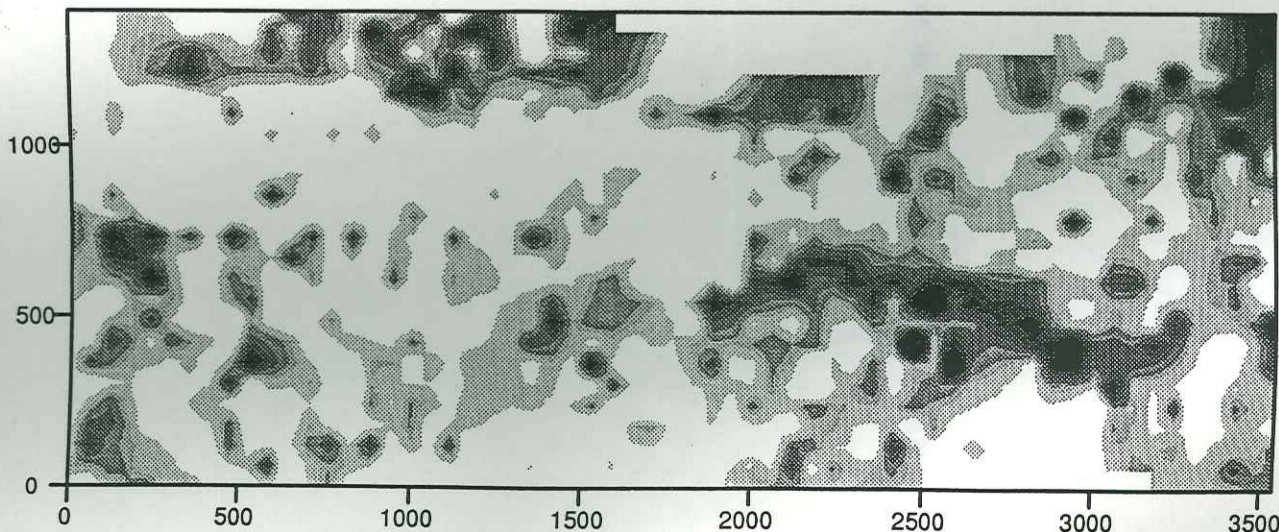


Légende:

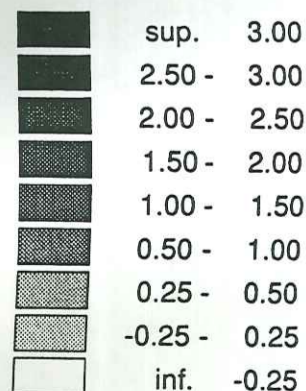


Carte des scores de F3 (après rotation)

Echelle: 0 — 500 m



Légende:



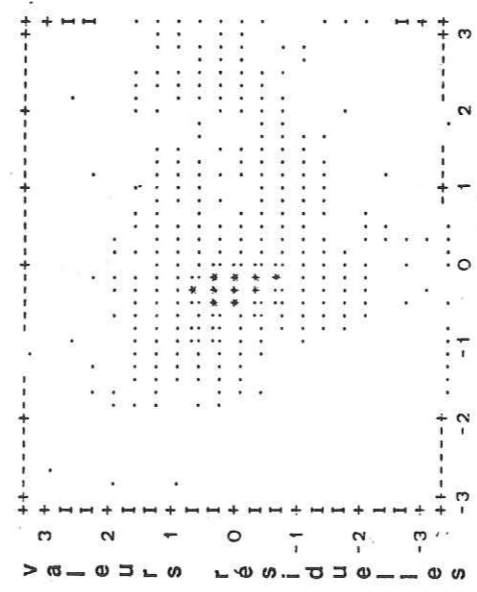
ANNEXE

5.

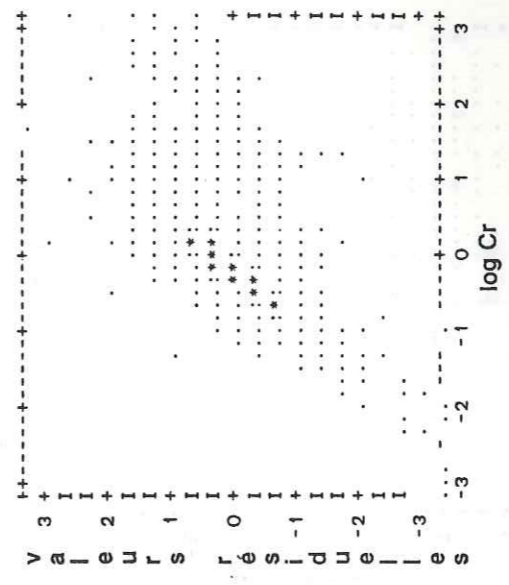
Comparaison des différentes composantes de la variation des teneurs

Légende:

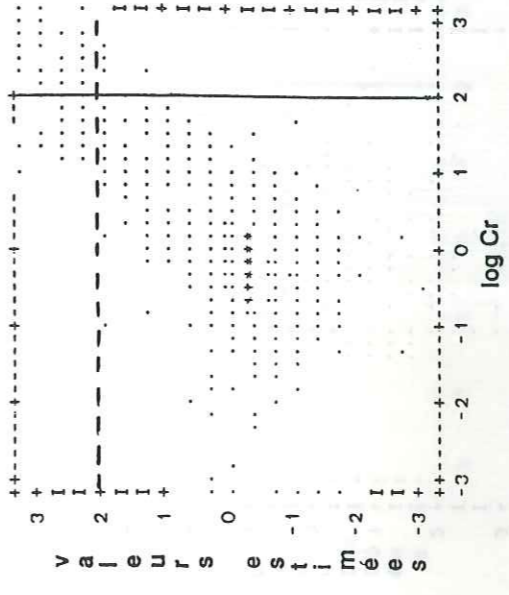
- seuil anomal (teneurs brutes)
- seuil anomal (valeurs estimées)



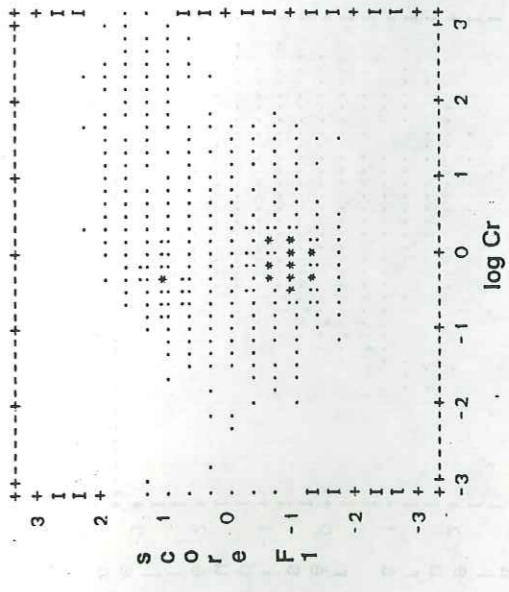
Symbols: : 13.0
 Max N * 52.0



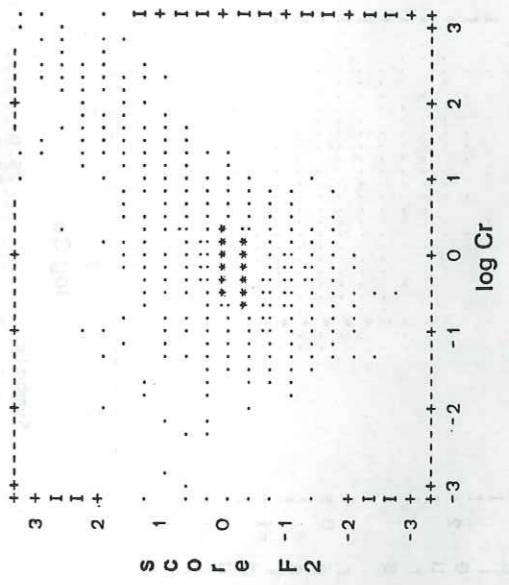
Symbols: : 16.0
 Max N * 64.0



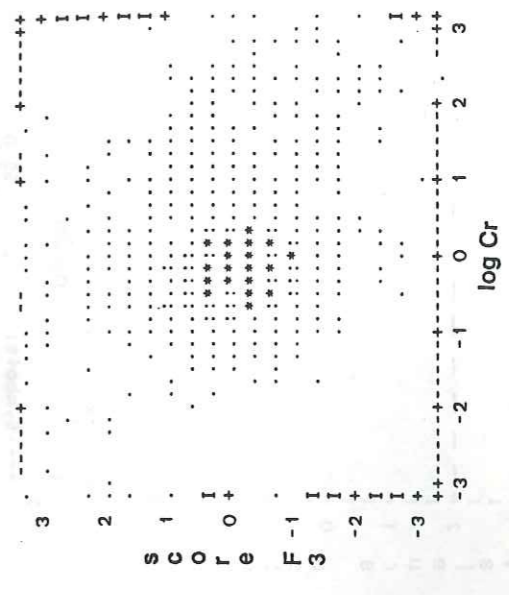
Symbols: : 19.0
 Max N * 76.0



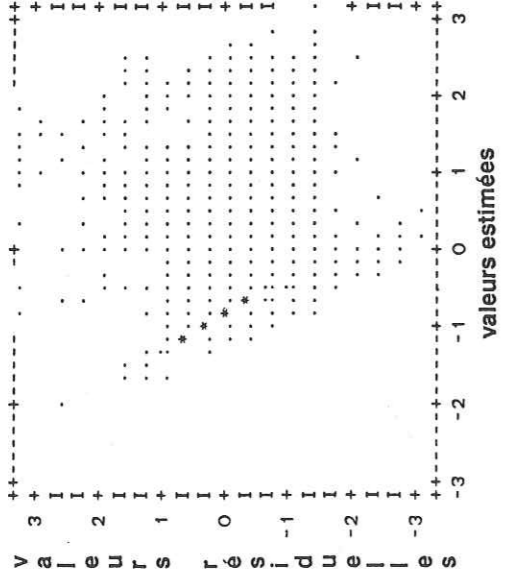
Symbols: : 11.0
 Max N * 45.0



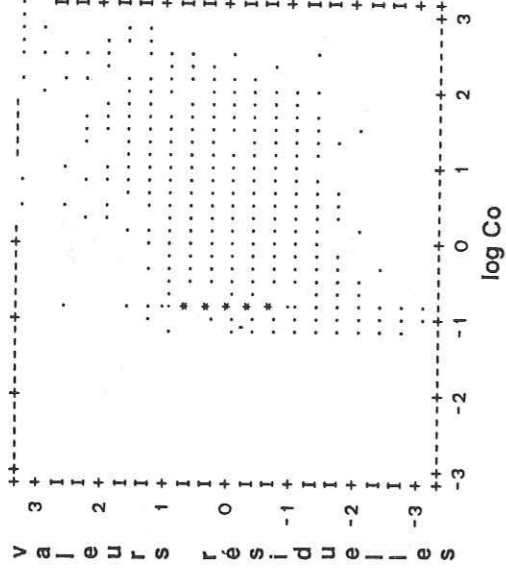
Symbols: : 12.0
 Max N * 49.0



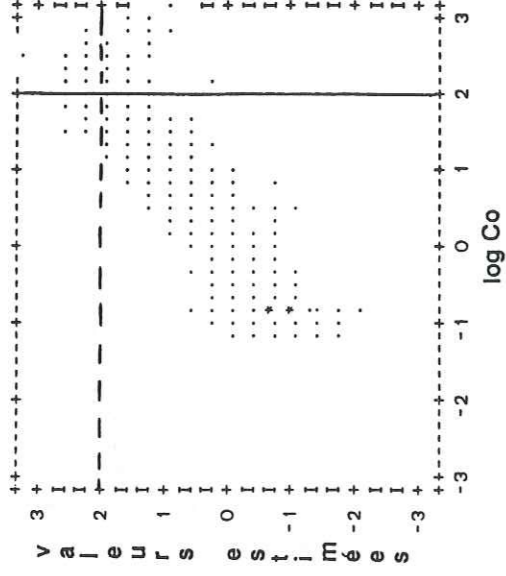
Symbols: : 9.0
 Max N * 36.0



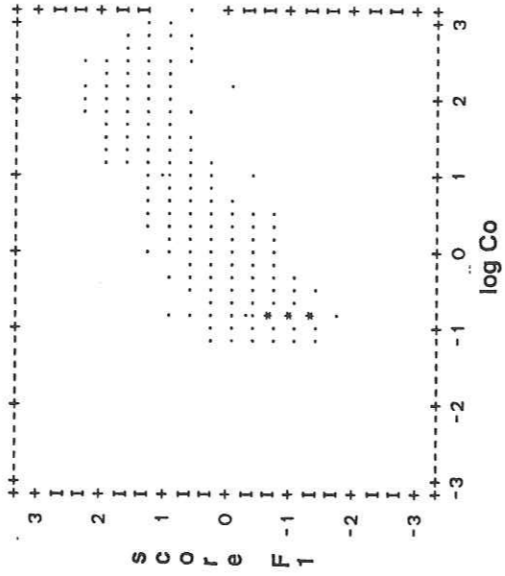
Symbols: : 26.0
 Max N * 104.0



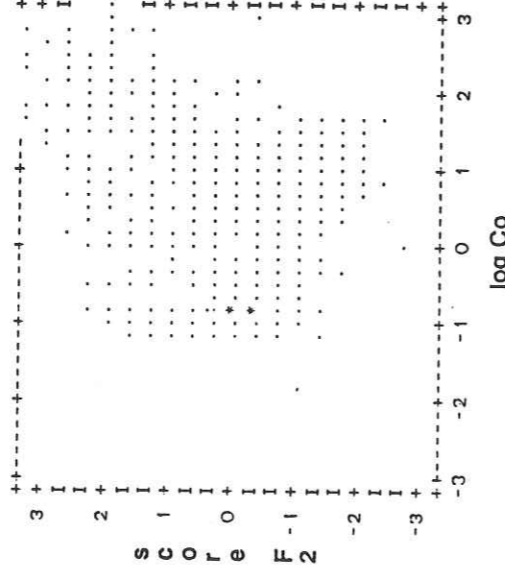
Symbols: : 26.0
 Max N * 105.0



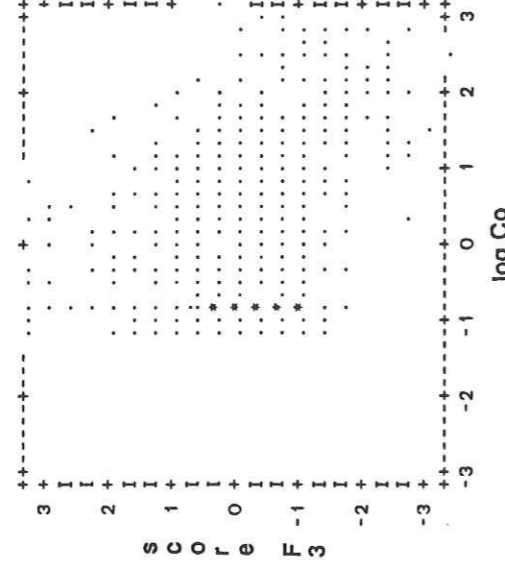
Symbols: : 59.0
 Max N * 236.0



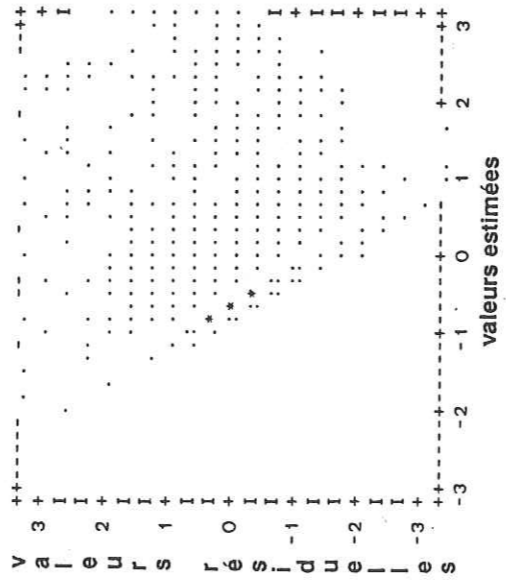
Symbols: : 50.0
 Max N * 200.0



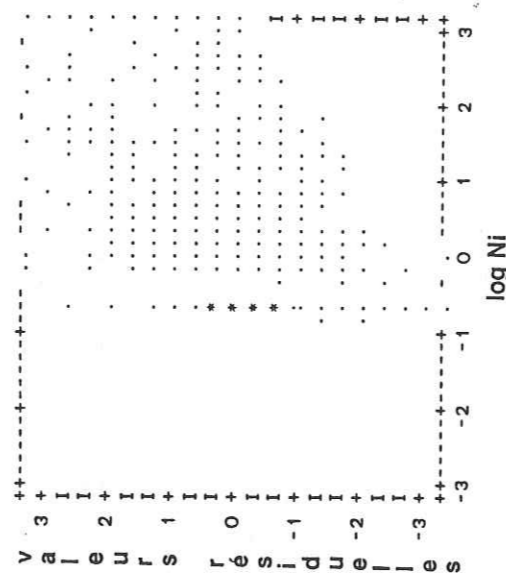
Symbols: : 50.0
 Max N * 200.0



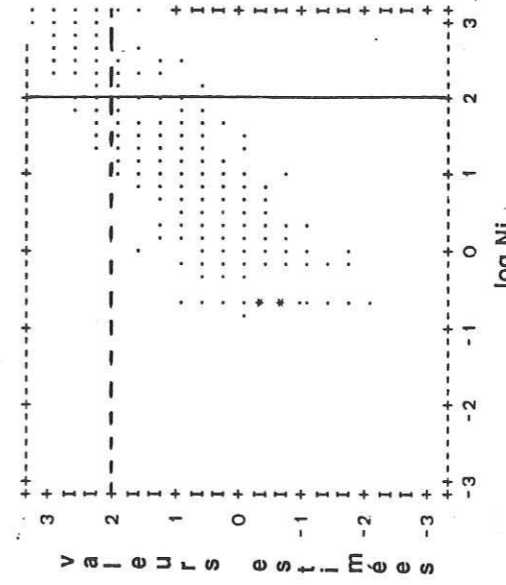
Symbols: : 28.0
 Max N * 115.0



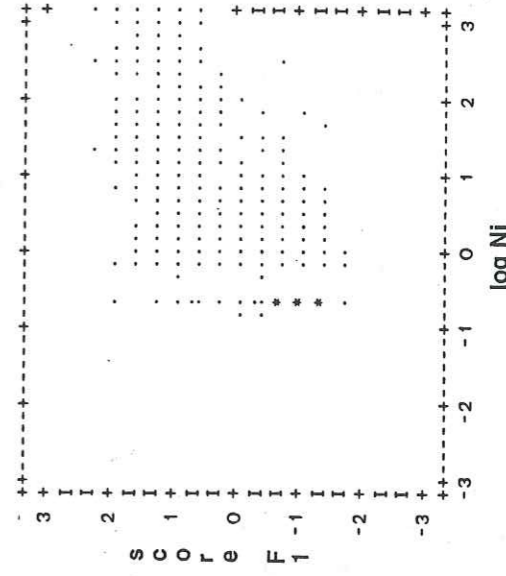
Symbols: : 31.0
 Max N * 124.0



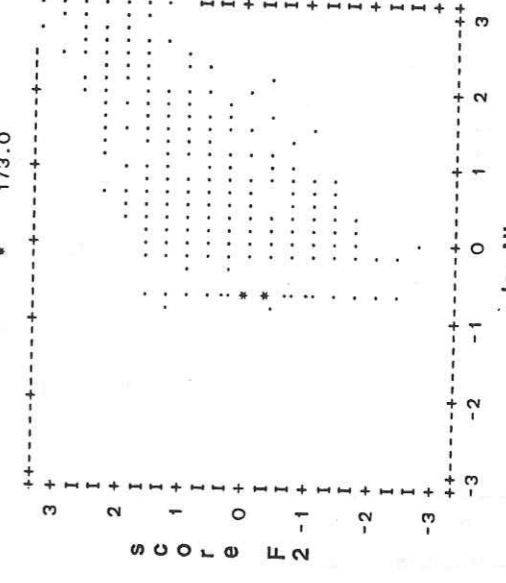
Symbols: : 43.0
 Max N * 173.0



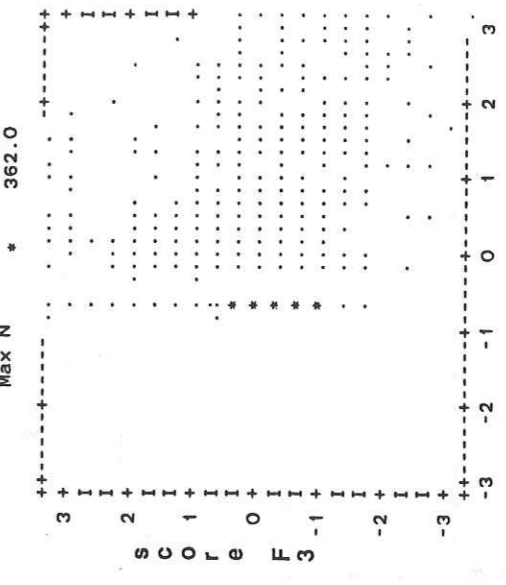
Symbols: : 90.0
 Max N * 362.0



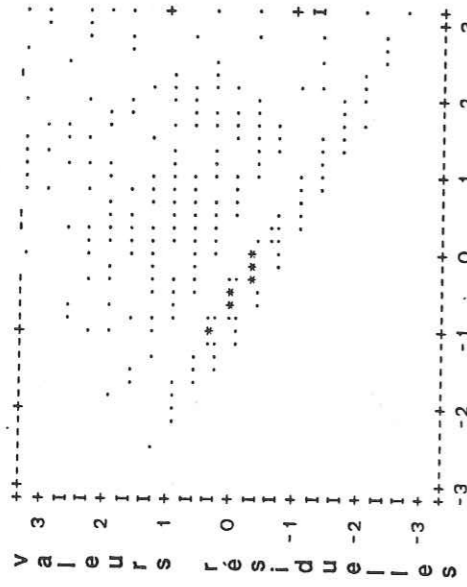
Symbols: : 51.0
 Max N * 207.0



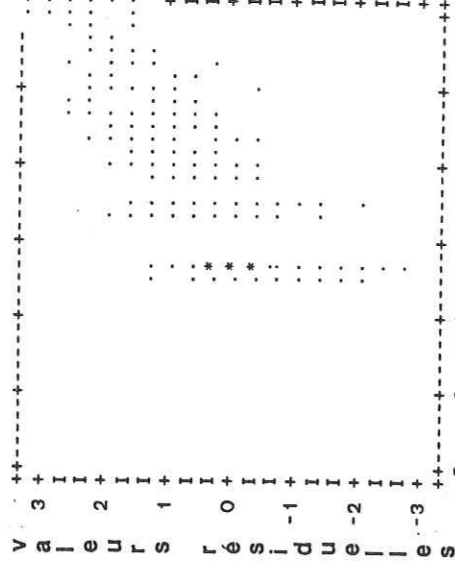
Symbols: : 56.0
 Max N * 227.0



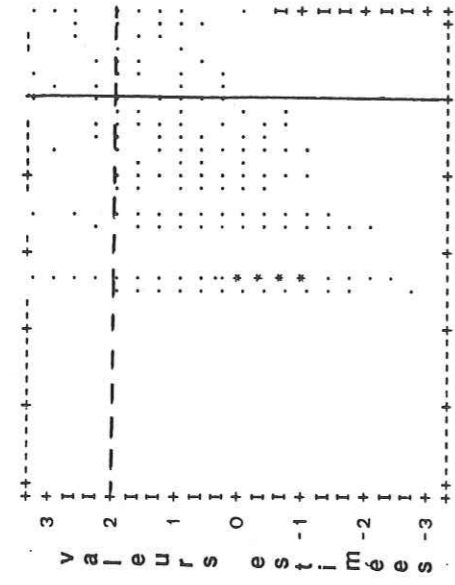
Symbols: : 40.0
 Max N * 161.0



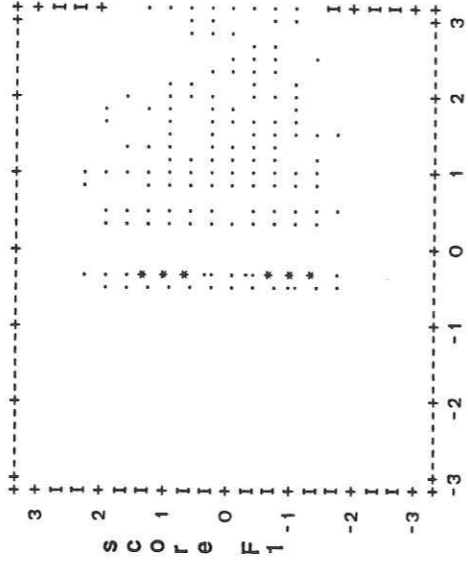
Symbols: : 31.0
 Max N * 127.0



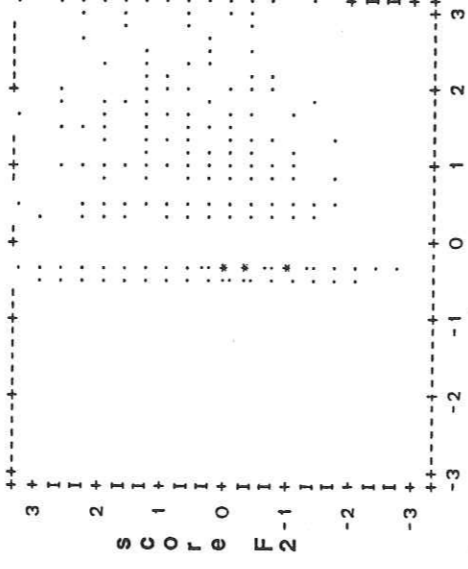
Symbols: : 71.0
 Max N * 284.0



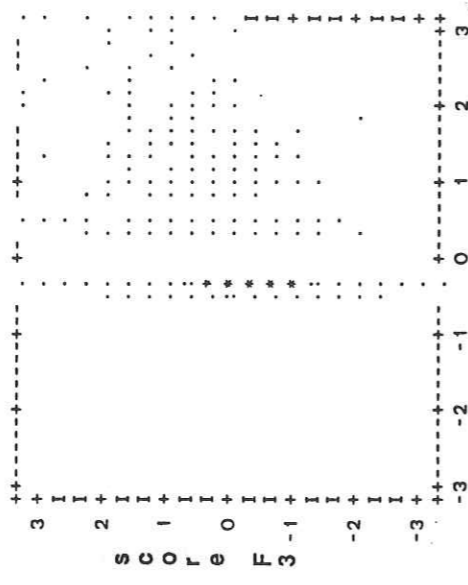
Symbols: : 56.0
 Max N * 225.0



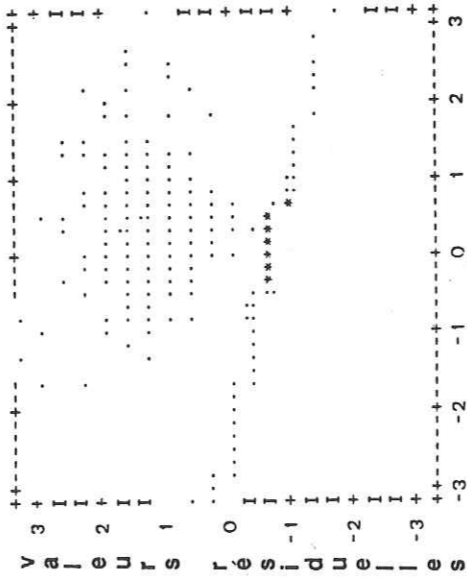
Symbols: : 41.0
 Max N * 166.0



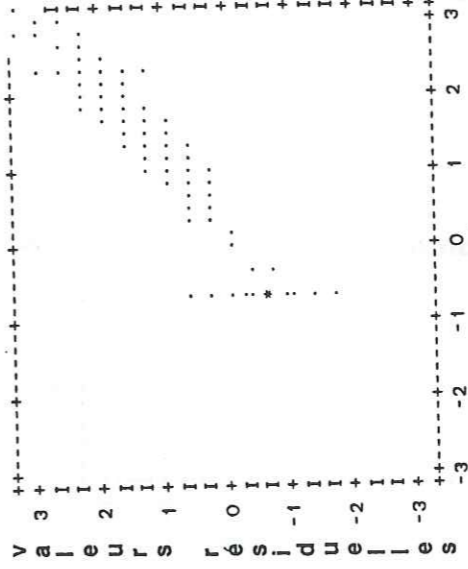
Symbols: : 48.0
 Max N * 194.0



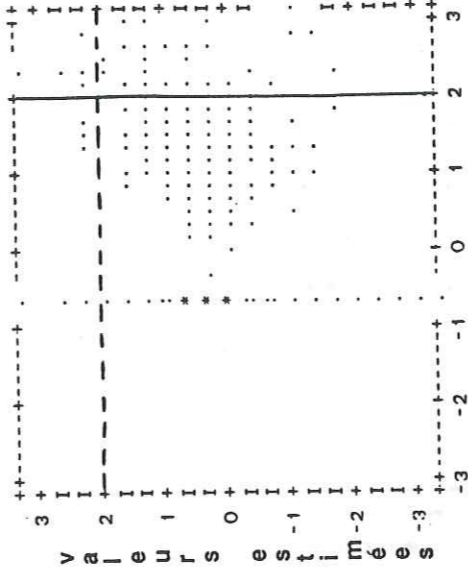
Symbols: : 43.0
 Max N * 175.0



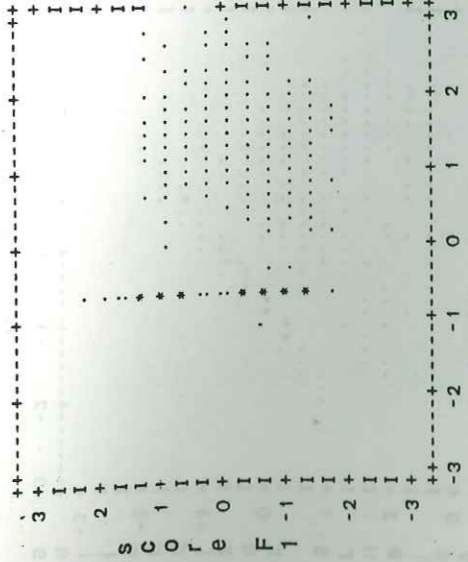
Symbols: : 25.0
 Max N * 103.0



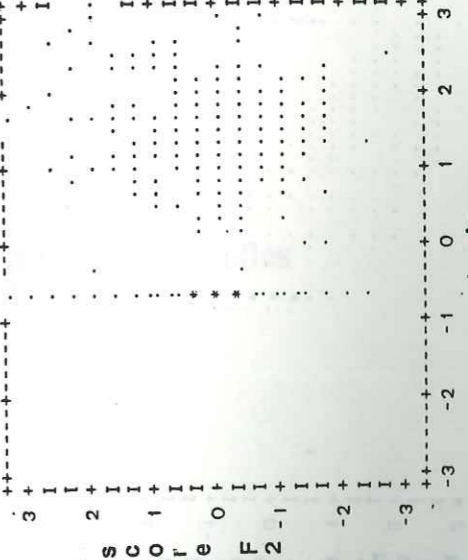
Symbols: : 129.0
 Max N * 518.0



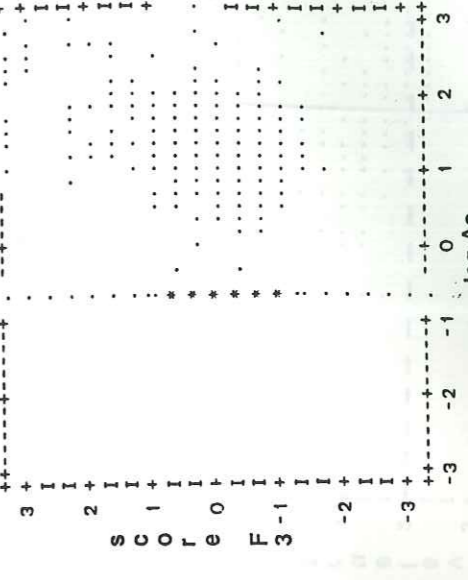
Symbols: : 52.0
 Max N * 210.0



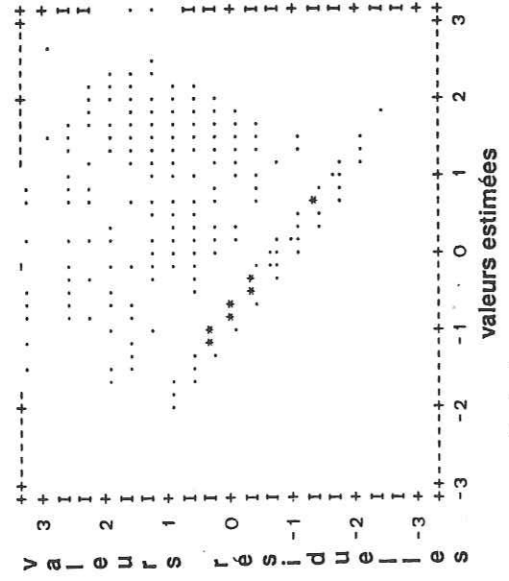
Symbols: : 40.0
 Max N * 160.0



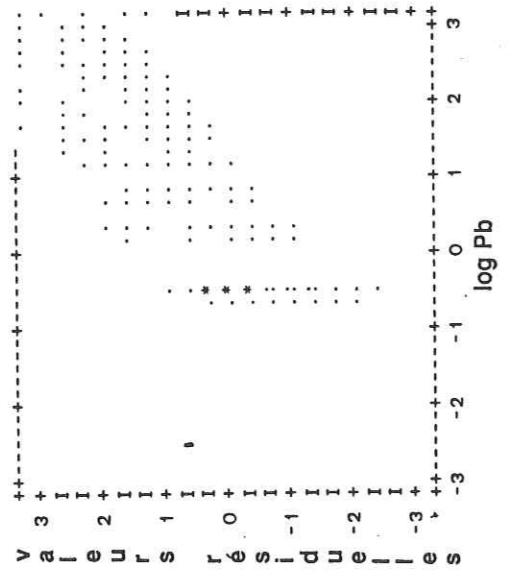
Symbols: : 47.0
 Max N * 191.0



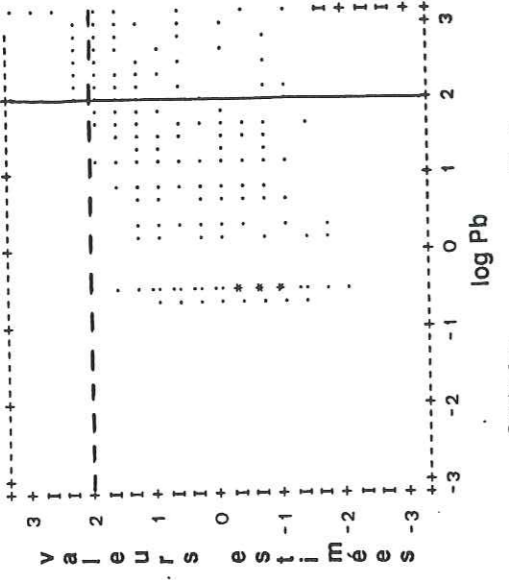
Symbols: : 42.0
 Max N * 168.0



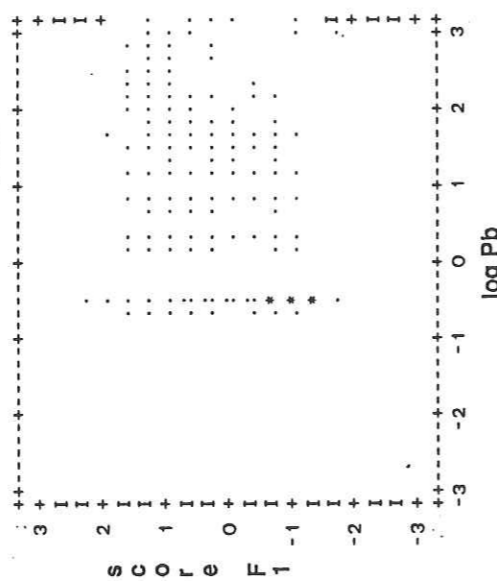
Symbols: : 28.0
 : 56.0
 * 112.0
 Max N *



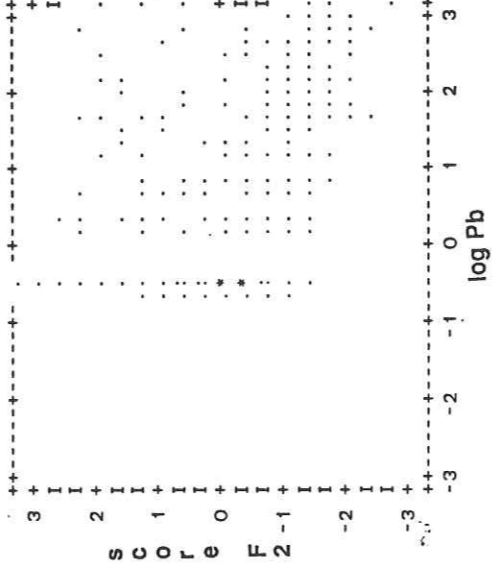
Symbols: : 59.0
 : 118.0
 * 239.0
 Max N *



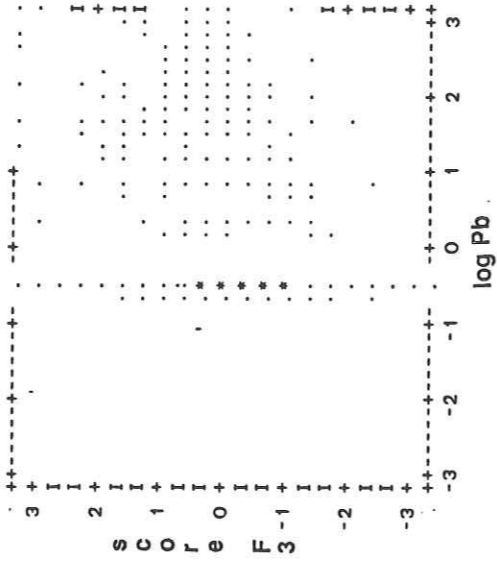
Symbols: : 55.0
 : 110.0
 * 221.0
 Max N *



Symbols: : 56.0
 : 112.0
 * 227.0
 Max N *



Symbols: : 62.0
 : 124.0
 * 250.0
 Max N *



Symbols: : 49.0
 : 98.0
 * 199.0
 Max N *

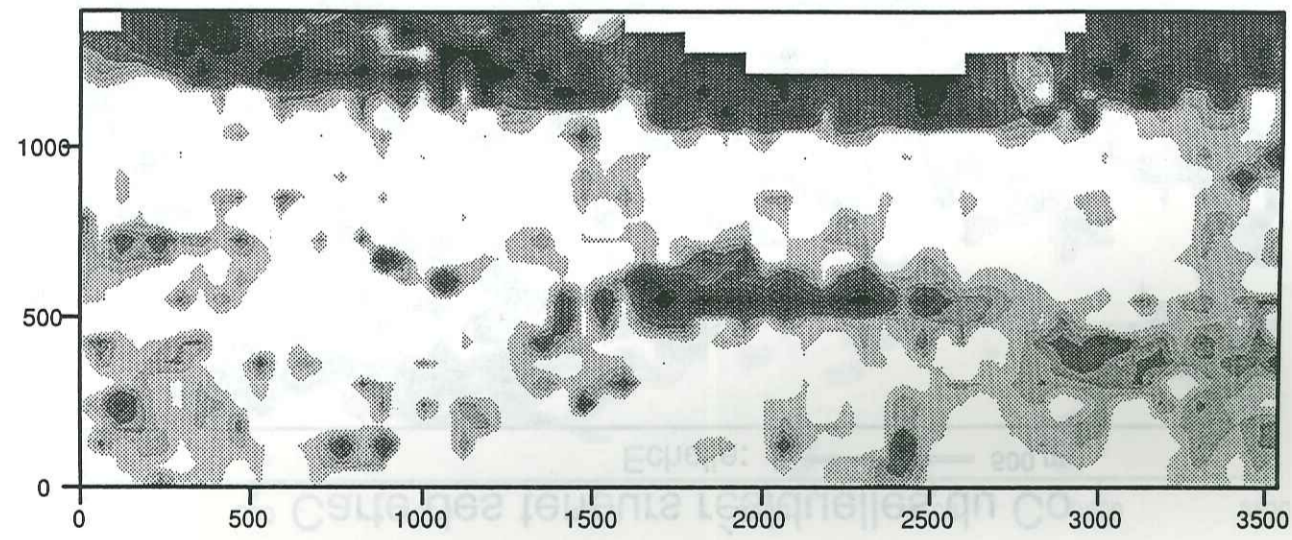
Cartes des teneurs estimées et résiduelles

ANNEXE

6.

Carte des teneurs estimées du Cr

Echelle: 0 — 500 m

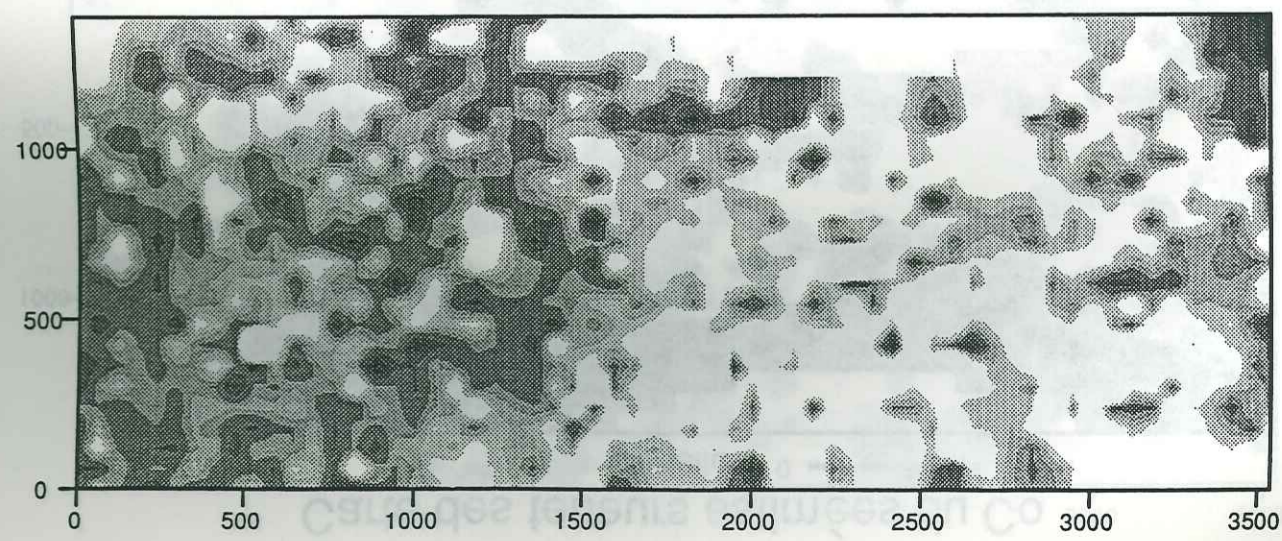


Légende: log (ppm)

sup.	3.11
2.94 - 3.11	
2.78 - 2.94	
2.60 - 2.78	
2.45 - 2.60	
2.28 - 2.45	
2.20 - 2.28	
2.12 - 2.20	
2.05 - 2.12	
inf.	2.05

Carte des teneurs résiduelles du Cr

Echelle: 0 — 500 m

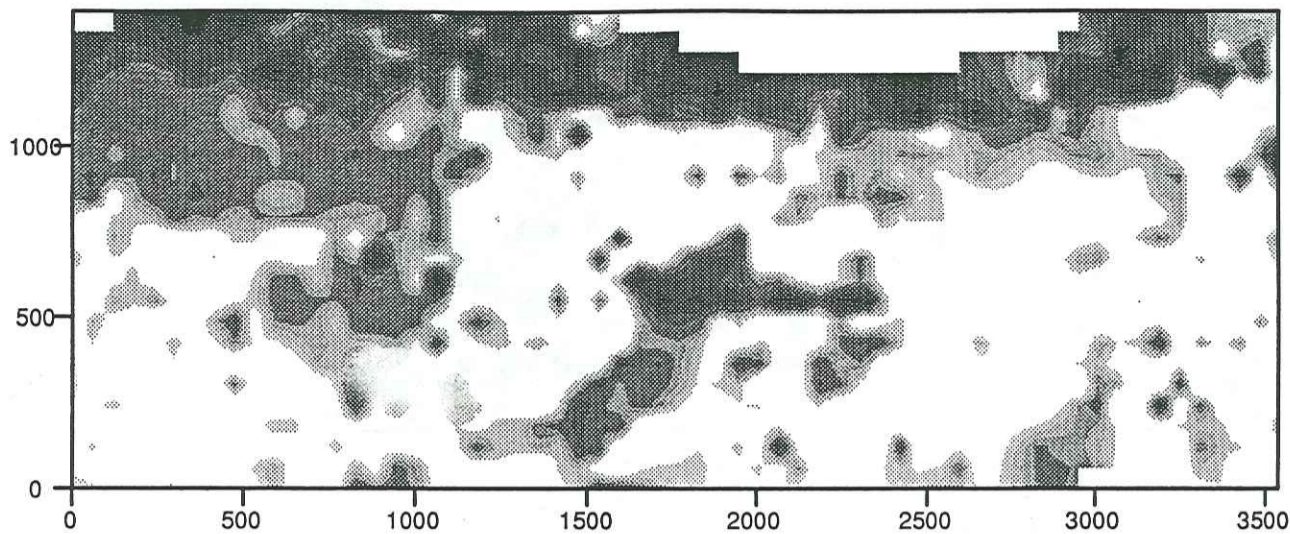


Légende: log (ppm)

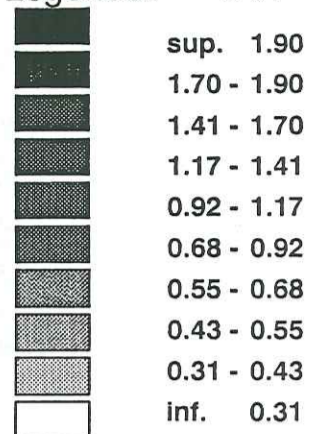
sup.	0.96
0.80 - 0.96	
0.64 - 0.80	
0.48 - 0.64	
0.32 - 0.48	
0.16 - 0.32	
0.08 - 0.16	
0.00 - 0.08	
-0.08 - 0.00	
inf.	-0.08

Carte des teneurs estimées du Co

Echelle: 0 — 500 m

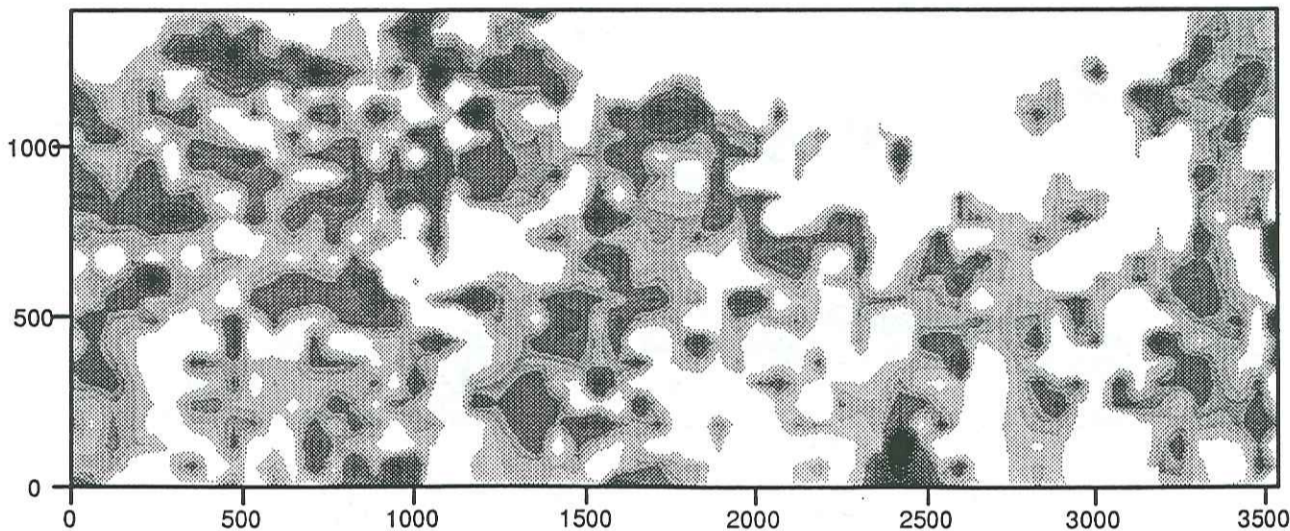


Légende: log (ppm)

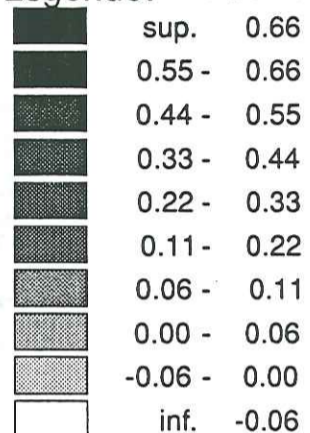


Carte des teneurs résiduelles du Co

Echelle: 0 — 500 m

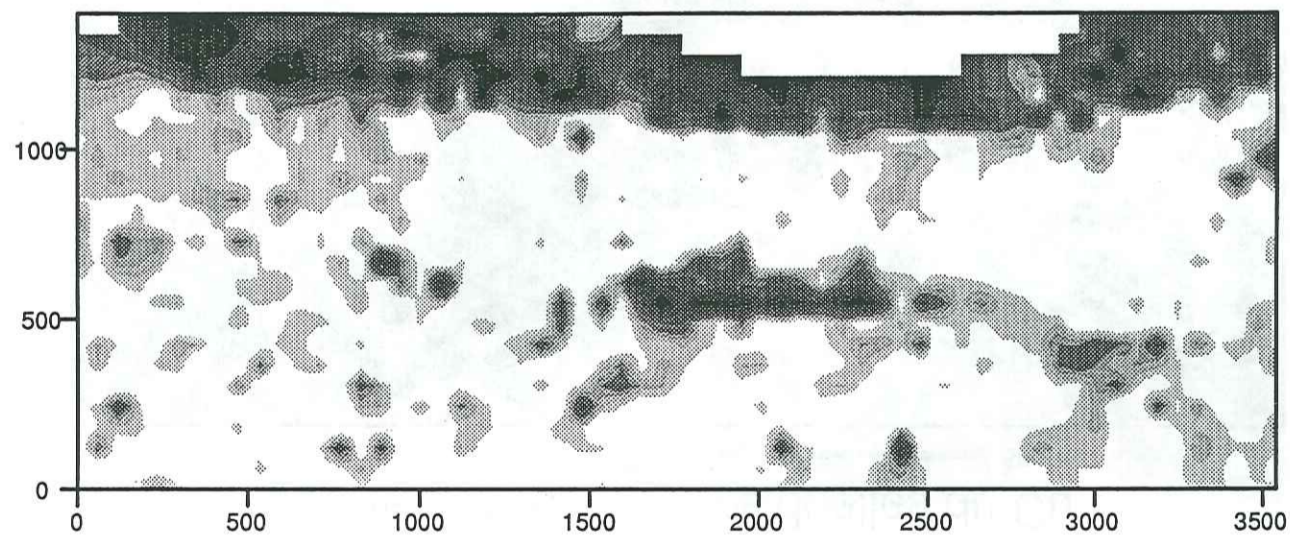


Légende: log (ppm)

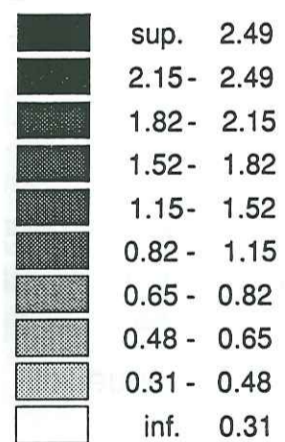


Carte des teneurs estimées du Ni

Echelle: 0 — 500 m

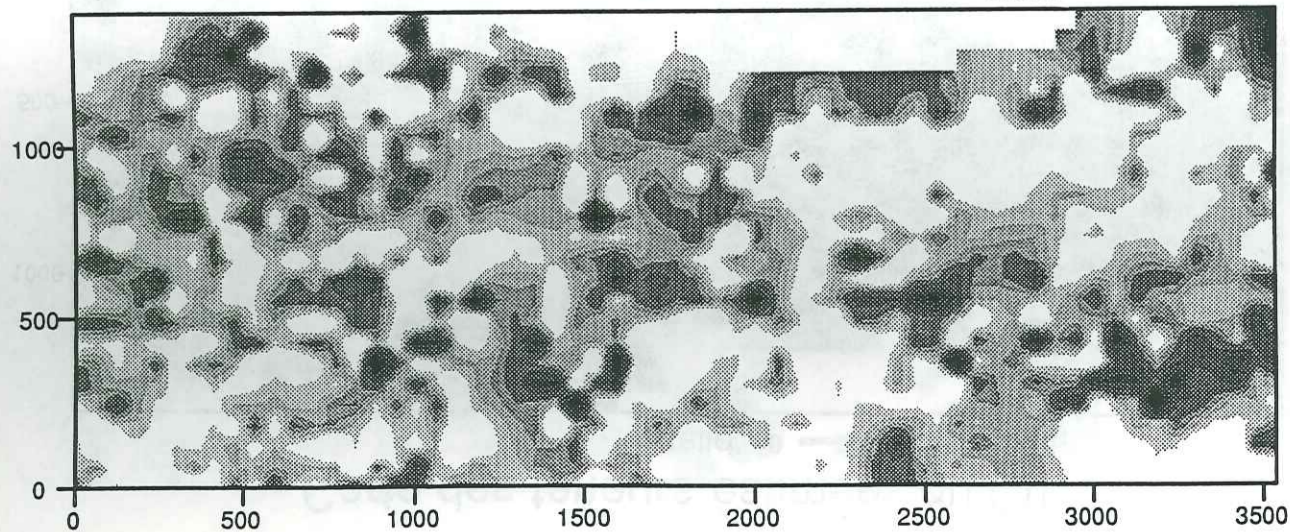


Légende: log (ppm)

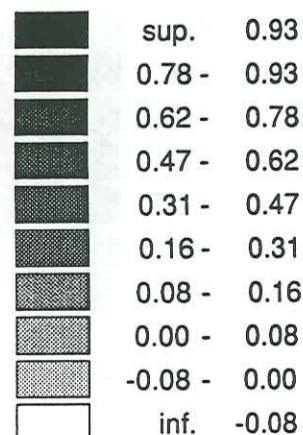


Carte des teneurs résiduelles du Ni

Echelle: 0 — 500 m

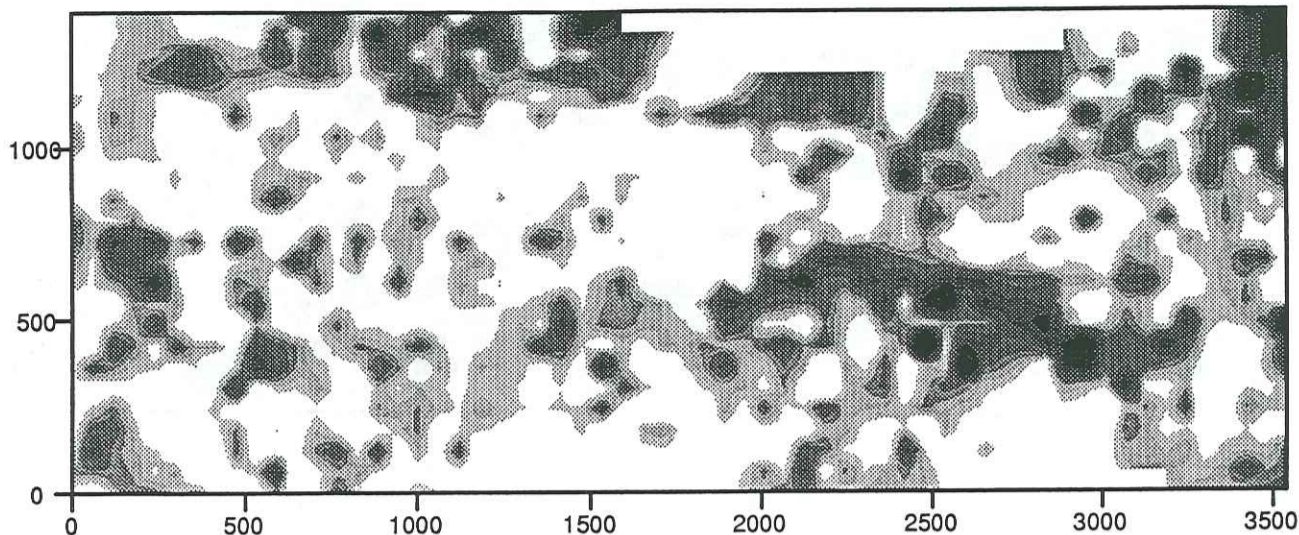


Légende: log (ppm)

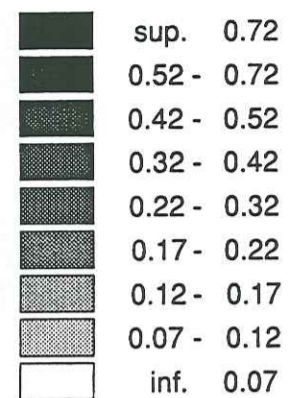


Carte des teneurs estimées du Cu

Echelle: 0 — 500 m

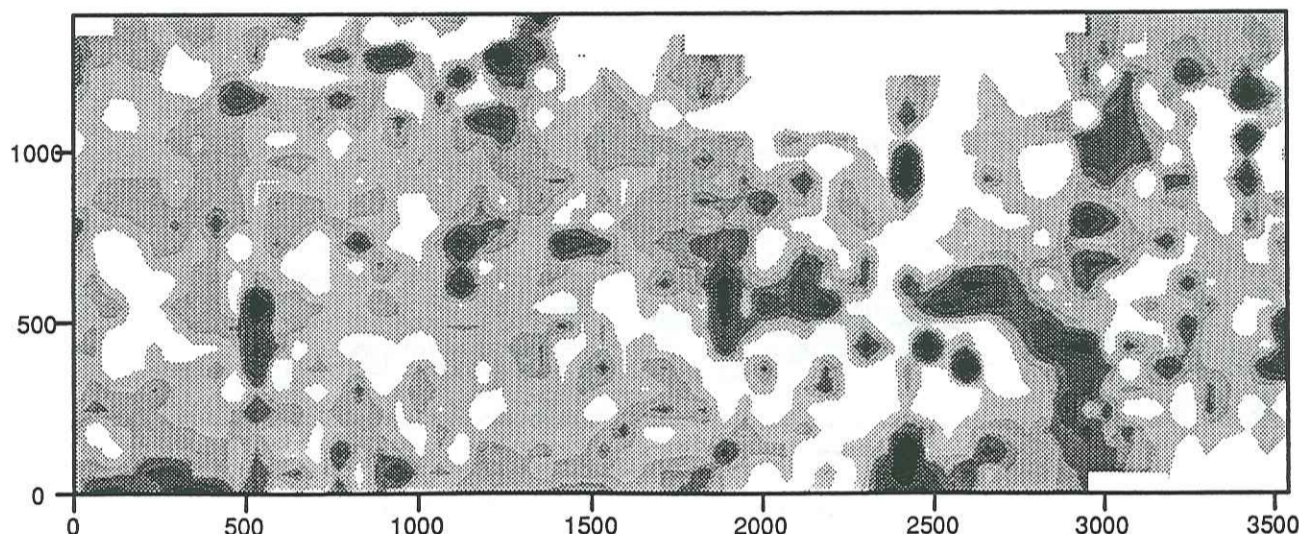


Légende: log (ppm)

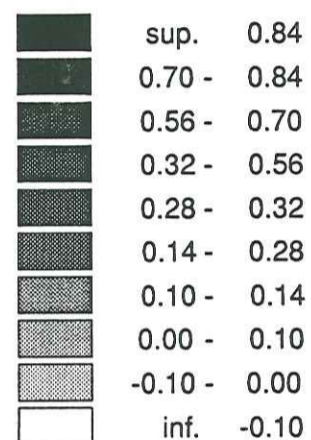


Carte des teneurs résiduelles du Cu

Echelle: 0 — 500 m

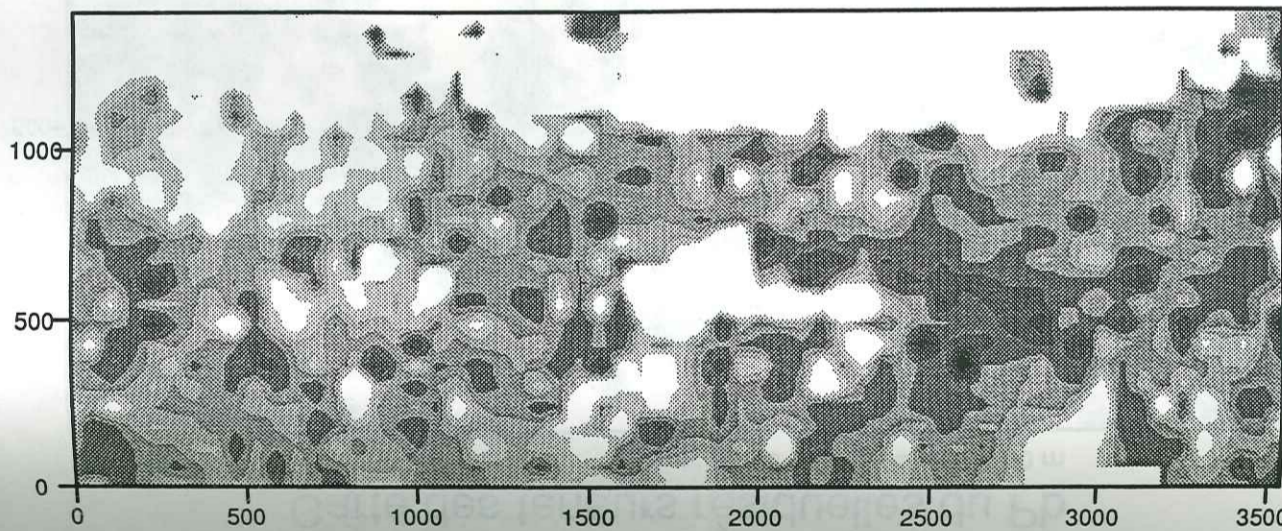


Légende: log (ppm)

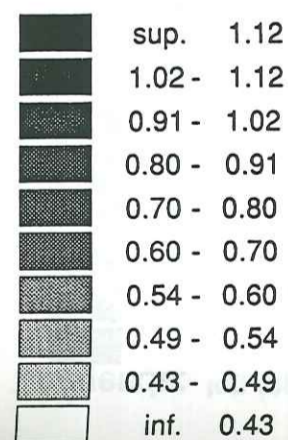


Carte des teneurs estimées de As

Echelle: 0 — 500 m

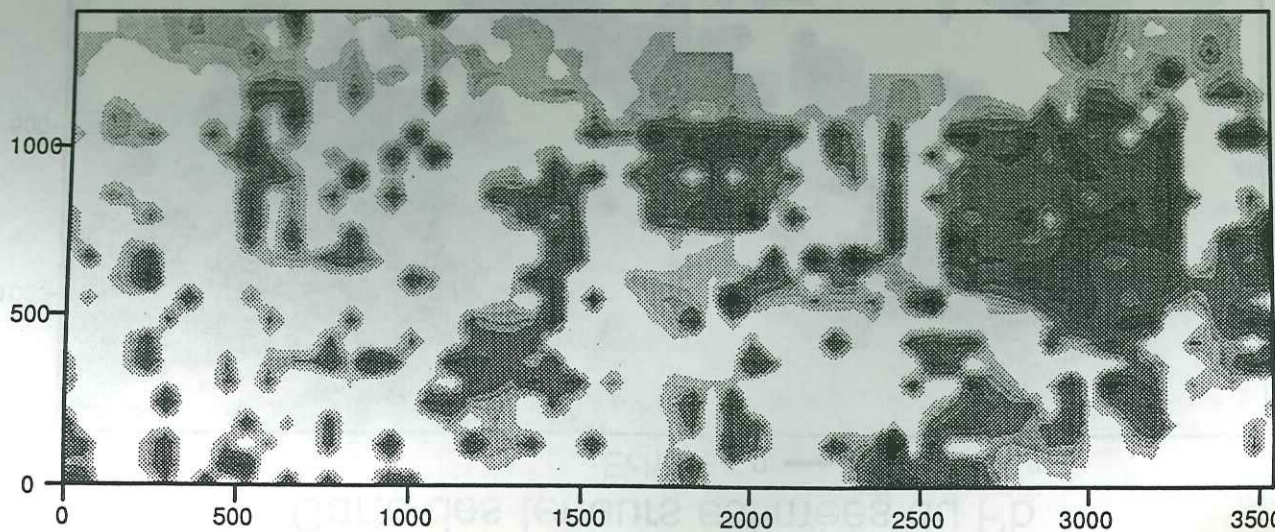


Légende: log (ppm)

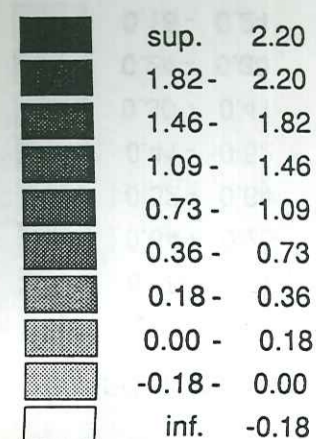


Carte des teneurs résiduelles de As

Echelle: 0 — 500 m

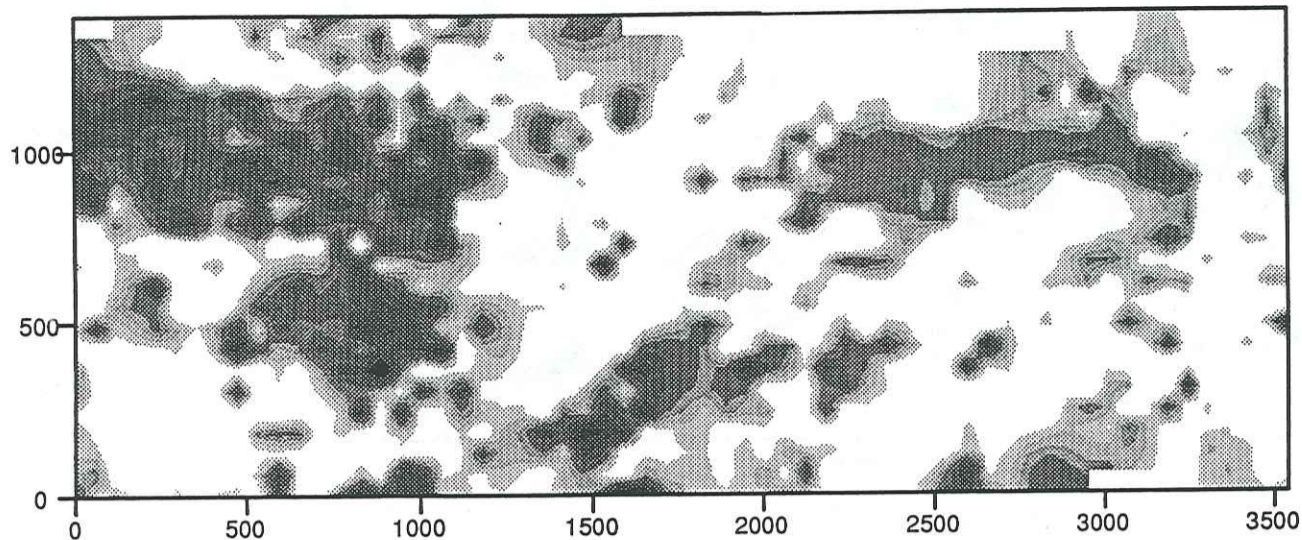


Légende: log (ppm)

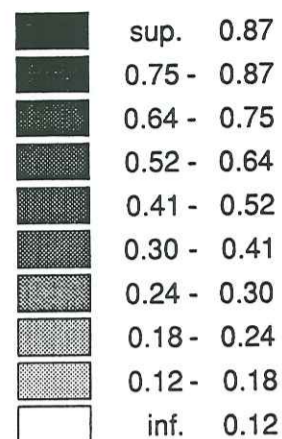


Carte des teneurs estimées du Pb

Echelle: 0 — 500 m

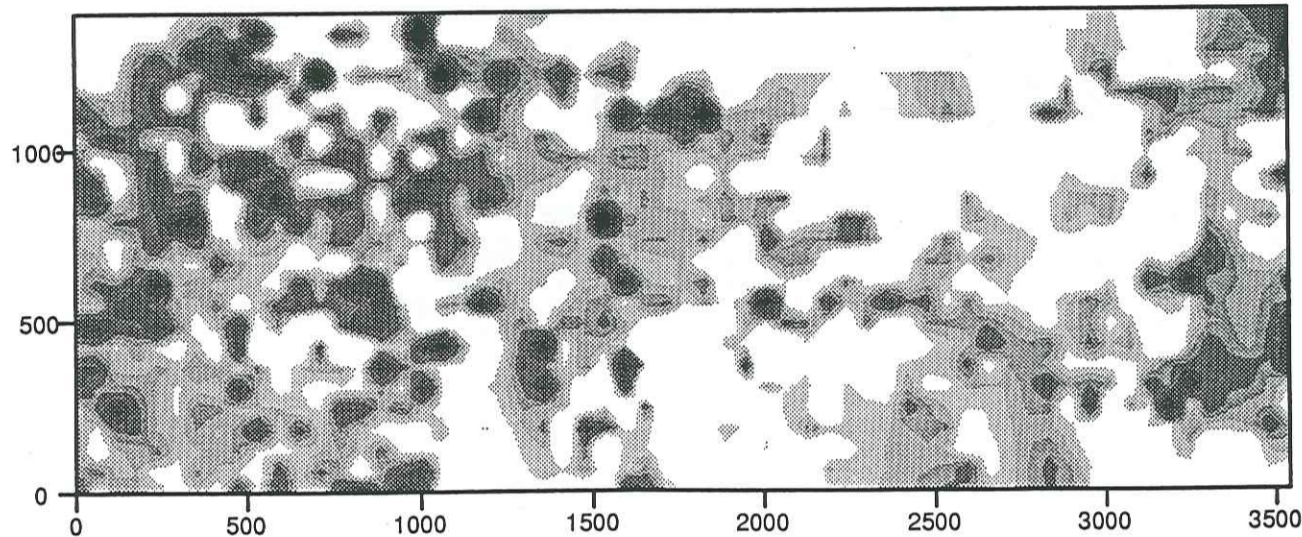


Légende: log (ppm)

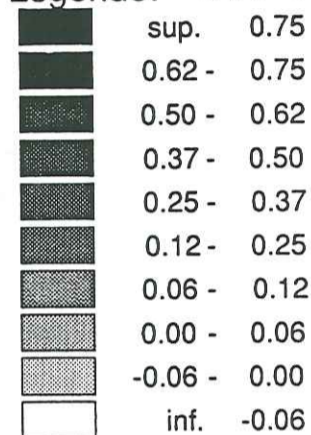


Carte des teneurs résiduelles du Pb

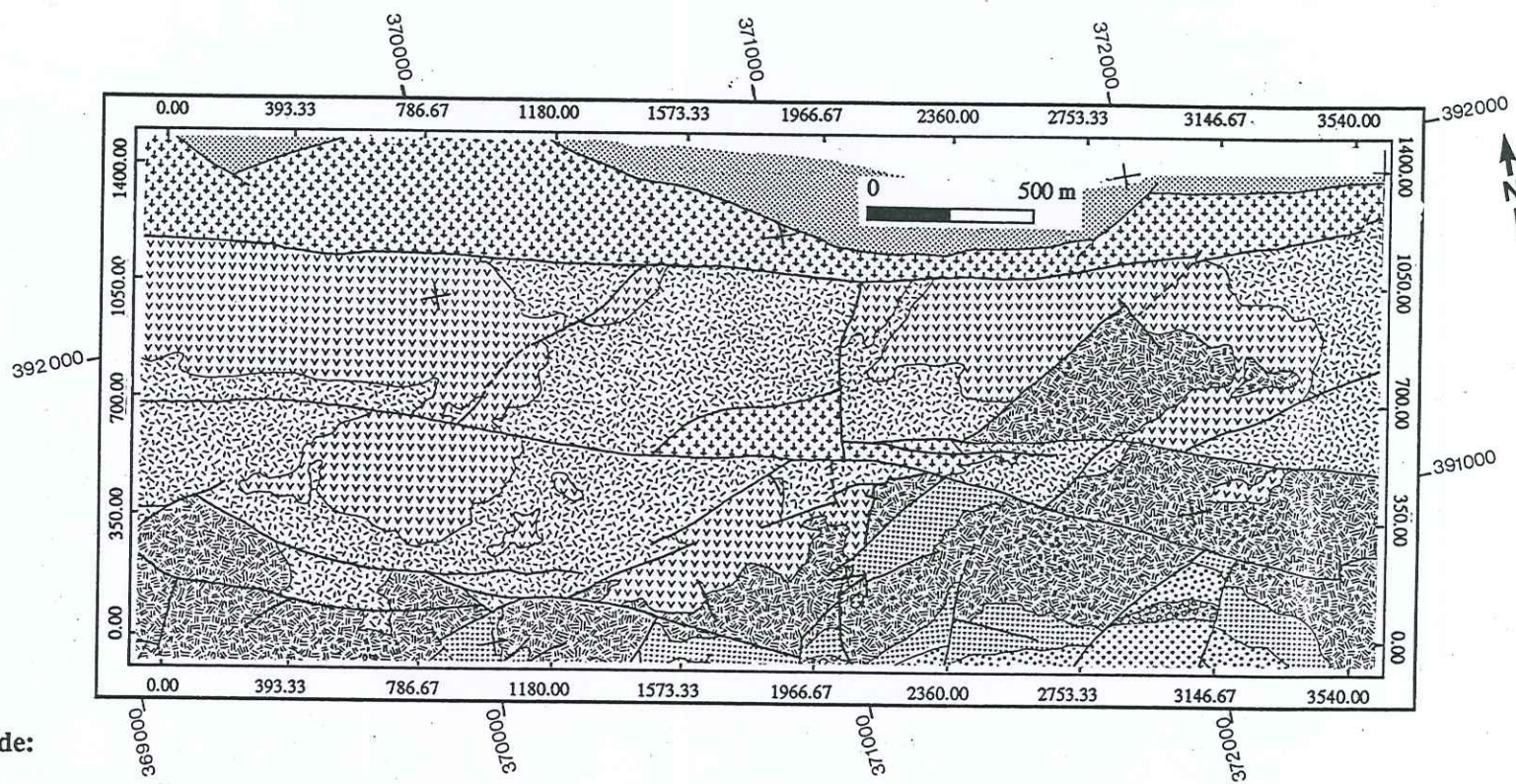
Echelle: 0 — 500 m



Légende: log (ppm)



Document hors texte: Carte géologique simplifiée de la zone échantillonnée pour la géochimie de prospection.



Légende:

- | | | |
|--------------------------------------|--|---|
| <p>PIII</p> <p>PII</p> | <p>roches pyroclastiques acides (C1 à E2), Unité 2</p> <p>andésites B, base de l'Unité 2</p> <p>roches pyroclastiques acides (A1 à A5), Unité 1</p> <p>roches détritiques de la série de Tiddiline (PII sup.)</p> <p>roches basiques et ultrabasiques (PII inf.)</p> | <p>tufs et ignimbrites (I1 à J6)</p> <p>formation conglomératique (H)</p> <p>dacites (G1 à G2)</p> <p>andésites F (base de l'unité 3)</p> |
|--------------------------------------|--|---|

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE I
 INSTITUT DE GÉOLOGIE
 DOCUMENTATION
 19, RUE MAURICE GIGNOUX
 F 38031 GRENOBLE CEDEX
 TEL. (03) 76 63 69 66
 FAX. (03) 76 97 82 43

RESUME:

Cette étude est effectuée dans la zone de suture panafricaine de Bou Azzer-El Graara (Anti-Atlas, Maroc). Elle s'articule en deux volets: d'une part, l'étude géologique et géodynamique du Précambrien Terminal (III) qui sert de support aux traitements statistiques de l'information géochimique de prospection récoltée dans le district de Tamdrost-Ambed d'autre part.

I) Un découpage lithostratigraphique des formations volcaniques du PIII est obtenu grâce à: la cartographie détaillée au 1/4000e du district de Tamdrost-Ambed et aux coupes géologiques levées en d'autres points de la boutonnière. Ceci a permis d'établir une coupe synthétique et des corrélations lithostratigraphiques.

L'étude pétrographique des roches volcaniques à prédominance pyroclastique de cette série montre leur rattachement à un magmatisme calco-alcalin, d'âge compris entre 580 et 560 Ma, dont la signification est discutée dans le cadre géodynamique régional.

L'analyse structurale des formations volcaniques et volcano-sédimentaires du Précambrien III, conduit à la mise en évidence de déformations synvolcaniques en régime distensif (NW-SE) et à la détermination des paléochamps de contraintes associés aux déformations observées. Le modèle d'extension proposé implique des mouvements de coulissement senestres le long de grands décrochements régionaux parallèles à la suture, entre le craton ouest-africain et le domaine panafricain "mobile".

II) Le traitement des données géochimiques (13000 analyses de 10 éléments majeurs et 24 éléments en traces par Spectrométrie d'émission) aboutit à la mise en évidence d'anomalies élémentaires et multiélémentaires significatives d'indices miniers, indépendants de la lithologie. Ce résultat passe par l'étude de la qualité des données géochimiques qui a conduit à l'évaluation de la précision et à l'application d'une correction empirique de l'erreur analytique.

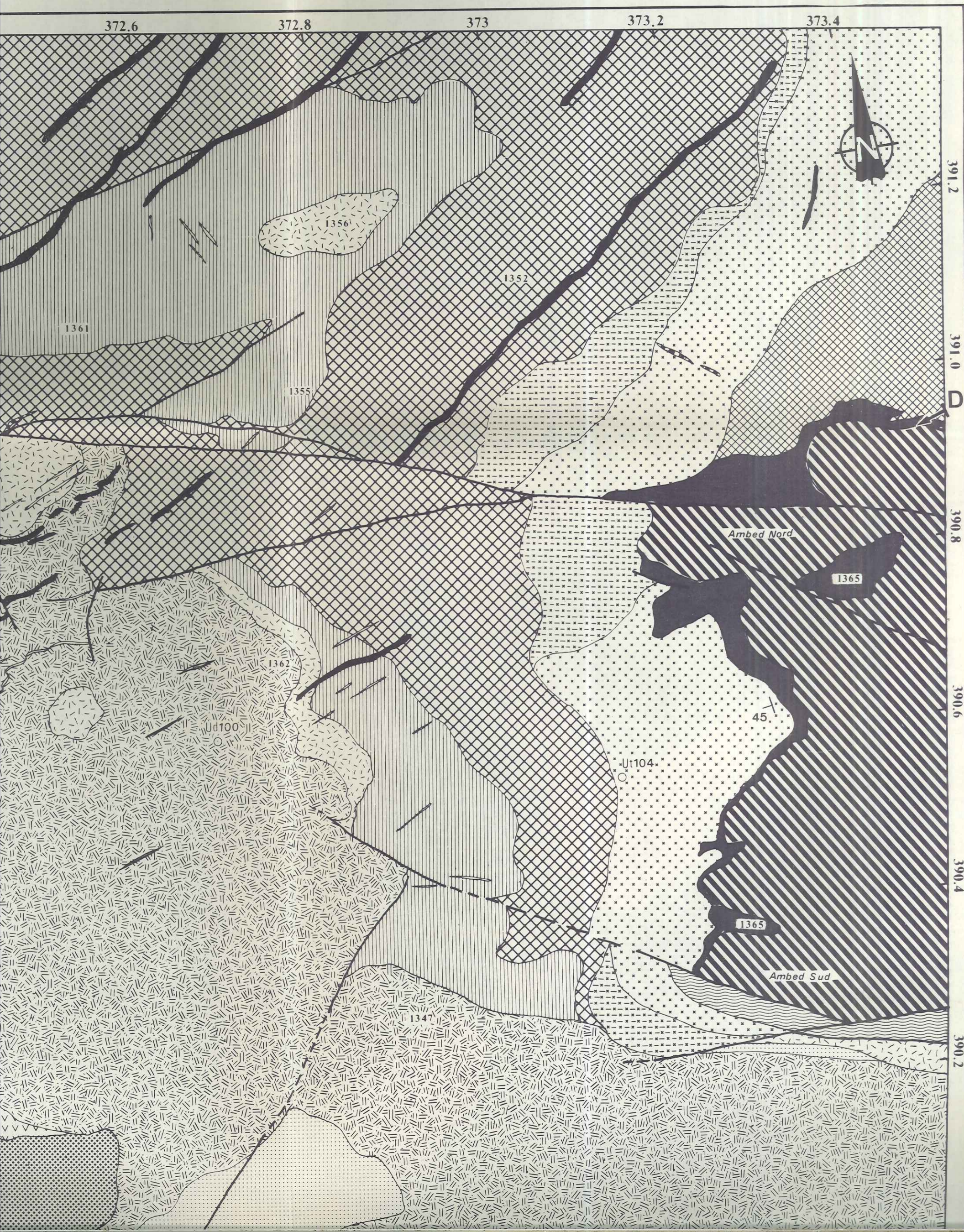
L'analyse statistique des données de prospection est effectuée en plusieurs étapes:

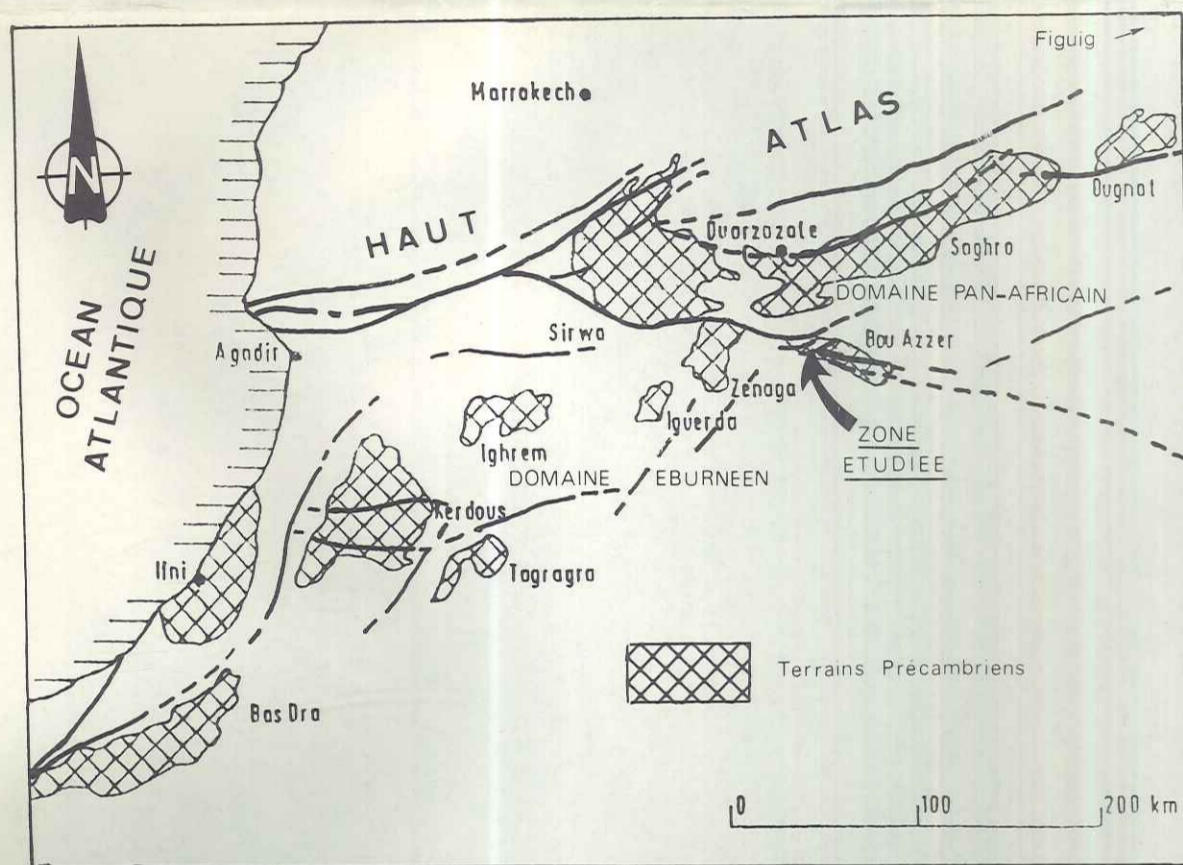
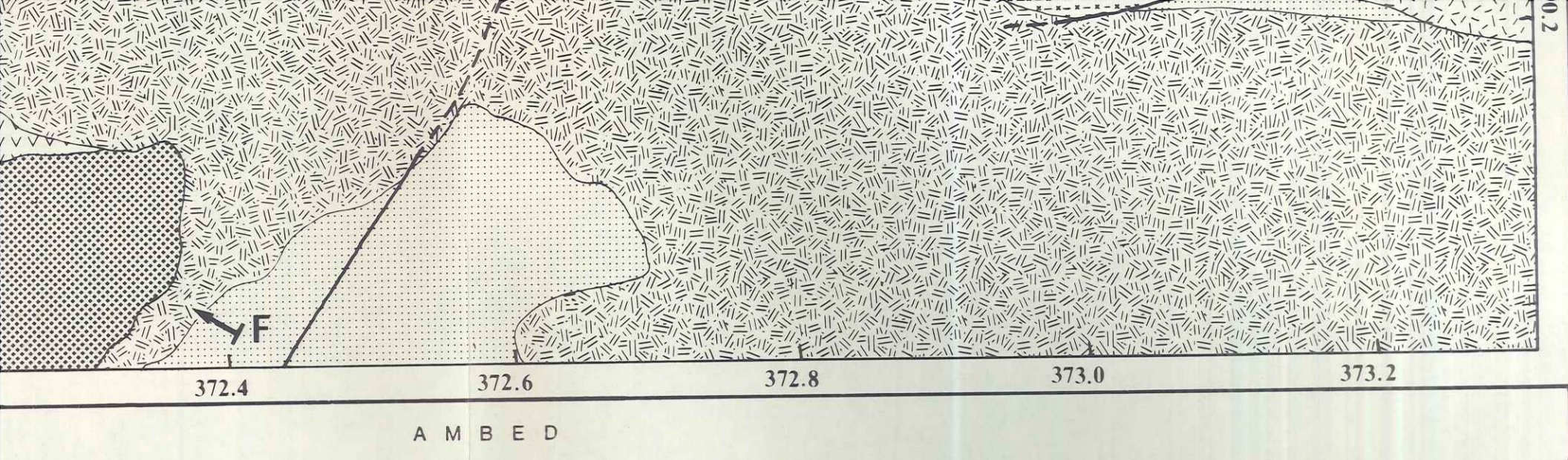
- l'utilisation de la technique non conventionnelle "box and whiskers" pour la détermination des seuils anomaux, toutes lithologies confondues;
- la diversité lithologique est simplifiée par analyse factorielle en composantes principales sur les médianes pour aboutir à quatre groupes lithologiques au lieu des 32 distingués sur le terrain;
- une analyse discriminante sur ces quatre groupes, désormais connus, aboutit à un modèle factoriel du fond géochimique qui explique mieux les variations liées à la lithologie;
- le fond géochimique modélisé est retranché par régression factorielle pour faire apparaître les anomalies discordantes.

Des cartes de synthèse des anomalies multiélémentaires sont établies dans le but d'orienter les campagnes de sondage.

Mots clés: Précambrien Terminal; Panafricain; Bou Azzer; Anti-Atlas; Maroc; volcanisme pyroclastique; calco-alcalin; géochimie; traitement de données; prospection; anomalie; indices miniers; statistiques; analyse factorielle; analyse discriminante.

CENTRAL, MAROC)



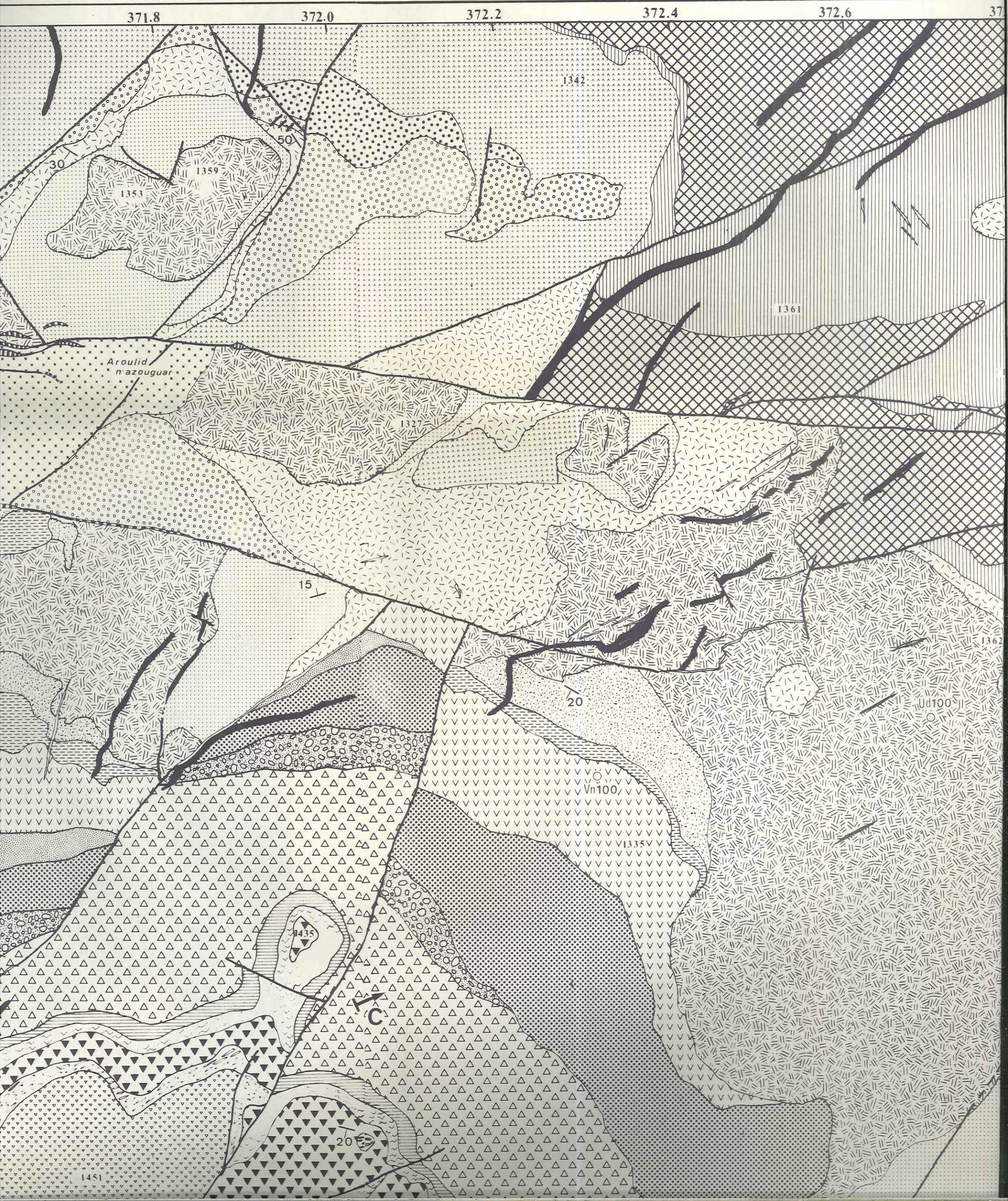


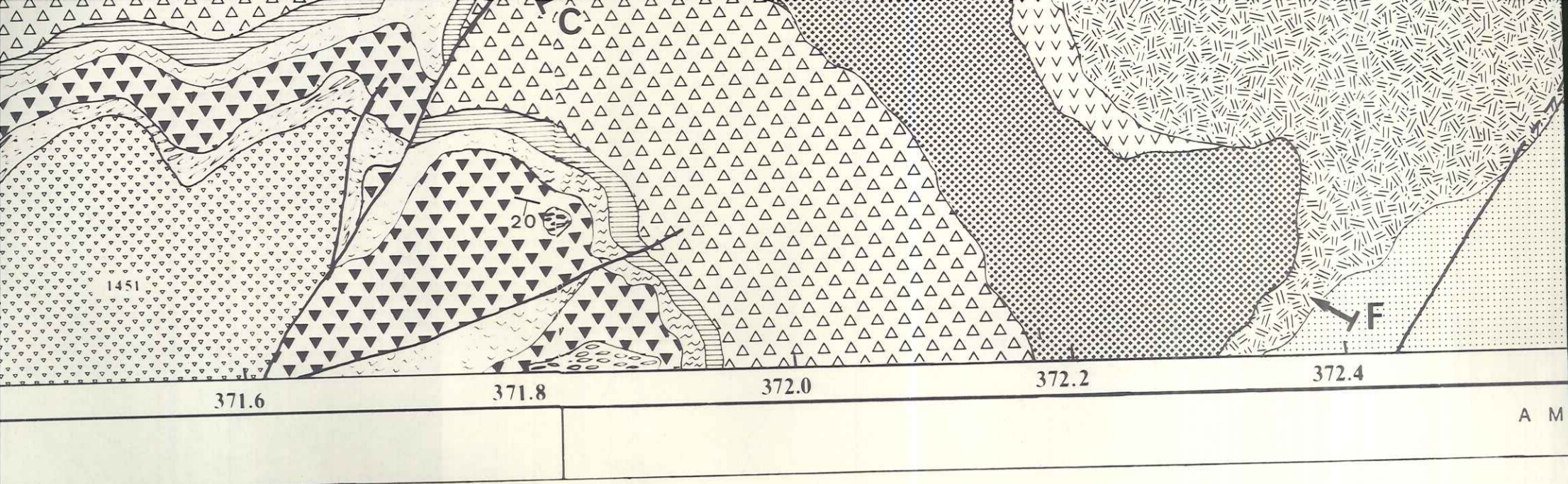
SCHEMA STRUCTURAL DE L'ANTI-ATLAS

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE I
 INSTITUT DE GÉOLOGIE
 DOCUMENTATION
 15, RUE MAURICE GIGNOUX
 F 38031 GRENOBLE CEDEX
 TÉL. (33) 76 63 59 66
 FAX. (33) 76 87 82 43

de BOU AZZER-EL GRAARA, ANTI-ATLAS CENTRAL, MAROC

par M.R. AZIZI SAMIR





Légende:

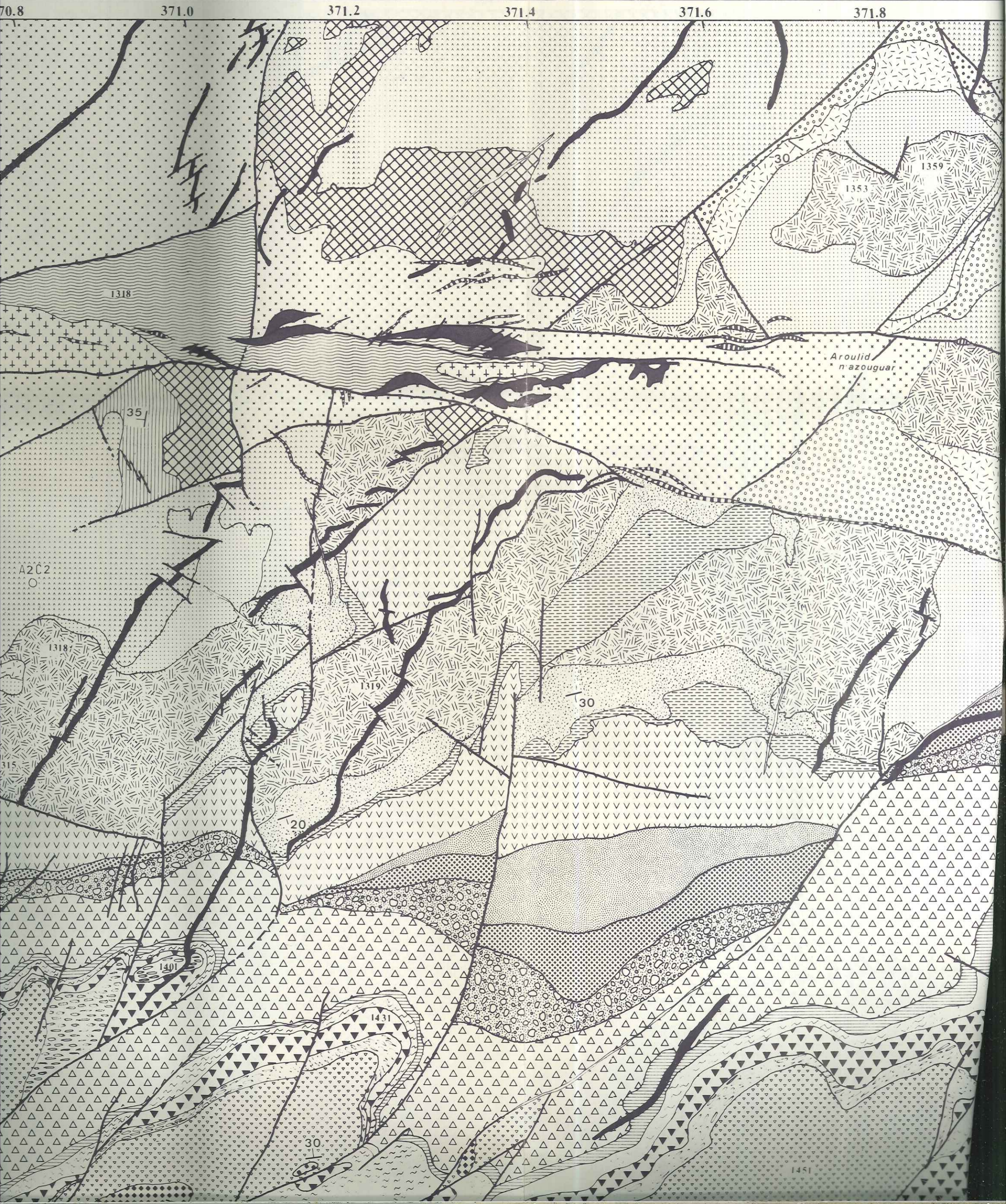
<p>H: conglomérat (lappilis, bombes volcaniques, cinérites)</p> <p>G2: ignimbrite dacitique à éléments de ponce</p> <p>G1: tuf dacitique</p> <p>F: andésite porphyrique</p> <p>E2: ignimbrite rhyolitique porphyrique</p> <p>E1: tuf rhyoliti-</p> <p>D: ignimbrite et tuf rhyolitique à biotite</p> <p>C4: ignimbrite rhyolitique</p> <p>C3: ignimbrite rhyolitique porphyrique</p> <p>C2: ignimbrite rhyolitique à lithophyses de quartz</p> <p>C1: tuf rhyolitique</p> <p>B: coulée andésitique</p> <p>A5: ignimbrite rhyolitique</p> <p>A4: tuf et ignimbrite rhyolitique</p> <p>A3: ignimbrite rhyolitique porphyrique</p> <p>A2: ignimbrite rhyolitique</p> <p>A1: tuf et ignimbrite rhyolitique à lithophyses de quartz</p>	<p>Unité 3</p> <p>Unité 2</p> <p>Unité 1</p>	<p>formation d'Ambed jaspes et carbonates</p> <p>diorites</p> <p>diabases</p> <p>serpentes</p> <p>Précambrien I (gneiss polymetamorphiques)</p>	<p>Précambrien II supérieur</p> <p>Précambrien II inférieur</p> <p>faulle</p> <p>filons de roche carbonatée</p> <p>filons de quartz</p> <p>stratification (x=pendage)</p> <p>situation des sondages</p> <p>situation des coupes géologiques</p>
---	---	--	---

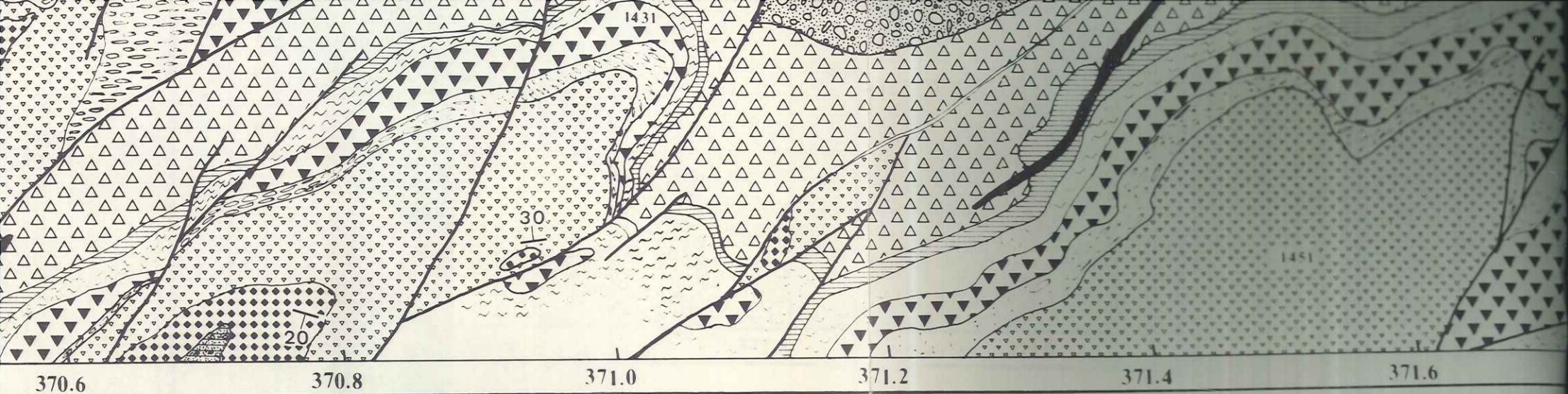
TAMDROST-AMBED

(Bouttonnière de BOU AZZER-E

1/4 000

par M.R. AZIZI S





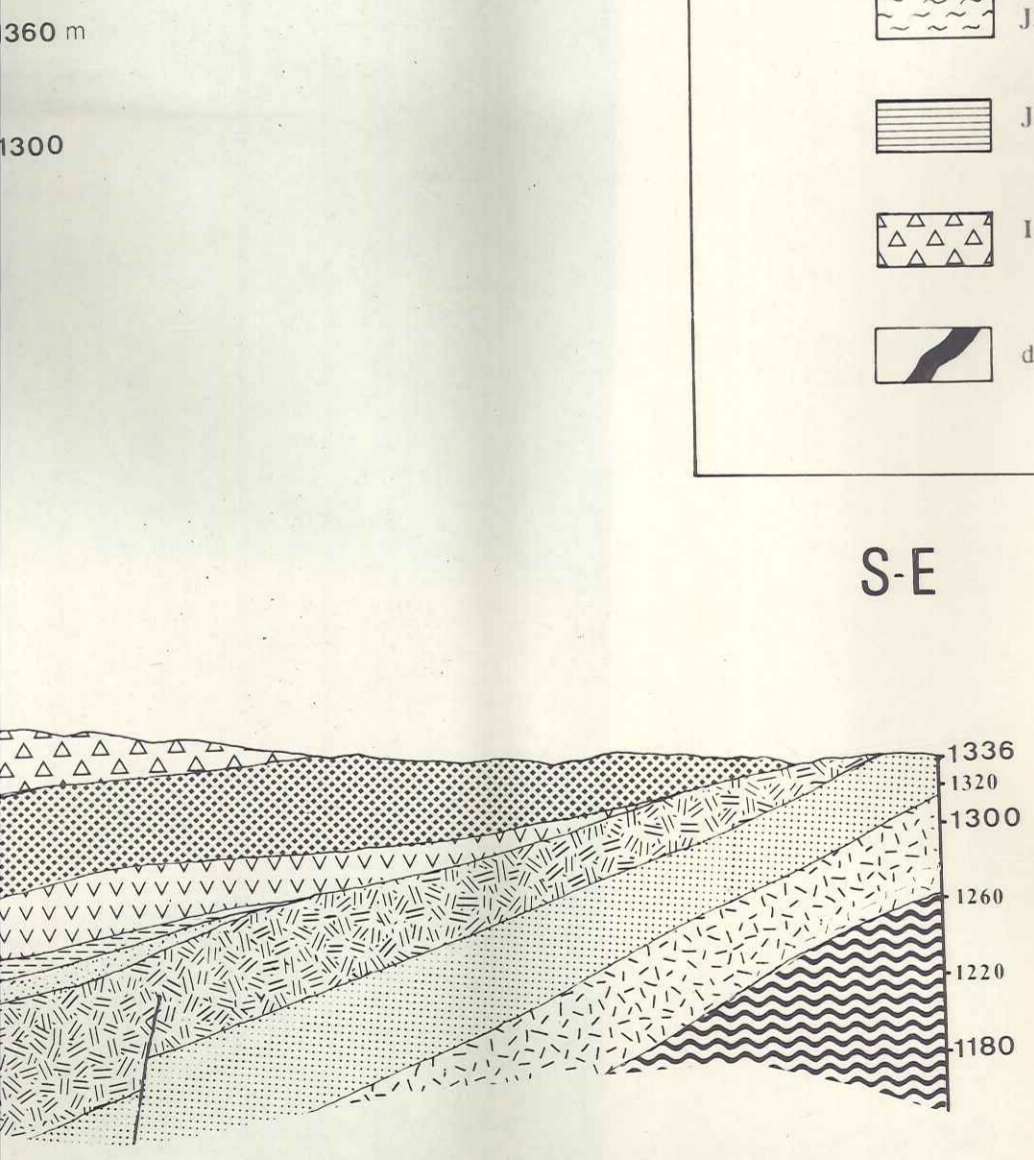
A R O U L I D N ' A Z O U G U A R

Précambrien III

- | | | | |
|--|---|--|---|
| | K: conglomérat et grès | | H: conglomérat (lappilis, bombes volcaniques, cinérites) |
| | J6: ignimbrite rhyolitique agglomératique | | G2: ignimbrite dacitique à éléments de ponce |
| | J5: ignimbrite dacitique | | G1: tuf dacitique |
| | J4: ignimbrite rhyolitique à lithophyses | | F: andésite porphyrique |
| | J3: ignimbrite rhyolitique | | E2: ignimbrite rhyolitique porphyrique |
| | J2: tuf rhyolitique | | E1: tuf rhyoliti- |
| | J1: ignimbrite rhyolitique | | D: ignimbrite et tuf rhyolitique à biotite |
| | I: andésite à sommet bulleux | | C4: ignimbrite rhyolitique |
| | dykes de porphyrite andésitique | | C3: ignimbrite rhyolitique porphyrique |
| | | | C2: ignimbrite rhyolitique à lithophyses de quartz |
| | | | C1: tuf rhyolitique |
| | | | B: coulée andésitique |
| | | | A5: ignimbrite rhyolitique |
| | | | A4: tuf et ignimbrite rhyolitique |
| | | | A3: ignimbrite rhyolitique porphyrique |
| | | | A2: ignimbrite rhyolitique |
| | | | A1: tuf et ignimbrite rhyolitique à lithophyses de quartz |

Unité 4

S-E



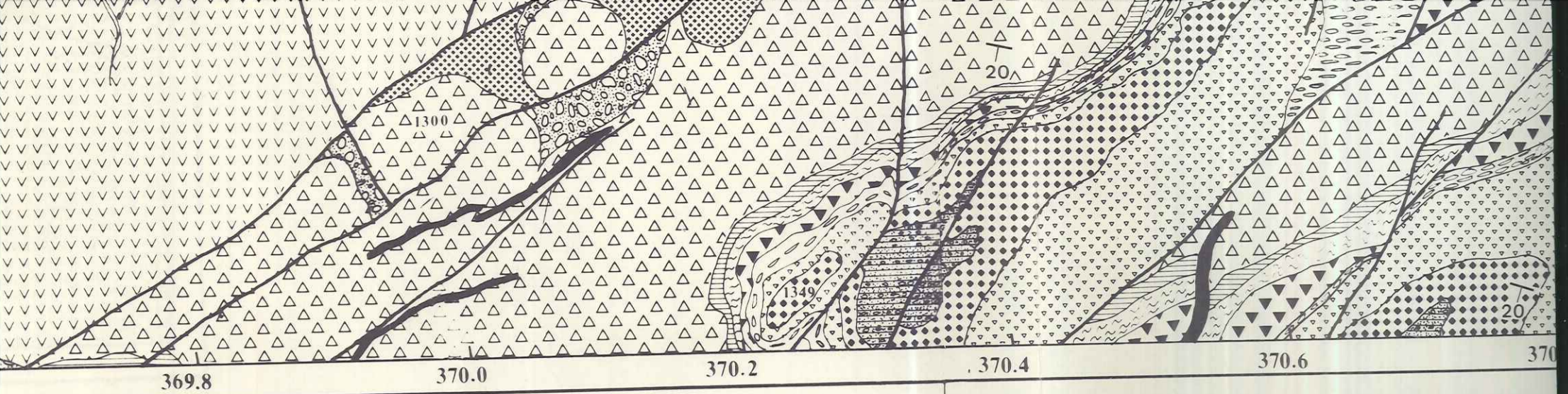
360 m

1300

CARTE GEOLOGIQUE DU DISTRICT DE TAMDRON

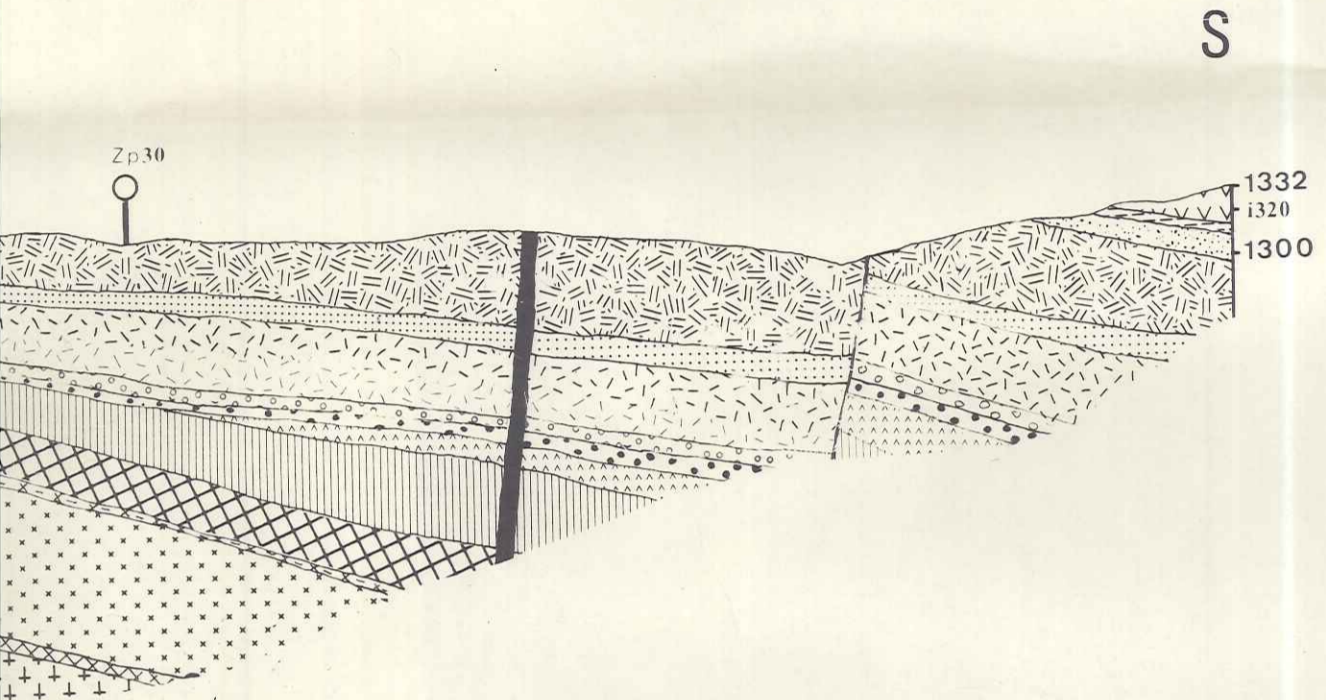
ECHELLE: 1/4 000



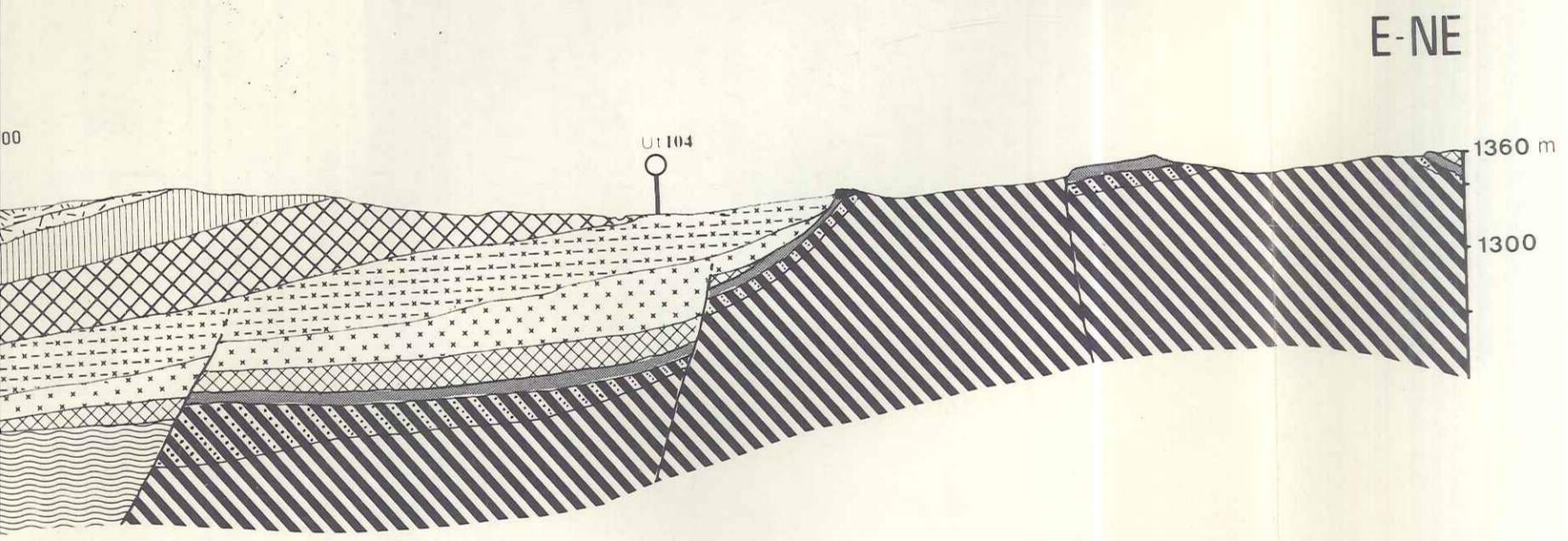


O S T - E S T

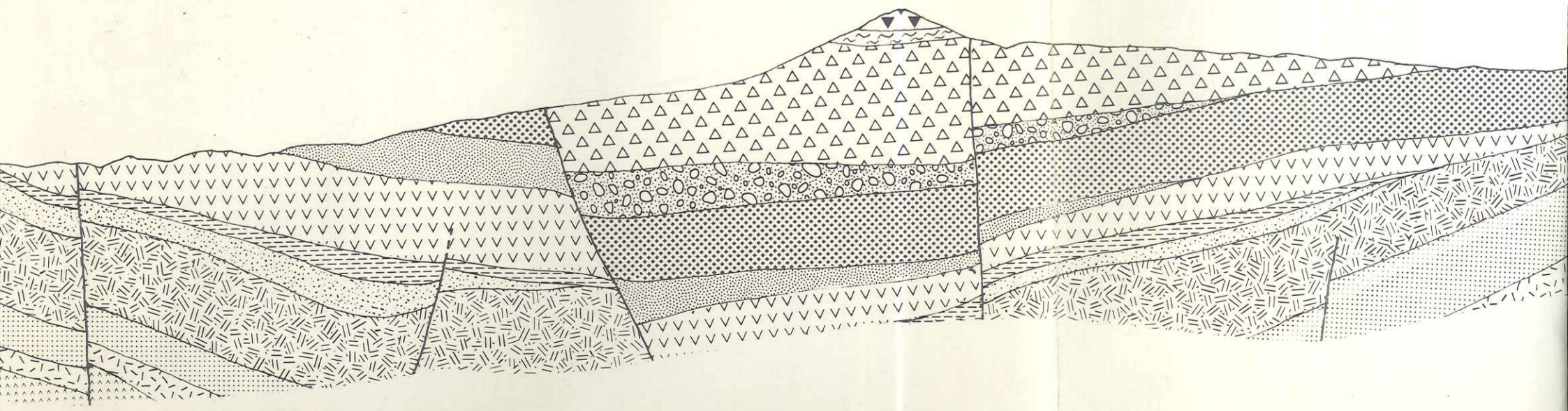
A-B

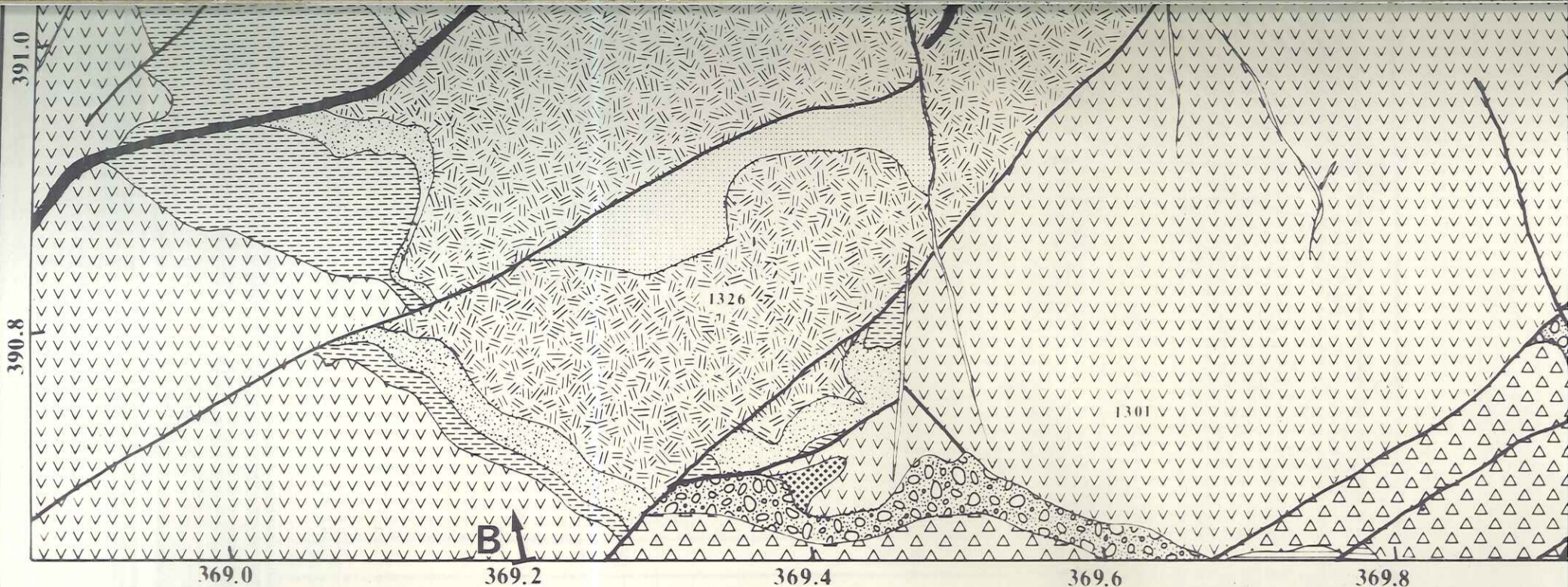


coupe C-D



coupe E-F

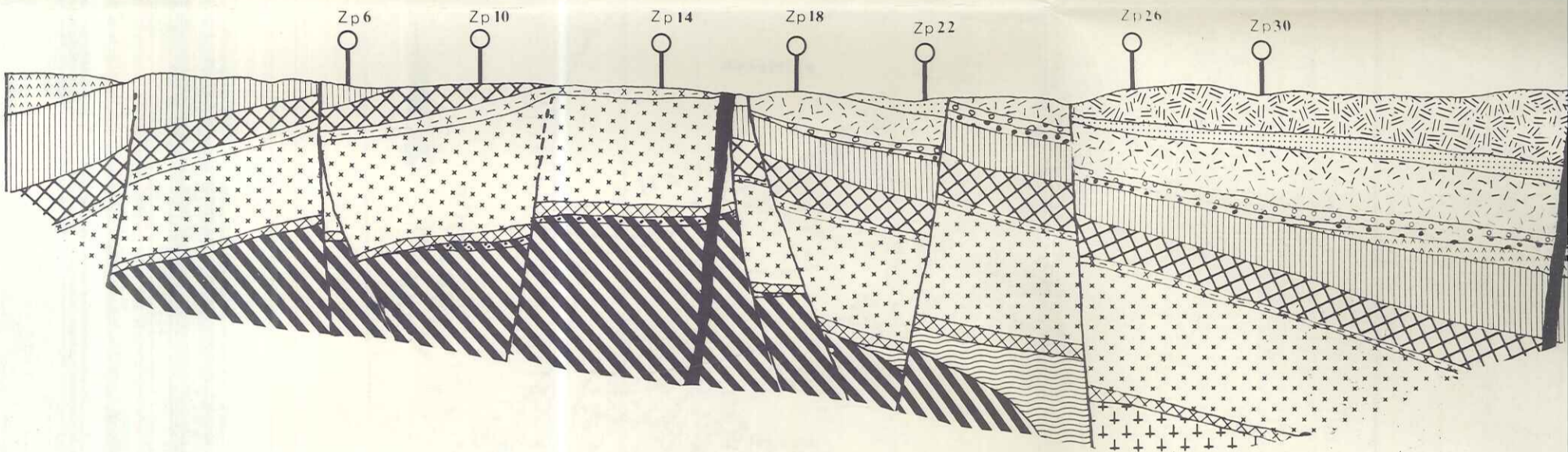




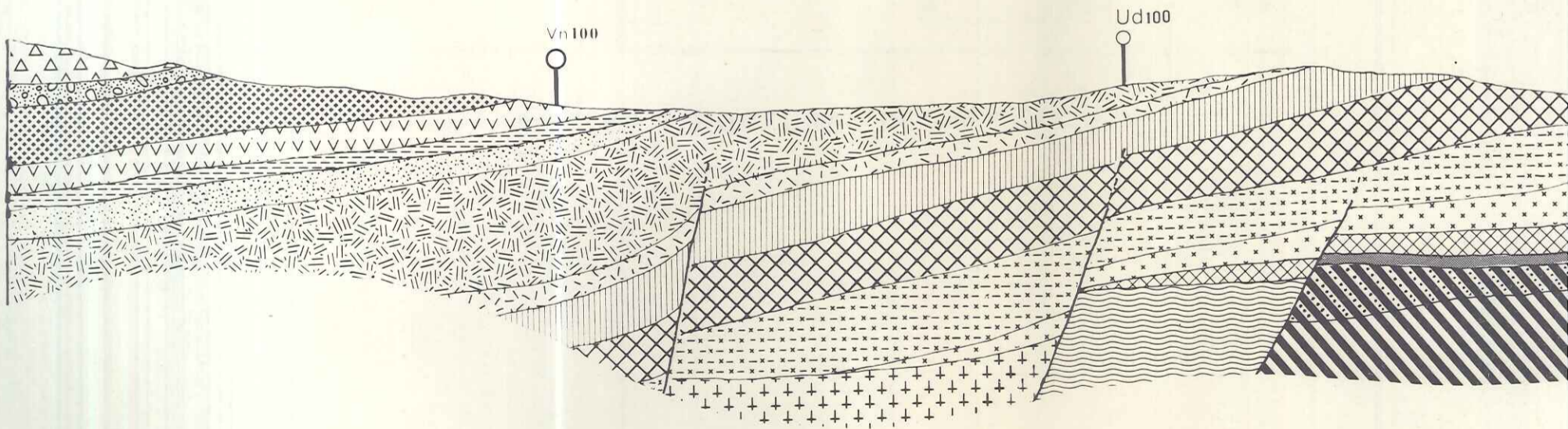
T A M D R O S T - E S T

coupe A-B

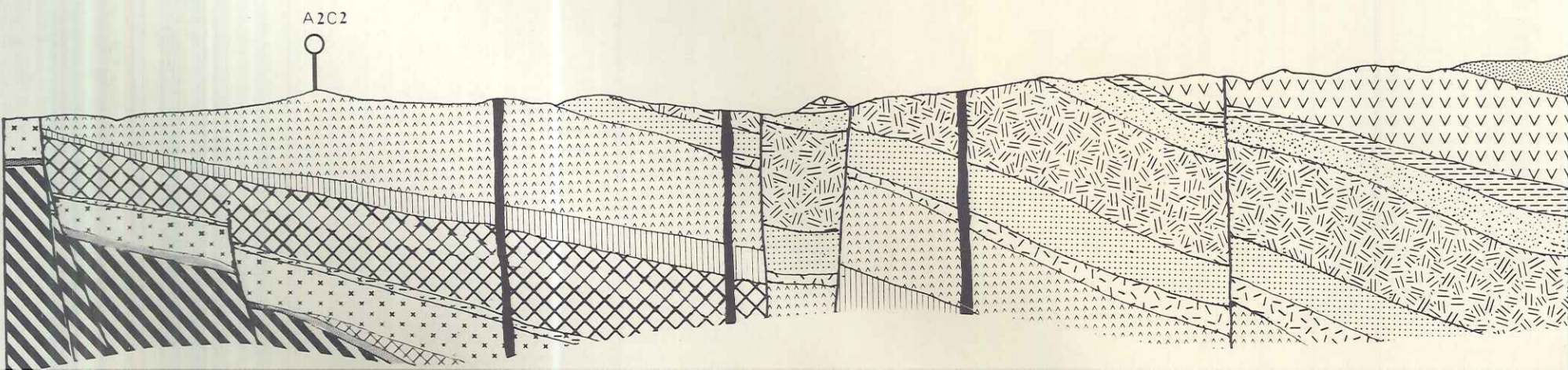
N



W-SW



N-W



CARTE G

