



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services Branch

395 Wellington Street
Ottawa, Ontario
K1A 0N4

Bibliothèque nationale
du Canada

Direction des acquisitions et
des services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa (Ontario)
K1A 0N4

Votre lib. *Votre référence*

Votre lib. *Votre référence*

NOTICE

The quality of this microform is heavily dependent upon the quality of the original thesis submitted for microfilming. Every effort has been made to ensure the highest quality of reproduction possible.

If pages are missing, contact the university which granted the degree.

Some pages may have indistinct print especially if the original pages were typed with a poor typewriter ribbon or if the university sent us an inferior photocopy.

Reproduction in full or in part of this microform is governed by the Canadian Copyright Act, R.S.C. 1970, c. C-30, and subsequent amendments.

AVIS

La qualité de cette microforme dépend grandement de la qualité de la thèse soumise au microfilmage. Nous avons tout fait pour assurer une qualité supérieure de reproduction.

S'il manque des pages, veuillez communiquer avec l'université qui a conféré le grade.

La qualité d'impression de certaines pages peut laisser à désirer, surtout si les pages originales ont été dactylographiées à l'aide d'un ruban usé ou si l'université nous a fait parvenir une photocopie de qualité inférieure.

La reproduction, même partielle, de cette microforme est soumise à la Loi canadienne sur le droit d'auteur, SRC 1970, c. C-30, et ses amendements subséquents.

Canada

**Genèse des carbonates terrestres
dans la dépression de Ouarzazate
(Maroc méridional).**

par

Brahim Akdim

Thèse présentée à l'Ecole des Etudes Supérieures
en vue de l'obtention du doctorat (Ph.D) en géographie

Université d'Ottawa



Brahim Akdim, Ottawa, Canada, 1991



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services Branch

395 Wellington Street
Ottawa, Ontario
K1A 0N4

Bibliothèque nationale
du Canada

Direction des acquisitions et
des services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa (Ontario)
K1A 0N4

Your file *Votre référence*

Our file *Notre référence*

The author has granted an irrevocable non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of his/her thesis by any means and in any form or format, making this thesis available to interested persons.

L'auteur a accordé une licence irrévocable et non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de sa thèse de quelque manière et sous quelque forme que ce soit pour mettre des exemplaires de cette thèse à la disposition des personnes intéressées.

The author retains ownership of the copyright in his/her thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without his/her permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège sa thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

ISBN 0-315-80038-0

Canada



UNIVERSITÉ D'OTTAWA
UNIVERSITY OF OTTAWA

Remerciements

Je tiens à remercier le professeur Dr Geurts Marie-Anne, directrice du travail. J'ai largement bénéficié de ses subventions, de ses documents bibliographiques et de ses discussions scientifiques. Ses déplacements sur le terrain (Maroc), et ailleurs (Seville et Bruxelles) étaient décisifs pour l'achèvement de ce travail.

Les professeurs des départements de géographie et de géologie de l'Université d'Ottawa ont été collaborateurs et ont comblé plusieurs de mes lacunes scientifiques. J'ai appris des méthodes avancées d'analyse spatiale (Dr Phipps), des techniques d'analyse quantitative (Dr Langlois), des traitements hydrochimiques et la géomorphologie du karst (Dr Lauriol), des problèmes relatifs à l'environnement périglaciaire (Dr French), la paléoclimatologie (Dr Lagarec). La pétrographie des carbonates et la discussion de nos analyses a été assurée par Dr Desrochers. Les résultats de la géochimie isotopique ont été discutés avec Dr Al-Aasm et Dr Clark. Les datations à l'Uranium/Thorium ont été faites par Dr Ramon Julia du C.S.I.C. à Barcelone. Les diffractions aux rayons X ont été effectuées au laboratoire de minéralogie de l'Université Catholique de Louvain par le Dr Naud. Je les remercie tous vivement. L'aide des Ingénieurs de la direction de l'hydraulique au Maroc a été précieuse (analyse des eaux et données d'archives). Mes remerciements vont à MM. Kessab, Yaacoubi, Aglal et Faskaoui, ainsi qu'à l'équipe de jaugeage de la D.H. de Ouarzazate, particulièrement MM. Araria et Ahechmi. M. Azza du laboratoire du Ministère de la Géologie et des Mines à Rabat est remercié pour les analyses granulométriques et géochimiques effectuées. Les lames minces ont été taillées au laboratoire du département de géologie de la faculté des sciences de Fès. Je remercie M. le professeur chef du département précité ainsi que MM. M'hanned et Slaoui pour la bonne qualité de leur travail. Le professeur Gourari du même département m'a aidé par une discussion fructueuse des résultats pétrographiques. L'illustration au microscope à appareil photographique s'est faite au laboratoire de l'Ecole Normale Supérieure de Fès; l'accès à ce laboratoire m'a été permis par M. le directeur Dr Saaidi et MM. les professeurs Marghich Abdeslam chef du département des sciences de la terre et Rougui Driss chef du laboratoire de sédimentologie. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect.

Je tiens à remercier M. le doyen de la faculté de lettres (Fès) et les collègues du département de géographie pour avoir accepté mon absence prolongée durant mes deux années de stage au Canada.

Dabab Hamid, technicien au laboratoire de dessin du département de géographie (Fès) s'est longtemps occupé des illustrations graphiques de cette thèse, il mérite mes remerciements sincères.

Dr Nicod et Dr Vaudour de l'Université d'Aix (France) m'ont fourni une documentation précieuse pour ce travail; Dr Hakim de l'Université libanaise (Beyrouth) m'a initié aux méthodes de l'hydrochimie; qu'ils soient ici remerciés.

Les habitants du haut Dadès et du M'goun ont partagé, plusieurs fois, leur pain avec nous; sans l'aide

des Ait Hdiddou et des M'gouna, la haute montagne nous fut inaccessible. Ces hommes, aux souvenirs inoubliables, méritent mes remerciements sincères. Mon collègue Marzouk El-Ouariachi est remercié pour l'aide au premier tirage du texte.

Je remercie les évaluateurs membres du jury, pour les commentaires instructifs qu'ils m'ont donnés, à la soutenance et après celle-ci.

Abstract

The carbonate encrusting process and its consequent products (crusts, tufa and travertine) in the southern Morocco (Ouarzazate) are studied in this thesis. A detailed inventory of the carbonate deposits is given. The dynamic aspects of carbonate precipitation and dissolution are considered from an environmental point of view. The main factors influencing their genesis are discussed on the basis of a multidisciplinary investigation. Among the accumulated carbonates, caliches are the most abundant. Their genesis involves a changing environment where sedimentation has the same importance as the biogenic and pedogenic processes. Dated by the Uranium/Thorium method, these caliches are older than 300 ka. They indicate that the encrusting process is ancient. These deposits have become progressively rare during the Quaternary period except for the important hydrothermal travertine of Skoura. Only a few accumulations are still forming nowadays (Alt Arbi and Ifesfas). Their absence in present day water, especially in rivers is interpreted as indicating an environmental change. It is hypothesised that a disequilibrium affects the encrusting process. A comparative study between rivers and sources in different settings is carried out. The saturation degree of water, its chemical composition, especially in elements that may have particular origins (potassium, nitrate, sulfate, etc.) and its bacteriological characteristics are investigated in the thesis. Results seem to indicate that differences exist between the calcite - precipitating waters of some sources (not affected by human activities) and the sterile waters of rivers (Dades and M'goun). The latter are polluted by chemical fertilizers or turbulent, such that no carbonate deposits are permitted.

The conclusion is that the reduced encrusting phenomena indicate an environmental change. A progressively drier climate and progressively reduced discharge make the deposits more limited in space and rare. The human impact on the quality of water must be considered to explain the limited extend of present day encrusting processes.

Résumé

L'encroûtement est pris dans un double sens: encroûtement comme processus et encroûtement comme accumulation. Son étude en domaine semi-aride revêt une importance considérable à cause de son abondance sous des aspects variés. La présente étude consacrée à la dynamique des carbonates de la dépression de Ouazazate pose un problème à la fois méthodologique et environnemental.

L'aspect méthodologique provient d'une prise de conscience sur la complexité du phénomène d'encroûtement et la diversité d'approches et de techniques qu'il impose (une technique à elle seule négligerait des points éventuellement fondamentaux); ainsi nous avons élargi l'éventail technique de la recherche: observation du terrain, pétrographie, géochimie des carbonates et des argiles, hydrochimie, bactériologie et datations absolues. Cet éventail assez large et multidisciplinaire offre des informations souvent concordantes pour appuyer la conception de base voulue globale et environnementale.

Le deuxième aspect du problème est d'ordre environnemental. Nous avons constaté l'abondance de dépôts appartenant aux phases quaternaires anciennes sans que le processus d'encroûtement ne se maintienne actuellement à cause des transformations environnementales que la région a subies. Cette hypothèse de base impose une recherche visant d'abord la connaissance des dépôts anciens et l'étude des processus actuels. La nature hydrothermale des dépôts de Skoura est confirmée.

La typologie s'est faite sur des bases techniques multiples dans le but d'appréhender en même temps les processus génétiques. La conclusion tirée est donc de confirmer l'activité du processus d'encroûtement durant les phases anciennes du Quaternaire. Son ralentissement, voire même son blocage actuel résulte d'une transformation majeure, affectant à la fois la quantité et la qualité des eaux disponibles.

Les indicateurs de cette transformation sont perçus à travers l'hydrochimie des eaux, la réduction des ressources en eau, l'apparition de traces et de comportements ioniques perturbés (sulfates, nitrates, potassium etc...) et l'affectation de la biomasse. A ce propos, nous avons testé la validité de l'hypothèse retenue en prenant comme espèce bactérienne à rechercher dans l'eau le Pseudomonas. Celui-ci est reconnu et prouvé actif dans le processus d'encroûtement. Les résultats de cette étude ont montré que ces bactéries se réfugient dans les hydrosystèmes peu affectés par la perturbation anthropique (en montagne); le M'goun semble représenter un cas particulier dans lequel l'hydrodynamique et l'intervention probable d'autres espèces bactériennes ou algues influence le processus d'encroûtement. La conclusion tirée est donc qu'en plus d'une transformation environnementale d'ordre climatique (assèchement) et hydrologique (tarissement des sources et concentration du réseau), l'impact humain dans les zones peuplées (vallées) est considérable. Les pratiques humaines affectent donc la dynamique des carbonates d'une façon hydrochimique ou mécanique.

Table des matières

Remerciements

Résumé/abstract

Introduction.....1

Première partie: généralités et cadre théorique

I- Présentation du terrain de l'étude

1-Topographie.....5

2-Géologie.....8

3-Climat et bioclimat.....12

4-Aspects humains.....15

II-Cadre conceptuel

1-Objectifs et hypothèses du travail.....17

2-Problèmes méthodologiques (approche inductive;
question d'échelle; seuil; information).....20

III-Méthodes et techniques d'analyse

1-Sédimentologie.....29

2-Géochimie isotopique.....34

3-Hydrochimie.....35

4-Analyse multivariée.....40

Deuxième Partie: données et résultats de l'analyse

IV-Les croûtes et encroûtements calcaires.....46

1-Description macromorphologique.....46

A-Croûtes zonaires.....47

B-Croûtes pelliculaires.....51

C-Encroûtements et ciments.....55

2-Observations pétrographiques et géochimiques

A-Description pétrographique.....57

B-Discussion des résultats pétrographiques.....	61
C-Géochimie isotopique.....	67
D-Discussion des résultats isotopiques.....	69
3-Influence du contexte morphologique.....	71
V-Les travertins d'eau douce.....	75
1-Présentation des dépôts	75
A-Travertin d'Ait Arbi au Dadès.....	77
B-Travertin de Taltfraout.....	81
C-Travertin d' Ifesfas (M'goun).....	82
2-Analyses de laboratoire	
A-Pétrographie.....	84
B-Géochimie isotopique.....	90
3-Discussion	
A-Types de travertins.....	94
B-Diagenèse et évolution des dépôts.....	96
C-Dimension environnementale.....	98
VI-Un travertin hydrothermal: Skoura	
1-Présentation des coupes.....	102
2-Description pétrographique.....	108
3-Géochimie isotopique.....	117
4-Discussion et portée de l'étude.....	123
A-Influences génétiques.....	123
B-Cristallinisation et évolution diagénétique.....	130
VII-L'hydrochimie actuelle des eaux.....	134
1 - a n a l y s e g l o b a l e d e s d o n n é e s	
hydrochimiques.....	134
A-Points échantillonnés.....	135

B-Matrice des corrélations.....	136
C-Les composantes.....	138
D-Interprétation.....	141
E-Classification.....	151
2-Charge rocheuse et saturation des eaux.....	152
A-Evaluation de la charge rocheuse.....	153
B-Degré de saturation.....	156
3-Variation mensuelle de certaines caractéristiques.....	164
conclusion	

Troisième partie: Les relations géodynamiques et les implications génétiques

VIII-Les transformations paléoenvironnementales.....	169
1-Les phases anciennes d'encroûtement.....	169
2-Implications morphostructurales.....	171
3-Indications paléoclimatiques.....	173
IX-Ralentissement de l'encroûtement.....	176
1 - L e s t r a n s f o r m a t i o n s	
environnementales.....	176
A-Biocalcification et équilibre écologique.....	177
B-Les fondements expérimentaux.....	179
C-Quelques facteurs inhibiteurs de la biocalcification.....	180
D-Signification du contrôle bactériologique.....	183
E-Des indicateurs hydrochimiques.....	186
2-Discussion des indicateurs environnementaux.....	199
A-Géologie et climat.....	199
B-Effets de fertilisants.....	200

C-Effets hydrochimiques.....	203
D-Irrigation et géochimie des sols de fond de vallées..	205
X-Conclusions générales.....	210
Bibliographie.....	217
annexes	

Liste des figures

1.1	Localisation du terrain étudié.....	2
1.2	Cuvette de Ouarzazate (orographie).....	6
1.3	Coupes géologiques dans le faisceau crétacé-éocène et échelle stratigraphiquesimplifiée.....	9
1.4	Carte des isohyètes.....	13
1.5	Courbes ombrothermiques.....	14
2.1	Les principales techniques utilisées.....	21
2.2	Localisation des coupes et points d'eau étudiés.....	22
4.1	Cadre géomorphologique des croûtes à Boumalne.....	48
4.2	Coupe schématique des croûtes zonaires du Dadès.....	49
4.3	Sédimentologie des terrasses encroûtées à Boutaghrar.....	53
4.4	Accumulation du niveau 3 d'Ait Arbi.....	54
4.5	Terrasse du niveau 4 d'Ait Moussa Ouichou.....	56
4.6	Photomicrographie de traces biologiques dans la croûte de Boumalne.....	58
4.7	Photomicrographie illustrant la dissolution de galets emballés dans la croûte de Boumalne.....	58
4.8	Dissolution dans les lamines de croûte à Boumalne.....	60
4.9	Photomicrographie des filons de calcite sparitique au sein de la croûte zonaire à Boumalne.....	60
4.10	Photomicrographie montrant des fissures bourrées de calcite d'une autre génération dans la croûte de Boumalne..	63
4.11	Géochimie et structure d'une croûte à Boumalne.....	70
4.12	Géochimie isotopique des croûtes, comparaison avec	

Salomon <u>et al.</u> , 1978.....	70b
5.1 Cadre géomorphologique des travertins du Dadès.....	76
5.2 Dépôt de travertin ancien d'Ait Arbi.....	78
5.3 Travertin de Taltfraout.....	78
5.4 Cascade travertineuse d'Ifesfas.....	83
5.5 Photomicrographie d'ondulations calcitiques dans le travertin d'Asfazate (Ait Arbi).....	85
5.6 Filaments algaires dans le travertin fonctionnel d'Ait Arbi.....	85
5.7 Pétrographie d'un galet couvert de calcite actuelle à Ait Arbi.....	87
5.8 Travertins de Taltfraout: de la coupe à la lame mince.....	87
5.9 Laminations micritiques noirâtres (Ait Arbi).....	89
5.10 Travertin sur mousse et éboulis, Ifesfas (M'goun).....	89
5.11 Comparaison isotopique de certains travertins.....	92
5.12 Teneurs isotopiques des eaux de sources au Dadès et au M'goun.....	93
6.1 Le moyen Dadès (Skoura) formes et formations.....	101
6.2 Morphologie des travertins anciens à Skoura.....	103
6.3 Travertins laminaires de Skoura.....	105
6.4 Faciès collinaire des travertins à Skoura.....	105
6.5 Les cascadelles de travertin à Skoura.....	107
6.6 Travertins récents de fond de vallée.....	107
6.7 Photomicrographie des lamines et formes arborescentes dans le travertin hydrothermal.....	109
6 . 8 A g r a n d i s s e m e n t d e s f o r m e s	

arborescentes.....	109
6.9 Matière organique en taches noires.....	110
6.10 Schéma d'une lame mince au travertin ancien de Skoura..	112
6.11 Taches noires encadrant les vides internes du niveau supérieur à Skoura.....	113
6.12 Analyse au microscope électronique (S.E.M) de l'horizon noirâtre du travertin supérieur.....	113
6.13 Photomicrographie d'une structure alvéolaire.....	115
6.14 Aspects filamenteux de certains dépôts.....	116
6.15 Résultats isotopiques des travertins de Skoura.....	120
6.16 Teneurs isotopiques des eaux de sources.....	121
6.17 Géochimie isotopique de certains dépôts.....	122
6.18 Structure dendritique dans les taches noires du travertin ancien de Skoura.....	127
7.1 Représentation graphique des composantes hydrochimiques	142
7.2 Les groupes retenus par la classification automatique à base des deux premières composantes.....	143
7.3 Saturation des eaux du M'goun.....	162
7.4 Saturation des eaux de rivières.....	163
7.5 Saturation des eaux de sources.....	163b
7.6 Variation des paramètres physico-chimiques du Dadès à M'semrir.....	165
7.7 Hydrochimie du M'goun à Aifer.....	166
7.8 Evolution des principaux paramètres chimiques au Dadès Todgha et sources.....	167b
9.1 Variation du potassium et des sulfates dans le Dadès	

à M'semrir.....	189
9.2 Le Dadès et les séguia bordières à Ait Mouted, comparaison.....	192
9.3 Corrélation du calcium et du total dissout des eaux étudiées.....	195
9.4 Corrélation des sulfates et du total dissous	196
9.5 Corrélation des nitrates et du total dissous.....	197
9.6 Les sels solubles d'un sol non irrigué à Skoura.....	206
9.7 Les sels solubles d'un sol irrigué à Skoura.....	207

Liste des tableaux

4.1 Teneurs isotopiques des croûtes calcaires à Boumalne...	68
5.1 Composition isotopique de certains travertins étudiés.....	91
5.2 Géochimie isotopiques des eaux de sources.....	91
6.1 Travertins de Skoura (isotopes).....	118
6.2 Travertins de Skoura (isotopes).....	119
7.1 Tableau des corrélations entre variables hydrochimiques.....	137
7.2 Les composantes principales en hydrochimie.....	139
7.3 Hydrochimie des eaux de puits à Boumalne.....	155
7.4 Saturation des eaux au Todgha.....	158
7.5 Saturation des eaux au Dadès.....	160

9.1	Résultats d'analyse bactériologique des eaux.....	185
9.2	Les ions gypso-salifères dans les eaux du Dadès.....	190
9.3	Sulfates, potassium et chlorures dans les eaux de sources.....	193
9.4	Distribution des engrais à Boumalne.....	202

Liste des annexes

- 1- Le Quaternaire marocain: terminologie et classification utilisée.
- 2- Nouvelle méthode pour l'évaluation de la dissolution spécifique ans les terrains calcaires.
- 3- Programme SAS pour l'analyse en composantes proncipales et procédure de classification des données hydrocchimiques.
- 4- Procédure SAS d'analyse des données hydrochimiques par régression.
- 5- Procédure de représentation graphique des résultats de l'analyse des données par régression (gplot).
- 6- Notes factorielles (contribution absolue des composantes).
- 7- Saturation des eaux dans certains points d'eau.
- 8- Résultats de la datation des carbonates à l'Uranium/Thorium.

Introduction

Les carbonates terrestres sont abondants et très variés dans la cuvette de Ouarzazate au Maroc méridional (fig. 1.1). On y trouve des travertins, croûtes et encroûtements.

Dans ce travail, la terminologie adoptée est celle de Vaudour (1986): les travertins sont des accumulations carbonatées terrestres d'origine biologique ou physico-chimique de localisation variable selon l'environnement génétique. Les croûtes dont la terminologie (caliche, calcrete...), la signification et les faciès sont très discutés dans la littérature (Aristarian, 1971; Goudle, 1972; Reeves, 1976; Vaudour et al. 1989) sont, pour nous, des accumulations carbonatées spatialement plus répandues et de faciès variés (dans ce domaine elles sont surtout pelliculaires ou zonales). Elles sont relativement épaisses. Les encroûtements sont plutôt des accumulations localisées dans l'espace et au sein des profils, mais ils peuvent être généralisés au sein des conglomérats de terrasses quaternaires (Beaudet et Laouina, 1989).

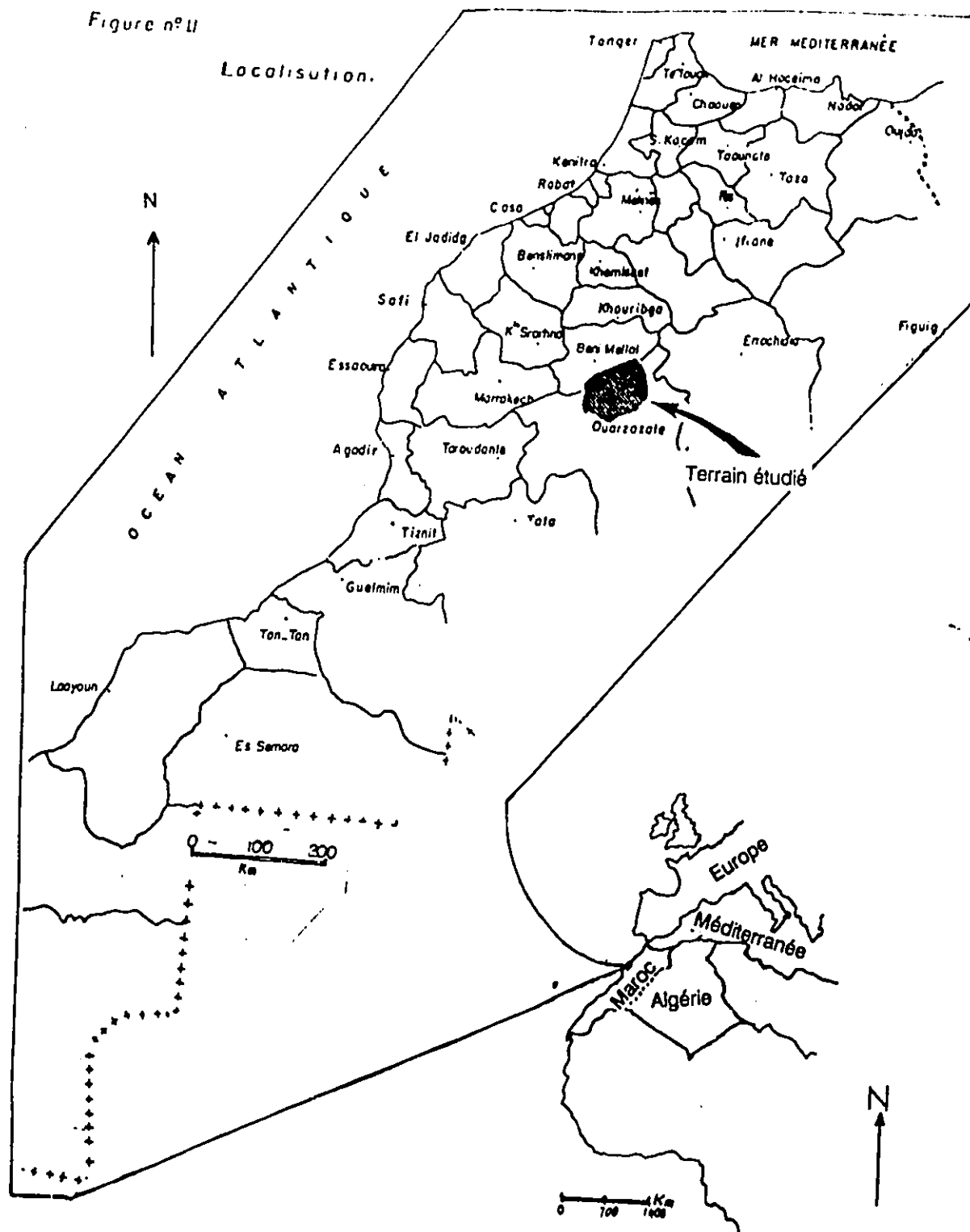
Le problème incitateur à cette recherche dans la région de Ouarzazate se résume en trois composantes interreliées:

- la première est spatiale (identification et distribution des différents faciès),
- la deuxième est chronologique (étude des phases morphologiques et paléoclimatiques favorables à l'accumulation).
- La troisième est d'ordre environnemental (étude du changement global du milieu et des facteurs explicatifs du ralentissement de l'encroûtement actuel).

Nous reviendrons aux détails de ces aspects en discutant des objectifs de la recherche. Celle-ci est d'une part une contribution thématique (étude multidisciplinaire et simultanée des processus dans des dépôts souvent traités séparément dans la littérature pré-cédente); mais elle vise aussi l'aspect pratique, sa finalité se conçoit dans la mise en évidence des facteurs affectant l'équilibre hydrochimique de l'eau à travers l'étude des processus de saturation - agressivité des eaux et la dynamique des carbonates conséquente. Pour une meilleure compréhension du texte, il paraît nécessaire de l'ordonner en trois parties majeures:

Figure n° II

Localisation.



* **La première partie** est essentiellement **introductive**. Les trois chapitres qui la composent présentent le milieu physique et humain (contexte influençant le processus d'encroûtement), et discutent du cadre théorique de l'étude et des méthodes et techniques de recherche employées.

* Les chapitres de **la deuxième partie** sont consacrés à la **présentation des données** et résultats de nos analyses. C'est-à-dire les données et résultats d'observations de terrain et de laboratoire effectuées. Nous procéderons par une description macroscopique, une analyse pétrographique et la géochimie isotopique, enfin nous discuterons ces résultats à la lumière de nos recherches bibliographiques. Quatre chapitres sont réservés consécutivement à l'étude des croûtes et encroûtements, des travertins d'eau douce, des accumulations de type hydrothermal et enfin à l'étude de l'hydrochimie actuelle des eaux. Cette deuxième partie inventorie donc les différents dépôts carbonatés; elle les caractérise au niveau des spécificités microscopiques et géochimiques. Elle appréhende enfin l'élément moteur de la dynamique des carbonates, à savoir l'hydrochimie actuelle des eaux de rivières et sources. La structure des eaux, leurs composantes et le degré de leur saturation ont été abordés.

* **La troisième et dernière partie** est consacrée à des réflexions d'ordre génétique et environnemental. Deux chapitres discutant la signification et l'interprétation de nos résultats dans une **option globale** (historique et environnementale) sont successivement consacrés à l'évolution de l'encroûtement au Quaternaire (phases, implications structurales et climatiques) puis aux transformations environnementales perçues dans l'hydrosystème étudié. **L'unité de notre sujet** est donc conçue dans le cadre d'une vision reliant les accumulations carbonatées et l'hydrochimie des eaux au contexte physique et humain.

Première partie

Présentation du terrain et des méthodes

La première partie est consacrée à la présentation générale du terrain et des méthodes de recherche et des techniques utilisées. Son but est de mettre le lecteur en contact direct avec le lieu, le thème et le type d'approche adopté. Les trois chapitres de cette partie sont donc introductifs mais fondamentaux à la compréhension du texte qui suit.

Chapitre I

Présentation du terrain d'étude

Le domaine de cette étude couvre la dépression de Ouarzazate et ses bordures. Il représente donc une liaison spatiale entre les domaines précédemment étudiés par deux auteurs: le Haut-Atlas central calcaire (Couvreur, 1981) et l'Anti-Atlas formé de roches carbonatées anciennes (Riser, 1979). Le premier auteur procède à une échelle très étendue puisque ses intérêts couvrent à la fois le domaine axial de la chaîne et ses bordures septentrionale et méridionale. Ceci ne lui permet pas d'aller dans le détail de certains processus comme ceux qui nous préoccupent dans cette étude. Le deuxième quant à lui, s'est concentré surtout sur la retombée méridionale de l'Anti-Atlas. Le domaine de la présente étude est en marge de ses intérêts.

L'étude entreprise ici est donc originale par son objet spatial et le type d'approche qu'elle met en oeuvre. Ce chapitre introduit la région de façon générale. Il donne de brèves informations sur la topographie, la géologie, le climat et les aspects humains.

1 -Topographie: une dépression et des massifs bordiers

La couverture cartographique de cette région est à l'échelle du 1/100000. Seules les localités de Skoura et d'El Kélaa des M'gouna ont jusqu'à présent les cartes à l'échelle 1/50000.

La dépression de Ouarzazate s'allonge sur près de 200 kilomètres suivant un axe sud-sud-ouest / nord-nord-est entre deux chaînes de montagnes très élevées (figure n° 1.2). Le Haut- Atlas chevauchant du côté septentrional s'élève jusqu'au-delà de 4000 mètres aux sommets d'Ighil M'goun. Ses versants méridionaux dominant la dépression d'environ 1000 mètres. Cette chaîne est découpée en bordure par

18



les canyons des rivières Dadès et Todgha et leurs affluents. Ceux-ci traversent des canyons, parfois des cuvettes intra-montagnardes, avant de déboucher sur la dépression de Ouarzazate. Celle-ci est limitée au sud par l'Anti-Atlas: chaîne dont l'altitude dépasse 2000 mètres aux sommets culminants de Saghro. Cette chaîne domine la dépression d'environ 600m.

La dépression s'élève en moyenne à environ 1200 mètres d'altitude. Elle atteint sa plus grande largeur aux alentours de Skoura - Ouarzazate, où elle dépasse 50 kilomètres du nord au sud. Elle se rétrécit vers les marges orientales et occidentales où l'on trouve dans les deux sens un bouchon volcanique quaternaire: le volcan de Fom-el-Kouss au nord-est et celui de Siroua au sud-ouest.

La dépression est monotone. Des grands glacis (pediments) étagés dominent la topographie. Ceux-ci s'observent surtout sur la rive occidentale du Dadès. La rive orientale quant à elle, se caractérise par une série de cônes de déjection sur le pourtour septentrional de l'Anti-Atlas. Une exception se trouve dans la partie nord-orientale de la dépression, aux alentours de Boumalne du Dadès.

Dans cette région, on observe l'énorme plateau d'Anbed, réel glacis reliant les deux chaînes atlasiques. Ce glacis est assez découpé par les affluents descendant des deux montagnes.

Sa surface est ondulée au pied de la montagne par un réseau de cônes plus ou moins récents et coalescents en réelles bajadas surimposées au glacis. Un étagement caractérise aussi la topographie des vallées. Il s'agit d'un réseau de terrasses fluviales qui se reconnaît tout au long des affluents principaux ou secondaires du Dadès. Cet étagement se distingue aussi bien en amont (montagne) qu'en aval (en pleine dépression).

L'agencement des unités topographiques ainsi décrites se résume de la façon suivante:

- Une cuvette caractérisée par des glacis gigantesques étagés ou découpés par les affluents du Dadès qui sont souvent à sec.

- Des bordures en versants découpés de canyons profonds.

Les dépôts carbonatés étudiés se trouvent partout dans ce domaine mais sous des aspects variés: tufs, travertins, croûtes et encroûtements. Ils confirment la réalité du substratum géologique à dominance

calcaire ou calcaro-dolomitique, et reflètent une dynamique évolutive et variante.

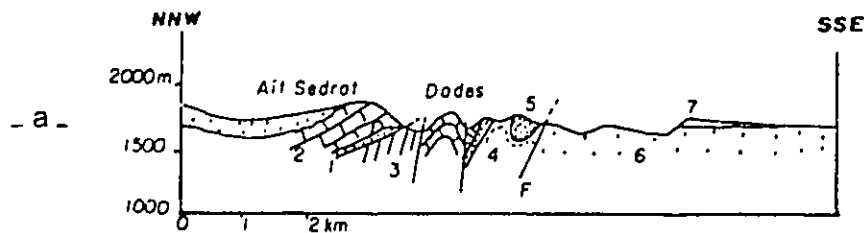
2 -Géologie:

La connaissance du cadre géologique général de la région est assez satisfaisante. La couverture cartographique s'est effectuée à deux échelles différentes: 1/200.000 pour la carte du Saghro- Dadès et Telouet; et 1/500.000 pour la carte de Ouarzazate.

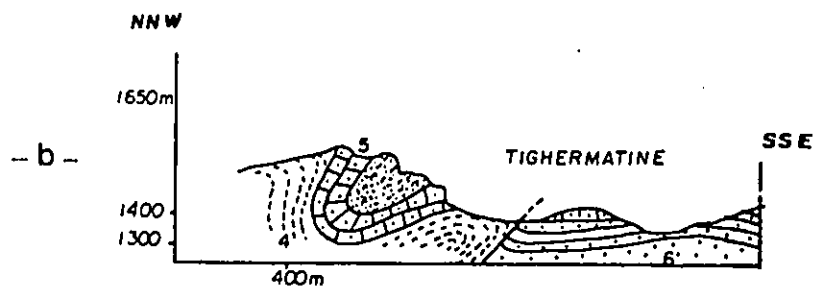
-Stratigraphie et lithologie

La clarté des faciès et l'absence du couvert végétal permettent une reconnaissance avantageuse du terrain. Les dépôts superficiels quaternaires qui nous préoccupent dans cette thèse s'étendent sur un substratum formé de couches dont l'âge remonte jusqu'au Paléozoïque selon les lieux. Les roches les plus anciennes apparaissent sur les versants de l'Anti-Atlas. Elles sont variées, mais les quartzites, les grès et les schistes demeurent les plus abondants. Les versants méridionaux du Haut-Atlas sont surtout formés de couches sédimentaires du Mésozoïque. Celle-ci sont calcaires, marneuses ou mixtes. Quelques affleurements du Cénozoïque s'étendent sur le faisceau bordier de la chaîne. La partie centrale de la cuvette montre quant à elle une série de dépôts détritiques Mésozoïques. La seule séquence lacustre en présence est représentée par les calcaires lités correspondant au Crétacé supérieur. Les couches argileuses et gréseuses rougeâtres du Crétacé et du Jurassique se répandent en plusieurs endroits, depuis la ville de Tineghir jusqu'aux alentours de Ouarzazate. C'est un matériel de comblement attestant que la cuvette s'est déjà esquissée à cette époque. La montée tectonique de ses bordures au début du Cénozoïque accentue la différence d'altitude relative avec la dépression. Celle-ci continue de représenter un bassin sédimentaire pour les matériaux détritiques provenant des deux Atlas. La principale phase de comblement correspond au Mio-Pliocène (figure n° 1.3c). C'est la période pour laquelle Couvreur (1981) et Riser (1979) rattachent les conglomérats massifs à ciment argileux roses des domaines étudiés. Son faciès typique dans la région s'étend entre Boumalne et El Kélaa. Son matériel devient plus fin en s'éloignant du pied de la montagne. Aux alentours de Ouarzazate, le matériel de cette période est donc surtout argilo-gréseux ou sableux.

Coupes géologiques et stratigraphie du domaine étudié.
(voir localisation des coupes dans la figure 2.2)



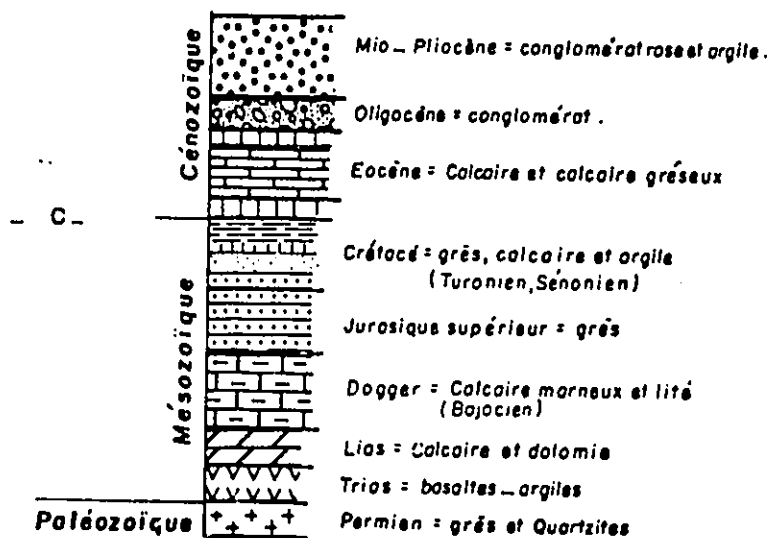
Coupe dans le faisceau Crétacé-Eocène ou Dadès



1: Trias, 2: Lias inf., 3: Crétacé inf., 4: Crétacé sup. 5: Eocène, 6: Mio-Pliocène, 7: Plio-Villafranchien, 8: Faille.

Coupe mettant en évidence le lambeau Eocène sur le Mio-Pliocène au Dadès tirée et rectifiée de H. Gauthier, 1957-60, p. 194)

Stratigraphie schématique



-Structure et tectonique

Les subdivisions structurales de la région sont influencées et déterminées par la nature lithologique des terrains et les manifestations tectoniques. Le découpage que nous proposons s'appuie entre-autres sur les recherches au sujet de la tectonique de Laville (1975), sur le schéma morphostructural de Couvreur (1981) et sur l'aperçu géologique que nous avons précédemment présenté (Akdîm, 1983; 1986). Vue l'influence de la géologie, par ses aspects tectoniques et structuraux, sur le chimisme des eaux, sur l'hydrologie régionale et la genèse des carbonates nous en rappelons brièvement les principaux aspects:

- Les anticlinaux étroits à affleurements triasiques. Les couches sont ici argilo-basaltiques et salifères. Elles sont soit des couches recouvrant le socle dans les parties nord- occidentales du M'goun, soit des dépôts occupant le fond des plis faillés du calcaire bajocien d'Ait Attou-ou-Moussa en amont du Dadès, ou du calcaire liasique d'Ait Ibrim dans la région de Boumaïne. Ce matériel a un rôle minime en géomorphologie locale, mais important en hydrogéologie. Il sert de substratum imperméable pour le principal aquifère de la région, à savoir la nappe liasique.

- Terrains liasiques à faciès calcaire ou calcaire marneux, parfois dolomitique sur les bordures. On les trouve tous le long de l'accident sud-atlasique. Ils chevauchent sur le faisceau crétacé-éocène et s'étendent au nord jusqu'aux cuvettes jurassiques d'Ait Hani, M'semrir et M'goun. L'épaisseur des couches liasiques dépasse en général 600m. Elles jouent un rôle essentiel en géomorphologie locale (canyons) et en hydrogéologie car elles alimentent les principales sources de la région. Leur partie supérieure est marneuse brune, représentant "les marnes chocolats" du Lias supérieur connues dans la stratigraphie marocaine.

- Les unités structurales bajociennes sont connues en haute montagne. Les calcaires massifs ou lités de cette époque encadrent les deux principales cuvettes intra-montagnardes de M'semrir et d'Ait Hani et s'étendent sur les plateaux du haut Dadès. L'alternance de couches calcaires et marneuses marque ces paysages et oriente l'activité souterraine des eaux.

- Les synclinaux de comblement jurassique se trouvent dans le haut M'goun, le haut Dadès à M'semrir et

dans le haut Todgha (Alt Hani). Le matériel y est détritique, surtout gréseux (Grès des Guettlioua, dans la stratigraphie marocaine).

- Le faisceau crétacé-éocène longe la bordure de la chaîne du Haut-Atlas. Il est constitué de calcaires épais de 5 à 30 mètres (éocènes) et de couches gréseuses ou argileuses rouges (crétacées). Les faciès y sont changeants et par conséquent la couleur, la structure, la porosité et la cohésion des roches sont variables. Cette diversité est liée aux conditions lacustres de sédimentation.

- La dépression majeure reliant les deux chaînes atlasiques est la dépression de Ouarzazate. C'est un synclinal faillé comblé de conglomérats et argiles du Mio-Pliocène. Après une controverse sur l'âge précis de ces formations (Gauthier, 1957; Joly, 1961; Couvreur, 1981), un accord sur leur attribution au Mio-Pliocène est actuellement atteint. Les dépôts sont grossiers au pied de la montagne. Ils deviennent argileux et fins au milieu de la dépression.

L'évolution tectonique du domaine étudié est lente et complexe (Joly, 1961, p. 73) avec cependant une activité plus intense momentanément. La phase tectonique principale correspond à l'Oligocène (Gauthier, 1957) ou plutôt au début du Cénozoïque (Laville, 1975; Couvreur, 1981). L'activité tectonique n'a jamais cessé jusqu'au début du Quaternaire. Le chevauchement des matériaux oligocènes, éocènes ou même liasiques sur des termes postérieurs comme à Tighermatine du Dadès (figure n° 1.3) sont tant de preuves pour ce fait. La néotectonique plio-quaternaire a vivement contribué à l'évolution morphologique régionale, et a modifié directement ou indirectement, mais de façon lente et partielle, un schéma déjà élaboré au Tertiaire.

Les preuves de la néotectonique ne manquent pas dans notre domaine:

- Chevauchement éocène sur les termes postérieurs (op. cités).

- Conglomérats du Mio-Pliocène légèrement plissés à Alt Sedrat; nous en verrons les implications sur l'hydrosystème alimentant la source d'Asfazate à Alt Arbi (Dadès).

- L'activité érosive au fond des canyons et l'absence de tout dépôt fluviatile actuel dans ceux-ci peut être interprétée comme un indice de soulèvement récent, sinon continu et actuel (Birot, 1955, p.22).

En conclusion nous soulignons certains faits principaux conditionnant la dynamique des carbonates de

façon évidente. Il s'agit de:

- l'abondance du calcaire dans le substratum de toutes les époques.
- Les conditions hydrogéologiques favorables aux aquifères bien soutenus, surtout dans les couches liasiques. Le débit important de certaines sources étudiées est ainsi compréhensible.
- la tectonique et la néotectonique sont des paramètres qui s'imposent. Nous y reviendrons à propos des dépôts travertineux hydrothermaux analysés à Skoura.

3-Climat et bioclimat: domaine semi-aride

Située en marge du domaine saharien et en position entièrement continentale, la dépression subit largement les influences climatiques méridionales dans la plupart des cas. Cet effet diminue cependant, comme on peut s'y attendre, vers le nord et surtout en altitude. Ces facteurs induisent une légère différenciation entre les stations au niveau des températures et des précipitations, sans que cela affecte sérieusement le caractère semi-aride du climat dominant. Selon le critère de classification climatique d'Emberger (Sauvage, 1963) la plupart des stations de la région sont incluses dans cet étage. Ce qui permet d'ailleurs de maintenir aussi longtemps les héritages géomorphologiques du Quaternaire, qu'il s'agisse de formes ou de dépôts. Les températures moyennes fluctuent autour de 25 à 30 degrés Celsius, mais les maxima enregistrent des extrêmes pouvant atteindre 45 ou 50°, alors que les minima descendent souvent en dessous de zéro. Les quantités de précipitations annuelles varient entre 100 et 700 millimètres (figure n° 1.4). Leur régime saisonnier est très variable. La brutalité des orages et l'irrégularité du régime des précipitations imposent aux systèmes biotiques et morphogénétique des conditions sévères. L'évaporation est active dans cet environnement. Elle contribue au déficit du budget hydrique comme le montre la figure n° 1.5 faite à la base de l'indice climatique de Gaussen (Dresch, 1982) pour qui le mois est considéré comme sec quand la quantité de précipitations P (mm) est inférieure à 2t (température en degré Celsius). Ce déficit influence clairement le chimisme des eaux et des dépôts.

La connaissance des spécificités climatiques de la région nous intéresse à deux égards. Elles expliquent

Fig n° 14 : Carte des isohyètes (Dadès, Todgha)

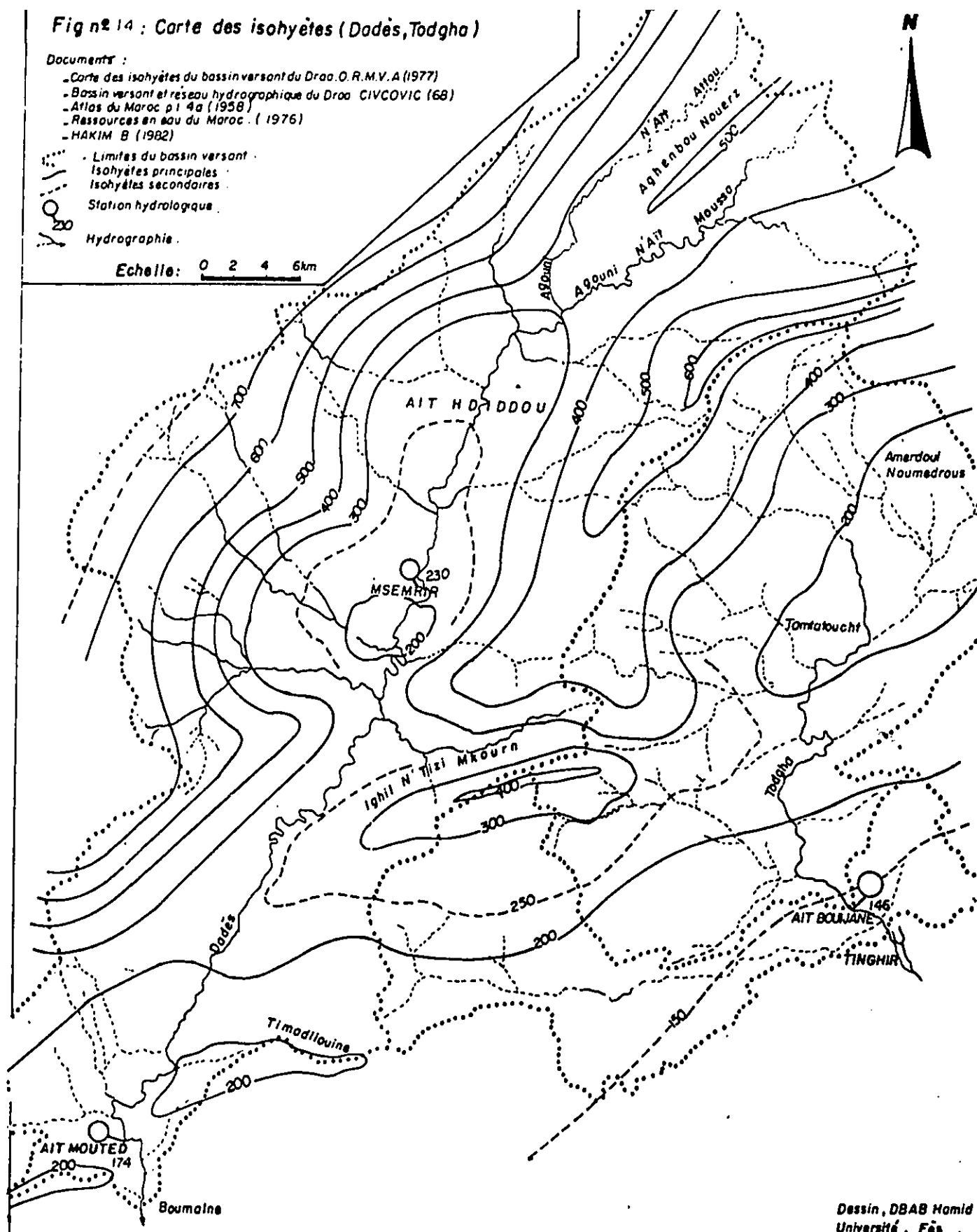
Document :

- Carte des isohyètes du bassin versant du Draa. O.R.M.V.A (1977)
- Bassin versant et réseau hydrographique du Draa CIVCOVIC (68)
- Atlas du Maroc p1 4a (1958)
- Ressources en eau du Maroc. (1976)
- HAKIM B (1982)

- Limites du bassin versant
- Isohyètes principales
- Isohyètes secondaires
- Station hydrologique

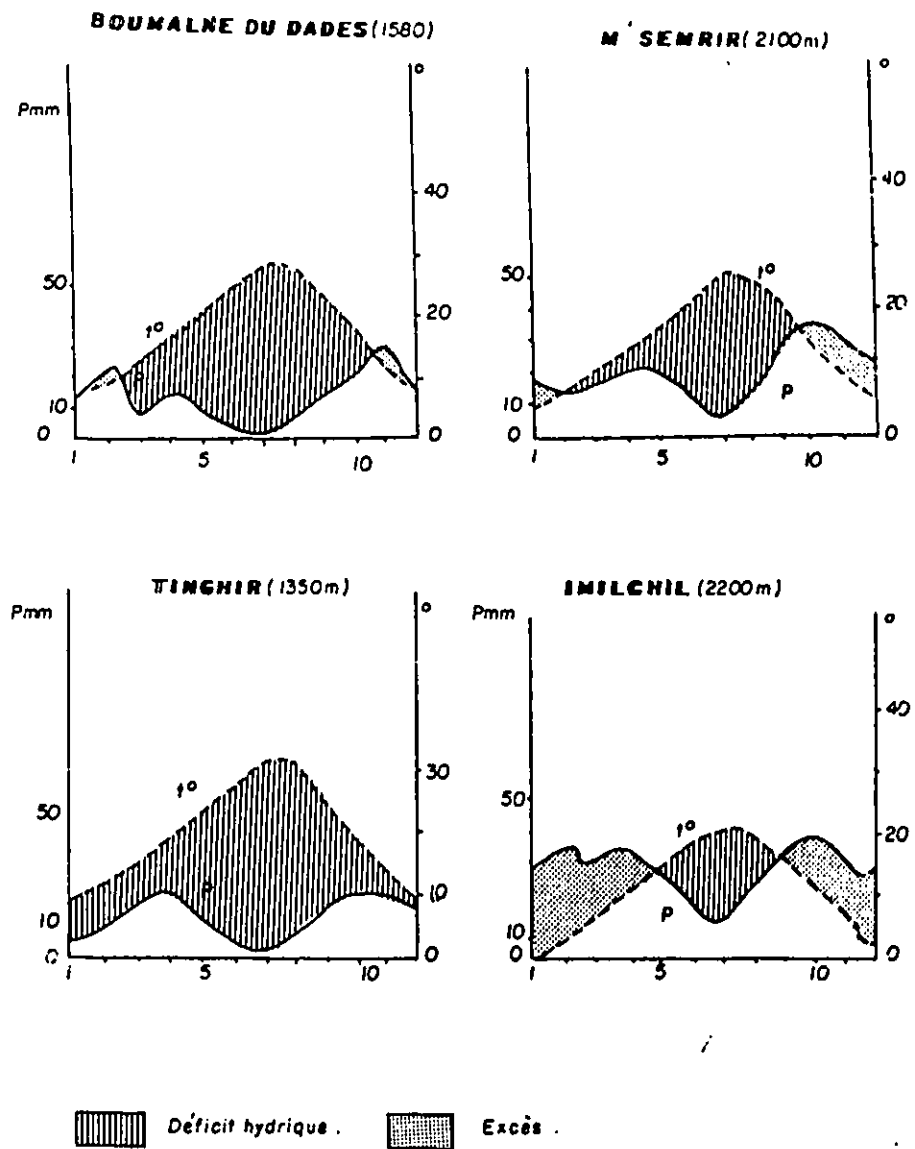
Hydrographie

Echelle: 0 2 4 6km



Dessin, DBAB Hamid
Université, Fès

Figure: 1.5 COURBES OMBROTHERMIQUES



en partie les modalités morphogénétiques en termes de la dynamique des écoulements et de l'apparition de formes typiques comme les glacis. Elles permettent aussi de concevoir les éléments essentiels caractérisant la structure géochimique et sédimentologique des dépôts en vue d'une interprétation précise. L'impact d'une forte évaporation peut être important et doit être considéré en étudiant les traceurs isotopiques.

Les conséquences bioclimatiques des conditions sévères de ce climat semi-aride se traduisent dans le couvert végétal détérioré. Seules quelques espèces de buissons xérophiles et épineux subsistent. Les sols consolidés d'encroûtements carbonatés sont squelettiques, exception faite des basses terrasses longeant les artères permanentes du réseau hydrographique du Dadès et de ses affluents.

4-Aspects humains: densité et peuplement.

Les nombreux dessins et gravures rupestres découverts dans le Haut et l'Anti-Atlas renseignent sur le mode de vie des habitants de ces régions au cours des huit derniers millénaires (Simoneau, 1969). En observant ces gravures, l'auteur remarque l'apparition précoce d'outils comme l'araire et le passage du nomadisme à l'exploitation agricole le long des grandes vallées de la région (première phase de néolithisation).

Ces observations sont utiles dans la mesure où elles attestent l'ancienneté du peuplement et les pratiques agricoles dans cette région. Les conditions bioclimatiques exposées plus haut imposent une concentration humaine au long des drains permanents; le Dadès, M'Goun et Todgha sont entre autres des exemples d'espaces densément peuplés. Les techniques agricoles sont cependant restées traditionnelles et la pression sur l'hydrosystème naturel n'a pas été aussi forte auparavant qu'actuellement.

Deux thèses récentes en géographie humaine de cette région (Mountasser, 1985; Ait Hamza, 1986) illustrent l'explosion du facteur démographique, le niveau de vie assez élevé dans certains endroits et la diffusion d'innovations (pratiques et techniques agricoles importées). Ces innovations ont récemment déclenché des processus de changement et de déséquilibre dans le système naturel. De tels changements

ont-ils eu un impact sur la dynamique des carbonates continentaux? c'est là l'un des axes de recherche de ce travail.

Conclusion

La diversité topographique et géologique, l'irrégularité et l'aridité climatique, l'ancienneté du peuplement et l'impact humain sont des éléments essentiels du cadre naturel global.

Leurs interactions influencent l'hydrochimie et l'encroûtement dans ce domaine.

Chapitre II

Cadre conceptuel

Dans ce chapitre, nous exposons les objectifs tracés pour ce travail, les hypothèses retenues et la méthode d'investigation mise en oeuvre dans l'analyse. Nos principales sources d'information seront brièvement signalées et la notion d'échelle et de seuil seront discutées en raison des problèmes d'interprétation qui peuvent en découler.

1 - Objectifs et hypothèses de travail.

Deux types d'objectifs sont considérés dans le cadre de ce travail: des objectifs généraux, que l'on traite dans une option globale au fur et à mesure que la recherche progresse, et des objectifs spécifiques visant à combler des lacunes encore nombreuses dans la compréhension des processus morphogénétiques locaux, que ce soit au niveau des formes ou au niveau des formations dominantes.

Objectifs généraux:

- i - Inventorier et classer les types d'accumulation superficielle; en particulier des encroûtements dont la prépondérance impose un intérêt spécial. Leur typologie génétique fera l'objet d'une analyse spatiale dans le cadre morphologique régional et dans les profils locaux.
- ii- Étudier en détail la dynamique actuelle de formation et/ou de démantèlement de ces dépôts, en cherchant les arguments spécifiques utiles à l'interprétation des différents aspects de cette dynamique, qu'ils soient d'ordre hydrochimique, structural ou morphologique.
- iii-Préciser la signification paléogéographique des dépôts.
- iv - Établir un cadre chronologique de la sédimentation et dégager les principales périodes favorables à la genèse des dépôts, dans la perspective de l'évolution climatique quaternaire. Sans que le plan de notre

travail ne mette clairement en évidence une organisation traitant respectivement ces points, le lecteur notera toutefois que les résultats de la réflexion montrent l'adoption d'une logique appropriée au traitement de telles questions.

Objectifs spécifiques.

- i - Analyser les faciès des dépôts, en se basant sur une investigation sédimentologique visant à approfondir la connaissance des natures, textures et structures microscopiques caractérisant chaque type de dépôt.
- ii - Montrer les traces de processus génétiques (organiques et inorganiques) actifs au cours de la formation des dépôts et l'évolution diagénétique qu'elles peuvent subir. Nos identifications sont basées sur l'examen de la littérature pertinente.
- iii - expliquer le net ralentissement du concrétionnement carbonaté dans le cadre des conditions hydrologiques et hydrochimiques actuelles, malgré des conditions apparemment favorables.

Cette question principale dans le cadre de notre étude comporte deux volets d'une problématique complexe: le milieu aqueux peu saturé et le bilan quasiment nul du concrétionnement actuel.

Les hypothèses guidant notre réflexion se résument ainsi:

- La morphologie dominante est le reflet de particularités environnementales locales, régionales et globales.
- Les formations superficielles reflètent une évolution fluctuante des paléoclimats quaternaires.
- Les processus morphogénétiques actuels sont affectés par l'intervention humaine.
- Les accumulations carbonatées et l'hydrochimie des eaux sont influencées par l'état de la biomasse et les facteurs anthropiques.

Des choix s'imposent quant à la sélection des aspects à soumettre aux examens approfondis pour des conclusions significatives.

La réalité du domaine qui nous intéresse évoque des axes préférentiels: la planation s'impose au niveau des formes, mais elles ne sera pas considérée qu'en termes de cadre morphologique et substrat des dépôts. Une publication ultérieure leur est entièrement consacrée (Akdin *et al.*, 1991).

Les encroûtements carbonatés s'imposent au niveau des formations. Le choix des méthodes

hydrochimiques s'impose pour deux raisons principales. D'une part, les processus hydrochimiques expliquent les mécanismes de concrétionnement et de dissolution des carbonates remarquablement répandus. D'autre part, ils permettent de saisir la réalité de l'impact humain sur le milieu physique en apportant des éléments utiles à l'analyse des liens supposés entre les facteurs anthropiques, l'hydrochimie et les problèmes d'encroûtement dans le cadre des conditions actuelles.

Les objectifs énumérés ci-dessus constituent les éléments d'une problématique globale élaborée au cours de la recherche. A première vue, les hypothèses formulées n'allaient pas au-delà d'une approche descriptive des formes et des accumulations superficielles dans ce milieu semi-aride. Nous voulons en fait progresser dans une voie plus synthétique, fondée sur une analyse multidisciplinaire. Une voie surtout plus englobante qui considère l'unité géographique étudiée comme entité d'interrelations multiples entre les facteurs morphogénétiques (y compris l'impact humain), les processus et les formes du relief résultantes. Nous voulons rechercher dans notre domaine les manifestations physiques attribuables au climat méditerranéen actuel ou passé: par exemple les encroûtements que plusieurs auteurs considèrent typiques du milieu méditerranéen (Dewolf *et al.*, 1975, Vogt, 1975, 1984; Vaudour, 1985).

L'étude sur le terrain nous a permis de constater que la région de Ouarzazate n'est actuellement pas une région d'édification spectaculaire des travertins et des encroûtements carbonatés. Quand celle-ci apparaît par endroits, elle est très lente sinon bloquée, malgré les paramètres favorables mentionnés.

Nous verrons en fait dans quelle mesure est-il encore permis de parler de conditions méditerranéennes dans un domaine comme le nôtre. Le régime hydrologique des drains principaux comme le Dadès et le M'Goun sont suffisamment soutenus en amont pour assurer la pérennité de l'écoulement. Le contexte climatique accentuant les phénomènes d'évaporation et la saturation des eaux en sels minéraux et la nature lithologique du Haut-Atlas calcaire sont tant de conditions théoriquement idéales à la genèse des dépôts.

Le problème ainsi posé s'avère complexe car il comporte une contradiction apparente: un milieu qui (théoriquement) est favorable à la précipitation de la calcite et une genèse figée des accumulations. Il impose quatre directions principales de recherche:

-Étude des faciès de divers encroûtements en vue d'une compréhension des principaux processus génétiques ayant joué un rôle essentiel dans leur formation.

-Connaissance du milieu aquatique actuel des cours superficiels et des sources principales, afin de dégager les corrélations probables avec les facteurs conditionnant les qualités physico-chimiques de l'eau.

-Recherche des facteurs potentiels inhibant la précipitation de la calcite.

-Contribution à l'étude régionalisée des variables hydrochimiques en vue de suivre les nuances spatiales des phénomènes reflétés à ce niveau. Ce que nous voudrions démontrer dans cette thèse est l'existence de facteurs perturbant la genèse des accumulations. Les facteurs anthropiques ne sont pas à notre sens des paramètres neutres.

Leurs impacts sur l'évolution des milieux naturels font partie des préoccupations de cette thèse. Afin de mieux concevoir l'impact des pratiques agricoles sur les qualités physico-chimiques des eaux, des comparaisons avec la composition d'eau d'aquifères naturels, n'ayant pas subi d'influence humaine s'imposent. Ces aquifères ont été cherchés en montagne, dans des sources où l'on a l'évidence hydrogéologique de la condition requise.

2 - Problèmes méthodologiques.

- Type d'approche.

Il est certain que dans toute étude se voulant aussi synthétique et fondée sur une approche à éléments divers, le problème des méthodes revêt une importance capitale. Les objectifs ci-dessus mentionnés nécessitent par leur variété un procédé méthodologique et technique considérable.

Celui-ci ne vise pas à cumuler le maximum d'information sur tous les phénomènes naturels, mais sur tout à collecter le renseignement utile pour résoudre la question relative à la dynamique des carbonates dans le domaine étudié (figure n° 2.1 et 2.2).

D'après Huggett (1985, p. 10), trois types d'approche analytique sont généralement envisagés et utilisés dans les sciences de la terre:

Fig n°: 21. Les principales techniques de recherche, appliquées à la dynamique des carbonates et l'objectif de leur emploi dans la présente étude.

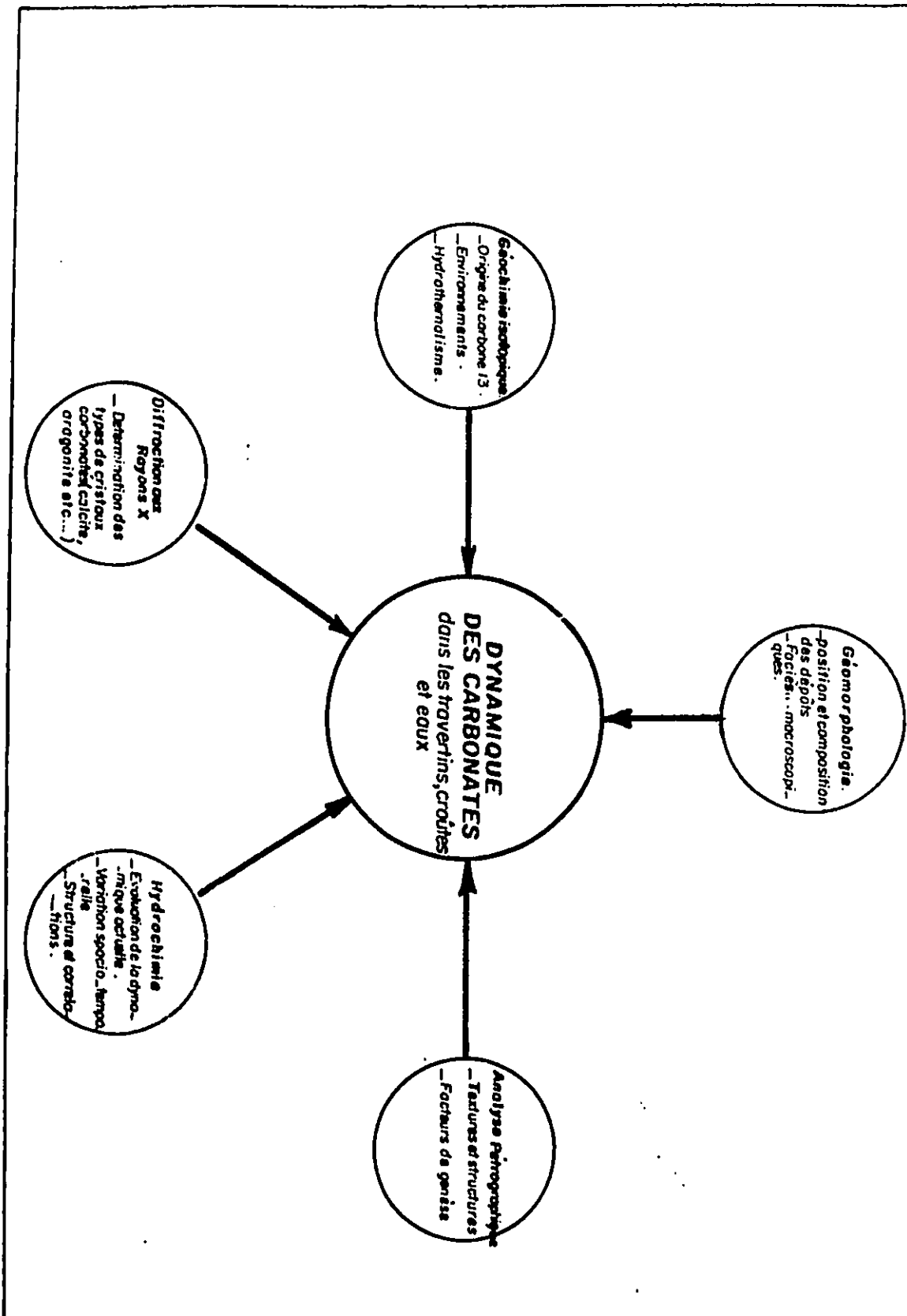
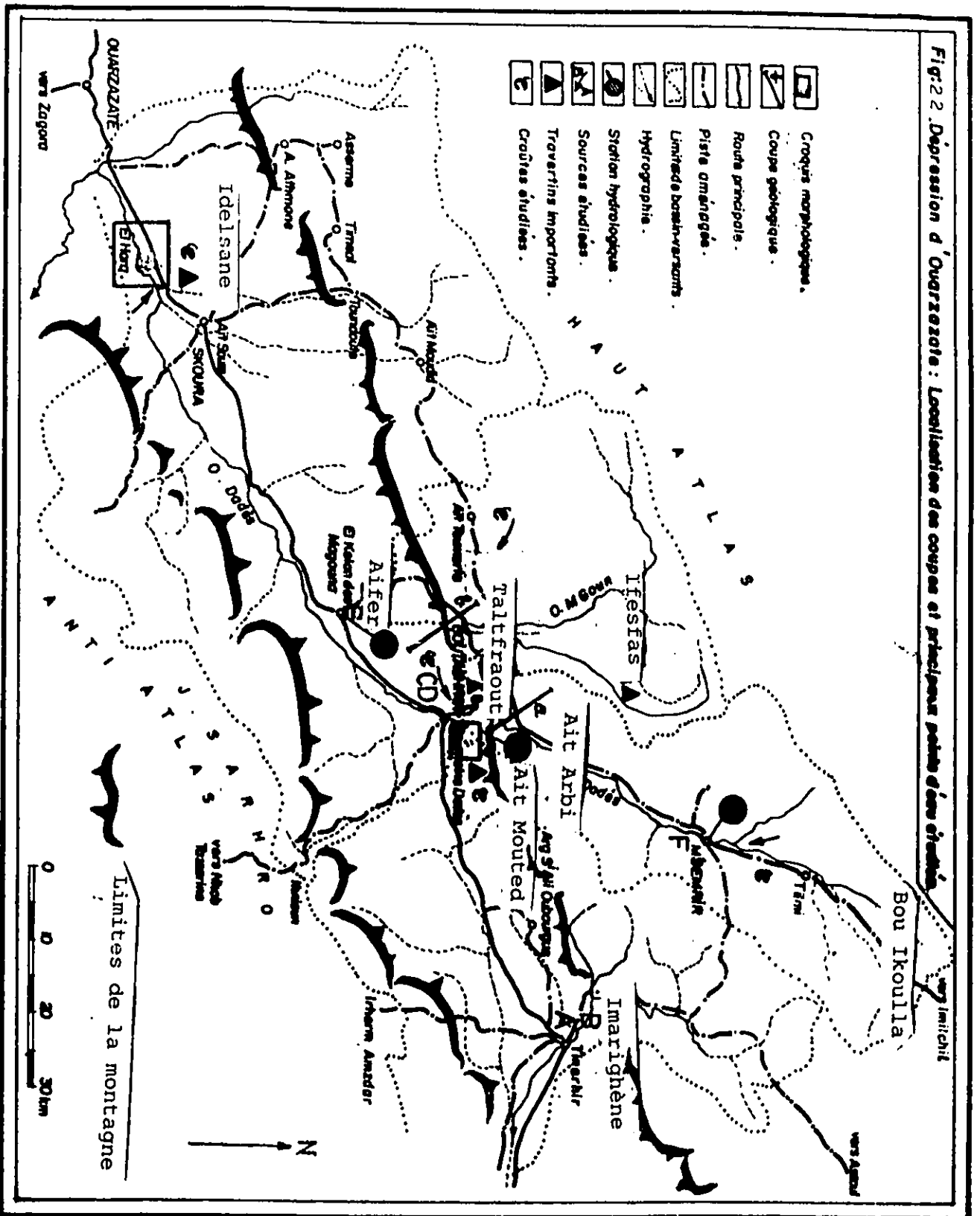


Fig. 2. Dépression d'Ouarezzaïte : Localisation des coupes et principaux points d'eau étudiés.



- Modèles élaborés au laboratoire afin de rendre faisables des expériences à échelle réduite sur des processus naturels.

- Modèles basés sur une observation détaillée des processus sur le terrain (dans des parcelles ou points choisis).

- Modèles purement mathématiques, traitant des schémas d'ordre théorique, pour exprimer l'état du système naturel et son évolution. Celui-ci revêt son universalité de l'abstraction et du symbolisme formalisant les idées.

L'aspect artificiel du premier rend son applicabilité très restreinte et parfois peu réaliste. Plusieurs phénomènes naturels, comme la pédimentation et l'influence des paramètres réels sont difficilement représentés avec précision dans ces modèles réduits.

L'aspect trop théorique du dernier porte le risque de marginaliser les problèmes réels que la géomorphologie se propose d'élucider au mieux, dans un cadre aussi clair et précis que ce soit. Notre objectif est non seulement d'exprimer avec précision les phénomènes comme le permettrait le langage mathématique, mais surtout de les comprendre profondément.

Notre choix porte donc sur le second modèle, dont l'objectif combine à la fois la réalité observée du terrain, les analyses sélectionnées de laboratoire (eaux et dépôts) et quelques techniques simples de traitement statistique permettant de caractériser certains phénomènes en mettant en évidence leur structure interne et leur distribution spatio-temporelle.

La méthode que nous avons adoptée est inductive. Elle consiste, comme le précisent Harvey (1969 p. 33) et Gregory (1985, p. 44), à procéder par étapes: constater les faits et collecter les observations désordonnées, les traiter dans une option exploratoire conduisant aux constructions théoriques généralisables et aux modèles explicatifs.

Elle est donc exploratoire et en mesure de promouvoir la créativité et la recherche de liens. Elle vise à édifier un modèle adaptable à une réalité donnée suite aux tests et analyses entrepris préalablement dans ce sens. L'explication de la variabilité spatiale des aspects étudiés (formes et formations superficielles) est

l'un des objectifs ultimes de la géomorphologie (Minsley et Zimper, 1976 p. 388). Chaque élément du paysage géomorphologique peut être étudié dans les perspectives suivantes:

- i- Dans un contexte spatial, comme par exemple l'étude des dépôts corrélatifs et leurs liens avec les formes parentales. Ceci permet de comprendre l'agencement perçu et les liens horizontaux entre les composantes. Des coupes et sites reflétant ces aspects sont sélectionnées (figure n° 2.2).
- ii- Dans une perspective évolutive, c'est-à-dire à l'échelle temporelle (jour, saison, période géologique). Cette perspective permet de cerner la dynamique des changements passés ou actuels à travers des combinaisons d'indicateurs variés.
- iii- Dans une échelle différenciée, permettant de suivre les particularités du phénomène au niveau macroscopique et microscopique. Cette notion d'échelle est aussi des plus complexes et mérite quelques précisions dans ce cadre.

Problèmes d'échelle et de seuil.

Ces problèmes sont apparus depuis le début d'une réflexion visant à établir la symbiose entre les phénomènes mégascopiques, macroscopiques et microscopiques. Très rapidement, au cours des recherches sur le terrain, il nous est apparu nécessaire de travailler dans un cadre spatial assez étendu, non pas parce que la morphologie de la cuvette de Ouarzazate est monotone ou vite épuisée, mais simplement parce que l'étude géomorphologique ne peut, dans bien des cas découvrir le rapport qui unit deux faits locaux que par une comparaison avec des faits identiques mais géographiquement dispersés. Le terrain ainsi étendu impose le travail à échelles variées. Tricart (1965 p. 79) et Chorley *et al.* (1985, p. 14) distinguent au moins huit ordres de grandeurs s'étalant des dimensions planétaires à la dimension du millimètre et du micron.

Notre travail s'intéresse aux subdivisions allant du quatrième ordre (quelques dizaines de Km) au huitième ordre (analyse microscopique) des deux classifications taxonomiques précédentes.

Les observations de terrain se basent sur l'analyse des formes apparentes des profils et des coupes, mais les précisions viennent suite aux investigations faites à une échelle plus détaillée au laboratoire, au niveau

de l'ion et de la lame mince.

Un autre aspect relatif à ce point est constaté au niveau des liens entre l'actuel et les phénomènes du passé. Les processus actuels et leurs configurations passées sont à considérer dans une échelle temporelle.

La variabilité des paramètres hydrologiques et hydrochimiques des eaux sert d'exemple simple pour affirmer que l'échantillon instantané est difficilement acceptable comme reflet d'une structure journalière et donc comme reflet d'une réalité mensuelle ou saisonnière. Des précautions s'imposent donc dans les interprétations.

La notion du seuil quand à elle est considérée conceptuellement fondamentale car elle permet de distinguer l'état des équilibres dynamiques des processus et des formes morphologiques.

C'est un concept d'ailleurs ancien mais différemment utilisé par les auteurs. Il revient à Tricart (1963, p.52), d'appliquer pour la première fois le concept de seuil pour la compréhension des glaciations et des déglaciations. Celles-ci ont lieu après que certaines conditions se réalisent, mais le déclenchement de processus opposés se fait au-delà de ces limites. Ces idées font par la suite le fil conducteur d'une publication postérieure du même auteur (Tricart, 1965), au moment même où Schumm et Lichty (1965) suggèrent des idées concordantes. De nombreuses publications consacrées à la discussion de l'application de ce concept se sont succédées (Brunet, 1968, p. 13; Schumm, 1973; Coates et Viteck, 1978; Ford, 1978; Starkel, 1984; Tricart 1985). Cette revue théorique nous donne les éléments nécessaires pour établir un cadre conceptuel valable pour l'étude des problèmes qui nous préoccupent. Le concept de seuil s'applique à la dynamique des aplanissements qui évoluent dans le sens d'édification progressive ou de démantèlement et d'incision accrue selon que certaines conditions s'achèvent. Les encroûtements carbonatés varient dans un sens cumulatif ou érosif selon certaines conditions qui commandent la mécanique d'évolution naturelle du dépôt. La chimie des eaux de son côté reflète ces mêmes principes au niveau des équilibres de saturation-agressivité et de précipitation-érosion de la calcite. Notre interprétation des phénomènes prend toujours en compte ces principes théoriques dont l'application s'avère significative sur le plan de la dynamique évolutive des carbonates.

Les sources d'information.

L'information soumise à l'examen est double: information issue d'investigation personnelle, suite aux travaux de terrain et de laboratoire, et information issue de sources officielles.

La première consiste en une somme de données provenant de nos analyses personnelles. Elles concernent surtout l'hydrochimie des eaux, les jaugeages de débits de sources, la morphométrie des galets, la granulométrie et la morphoscopie des sables et la géochimie des carbonates et des argiles.

Elle regroupe également nos observations personnelles sur les faciès et la cartographie des différents phénomènes suite aux multiples travaux de terrain que nous avons effectués.

Le deuxième type d'information utilisé provient d'organismes d'état s'intéressant aux mêmes problèmes. Des données complétant les nôtres proviennent ainsi des archives de la Direction de l'Hydraulique au Maroc, ou ceux du Ministère de la Géologie et des Mines et de ses délégations régionales.

Les documents cartographiques publiés par le Service de la Carte à Rabat, nous donnent une plate-forme utile à l'analyse. La région est couverte par un réseau de cartes topographiques au 1:100000, tandis qu'en géologie la carte de Ouarzazate à l'échelle 1:500000 donne un cadre général que les cartes au 1:200000 de Saghro-Dadès et Telouet illustrent plus en détail. Une couverture de photographies aériennes au 1:50000 est à notre disposition.

Le domaine qui nous intéresse est encore peu connu dans la littérature. L'information provenant donc de cette source est rare. Les principales thèses déjà effectuées documentent cependant certains aspects des bordures, particulièrement sur le plan de la structure géologique et le soulèvement des chaînes atlasques.

Les travaux de Gauthier (1957) et de Laville (1975) sont très pertinents. Ils éclairent au mieux la complexité tectonique de certaines unités structurales incluses dans le domaine de cette étude.

L'analyse critique est le principe retenu dans la manipulation des données et des documents. Une confrontation entre informations d'origines diverses soumet certaines données comme les analyses hydrochimiques ou les descriptions géologiques au test de validité.

En effet nous possédons des données provenant d'organismes ou ouvrages variés pour certains

phénomènes, ce qui nous permettra de procéder aux contrôles désirés. Des comparaisons aux cas étudiés au Maroc et dans le monde selon les mêmes procédures aident à caractériser les phénomènes locaux et leurs particularités spécifiques.

Les précautions considérées pour contrôler chaque type d'information (hydrochimique, pétrographique, etc...) seront discutées ultérieurement dans ce texte en temps opportun.

PAGINATION ERROR.

ERREUR DE PAGINATION.

TEXT COMPLETE.

LE TEXTE EST COMPLET.

NATIONAL LIBRARY OF CANADA.

BIBLIOTHEQUE NATIONALE DU CANADA.

CANADIAN THESES SERVICE.

SERVICE DES THESES CANADIENNES.

Chapitre III

Méthodes et techniques d'analyse

(critiques et choix).

1 - Sédimentologie.

Les ouvrages consultés dans ce domaine sont nombreux et fort utiles au point de vue méthodologique (Tricart et Cailleux, 1963; Vatan, 1967; Bathurst, 1975; Berthois, 1975; Humbert, 1976; Rivière, 1977; Greensmith, 1978; Flugel, 1982; Shneidermann et Harris, 1985; Lindholm, 1987).

Dans cet exposé nous présentons les objectifs visés par l'utilisation de ces techniques, et les principales étapes d'observation que nous avons adoptées: l'échantillonnage et l'observation des faciès sur le terrain et les traitements en laboratoire.

Buts.

Dans un but exploratoire de caractérisation des dépôts superficiels et de leurs environnements spécifiques, nous avons opté pour l'utilisation de l'analyse granulométrique, morphoscopique et pétrographique à plusieurs reprises.

Nous espérons que ces analyses nous permettront de nuancer les différents faciès macroscopiques et microscopiques, et de rassembler des renseignements utiles à la reconnaissance des modes génétiques appropriés. Ces derniers contribueront directement à la conception des modèles environnementaux locaux et permettent d'envisager des liens éventuels avec des conditions plus globales, actuelles ou passées.

Signalons à cette occasion que l'objectif de cette étude n'est pas purement sédimentologique. Nous nous servons des techniques de cette discipline comme moyen complémentaire d'investigation. L'analyse sédimentologique est le moyen d'extraction d'informations sur les processus mécaniques, chimiques et biologiques ayant commandé la modulation actuelle ou passée du matériel.

Les traces fort nuancées entre les acteurs d'environnements distincts feront sujet de la recherche à plusieurs échelles: du dépôt et ses couches constitutives à la lamelle et aux cristaux qui la composent.

Nous espérons pouvoir en tirer des renseignements utiles pour la reconstitution paléoenvironnementale, paléohydrologique et paléoclimatique des conditions ayant guidé l'évolution géomorphologique de cette région.

Nous insistons surtout sur la genèse des encroûtements carbonatés en raison de leur répartition remarquable et surtout à cause d'une hypothèse de travail que nous avons dès le début avancée pour la compréhension des liens entre l'encroûtement, l'hydrochimie et l'impact humain.

L'analyse détaillée de ce type de dépôts est donc supposée être en mesure d'apporter des éclaircissements aux modes génétiques des différents dépôts carbonatés dans le passé, avant de procéder à la recherche des aspects explicatifs de la situation qu'ils connaissent à l'heure actuelle.

Sur le terrain.

En plus de l'échantillonnage, des relevés cartographiques et du contrôle des aspects morphostructuraux reconnus par photo- interprétation, le travail de terrain consiste en une série de manoeuvres d'ordre sédimentologique.

Les structures sédimentaires, la nature lithologique des dépôts, les traces d'usure et d'altération du matériel, la distribution horizontale et verticale des phénomènes sont entre autres des points à soumettre aux observations sur le terrain.

Les mesures de dimensions de galets (utiles au calcul d'indices) les attaques par acides chlorhydriques, les cassures de galets en vue de voir le degré d'altération interne et la nature lithologique sont aussi des opérations pratiquement faisables sur le terrain.

Comme le souligne Lindholm (1987, p.6) cette observation du terrain permet déjà de reconnaître les facteurs contrôlant l'aspect des lits et la stratification, car l'environnement sédimentaire est typiquement distinct selon qu'il est aquatique, subaérien ou aérien. Dans le premier cas, la turbulence, le sens de l'écoulement et éventuellement l'importance du débit mis en oeuvre sont reconnaissables. Dans les deux

derniers cas, d'autres facteurs peuvent prendre une importance grandissante.

Les structures reliées à la dynamique éolienne peuvent être par exemple détectées, étant donnée la spécificité apparente de leurs dépôts. Pour les formations carbonatées, la diagnose complète comprend nécessairement l'inventaire descriptif et quantitatif des structures apparentes à l'oeil nu, les composantes de chaque faciès et les caractéristiques morphologiques des édifices.

Nous nous attacherons à reconnaître les structures par l'organisation dominante, qu'elle soit laminaire, ondulée, massive ou encore perturbée quand une diversité s'impose à cause des conditions génétiques particulières.

L'épaisseur et la description aussi détaillée que possible des coupes seront des préoccupations prioritaires de cette étape de la recherche. Les conglomérats sont d'un autre côté remarquablement abondants dans le matériel des terrasses et des glacis de notre terrain. Leur interprétation dans la reconstruction paléoenvironnementale s'est avérée très significative (Koster et Steel, 1984).

Ils renferment des renseignements sur les facteurs transporteurs, les conditions de sédimentation et le contexte climatique réglissant la consolidation du matériel.

L'observation sur le terrain des différents types de conglomérat, leur épaisseur, l'alternance d'horizons variés, et les différentes tendances que l'on peut noter au sein des profils sont pour nous des indicateurs précieux. Ceux-ci sont utilisables pour la vérification au moins partielle des hypothèses de ce travail, particulièrement les mécanismes morphologiques et l'évolution des conditions paléoclimatiques.

En résumé, le travail de terrain est une étape essentielle à la formulation des modèles explicatifs et au contrôle des hypothèses élaborées. Une argumentation non moins solide peut déjà être évoquée, mais les analyses sédimentologiques du laboratoire sont aussi nécessaires. Elles apportent des précisions, voire même des idées utiles à la conception d'une interprétation différente.

Au laboratoire.

Deux types principaux d'analyses feront l'objet de cette étape: la granulométrie et la pétrographie. Les résultats de la granulométrie ne seront que partiellement présentés dans la thèse car ils concernent surtout

les sables de terrasses supportant les encroûtements et non pas les encroûtements eux mêmes.

D'autres traitements complémentaires comme la géochimie des argiles et des carbonates sont envisagés, selon les lieux et la nature du matériel.

L'analyse microscopique sera centrée sur deux points majeurs: l'observation des grains du quartz et la pétrographie détaillée des microfaciès d'encroûtements carbonatés.

La première apporte des indicateurs de reconstruction d'une histoire géomorphologique (Krumbein et Pettijohn, 1938; Tricart et Cailleux, 1963; Müller, 1967, p.15; Folk, 1974, p.14). Ses résultats seront considérés dans la discussion sans toutefois leur réserver une partie spéciale dans le texte centré essentiellement sur les carbonates.

Pétrographie des encroûtements carbonatés.

L'analyse pétrographique en lames minces des divers faciès de la région sera effectuée à la loupe binoculaire et au microscope polarisant. Elle vise à reconnaître des structures dominantes, des structures rares et la texture dominante.

Celles-ci peuvent dans bien des cas apporter des éléments d'explication précieux à notre approche environnementale. Le microfaciès comme concept méthodologique est par définition composé d'un assemblage d'aspects lithologiques et paléontologiques (Flügel, 1982). L'inventaire des structures pétrographiques offre en même temps l'opportunité d'analyse des cristaux et des traces biologiques au sein de chaque faciès.

Comme le signale Lindholm (1987, p. 241), la première difficulté se pose dès que l'on veut classifier nos observations conformément à l'un des modèles connus, car la nature est si dynamique et variée qu'elle produit des formes difficilement répertoriées dans ces modèles.

Cet auteur suggère, à juste raison d'ailleurs, des raffinements de ces critères de façon progressive. Il renie l'utilité de se restreindre à une classification unique, qui risque alors de bloquer l'effort d'innovation. Mais il ne soutient pas non plus les tentations de travail dans un vacuum, sans considérer les antécédents qui gardent encore une valeur scientifique.

La difficulté d'interprétation des phénomènes microscopiques dans les systèmes carbonatés est d'un autre côté sérieuse. La part des processus biologiques versus purement chimiques reste encore débattue. Carozzi (1972, p. 2) désigne les dépôts carbonatés de "biochimique", en écrivant:

"The designation 'biochemical' is precisely meant here, in order to stress the fact that combined mechanisms should always be kept in mind in the discussion of such rocks."

Le problème est d'autant plus complexe que dans certaines conditions le produit final de deux processus distincts peut bien être semblable. Carozzi illustre bien la confusion qui peut naître de tels aspects en donnant comme exemple les aiguilles aragonitiques, générées dans des milieux sursaturés marins. Ces aiguilles sont parfaitement identiques aux aiguilles relatives à la décomposition des restes algaires.

Avec toutes les précautions possibles et sans entrer dans un débat que nous considérons marginal pour cette thèse, nous adoptons les procédés d'interprétation et de classification pétrographiques ayant fait sujet d'unanimité de la majorité des spécialistes. Les publications de Lucas *et al.* (1976), de Flugel (1982) et de Chafetz et Folk (1984) sont des références de base à ce propos. On y trouve des exemples illustrés de microfaciès carbonatés aussi bien marins que terrestres.

Dans le présent travail, la dimension considérée comme le critère d'identification des cristaux est celle de Folk (1959) et (Bathurst, 1975) pour qui les micrites varient de 1 à 4 microns et les sparites sont supérieures à 4 microns. L'agencement des textures cristallines, la reconnaissance des liens avec les facteurs biologiques quand ceux-ci sont évidents, la recherche des phénomènes endogènes et exogènes d'altération et la distinction des traces de diagenèse aggradante ou dégradante sont d'utilité considérable pour bâtir les hypothèses génétiques.

Ces hypothèses sont à considérer dans une option hiérarchique, allant des lamines de détail à la formation qu'elles composent dans sa globalité. Elles sont appréhendées dans un contexte vertical au sein des profils, mais la dimension géographique (spatiale ou latérale) reste fondamentale.

La description des structures de grains et de ciments calcitiques donne la possibilité d'évaluer l'ordre et le désordre cristallin, la continuité et la discontinuité des processus de dissolution ou de colmatage des pores et l'évaluation du degré d'interaction des grains et des ciments. Elle est donc essentielle à la

restitution des conditions de cristallogénèse. Celles-ci sont directement révélatrices des conditions environnementales dont ce travail se fait une préoccupation majeure.

2 - Géochimie isotopique

Les notions de base de cette méthode et les modalités de son application en géologie sont exposées dans une série d'ouvrages récents. Par leur simplicité et l'aspect synthétique qui les caractérisent, certains ouvrages comme celui de Faure (1977), de Hoeffs (1980), de Fritz et Fontes (1980; 1986) ou d'Anderson *et al.*, 1983) peuvent être signalés comme des ouvrages de référence. Ils donnent les détails, les exemples et les méthodes d'analyse pertinentes.

Les isotopes stables utilisés pour résoudre les problèmes géologiques sont en général les isotopes de l'hydrogène, du carbone, de l'azote, de l'oxygène et du soufre. Les teneurs en isotopes lourds sont souvent exprimées en unités delta: soit sous la forme de la différence relative des rapports isotopes lourds / isotopes légers d'un étalon, par exemple le SMOW (Standard Mean Ocean Water) ou le PDB (Pee Dee Belemnite). La grandeur se calcule comme suit:

$$\delta = [R(\text{échantillon}) - R(\text{standard}) / R(\text{standard})] \times 1000$$

et s'exprime donc en pour mille. R représente le rapport isotope lourd/isotope léger d'un même élément, comme par exemple oxygène 18 sur oxygène 16, ou bien carbone 13 sur carbone 12.

Les applications de la chimie des isotopes à la compréhension des processus continentaux ont intéressé de nombreux auteurs. Des exemples de recherches sur les travertins, stromatolites et croûtes calcaires (Anderson *et al.* 1983, p.29; Casanova et Hillaire-Marcel, 1987; Pazdur *et al.* 1988) ont montré l'utilité des isotopes comme indicateurs des paléoenvironnements.

Contrairement aux milieux marins où l'homogénéité relative des conditions thermiques ou minérales facilite l'interprétation, certaines précautions s'imposent dans le cas des carbonates continentaux plus variés (Hillaire-Marcel, 1982, p.34).

En Afrique orientale, l'auteur signale que la composition isotopique de l'oxygène des carbonates peut être

plus influencée par l'effet d'évaporation qui masque largement celui de la thermodépendance de l'équilibre isotopique. En outre, les teneurs en carbone lourd de ces mêmes carbonates paraissent n'obéir qu'exceptionnellement à l'équilibre isotopique avec le CO₂ atmosphérique.

L'étude du fractionnement isotopique et les relations géochimiques dans le continuum calcite-eau-atmosphère ont démontré que la précipitation de la calcite se fait souvent dans des conditions proches des équilibre isotopique CO₂ atmosphérique - CaCO₃ (carbone lourd) et CaCO₃ - H₂O (oxygène lourd). Elles s'écartent cependant parfois de l'état d'équilibre (Gonfiantini, et al., 1968; Usdowski, et al., 1979; Dandurand, et al., 1982; Clark, 1987). L'analyse isotopique des travertins reste cependant utile pour la reconstruction paléoenvironnementale dans les régions tropicales quand elle fait partie d'une approche multidisciplinaire (Casanova, 1987).

Dans notre étude l'approche isotopique pourrait apporter des informations sur la composition isotopique de l'eau qui présida à la précipitation des carbonates, donc sur les paléoclimats, ainsi que des informations sur les sources de carbone à l'origine de la minéralisation de l'eau.

Nos résultats seront comparés aux données de la littérature traitant particulièrement de milieux semblables d'Afrique du nord ou tropicale, d'Europe méditerranéenne, d'Inde et de Moyen-Orient (e.g. Salomons et al., 1978; Turi, 1986; Clark, 1987).

Des mesures des déséquilibres Uranium / Thorium ont été également effectuées (tableau en annexe no 8). Les résultats apportent quelques informations chronologiques utiles à l'établissement de l'histoire des carbonates de la région étudiée.

3 - Hydrochimie.

C'est une approche que nous avons considérée comme essentielle à la résolution des problèmes soulevés dans ce travail. Il est de notre devoir d'exposer les raisons de ce choix, et de spécifier parmi les méthodes d'analyse hydrochimique celle qui nous paraît être la meilleure pour répondre aux questions problématiques de cette thèse.

Buts.

L'agressivité ou la saturation de l'eau, les quantités de roche véhiculées, la nature des éléments et leur variabilité dans l'espace et dans le temps sont des buts transitoires pour atteindre les objectifs principaux de cette thèse à savoir la dynamique morphogénétique des processus hydrochimiques et l'impact humain sur ces processus.

Le système calcaire dominant la réalité de notre terrain soulève des questions quant à sa dynamique passée ou actuelle. Les processus de dissolution et de précipitation de la calcite sous des conditions climatiques actuellement semi-arides ne sont qu'un aspect partiel de cette dynamique.

D'autres aspects sont traduits au niveau de la variation d'activité de ces processus à travers la région, c'est-à-dire dans l'espace en fonction de paramètres géologiques ou climatiques locaux.

Par ailleurs les variations spatiales et temporelles des paramètres physico-chimiques reflètent aussi les pratiques humaines qu'il faudra dégager des facteurs naturels. Ce point est cependant traité dans une perspective géomorphologique, car nous avons attaché plus d'importance aux liens probables entre la chimie des eaux et les processus empêchant la précipitation de la calcite à l'heure actuelle comme il est signalé dans le troisième axe majeur des hypothèses de ce travail.

Nous résumons donc les objectifs tracés à cette analyse comme suit:

- Étudier la capacité potentielle de l'activité érosive ou accumulatrice des eaux à travers l'analyse de leurs états d'agressivité ou de saturation.
- Suivre la variabilité d'évolution des différents ions dans une période suffisamment longue pour être représentative des conditions naturelles de notre système. Cette période couvre au moins un cycle hydrologique, et peut s'étaler dans certains cas sur plusieurs cycles.
- Soumettre nos analyses à un traitement global visant à chercher la structure interne qui caractérise notre domaine sur le plan hydrochimique. C'est donc appliquer un traitement statistique multivarié à ces données en vue d'en extraire l'information utile à notre effort de catégorisation et d'interprétation environnementale.

- Procéder par analyse partielle en vue d'expliquer les particularités régionales qui s'avèrent dès à présent remarquables entre le M'goun, Dadès et Todgha.
- Chercher les éléments explicatifs d'une problématique centrée sur la lente accumulation des encroûtements sous conditions hydrochimiques actuelles.

Méthodes

Le besoin d'avoir une vision globale sur la composition de l'eau et sa structure induit des comparaisons immédiates entre les éléments. L'unité de mesure doit être adaptable et conforme de façon à mettre en évidence les différences de concentration propres à chaque élément.

Le milligramme par litre ne permet pas de telles comparaisons, vue l'énorme différence de masse entre les éléments. Le CaCO_3 équivalent nécessite des calculs supplémentaires exposant les résultats à toutes sortes d'imprécision et d'erreurs. Il conviendrait dans cette approche estimative d'utiliser la notation en milliéquivalent. Elle est plus rationnelle et mieux adaptée car elle exprime les nuances de masse (Schoeller, 1962, p. 312; Hakim, 1975, p. 124; Drever, 1982, p. 15).

Quand il est utilisé pour exprimer la contenance en sels dissous dans un litre (capacité), le milliéquivalent par litre (noté mé/l) exprime une concentration, et répond aux objectifs d'une recherche traitant des problèmes relatifs à la concentration, comme il est le cas pour l'évaluation de l'érosion-précipitation des carbonates. En tout état de cause, les transformations en milligramme par litre et vice-versa sont toujours possibles pour des fins utiles. Pour atteindre les objectifs prescrits, plusieurs méthodes d'analyse sont à notre disposition.

Une documentation bien fournie est disponible à ce sujet (e.g. Roques, 1964; Garrels et Christ, 1965; Ek, 1969; Berner, 1971; Geurts, 1976; Brownlow, 1979; Lerman, 1979; Samuel et Osman, 1981; Stumm et Morgan, 1981; Hakim, 1982, 1984).

Il nous revient d'en discuter certains exemples, les modalités, avantages et difficultés d'application, et enfin les raisons du choix de la méthode que nous adopterons dans le présent travail.

Le degré de saturation ou d'agressivité d'un milieu aquatique a été calculé par l'intermédiaire du titre alcalimétrique complet (TAC) et par la pression du gaz carbonique PCO_2 .

Roques (1964, p. 283) donne un résumé des constantes qui peuvent rendre compte des équilibres chimiques du système CO_2 - H_2O - Calcite. Suite à ses travaux expérimentaux de laboratoire il élabore des courbes d'équilibre de la calcite en fonction du pH et de la température.

L'application de ces modèles est surtout significative dans un domaine où la fluctuation de ces paramètres est considérable, pour permettre une distinction claire des phénomènes.

Dans le cas de la Belgique, la stabilité relative des pH des eaux analysées (souvent entre 8.0 et 8.6) amène Geurts (1976, p.22) à appliquer une autre méthode basée sur le coefficient d'activité ionique (γ) et son rapport avec la constante thermodynamique (K_p).

Dans notre domaine cet empêchement n'est pas majeur, vue la variabilité remarquable des caractéristiques physico-chimiques des eaux, en particulier superficielles. L'application des courbes d'équilibre de Roques est donc concevable comme moyen de vérification du degré de saturation ou d'agressivité dans ce domaine.

La majorité des auteurs s'intéressent d'un autre côté à l'estimation de la quantité de roche dissoute dans l'eau. Ils utilisent l'unité du CaCO_3 équivalent pour exprimer ce taux. En fait, ils transforment les composantes réelles de cette eau en leur équivalent calculé de CaCO_3 , c'est-à-dire qu'ils considèrent tous les sels comme étant du CaCO_3 . Les CaCO_3 , MgCO_3 et d'autres sont par exemple amenés à leur équivalents en CaCO_3 et c'est en additionnant avec le taux réel de CaCO_3 contenu dans la solution qu'ils obtiennent le total dissous.

Cette méthode nécessite au préalable le calcul des quantités spécifiques relatives à chacun des sels qui composent l'eau. Ce qui représente une reconstitution hypothétique en soi, car elle est trop approximative.

En chimie, les cations et les anions d'une solution quelconque peuvent avoir des associations/réactions originalement différentes de celles supposées plus haut. Par exemple l'association des sulfates et des ions du magnésium, ou autre élément dont la valence permet un équilibre de la réaction chimique est toujours probable.

La connaissance du contexte géologique et des réseaux souterrains d'alimentation peut dans certain cas servir de fondement logique pour de telles reconstitutions. La précaution s'impose car les contaminations

d'eaux d'origines différentes sont toujours probables.

Hakim (1975, p. 122) confirme que "cette méthode est incorrecte du point de vue strictement chimique, mais on est obligé de dépasser les formalités pour pouvoir schématiser l'origine des ions dans un bassin hydrogéologique".

Les principales critiques avancées à l'encontre de cette méthode se résument ainsi:

- Elle est approximative puisqu'elle néglige les considérations qui peuvent être d'une importance primordiale en réalité.
- Elle est spéculative puisqu'elle suppose l'existence de roches comme le calcaire, les gypses etc... sans preuve tangible.
- Elle est peu pratique puisqu'elle nécessite une série de calculs préalables, et comporte des risques d'erreurs et des généralisations aberrantes à tout les instants.

Pour ces raisons, Hakim (1982, 1984) propose une approche nouvelle pour l'évaluation de la dissolution spécifique (annexe, n° 2). En principe, cette méthode vise à écarter un certain nombre d'erreurs au niveau de l'expression de la dissolution ou du calcul des éléments apportés par les eaux météoriques et les rivières exogènes (Hakim, 1987, p. 402). Sa procédure se résume en calculs d'éléments de roche (E.R) charriés par l'eau, et ceci, en se basant sur le calcul des éléments carbonatés et des éléments gypseux qu'il faut effectuer séparément en raison de la différence des poids spécifiques. La somme des constituants carbonatés et des constituants gypseux et salins permet d'avoir le total des éléments rocheux.

L'application de cette méthode pour l'étude de quelques points d'eau en montagne marocaine, dans le Haut-Todgha et au Haut-Dadès (Akdim, 1986) prouve déjà son adaptation à l'étude de cas pareils.

Nous pensons cependant que cette nouvelle méthode mérite un appui technique au point de vue statistique. Une amélioration méthodologique pourrait donc être apportée sur ce point. Elle consiste à soumettre les données acquises à d'autres calculs visant à classer les paramètres physico-chimiques selon des critères spatiaux et temporels. En d'autres termes, orienter l'analyse dans une option vraiment géographique en cherchant au sein d'une série de données, les structures spécifiques qu'il faut interpréter dans un contexte environnemental approprié.

L'emploi de l'analyse factorielle en composantes principales et de la régression est fructueux. Nous discuterons ce point en temps opportun. Dans la présente étude, nous adoptons une méthode de recherche basée à la fois sur les acquis d'approches précédentes, essentiellement celle proposée par Hakim (1984), tout en essayant de progresser dans un sens plus explicatif et mieux adapté aux problématiques qui nous préoccupent.

Cette méthode se résume en trois phases essentielles:

- i --- Calculs effectués à base de données hydrochimiques brutes.
- ii -- Traitement informatique en vue d'une étude structurelle.
- iii - Interprétation des variables régionalisées et temporelles.

Ce dernier point sert de synthèse où les liens avec les autres axes de la recherche se mettent en évidence. C'est de là que nous espérons trouver des réponses du moins partielles aux questions posées sur la dynamique hydrochimique et ses variations régionales ainsi que l'information éventuelle de l'impact humain sur l'hydrosystème et ses liens avec la génétique de la calcite.

4 - Analyse multivariée

Malgré les critiques anciennement adressées à l'encontre de ce type d'analyse, surtout en hydrologie (Matalas et Reihner, 1967; Wallis, 1968), l'utilisation des techniques d'analyse multivariée est actuellement acceptée comme moyen méthodologique pratique et fort utile d'investigation dans le domaine de la géographie (French et Racine, 1971; Chojnki et Cziz, 1975).

De nombreuses publications et travaux de recherches peuvent être cités comme exemples d'application dans divers domaines naturels (Doornkamp, 1971; Dauphiné, 1973; Guigo, 1979, 1983; Kupper, 1984; Pirkle et al 1985; Dewez, 1988; Saad et Turgeon, 1988).

En hydrochimie, ces méthodes sont cependant jusqu'à présent peu connues et leur application est encore rare. Dans notre cas, l'abondance des données acquises particulièrement en hydrochimie et l'objectif exploratoire précédemment signalé à ce propos méritent le choix de techniques appropriées: la régression et l'analyse factorielle en composantes principales.

Elles permettent une meilleure appréciation des possibilités de recherche, une rigueur du travail et la formalisation des résultats.

Analyse factorielle en composantes principales

Les techniques manuelles d'analyse et de représentation, comme les courbes ou les histogrammes ne permettent qu'une visualisation comparative de données restreintes. Elles sont donc peu pratiques dans notre cas. Le nombre assez élevé d'analyse hydrochimiques à traiter et la variété de données testées imposent le recours aux techniques d'analyse multivariée.

Une masse considérable de données s'est réunie sur les différentes variables observées ou calculées à propos des eaux de sources et des eaux superficielles de notre domaine entre 1975 et 1985. Le besoin d'une réduction rationnelle se fait sentir. L'analyse factorielle en composantes principales permettrait un tel objectif. Elle est une méthode qui s'efforce d'atteindre la parcimonie dans la description tout en minimisant la perte d'information (Beguin, 1979).

L'emploi de cette technique nous permettra de grouper nos données en sous-ensembles hydrochimiquement distincts. Ceci est en mesure de révéler des questions pertinentes, voire même d'apporter des arguments relatifs à l'une ou l'autre des hypothèses de ce travail.

Ashley et Lloyd (1978) ont suggéré l'application de l'analyse factorielle dans la recherche hydrochimique. Ils ont cartographié les résultats d'applications faites au Chili et en Angleterre et ils ont déduit les facteurs les plus significatifs au niveau de la variation des éléments dissous dans l'eau.

L'analyse factorielle en composantes principales a aussi été appliquée dans une option semblable par Williams *et al.* 1983, p.299). Ces auteurs, en étudiant les eaux de pluie et de rivière au Dartmoor (S.O d'Angleterre), ont examiné les variations de la nature chimique des matières dissoutes suivant les différentes voies de transport ainsi que les facteurs qui les gouvernent. Les éléments comme le chlore, le sodium et le magnésium sont interprétés dans ce cas comme étant d'origine marine.

Les tendances saisonnières ont été mises en évidence, ainsi que leur relation avec les conditions atmosphériques dominantes. Le classement établi à l'aide de l'analyse en composantes principales leur a permis de distinguer différentes sources pour les matières dissoutes dans les eaux étudiées et de mettre en évidence l'influence de la forêt et des facteurs atmosphériques.

Cette méthode étant prouvée utile dans la détermination des paramètres actifs au sein d'un système hydrochimique nous paraît applicable dans la présente étude. Elle n'est cependant pas un but en elle-même, mais un moyen utile à la mise en évidence de structures caractéristiques aux sources et aux eaux superficielles de notre domaine. Elle permet de concevoir les relations internes aptes à progresser la connaissance de ce milieu particulier.

L'interprétation s'attache à rechercher pour chaque facteur les similitudes ou les oppositions au niveau des saturations. Celles-ci mettent en évidence les variables à évolution semblable et montre celles qui s'opposent. Cette conclusion est révélatrice car elle incite déjà à expliquer les faits décrits, par investigation dans les domaines connexes. L'interprétation d'un facteur est considérée d'autant plus sûre que ses saturations sont proches de -1, 0 ou +1. Les valeurs extrêmes (voisines de -1 et +1) reflètent une bonne corrélation entre les variables et ce facteur. Tandis que celles voisines de 0 indiquent une faible représentativité à ce niveau (Drever, 1982, p. 159).

C'est dans la même logique que Beguin (1979, p. 174) considère qu'un facteur est d'autant plus nettement identifiable quand les saturations supérieures à 0.8 en valeur absolue et celles inférieures à 0.2 en valeur absolue sont nombreuses. Les premières reflètent des variables très bien liées au facteur tandis que les secondes (celles qui sont proches de zéro) caractérisent les variables que le facteur ne représente quasiment pas.

La procédure de rotation "Varimax" que nous utiliserons permettra de maximiser la représentation de la variance et rend plus aisée l'interprétation des facteurs (Beguin, 1979, p. 174).

La régression

L'utilisation des modèles de régression pour des objectifs prédictifs dépend de la permanence des relations entre les variables dépendantes et les variables indépendantes à l'échelle temporelle (Hauser,

1974 p.150).

Dans un domaine où l'aléatoire devient le maître au niveau hydro-climatique comme dans le cas de la région qui nous intéresse, la prédiction est moins fiable. Les lois que l'on peut établir au niveau théorique ne peuvent l'être que dans une option probabiliste. Néanmoins, les modèles de régression servent à estimer les équations linéaires représentatives des états précis dans le temps et dans l'espace. Ils donnent un moyen d'explication basé sur les valeurs de corrélation significatives (Mark et Peuker, 1978 p. 51).

Les variations de concentrations des différents ions et du total rocheux dissous dans l'eau ainsi que leurs caractéristiques physiques comme la température, le pH et la conductivité électrique ne manquent pas de suggérer des orientations de recherche quant à l'origine des eaux et des matières qu'elles véhiculent.

Drever (1982, p. 157) insiste sur l'utilité d'une telle procédure, basée sur la recherche d'associations statistiques entre les constituants minéraux dissous et leur utilité dans la connaissance des paramètres environnementaux comme la lithologie, le climat, le relief et l'impact humain.

La critique que l'on peut formuler à l'encontre de cette méthode est qu'une association statistique de valeur aussi élevée qu'elle soit, n'établit pas directement la relation de cause à effet; mais elle présente fréquemment les résultats de traitement de données de façon à faciliter l'extraction d'idées utiles pour s'avancer dans ce sens.

A titre d'exemple, une série d'analyses montrant un fort lien entre le calcium et les sulfates permet d'envisager l'hypothèse d'une origine commune est donc vraisemblable, et l'on peut directement penser aux gypses comme source rocheuse de ces ions. La critique que l'on peut évoquer est d'ordre géochimique, car la même structure dans le chimisme des eaux peut bien résulter d'autres sources ou combinaisons chimiques comme par exemple la coexistence d'autre types de roches dans le domaine, qui sont aptes à libérer les mêmes ions.

Nous pensons d'un autre côté que lorsqu'une corrélation se confirme, elle exprime une logique et reflète une certaine réalité qu'il faut interpréter à base de la connaissance approfondie de l'environnement global de la région. Seule une telle connaissance de la lithologie, de l'hydrologie, de l'hydrogéologie, des climats, des bioclimats et des comportements humains par exemple, serait en mesure de confirmer sans équivoque

le sens des tendances et des liens révélés par régression.

Cette option impose cependant certaines considérations qu'il faut tenir en compte en utilisant des modèles de régression pour des fins explicatives. Il s'agit d'éviter les erreurs qui peuvent provenir des disparités spatiales dans un domaine aussi large que le nôtre, surtout que ces disparités se confirment clairement dès les premiers examens préliminaires. Nous avons ainsi procédé de façon à chercher des liens de corrélation dans des unités d'échelle réduite et entre les variables de façon partielle.

La dimension temporelle est introduite aux modèles dans le but de mettre en évidence la variabilité saisonnière des liens. L'objectif étant d'explorer les variables les plus explicatives et les saisons où les liens sont les meilleurs. Ceci nous permettra au terme de l'analyse d'évaluer les résultats à la lumière des hypothèses de recherche que nous avons retenues pour ce travail.

Conclusion

Il est vrai que le nombre de techniques appliquées à l'étude de la dynamique de l'encroûtement sont multiples et parfois semblent être éloignées, mais l'unité du sujet n'est en aucun cas absente de notre pensée. Cette diversité technique est bien voulue, car elle semble représenter l'unique voie permettant d'appréhender la globalité des phénomènes précédemment tracée à travers les objectifs du travail. Cette présentation méthodologique peut paraître assez longue, mais dans un travail de thèse la précision préalable des concepts théoriques, méthodologiques et techniques utilisés semble être fondamentale.

Deuxième partie

Données et résultats de l'analyse

Cette partie est réservée à la présentation et la discussion des résultats des analyses du terrain et du laboratoire effectuées. Les quatre chapitres qui suivent discutent successivement des croûtes et encroûtements calcaires, des travertins d'eau douce, des travertins hydrothermaux et enfin des caractéristiques hydrochimiques des eaux de la région étudiée.

Chapitre IV

Les croûtes et les encroûtements calcaires.

L'encroûtement comme phénomène sédimentologique à signification environnementale et évolutive a été largement étudié dans le pourtour de la méditerranée et du monde semi-aride. La nature et la diversité des cas décrits suscite dans la littérature plusieurs débats sur le modèle génétique adéquat (Coque, 1962; James, 1974; Read, 1974; Reeves, 1976; Vaudour et Clauzon, 1976; Harrison, 1977; Fassi, 1978; Vogt, 1984; Beaudet, 1976; Laouina, 1987; Coudé-Gaussen et Rognon, 1988).

La conclusion qu'impose la revue de cette abondante littérature est qu'un modèle universel s'avère difficilement acceptable et reste très hypothétique. Au lieu d'une hypothèse universelle jamais partout admise, les particularités locales et régionales sont plutôt décisives dans la genèse des croûtes et encroûtements. Cette déduction se démontre dans la présente étude. Nous discuterons des principales idées acquises à la lumière des observations de terrain et des analyses pétrographiques et géochimiques effectuées.

1-Description macromorphologique.

La typologie des encroûtements adoptée est conçue dans une vision globale des ensembles cohérents. Il est vrai que chaque coupe montre à elle seule une originalité certaine, mais l'observation profonde et les analyses topographiques et morphologiques permettent de distinguer trois grands types de faciès:

- Des croûtes zonaires très indurées à la surface des glacis.
- Des croûtes pelliculaires dallant les cônes et les versants.
- Des encroûtements variés, de cimentation dans les conglomérats de terrasses et glacis du Quaternaire ancien et moyen.

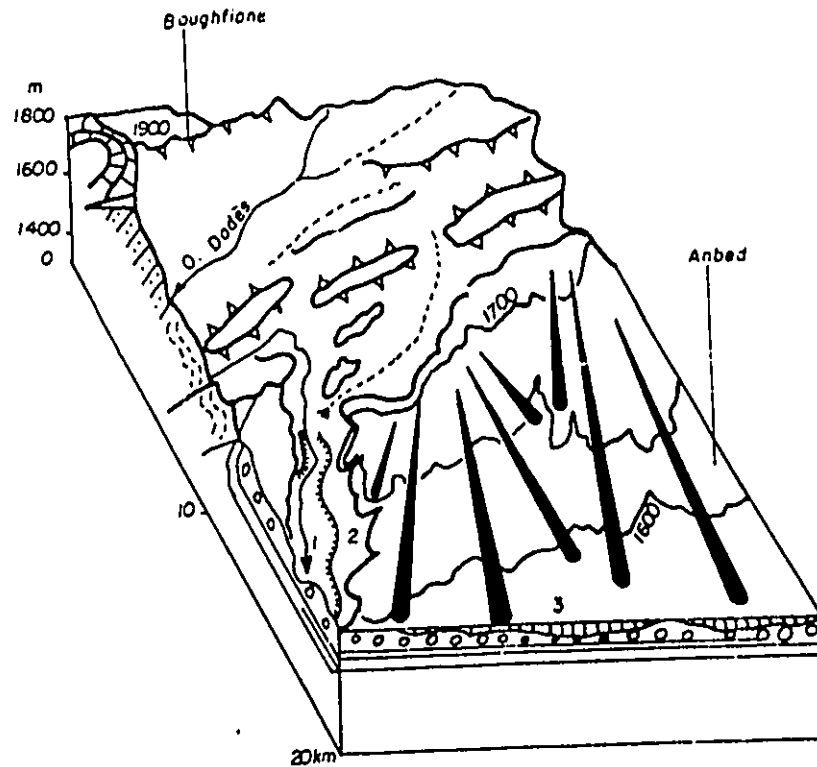
A - Les croûtes zonaires.

Les profils caractéristiques sont observables à la surface du haut niveau quaternaire de la cuvette de Ouarzazate. C'est à dire sur les glacis plio-villafranchiens s'étendant entre Skoura, El Kélaa des M'gouna et Boumalne. Ces glacis et leurs lambeaux isolés par l'érosion fluviale sont souvent recouverts d'une épaisse dalle typique, rappelant les faciès de croûte saumon ou lamellaire décrites dans les autres régions du Maghreb (Raynal, 1961; Coque, 1962; Beaudet, 1971; Ballais, 1982). Il s'agit de profils souvent hétérogènes et à composantes multiples, où l'on peut toutefois distinguer deux grandes zones différentes: l'une basale, altérée et l'autre superficelle indurée. Deux exemples seront décrits et exposés. Il s'agit de croûtes d'Anbed et celles d'El Goumt.

I- Les croûtes calcaires d'Anbed (région de Boumalne):

Dans le paysage, ces croûtes sont localisées à la surface du grand glacis formant le haut plateau d'Anbed dans la région de Boumalne. Le substratum conglomératique est surtout calcaire. Il en va de même pour les massifs montagneux d'amont, c'est à dire l'Atlas à lithologie globalement calcaire (figure n° 4.1). Les roches pourvoyeuses des carbonates sont donc abondantes dans ce contexte géomorphologique à dominance calcaire. La croûte assez bien répandue à la surface du glacis est cependant d'épaisseur variable. La coupe mise en évidence par une tranchée d'adduction d'eau au centre administratif de Boumalne (ONEP), montre une épaisseur maximale de la croûte aux alentours du lycée. La croûte y est profonde d'environ deux mètres. Elle s'amincit vers l'amont, où elle n'atteint plus que cinquante centimètres près de l'hôtel "Madayek". Elle devient pelliculaire et superficelle à quelques kilomètres plus au nord. Le conglomérat de base (Plio-Villafranchien) apparaît nu à la surface, au pied de la montagne. A mi-chemin entre le centre de Boumalne et la montagne, apparaît une croûte superficelle clairement démantelée en blocs métriques. Elle est exploitée par certains camionneurs de la région. La coupe caractéristique de cette croûte montre deux parties distinctes (figure n° 4.2). A la surface, la croûte est indurée. Elle comporte plusieurs lamines ou pellicules

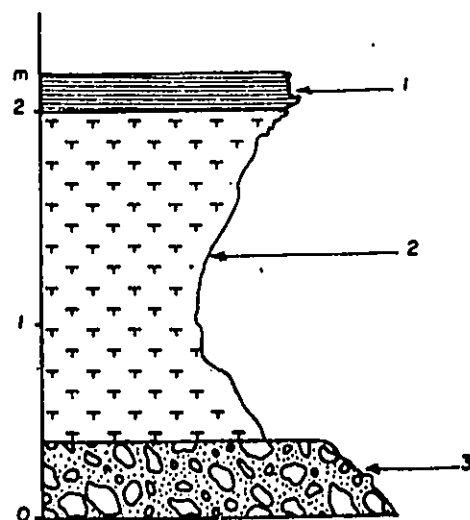
Fig n° 4.1 Cadre géomorphologique global des crêtes zonaires
à Boumalne Dadaï



-  Glacis étendus du Quaternaire ancien .
-  Falaises rocheuses et abrupts.
-  Rebords des terrasses fluviales .
-  Quaternaire 1, 2, 3 (récent, moyen, ancien) .
-  Crêtes zonaires du Quaternaire ancien .
-  Conglomérats et argiles mio-pliocènes .
-  Calcaire éocène
-  Argiles rouges sénonien (Crétacé supérieur)
-  Grès et argiles du Crétacé inférieur
-  Calcaire dolomitique, Lias inférieur .

NB : Les cailloutils quaternaires n'apparaissent pas en coupe car leur épaisseur ne le permet pas à l'échelle adoptée .

Fig n° 4.2 . Coupe schématique des croûtes zonaires
(moulouyennes) du Dadès



- 1 _ Horizons feuilletés indurés
- 2 _ Calcite pulvérulente tendre
- 3 _ Conglomérat de base

de calcite d'épaisseur centimétrique. Celles-ci s'alternent aux horizons rougeâtres et détritiques peu étendus (un à deux mètres d'extension) et d'épaisseur variable (cinq à dix centimètres dans la partie médiane la plus épaisse). Des galets plus ou moins abondants se trouvent emballés dans la croûte. La structure et l'allure des lamines est complexe. Elles sont entrecroisées, ondulées et d'épaisseur changeante. Il est remarquable de noter l'alternance d'ensembles facilement distincts. Chacun se compose de lamines calcitiques superficielles et de support rougeâtre plus argileux. Cette structure révèle déjà une évolution polycyclique dans la genèse des croûtes.

II - Croûte d'El Goumt (Kélaa des M'gouna).

La coupe se situe sur la piste menant à Boutaghrar au M'goun. Cette piste est issue de la route principale n° 32 au douar dit El Goumt. Le dépôt de croûte s'est développé sur la marge méridionale du glacis supérieur s'étendant jusqu'à Boumaine. Ce glacis a été incisé durant le Quaternaire par le Dadès et ses affluents (actuellement secs). La croûte occupe un site refuge au haut de versant. Elle est mise en évidence en coupe par le ravin que longe la piste menant vers Boutaghrar. Elle montre une discordance avec le conglomérat plio-villafranchien qui la supporte. La coupe montre en surface une croûte feuilletée de cinquante centimètres d'épaisseur, formant des ondulations légères de quelques mètres de longueur d'onde. Les lamines superficielles sont plus ou moins démantelées. De multiples fissures d'orientation variable traversent cette croûte indurée. Certaines de ces fissures sont comblées de calcite appartenant aux générations différentes. Elle forme des filons blancs au sein même de certains galets fissurés emballés dans la croûte. Ces observations révèlent une histoire diagénétique longue et complexe. La couche basale de la coupe est plus épaisse (1.5 mètre environ). Elle est pulvérulente et de couleur ocre, jaunâtre. Des taches blanches à allure verticale s'y observent. Les formes arrondies qui apparaissent sont soit des nodules de feuillets calcitiques circulaires (faux galets), ou des galets de calcaire originellement emballés au sein du dépôt. Ils sont plus abondants comparativement aux croûtes de la surface du glacis à Boumaine. La variation de résistance des couches se traduit sur l'aspect et la

topographie de la coupe. Un abri apparaît par le recul dû à l'érosion de la couche basale tendre et le maintien de la dalle de surface compacte. D'après le technicien de laboratoire, les essais de datation à l'Uranium / Thorium effectués (échantillon M 89-3) ont montré la difficulté du traitement de ce matériel à cause de l'abondance du manganèse insoluble à l'acide nitrique; mais heureusement après plusieurs essais les résultats sont bons. Ils indiquent un âge avancé que nous avons attribué par datation relative au Quaternaire ancien. Cette attribution est en accord avec les indications morphologiques, isotopiques et diagénétiques caractérisant ce type de croûtes.

B - Les croûtes pelliculaires sur cônes, terrasses et dépôts de versants:

Elles sont abondantes sur les dépôts anciens. On en trouve des exemples au M'goun dans la région de Boutaghrar, au Dadès près de l'hôpital de Boumalne et à Ait Arbi sur la terrasse du Quaternaire moyen dominant la route menant à M'semrir.

i-M'goun.

Dans la zone intra-montagnarde, des croûtes de ce type sont observables à des endroits multiples. Au-delà de la cuvette d'Ait Toumert, sur la piste menant à Imeghrane, deux grands cônes de déjection occupent la dépression d'Azaghar-n-igr. Ce sont les cônes de Taoujgalt et Tilmilt (noms de douars situés à leur amont). Les deux cônes sont bâtis d'un matériel conglomératique bien consolidé et recouvert en surface d'une mince croûte feuilletée calcaire. Le passage du conglomérat à la croûte est progressif sans aucune discordance apparente. Les ciments sont calcitiques dans le conglomérat et sont identiques à ceux de l'encroûtement de surface; car ils sont pelliculaires et de même couleur blanchâtre. Ce faciès indique l'envahissement du matériel en place par une calcite précipitée postérieurement à son dépôt. Il semble aussi indiquer une précipitation en milieu aquifère saturé, au moment où l'accumulation détritique cesse au profit des écoulements diffus, lents et mieux chargés en carbonates.

D'autres terrasses étagées du Quaternaire moyen dans la région de Boutaghrar montrent ces

encroûtements pelliculaires de surface. Il s'agit du niveau 3, supportant le douar de Tamalout. C'est encore un conglomérat calcaire à horizons sableux et galets émoussés que recouvre cette croûte relativement mince (figure n° 4.3). Dans certains cas elle relie la surface presque plane de la terrasse aux pentes raides du versant.

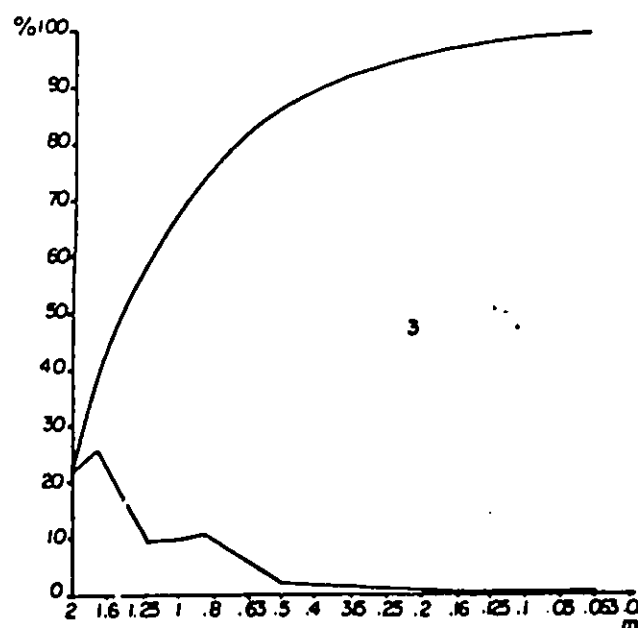
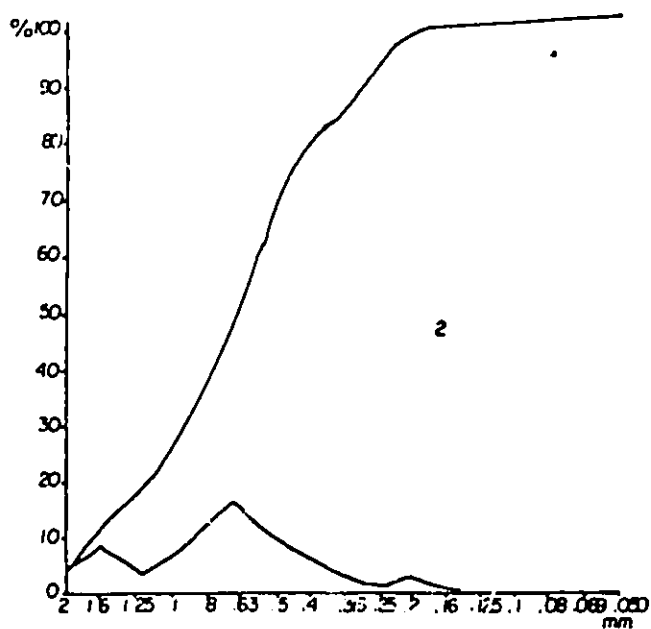
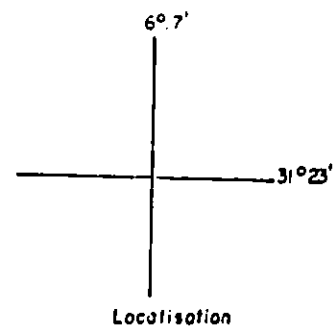
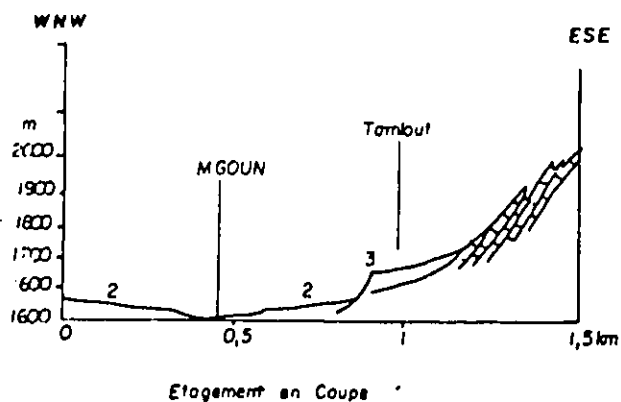
I-Boumalne.

Ce type d'encroûtements est fréquent sur les versants de la vallée de Dadès, particulièrement sur le niveau 3 correspondant au quaternaire moyen. C'est un encroûtement lié aux dépôts de versants et à leur dynamique d'évolution plus qu'à la terrasse qui les supporte. Il se trouve d'ailleurs dans certains cas discordant et clairement distinct. Plusieurs épandages encroûtés à pellicules de calcite superficielles sont observables à Boumalne, autour de l'hôpital et au-delà de tous les villages bâtis sur le niveau quaternaire 3. A une dizaine de kilomètres au nord de Boumalne, la coupe d'Alt Arbi offre un exemple représentatif de ces dépôts (figure n° 4.4). Sur la rive droite du Dadès, à gauche de la route menant à M'semrir, la coupe permet une distinction entre le matériel fluvial de la terrasse et l'épandage encroûté du versant. Le premier est formé d'une alternance de sables, graviers et conglomérats calcaire à teinte foncée, grisâtre, tandis que le second est formé d'un conglomérat encroûté supportant les encroûtements calcitiques de pellicules millimétriques. Ces encroûtements donnent au dépôt de surface une teinte plus claire et jaunâtre. Dans la partie inférieure du dépôt, les traces d'un lessivage avancé s'observent sur les galets. Ils sont carriés ou portent des cortex externes altérés. Ce sont des arguments d'une évolution en milieu hydromorphe.

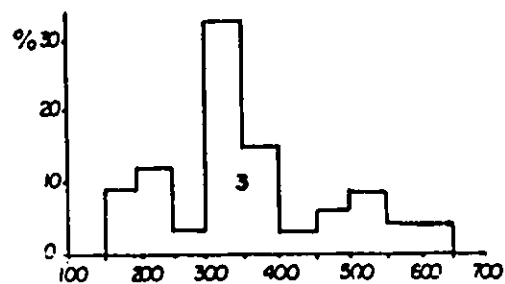
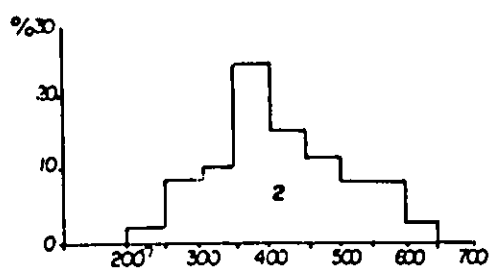
La partie supérieure montre au contraire une accumulation progressive de la calcite en plusieurs pellicules concentriques autour des galets. La croûte superficielle est fortement inclinée suivant la pente du versant. C'est un exemple dans lequel la croûte moule des topographies variées (terrasse, versant). Elle n'est donc pas uniquement limitée aux topographies horizontales ou subhorizontales comme on le croyait anciennement (Choubert, 1948). Ces observations macromorphologiques confirment la

Fig. 4 3. Sédimentologie des terrasses encroûtées à Boutaghrar (M'Goun)

(2 - 3 - 4 désignent les niveaux quaternaires)



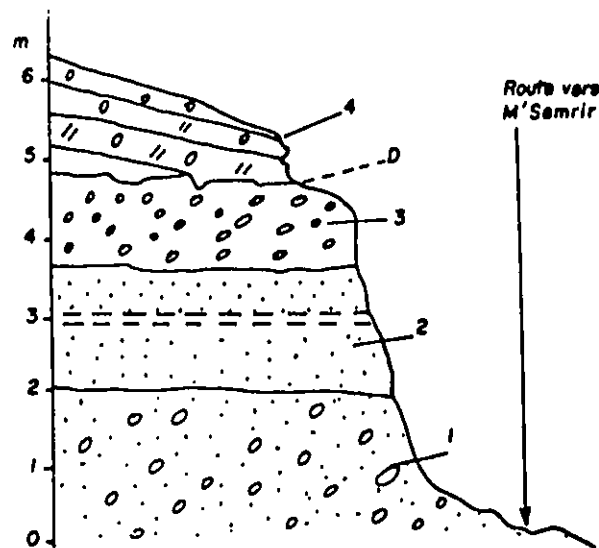
Granulométrie des sables



Emousse des galets calcaires

Fig n° : 4.4

Accumulation du niveau quaternaire 3 à Aït Arbi (Dadès)
(Rive droite)



- 1 - Sables et galets bien lessivés. 2 - Sables fins à horizons argileux.
3 - Conglomérat noirâtre. 4 - Croûte calcaire à galets calcaires
fréquents (glacis de versant). D - Discordance entre deux formations
distinctes

complexité des croûtes comme phénomène sédimentologique, la variété de leurs faciès et des sites qu'elles occupent; néanmoins, elles attestent de l'ancienneté de l'encroûtement dans le domaine de cette étude. Elles donnent des preuves que l'encroûtement était actif aux précédentes phases quaternaires. Plusieurs autres exemples peuvent être cités, comme à Ait Moussa-ou-ichou au haut Dadès (figure n° 4.5). Le dallage carbonaté se manifeste sur des positions et des faciès assez semblables à ceux d'Ait Arbi.

C-Encroûtements et ciments calcitiques des conglomérats.

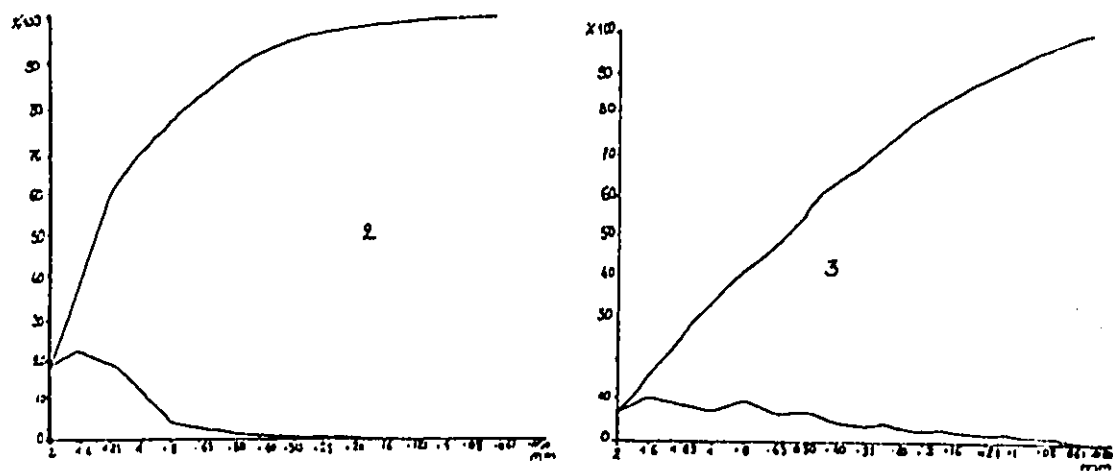
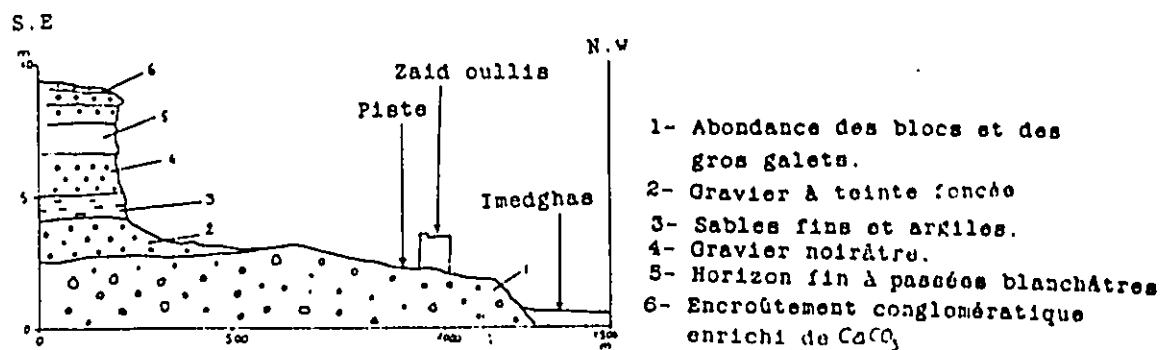
Les formations originellement alluviales ou colluviales composant les glacis et les terrasses sont dans la plupart des cas consolidées par des ciments calcitiques. Ceux-ci sont le résultat d'une évolution hydrologique et diagénétique quaternaire. Les galets, graviers et sables sont souvent pris dans une matrice plus fine, argileuse rose, fortement carbonatée. C'est un matériel souvent non structuré et révélateur de conditions de sédimentation brutales et instantanées. Le matériel subit une cimentation par la calcite précipitée par les eaux d'infiltration ou les eaux d'écoulement hypodermique. De tels conglomérats sont observables dans les glacis quaternaires de la dépression de Ouarzazate et dans les dépôts mio-pliocènes qui les supportent. Ils sont également visibles dans les terrasses fluviales du Quaternaire moyen et ancien au Dadès et dans la vallée du M'goun. L'encroûtement de ces formations conglomératiques explique leur résistance à l'érosion et la morphologie de puissants abrupts dans le cas où les entailles sont mises en relief par sapement fluvial. Ces encroûtements intra-conglomératiques ne sont visibles que rarement au sein des dépôts. Ils forment des ciments répartis dans l'accumulation plutôt que des horizons distincts. Leur importance reste néanmoins majeure vu leur rôle morphologique et leur utilité dans le raisonnement global de la dynamique des carbonates intéressant le présent travail.

L'étude macroscopique des encroûtements permet de reconnaître leur complexité génétique dans un cadre sédimentologique évolutif global. Des aspects d'altération sont visibles sur les galets; la décalcification

Fig. 4.5

Coupe détaillée de la terrasse quaternaire du niveau 4

A Ait Moussa Ouichou au haut Dadès



Granulométrie des sables selon les horizons.



Morphométrie des galets (70- 100mm) selon les horizons
(indice d'émoussé)

de certaines zones d'infiltration au sein des dépôts superficiels se fait au profit des fissures ou des vides inter-granulaires bourrés de calcite. Ceci rappelle des observations faites sur des dépôts identiques au nord-est marocain (Laouina, 1987). Les colluvions et le matériel détritique ainsi consolidés montrent une évolution changeante et forment des dépôts polyphasés. L'accumulation dans un premier temps est suivie d'une altération, de migration de la calcite et de sa redistribution interne dans un second temps. La consolidation peut se généraliser après, mais une différenciation liée aux conditions d'infiltration, de confinement ou à la granulométrie du dépôt s'impose. Des horizons peu cohérents amorcent un recul et la formation de cavités au sein du dépôt. Les analyses pétrographiques et géochimiques effectuées apportent des informations utiles à la compréhension de la genèse de ces dépôts.

2 - Observations pétrographiques et géochimiques.

A - Description Pétrographique.

Les aspects pétrographiques des lames minces étudiées dans divers types de croûtes montrent une variation de faciès et une complexité de structures rarement égalée dans les autres dépôts étudiés. Des phénomènes détritiques, diagénétiques et biocristallins se manifestent à des degrés d'importance différents. Des phénomènes d'érosion et de précipitation de la calcite sont reconnus et documentés. Les microfaciès de croûtes zonales ont été observés sur des échantillons appartenant aux sites éloignés pour voir les variétés spatiales. D'autres échantillons sont pris dans les détails d'un même profil.

A Boumalne, des lames minces taillées sur la croûte zonale près de l'hôtel "Madayek", montrent une alternance de lamines sparitiques très développées. Deux d'entre elles montrent un enrichissement spectaculaire de formes arrondies à structure concentrique. D'après les critères de classification de ce types de formes rapportés par Hay et Wiggins (1980, p. 560) et Peryt (1983, p. 5), ces formes sont soit

Figure no. 4.6. Photomicrographie montrant des traces biologiques dans la croûte zonale de Boumalne (Hôtel). Des pelloïdes sont observables (flèche). Ils sont en lumière naturelle noirâtre et de cristallinité micritique.

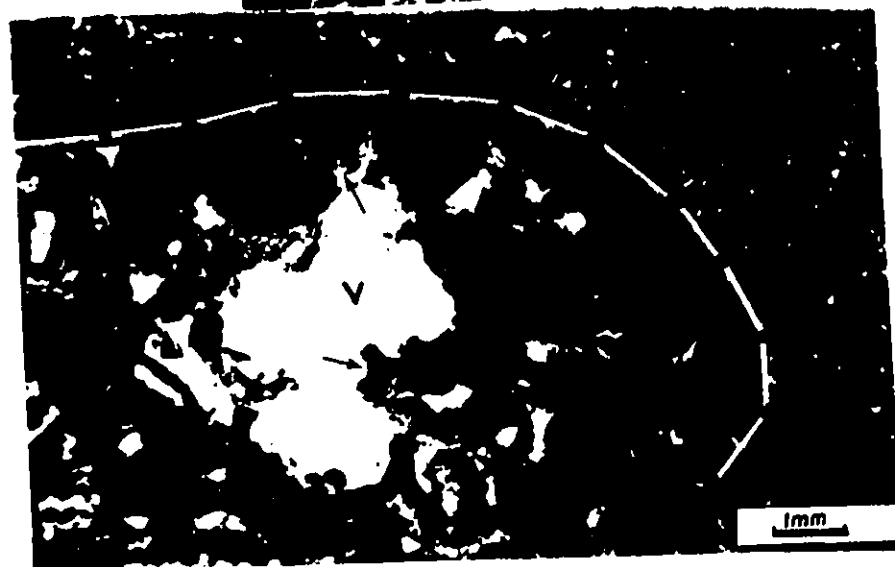
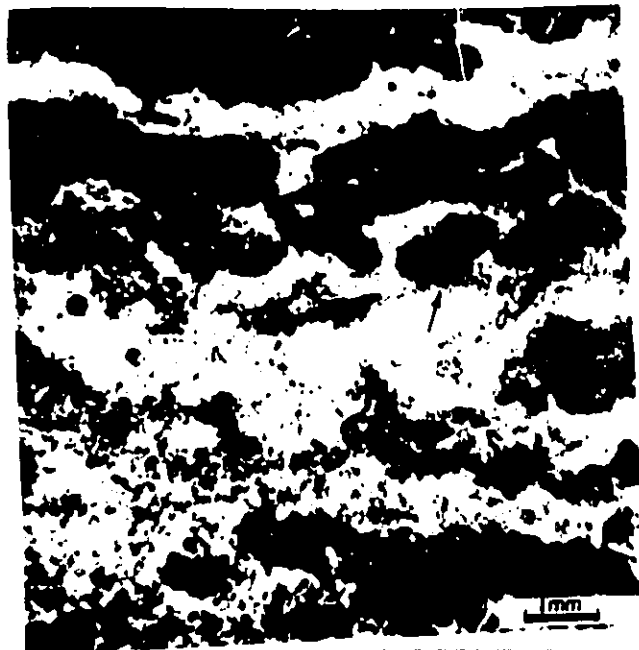


Figure no. 4.7. Photmicrographie illustrant la dissolution au sein de la croûte à Boumalne (Poste). On note la forme du galet (tirets) et la dissolution attaquant à la fois le galet et les oïdes (flèches). V indique le vide de dissolution.

des ooides (diamètre inférieur à 2 mm) ou des pisoides (diamètre supérieur à 2mm). Ceux-ci ne sont cependant pas de genèse locale car ils sont typiques des milieux marins. Ils sont d'origine externe (ils proviennent probablement du massif atlasique). Ils sont transférés individuellement par l'eau et déposés dans les lamines de la croûte au fur et à mesure qu'elles se forment (figure 4.6) ou encore transférés par des galets altérés sur place. Ces galets se reconnaissent par l'allure externe nettement arrondie (figure n° 4.7). Les lamines abondantes en pétrographie des croûtes sont d'épaisseur et de cristallinité variées. Certaines sont découpées indifféremment par des vides que nous attribuons à une dissolution postérieure. Il arrive que ces vides affectent un psoide qu'ils recoupent en deux parties distinctes. Des vides d'allure verticale ou subverticale s'élargissent progressivement à cause de la dissolution périodiquement active (figure n° 4.8). L'ondulation des lamines est caractéristique et la texture buissonnante tend à s'identifier localement. Ces formes buissonnantes d'influence biologique sont cependant moins grandes et peu développées comparativement à celles observées dans les travertins de Skoura ou ceux d'Ait Arbi, bien que leur hauteur est dans certains cas de l'ordre de 0.9mm. En tous cas elles rappellent en miniature les "shrubliques" décrites dans les travertins par Chafetz et Folk (1984). Des amas de cristaux micritiques à teinte noirâtre sont observables dans les microfaciès de ces croûtes. Il s'agit de pelloïdes révélateurs d'intense activité bactérienne dans le processus de précipitation de la calcite. Lucas *et al.* (1976) attribuent des formes semblables à la fossilisation de corps biologiques de la famille algale des characées. Harrison (1977, p. 33) quant à lui décrit dans les croûtes des Barbades, des formes en pelloïdes à grains micritiques résultant d'une diagenèse locale de squelettes biologiques ou de restes organiques algaires ou de macrovégétaux. En plus de cette composante biologique, les microfaciès de croûtes zonales étudiées dans la région de Boumalne (hôtel et lycée) montrent une abondance de matériel détritique sableux et argileux. La teinte rosâtre, la richesse en oxydes de fer et l'aspect picoté des grains de quartz en donnent la preuve. La croûte échantillonnée dans la tranchée d'adduction d'eau (ONEP) près du lycée à Boumalne montre des micrites

Figure no. 4.8. Elargissement des vides de dissolution (V) découpant les lamines calcitiques (en tirets).
Croûte de Boumalne (Hôtel).

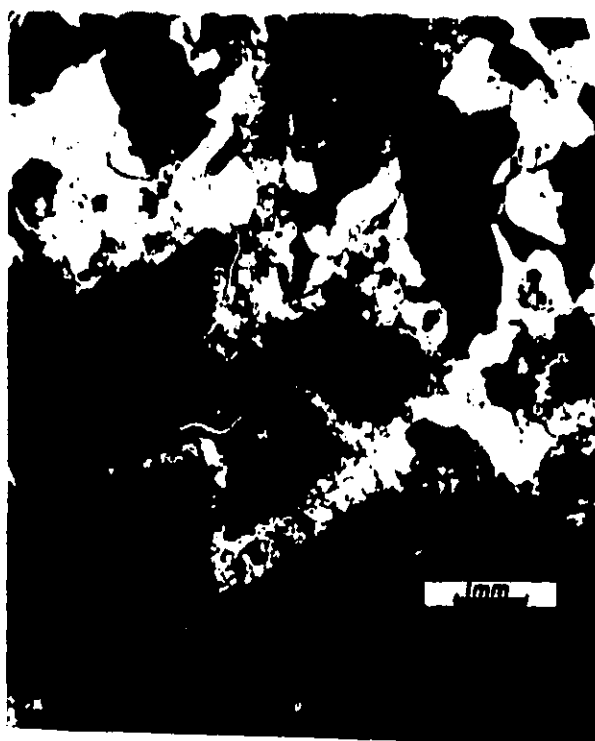
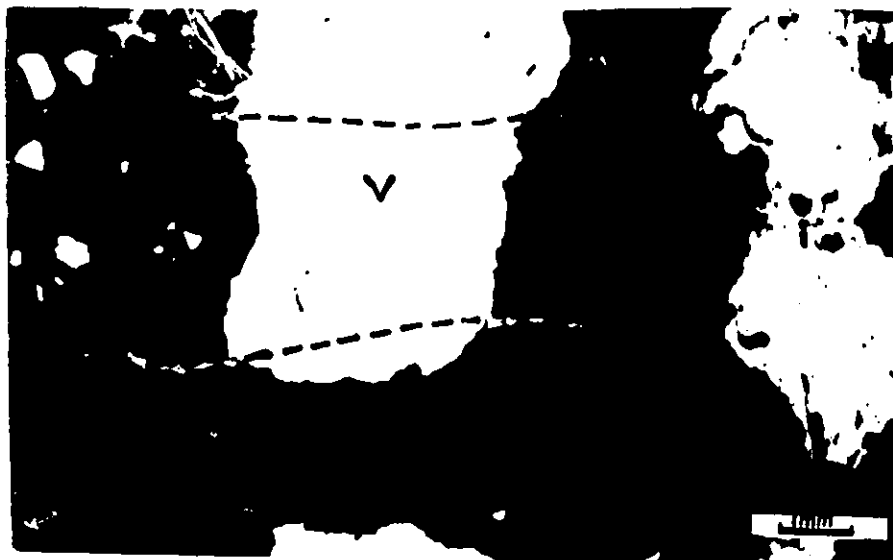


Figure no. 4.9. Photomicrographie montrant l'horizon détritique dans une croûte zonale à Boumalne (en noir) et la calcite sparitique en filons blancs. Genèse complexe: fissuration, dissolution et comblement.

sombres à travers tous le profil. Un réseau de filons calcitiques entassés révèle l'influence des pressions verticales qu'a subit le matériel. Les fissures entrecroisées sont comblées de calcite d'une seconde génération à cristallinité sparitique (figure n° 4.9).

Dans la croûte zonale d'El Goumt la partie indurée de surface montre des aspects pétrographiques similaires à ceux décrits à Boumaïne. Des feuillets bourrés de calcite et de matériel fin sont observables. Les cristaux sont à dominance micritiques mais des sparites s'observent le long des fissures. Ici encore on voit la preuve de la dissolution postérieure affectant certaines lamines. Des vides de dissolution naissent. Il ne s'agit pas de vides originaires ou structuraux de la croûte, mais bien des vides de dissolution, car ils traversent une ou plusieurs lamines dans des sens variés. Des pelloïdes à distribution irrégulière s'observent. Certaines lamines sont ondulées à une échelle microscopique. La longueur d'une ondulation de plusieurs feuillets calcitiques varie d'un millimètre à quelques centimètres. Des taches rousses détritiques sont abondantes. Les fissures traversant le profil sont comblées de calcite sparitique. Ces fissures peuvent être attribuées aux simples tensions internes exercées à l'intérieur du profil, ou à l'instabilité du matériel dans une position topographique assez inclinée comme celle qu'occupent les croûtes d'El Goumt.

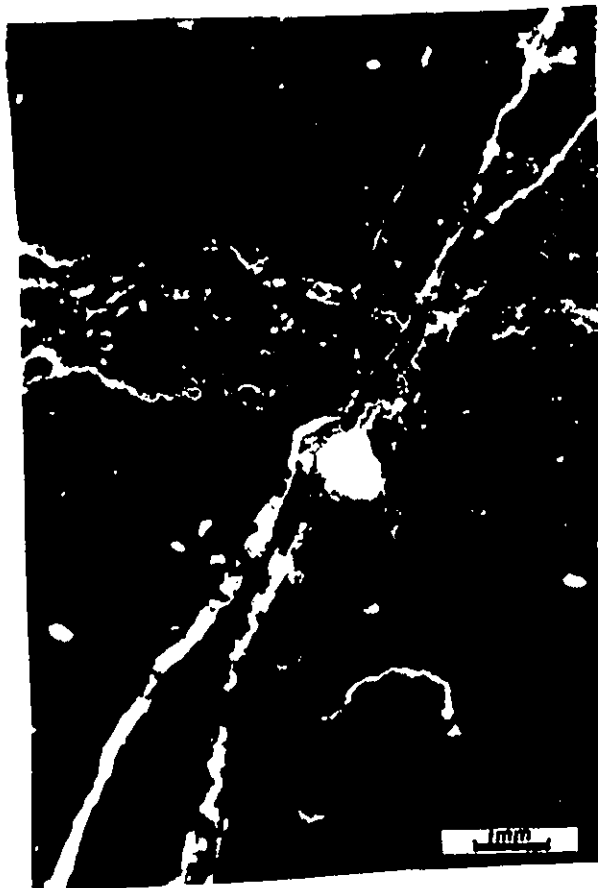
B -Discussion des résultats pétrographiques.

La précipitation de la micrite dans les croûtes a été attribuée aux processus multiples dans la littérature: l'évaporation activant la précipitation des carbonates dans la zone noyée saturée (Warren, 1983), l'apport intensif des carbonates par l'eau de pluie ou par les vents (James, 1972; Coudé-Gaussen et Rognon, 1988), les facteurs biogéniques considérés essentiels dans la formation de la micrite (Kobluk et Risk, 1977; Knox, 1977; Klappa, 1979; Weisrock, 1980; Chafetz et Folk, 1984; Chafetz, 1986; Jones et Motyka, 1987; Verrechia, 1987). Le modèle conceptuel que nous considérons applicable à la genèse des croûtes de la région étudiée s'inscrit dans une perspective d'interventions multiples et contemporaines. Nous avons en effet documenté d'abondantes traces biogéniques,

structures et formes bactériennes et algales. Ce qui est confirmé en géochimie isotopique par des concentrations correspondantes d'oxygène et du carbone (voir discussion des résultats isotopiques). La dissolution - précipitation de la calcite nous a livré des vides obliques ou presque verticaux et des ciments sparitiques secondaires d'une calcite de nouvelle génération. Des fissures dues aux tensions physiques ont été aussi comblées de calcite secondaire (figure n° 4.10). Ces tensions sont vives dans certains cas à cause du site ou du poids cumulé des croûtes. Des ondulations internes ont été décrites dans les croûtes anciennes. Elles sont typiques et anciennement connues dans la littérature (Price, 1925; Jennings et Sweeting, 1961). Watts (1977) décrit quatre types de déformations (ondulations) dans les croûtes sud-africaines. Le premier type se trouve à petite échelle (< 2mm de rayon) et est attribuable au développement horizontal du dépôt créant des volets de couverture inclinés et superposés. Le deuxième type est attribué à l'influence du substratum originellement ondulé, sur lequel la croûte se développe. Ce substratum influence le dépôt qu'il supporte par sa dynamique tectonique ou sa détente par exemple. Le troisième type est dû aux réarrangements des matières suite aux processus de la dissolution et de recristallisation à l'intérieur de la croûte. Des fissures et des pores internes orientent la précipitation de la calcite. Le quatrième type est appelé "faciès à anticlinaux diapiriques". Ces anticlinaux sont attribués à la dynamique des argiles constitutifs de certains horizons des croûtes. La consolidation et l'épaisseur des lamines calcitiques des croûtes de notre terrain éliminent l'apparition du dernier type. L'influence du substratum, de la dissolution - précipitation de la calcite et des tensions dynamiques des dépôts sont donc à retenir pour l'explication des ondulations observées dans les croûtes étudiées. La même disposition ondulée est signalée dans les croûtes du Maroc oriental (Laouina, 1987, p.434). Cet auteur rapporte que " la disposition ondulée est caractéristique d'une accumulation calcaire en subsurface, sur un modélé différencié. C'est aussi le résultat d'une pénétration au sein d'un matériel carbonaté et non d'un rajout de matériel carbonaté en surface sans lien avec le substrat récepteur".

Figure no. 4.10.

Croûte de Boumalne. Lamines fissurées et calcite de deuxième génération comblant la fissure subverticale.



Un autre mécanisme (discutable d'ailleurs) expliquant certaines ondulations microscopiques est suggéré par Bathurst (1975, p.234). D'après l'auteur, de telles ondulations apparaissent à cause de la diagenèse de transformation de l'aragonite en calcite. Ce mécanisme accroît de 8% le volume du matériel et crée une dynamique ondulante interne. La détermination aux rayons X du type cristallin constituant les croûtes étudiées montre l'absence de l'aragonite. Elle confirme dans tous les cas la dominance de la calcite. La question qui se pose est de savoir la part de celle-ci dans la phase initiale du développement du dépôt. Est-elle aussi abondante dès le début ou bien cet état résulte d'une transformation - néoformation de la calcite au détriment de l'aragonite? Nous ne possédons pas d'argument tangibles pour trancher. Mais il reste certain que des considérations spécifiques à l'aragonite permettent d'approcher le sujet. En effet, elle est très sensible à la dissolution. Elle est instable en milieu humide à température élevée. Elle se transforme directement en calcite. Elle s'élimine donc au profit de la calcite (Degens, 1965; Folk, 1972; Bathurst, 1975; Folk et Asserto, 1976; Bruni et Wenk, 1985; Given et Wilkinson, 1985; Budd, 1988). Les auteurs s'accordent à reconnaître que les processus de recristallisation - remplacement des cristaux induisent un changement de forme cristalline au cours de la diagenèse. Le minéral original (aragonite) est converti en unité cristalline nouvelle, aux dimensions et morphologie différentes. La diagenèse dont on a vu des indications pétrographiques et géochimiques semble dans notre cas évoluer dans le sens d'une transformation de l'aragonite en calcite, ou de la conservation de la calcite quand celle-ci est originelle. D'après Nahon *et al.* (1980), l'aragonite peut aussi apparaître dans un processus de néoformation traduisant les nourrissages les plus récents de l'encroûtement en carbonate du calcium. Mais aucune néoformation de ce type n'a été documentée dans les croûtes étudiées. L'aragonite éventuellement formée a dû être entièrement convertie à la suite des longs épisodes du Quaternaire. Un mécanisme déjà cité par Watts (1977, p.73) et rapporté par Laouina (1987) explique à notre avis certains types d'ondulations observées: l'alternance de solution, bréchification, recristallisation et recarbonatation des profils ou le remplissage des vides contribuent ensemble sous des conditions climatiques brutales, caractérisées par une

succession irrégulière de sécheresse et d'orages à rythme changeant, à la création de telles formes. Elles sont donc créées in-situ et illustrent les processus diagénétiques avancés dans la formation des croûtes (Blank et Tynes, 1965 p. 1390). Les produits minéraux des croûtes de Boumalne et d'El Goumt sont formés de carbonates allochènes, mais ils ont subi une évolution locale considérable.

Le matériel est issu des montagnes atlasiques. La présence de dépôts détritiques au sein des croûtes zonales étudiées et dans une situation d'alternance presque ordonnée avec les lamines calcitiques, marque l'importance des mécanismes sédimentaires dans cet environnement pédologique.

L'écoulement de surface véhicule saisonnièrement les particules sableuses ou argileuses issues de sols en formation ou de dépôts de versants. L'aspect luisant plus ou moins arrondi de certains grains de quartz incorporés à ces horizons est attribuable à ce déplacement par écoulement du matériel. La sédimentation, la pédogenèse et la diagénèse contribuent ensemble au développement des croûtes calcaires. D'autant plus que les environnements favorables à l'encroûtement sont, comme l'avait aussi remarqué Wright et al., (1988, p. 618) très variés. Ils rapportent ce qui suit:

"The wide range of facies association and paleoenvironmental settings inferred for their occurrences demonstrates conclusively that they are not unusual features developed only under particular conditions. They occur in a wide variety of settings including inter-channel, flood plain, marginal and ephemeral lake environments".

On suppose ainsi l'existence de mécanismes de passages d'un entassement à une dalle de croûte. Laouina (1987, p. 466) soulève les problèmes que ce passage peut poser, particulièrement au niveau de la coloration et de l'induration. D'après les observations que nous avons fait au Maroc méridional, la coloration à tendance saumon des croûtes se rapporte aux impuretés, oxydes de fer et de manganèse des horizons détritiques superficiels et internes aux dépôts. Ces éléments polluent nécessairement le dépôt et lui offrent une teinte rosâtre ou saumon. Laouina (1987, p.468) y voit le signe d'une réorganisation interne des carbonates et donc une chaîne d'altération, dissolution, précipitation de la calcite et identification des résidus.

L'induration quant à elle est un phénomène diagénétique du premier ordre. Elle a fait l'objet de deux

études récentes (Love et Chafetz, 1987; Dickinson, 1988). Dans les deux cas l'induration est considérée comme l'acheminement normal d'une évolution d'agglutination de cristaux calcitiques précipités. L'induration est accompagnée d'une cristallisation réduisant les pores et les vides d'une part et d'un assèchement temporaire ou saisonnier accélérant la cimentation des cristaux et des lamines d'une autre part. C'est donc la suite directe d'une séquence d'événements diagénétiques de cristallisation - cimentation des horizons. Une histoire de tensions et de pressions qui s'exercent sur le matériel en place pour le consolider est ainsi reflétée. Farres (1978) avait étudié ce processus en se basant sur un modèle expérimental. Il conclut qu'un remplissage fin s'observe à travers les pores inter-granulaires et entre les agrégats cristallins. L'incorporation de produits en surface sous forme d'un micropavement renforce l'homogénéité de la surface et développe ce que l'auteur appelle "équilibre de croûte"; c'est-à-dire le seuil après lequel celle-ci acquiert une résistance et stabilité relative. Elle peut ainsi protéger les horizons de base moins consolidés et peu résistants. Nous sommes enfin d'accord avec le modèle présenté par Verrechia (1987, p.182) qui considère la cimentation des croûtes comme un phénomène syngénétique ou diagénétique précoce. Ceci n'empêche pas une réorganisation des carbonates à la suite d'une évolution diagénétique.

Parmi les aspects pétrographiques notés dans les lames minces des croûtes zonaires d'El Goumt, une structure dans laquelle les cristaux de calcite prennent une forme en branches d'arbres. Des cristaux obliques s'accroissent entre eux suivant une organisation révélant un tronc principal et des branchements secondaires. Cette structure est donc dendritique. D'après Jones et Kahle (1985), elle indique un type d'encroûtement algaire. Dans leur plus simple forme, les cristaux s'accumulent sur une aiguille calcitique en branches secondaires ou tertiaires. Ils se développent par précipitation de la calcite entre les branches. L'incrustation de ce type se fait au vivant des algues, mais elle se poursuit après leur mort quand une série de conditions s'accomplissent. Celles-ci sont des conditions de la rapidité de la précipitation de la calcite comme la supersaturation hydrochimique, l'évaporation et l'abondance de carbonates. Toutes sont favorables dans le domaine étudié au moment des grands dallages de croûtes zonaires. C'est-à-dire au Quaternaire ancien.

Conclusion

En conclusion, nous pouvons rappeler certains phénomènes génétiques mis en évidence par l'analyse pétrographique:

- Le matériel carbonaté fondamental des croûtes est d'origine externe (apport des écoulements provenant de l'Atlas). La nature des grains de Quartz et la découverte de galets altérés à éléments biogènes typiquement marins sont par exemple des arguments de ce fait.
- La genèse des croûtes étudiées n'est pas continue. Elle se fait par moments et par étapes chronologiques à caractères distincts. Il en résulte une alternance de lamines (calcaire ou détritiques) et de faciès différents.
- L'influence des facteurs biologiques est importante. Des traces et formes typiques de ces facteurs ont été illustrées.
- La dissolution - reprécipitation de la calcite à la suite d'une évolution locale et diagenétique est confirmée. Plusieurs vides de dissolution et des ciments secondaires ont été reconnus.
- Le facteur du temps est essentiel dans la genèse des croûtes. La consolidation du matériel et l'apparition de nombreux phénomènes diagenétiques et structuraux au sein des croûtes en sont révélateurs.

L'analyse de la géochimie isotopique éclaire de nombreux aspects relatifs à ces idées et apporte une série d'enseignements utiles à la connaissance environnementale et génétique des croûtes.

-C -Géochimie isotopique: les données.

Les échantillons prélevés dans la dalle superficielle de la croûte zonale à Boumalne (près de l'hôtel et du lycée) montrent des teneurs en isotopes lourds homogènes (tableau no 4.1) et comprises entre -5 et -8 pour mille pour l'oxygène et le carbone. Il est remarquable de noter que les différences composition isotopique entre les lamines de faciès différents (sombres, blanchâtres et détritiques) sont faibles pour les deux éléments. Les valeurs observées sont comparables aux résultats d'analyse de croûtes à

Tableau no. 4.1

Teneurs isotopiques (en pour mille PDB) des croûtes calcaires de la région de Boumalne et d'El Kélaa.

Référence	Indications	Carbone 13	Oxygène 18
M89-1	Croûte El Goumt	-5.77	-6.09
M89-B	Tranchée ONEP	-7.73	-5.29
CBH-1	Hôtel lam. détr.	-4.97	-5.92
CBH-2	" " noir.	-6.85	-7.43
CBH-3	" " calc.	-5.79	-6.44
CBH-4	" " noir.	-5.79	-7.44
CBH-5	" " calc.	-6.63	-6.76

faciès semblables en Libye et à Chypre (Salomon *et al.*, 1978) ce qui laisse croire à une genèse et évolution voisine des carbonates.

Une comparaison des compositions isotopiques des croûtes ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ carbone inorganique total dissous C.I.T.D) avec celles des eaux de sources drainant les nappes aquifères laisse croire que les eaux qui présidèrent à la formation des croûtes ne se distinguent pas d'un point de vue isotopique de celles-ci.

Par contre, il est clair que les eaux de sources hydrothermales (Skoura) sont distinctes des eaux de nappes en carbone 13. Les premières sont bien supérieures. Elles atteignent + 5.66 pour mille en unité delta (source Tasbelbate).

Il en ressort que le "message" isotopique conféré par les croûtes n'est pas lié à ce système.

- Discussion des résultats isotopiques.

Les processus régissant les systèmes carbonatés sont comme l'indique la pétrographie observée par exemple dans nos échantillons n'autorisent pas des conclusions univoques à partir des données isotopiques. Il est probable que le "message" isotopique originel a subi des altérations au cours de la diagenèse et de l'évolution des croûtes calcaires.

Les teneurs en carbone 13 des croûtes révèlent cependant une source de carbone liée aux processus pédologiques à activité biologique dominante. Elles sont en effet inférieures à celles d'un équilibre avec le CO_2 atmosphérique (Dever *et al.*, 1983; Turi, 1986; Beier, 1987). L'abondance de traces pétrographiques attribuées à la biogenèse (bactérienne et algale) confirme cette interprétation géochimique.

En ce qui a trait aux teneurs en oxygène 18 on note un accroissement progressif vers le haut dans certains dépôts de croûtes laminées (figure 4.11). Ce gradient pouvant être dû à un effet d'évaporation vers la surface des sols, s'accompagnant d'un enrichissement en oxygène 18 de la phase aqueuse résiduelle. De façon similaire, les teneurs en carbone 13 indiquent un même gradient vers la surface qui peut rendre compte d'échanges isotopiques croissant avec le CO_2 atmosphérique. Celles-ci tendent en effet à amener

Figure n° : 4.11

Géochimie et structure d'une croûte
à Boumalne (hôtel Madayek)

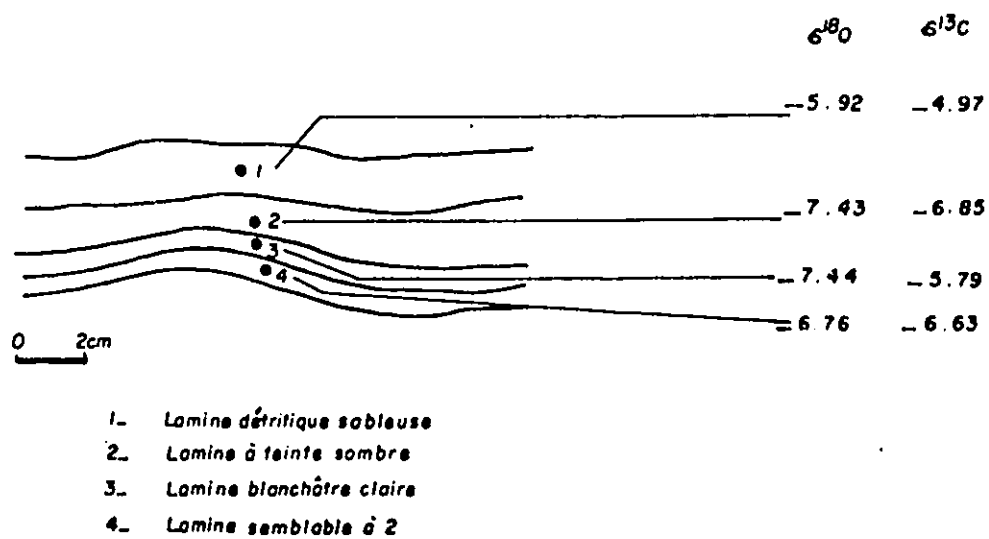
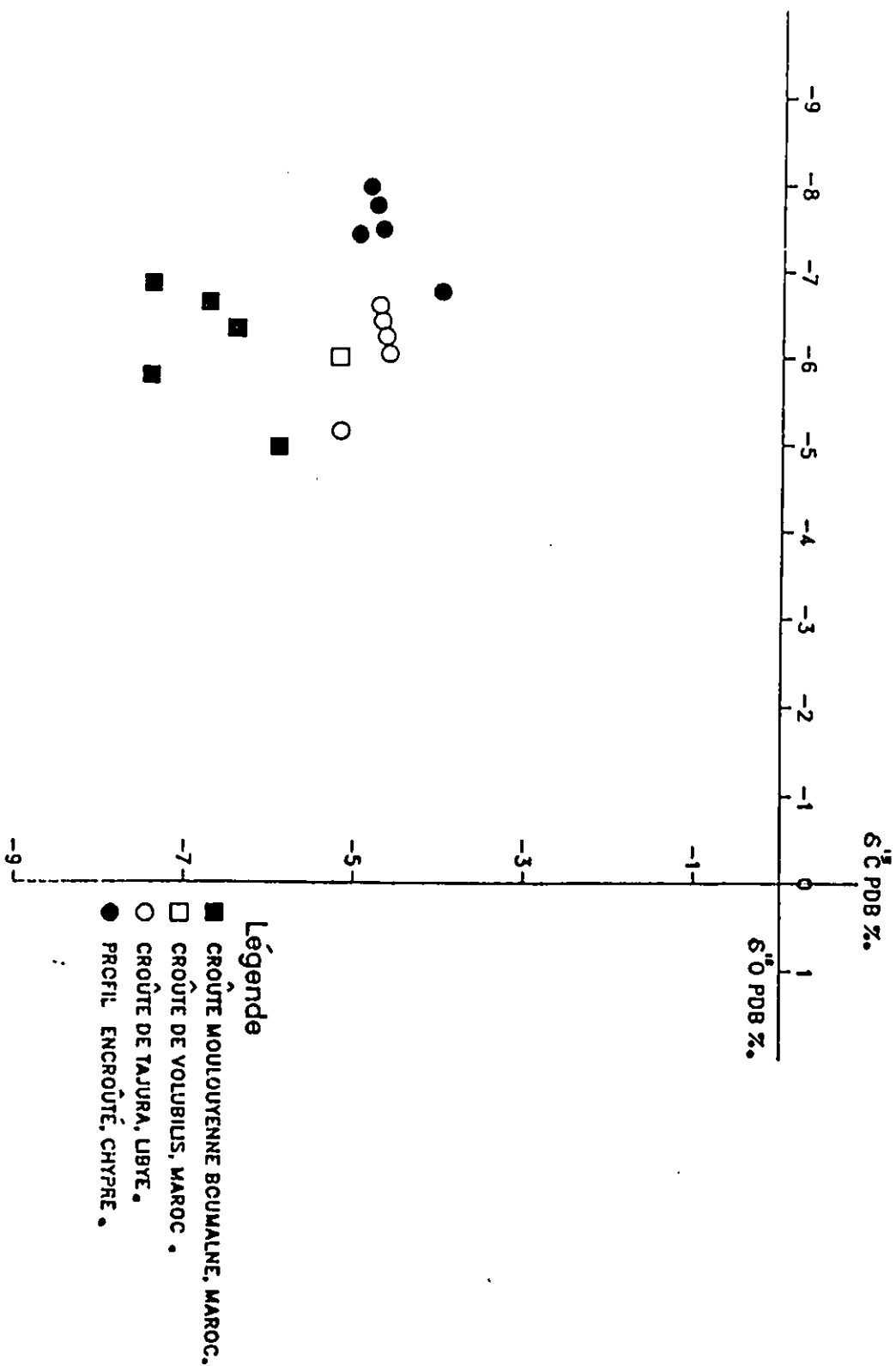


Figure 4.12. Teneurs isotopiques des croûtes à Boumdine, comparées aux données de Salomons et al. (1978).



la composition isotopique vers des valeurs positives (en delta PDB).

Nos résultats convergent avec ceux de Salomon *et al.*, 1978 (figure no. 4.12) montrant un rapprochement des compositions isotopiques et donc de processus génétiques.

Conclusion

La conclusion tirée de cette discussion est une genèse des croûtes assez complexe. Elles se sont développées dans un environnement d'humidité variante selon les saisons. L'activité pédologique et biologique y est notable.

3 - Influence du contexte morphologique global

Les critères morphologiques évoqués par Beaudet (1986) et par Laouina (1987) sont dans le présent domaine déterminants. La position des dépôts de croûte à Boumalne et à El Goumt correspond à une position de milieu à apports exogènes et énergie décroissante d'après une nomenclature proposée par Verrechia (1987, p.180). C'est-à-dire un milieu de glacis et de terrasses alluviales ou fluviales, où l'on trouve des éléments exogènes comme les galets ou les carbonates provenant du haut Atlas bordier. L'évolution *in-situ* des croûtes est soumise à des remaniements assez faibles dus à des écoulements en nappe qui sont spécifiques aux phases finales d'aplanissement. Ceux-ci sont responsables des horizons détritiques documentés en profil et dans les lames minces observées. La stabilité relative que connaît périodiquement ce milieu suffit pour déclencher des processus pédogéniques d'altération-dissolution, reprécipitation et de diagenèse ainsi que les processus de fixation de la calcite par effet biologique. Les oxydes, matières végétales et traces de bactéries filamenteuses sont décrites en pétrographie. La stratification séquentielle observée est liée à la genèse polycyclique qu'impose le changement de l'environnement (conditions climatiques, hydrologiques et biologiques). Les carbonates concentrés dans les croûtes y sont parvenus en général par transport superficiel. Le mode de ce transport est variable. Il se fait par voie éolienne et aqueuse. Dans certaines régions à climat comparable, le transport

éolien est prouvé (Reeves, 1970; James, 1972; Read, 1974; Knox, 1977; Al-Sulaimi, 1988; Coudé-Gaussen et Rognon, 1988). Au Maroc, ce type de transport des carbonates a été également évoqué par Laouina (1983, p.82) en discutant la composition de certaines fractions détritiques des accumulations superficielles de la région d'Oujda. Le rôle du vent est vraisemblablement actif au Maroc méridional. Les arguments tels que le picotage de certains grains de quartz et l'abondance des poussières éoliennes attestent de l'importance de ce rôle. Les carbonates déplacés en phase dissoute et par suspension alimentent à la fois les lamines détritiques et les lamines construites des croûtes. Les spécificités locales du milieu et la saisonnalité climatique sont déterminantes pour le développement des profils (accumulation: précipitation physico-chimique ou biologique, évaporation, décantation et cimentation vadose ou phréatique, altération et pédogenèse locale, remaniements saisonniers des résidus). La formation des profils étudiés suit ainsi une évolution polycyclique à rythme nuancé. Elle est plus ou moins rapide selon l'opportunité circonstancielle du milieu local et régional. L'évolution est parfois bloquée, voire même négative en cas d'érosion ou de remaniements tels que ceux signalés dans les horizons détritiques. Le matériel détritique à la surface des croûtes est très variable en épaisseur selon la topographie locale. Il ne dépasse pas cinquante centimètres en aucun cas. La règle est que la croûte affleure en surface. La question qui se pose est celle des liens de la croûte au matériel détritique qu'elle supporte parfois. La littérature apporte deux hypothèses explicatives. La première est classique. Elle suggère la formation du matériel sur place (Blank et Tynes, 1965). Le matériel détritique est considéré comme le résultat de l'altération in-situ des calcaires. C'est donc une sorte de terra-rosa ou résidu d'altération connu dans les régions méditerranéennes. La deuxième hypothèse admet l'importance des apports superficiels et insiste moins sur les liens verticaux. Dans le cas des Bessara (carrière de la Benterie du Maroc oriental) Laouina (1987) s'incline à cette hypothèse.

Dans les croûtes étudiées à Boumaine, une rupture verticale s'individualise au contact du dépôt de la surface avec la croûte. Celle-ci se termine souvent par un dallage en pellicules minces, parfois démantelées, mais structurellement attribuables à la croûte basale. Ceci milite à la faveur de l'appartenance des horizons meubles de la surface à l'ensemble sédimentaire provenant des amonts

bordiers, en l'occurrence des chaînes de l'Atlas. L'altération et la pédogenèse observées sont centrées au sein des profils et de façon moindre en surface, car l'humidité y est aussi moindre sous un climat semi-aride.

Elles ne peuvent en aucun cas produire en surface un tel matériel parfois volumineux, qui est en définitive originaire d'apports externes. Après Erhart (1967), et Verrechia (1987, p.187) nous pouvons donc appliquer le modèle d'équilibre biostasique à la genèse des croûtes, tout en considérant le problème d'échelle temporelle. Ce modèle s'étale aux périodes géologiques, alors que la genèse des croûtes nécessite une durée relativement restreinte. Dans cette théorie appelée de biostasie-rhexistasie, les événements se suivent en fonction de l'équilibre environnemental et climatique. Une phase d'érosion / sédimentation expliquerait l'apport d'éléments détritiques, le remaniement du matériel et l'érosion que la croûte subit. Tandis que la phase de l'équilibre environnemental serait plutôt favorable à la biogenèse et aux transports et accumulations chimiques de calcite plus ou moins pure. Des horizons riches en faciès noduleux, pelletiques et biologiques se forment.

Dans les deux phases, le profil de croûte est en édification continue et le mode d'accrétion par microséquences s'avère aussi valable. L'application du modèle "biostasie-rhexistasie" d'Erhart à la genèse des croûtes impose cependant la rectification essentielle d'échelle temporelle. Erhart l'a voulue révélatrice des phénomènes à l'échelle géologique. Les données géomorphologiques et analytiques à notre disposition montrent l'appartenance des dépôts de surface de glaciis d'Anbed à Boumalne et d'El Goumt au Quaternaire ancien. L'alternance des faciès internes (calcitiques détritiques etc...) reflète une évolution nuancée suivant le modèle d'Erhart, mais à une échelle réduite, au sein du Quaternaire ancien.

Les dépôts encroûtés du Quaternaire moyen (sur les versants et les terrasses) montrent également une évolution séquentielle et polycyclique du même aspect, mais moins développée. Les lamines sont moins épaisses et peu régulières, en raison du changement climatique montrant une diminution d'humidité et une irrégularité croissante au cours du Quaternaire. En effet, nous interprétons l'épaisseur des lamines carbonatées comme révélatrice d'une humidité abondante et sa diminution serait donc liée à un assèchement progressif. Elles correspondraient à la fin des périodes humides connaissant une stabilité

environnementale (végétale et érosive) sans excès d'humidité ni de sécheresse. Ceci se conçoit au sein d'une évolution annuelle ou pluri-annuelle. Une période assez longue connaîtrait son maximum d'édification carbonatée à la fin des épisodes humides. La genèse de véritables croûtes nécessite cependant l'intervention de paramètres consolidants, altérants et équilibrants les composantes des profils.

Conclusion

L'encroûtement calcaire est un processus complexe de formation de dépôts superficiels. Il est actif dans le domaine étudié depuis les temps anciens du Quaternaire. Les faciès sont variés mais ceux dont l'expansion est importante remontent au Moulouyen (Quaternaire ancien). Un affaiblissement notable et progressif du phénomène s'observe en liaison avec des conditions climatiques tendant à l'assèchement et à l'irrégularité.

Chapitre V

Les travertins d'eau douce au Dadès et au M'goun.

Un équilibre autrefois atteint.

Plusieurs jalons de dépôts anciens et récents se trouvent à des altitudes variées au Dadès et au M'goun. Ils sont significatifs par leurs faciès et leurs positions géomorphologiques. Ils renseignent à la fois sur l'hydrosystème ayant commandé leur genèse et servent d'indicateurs géomorphologiques précisant certains aspects du creusement des vallées et le degré de stabilité des versants sur lesquels ils s'inscrivent.

Les dépôts travertineux et les relations géographiques qu'ils ont vis-à-vis des terrasses fluviales quaternaires permettent une simple chronologie spatio - temporelle et contribuent à clarifier la dimension historique du phénomène d'encroûtement au Dadès dans un environnement autrefois favorable, ou encore actuellement favorable dans certains sites.

Nous proposons d'abord une présentation des dépôts travertineux dans leur cadre morphostructural global. Les résultats de traitements pétrographiques et géochimiques effectués seront exposés avant de discuter leur interprétation génétique dans une autre étape de l'analyse.

1-Présentation des dépôts (figure n° 5.1).

Au Dadès, deux principaux dépôts de travertins s'observent aux alentours de Boumalne. Ils se situent dans le faisceau crétacé-éocène de la zone sub-atlasique. Le premier est au vallon synclinal de Taltfraout, et le second se trouve à Ait Arbi à l'embouchure du vallon de la rive gauche du Dadès, au nord-est de ce village. Au M'goun, l'unique important dépôt se trouve en amont, dans le secteur liasique axial. Il se situe près de la source dite "Ifesfas".

Figure no. 5.1. Photographie aérienne de la région d'Ait Arbi. Echelle 1:50000. Les flèches indiquent les sites de travertins. 1-Ait Arbi, vallon affluent. 2-Ait Arbi (récent). 3-Taltfraout.



A-Les travertins d'Ait Arbi au Dadès (1-2 dans la figure 5.1).

Dans le pourtour du village d'Ait Arbi on trouve des dépôts révélateurs d'une dynamique hydrologique et structurale changeante. Le dit village se trouve à environ 10 kilomètres en amont de Boumalne, sur la route de M'semrlr. Deux grands dépôts accrochés aux versants sont étudiés dans cette région. Le premier se localise sur le versant droit du vallon débouchant sur le Dadès à Ait Arbi. Le second se situe sur le versant gauche de la vallée du Dadès, près de la source Asfazate.

1- Le travertin situé au vallon affluent d' Ait Arbi.

On l'observe à une distance d'environ six cents mètres de la confluence avec le Dadès, sur le versant droit du vallon à une altitude absolue de 1650 mètres. Ce travertin est massif. Il se présente en cascade majeure perchée et non fonctionnelle. Il subit un démantèlement évident à cause de l'instabilité du versant causée par l'encassement du ravin. Plusieurs de ses blocs de dimension métrique se trouvent en aval, à quelques centaines de mètres. Ils se sont déplacés par les crues saisonnières du vallon. Le reste du dépôt montre une coupe assez complexe. Elle est puissante d'environ dix mètres sur la paroi externe (figure n° 5.2). Son épaisseur se rétrécit à l'intérieur où elle n'est plus que d'un mètre en amont. Ceci se rattache à la structure en cascade de l'édifice. La partie frontale est formée de couches verticales ou inclinées épaisses, tandis qu'en amont les couches sont subhorizontales et relativement minces. Une terrasse fluviale s'étend à sa base. Elle est conglomératique, consolidée et domine le fond du vallon de dix mètres.

L'édifice travertineux est dans la classification de Weisrock (1981, p. 187) attribuable au type construit de source.

La cascade frontale est entièrement démolie, mais la construction du dépôt s'observe en amont dans la partie restante. A une échelle mégascopique, on voit des couches subhorizontales d'épaisseur variable entre 0.30 et 0.60 mètres. Celles-ci sont des couches calcitiques consolidées, riches en galets calcaires et en faux galets. Les couches médianes montrent une abondance de formes attribuables à un

Figure no. 5.2. Travertin ancien d'Ait Arbi (fond du vallon). Il est épais d'environ huit mètres sur sa paroi frontale démantelée.

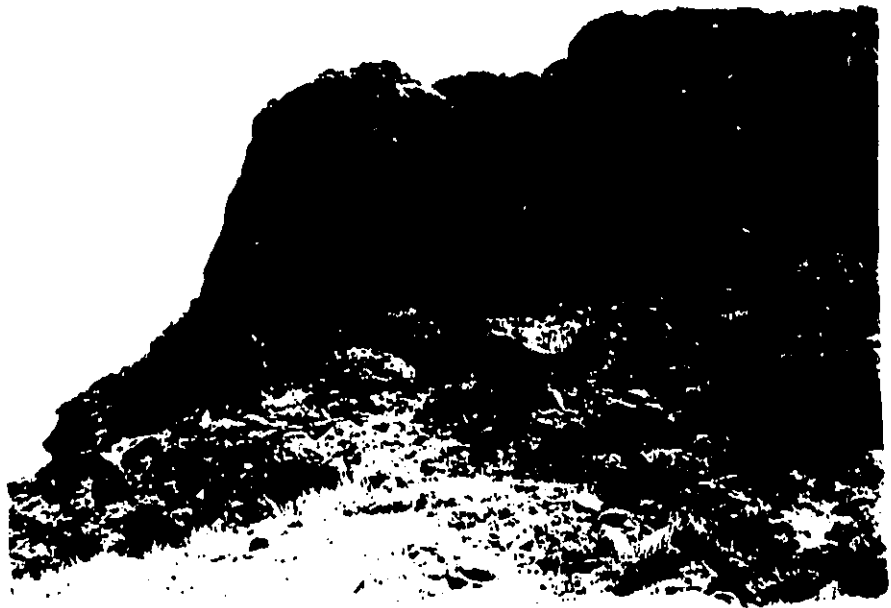


Figure no. 5.3. Travertin de Taltfraout. Echelle 2m. Sa position au fond du vallon indique un âge relativement récent (rharbien).

couvert végétal assez dense. Des branches d'arbres et des roseaux bien conservés par la calcite se reconnaissent encore.

Les intercalations ou joints de stratification sont considérables entre les couches travertineuses. Ceux-ci atteignent parfois une hauteur de 0.50 mètre et constituent des abris sous roches majeures. A l'intérieur, ces abris sont formés d'un matériel poreux blanc et peu résistant. Une fissure au sein du conglomérat mio-pliocène de base se trouve bourrée de travertins laminaires verticaux. Il s'agit de pellicules moulant les parois du conglomérat.

En somme, ce profil montre trois principaux faciès:

-1- un faciès poreux détritique; peut être l'équivalent du faciès détritique de Geurts, (1976) avec une différence qu'est la consolidation du faciès d'Ait Arbi.

-2- Un faciès construit, autour des branches et des restes végétaux; peut être l'équivalent du faciès cohérent de cascade de Geurts (1976).

-3- Un faciès poudreux de moulage des cascades et de leur abords, rappelant ce que Martin (1977) appelle "tuf de moulage". La source edificatrice de ce travertin est tarie. La nappe aquifère qui l'alimentait s'est abaissée de plusieurs mètres, et ce à cause de deux facteurs géomorphologiques décisifs:

- l'abaissement global des fonds de vallées (le Dadès et ses affluents) suite à une érosion verticale postérieure à la formation des travertins. Cet abaissement s'évalue à environ 8 mètres si l'on prend comme référence le conglomérat de la terrasse consolidée à la base du travertin. En effet ce conglomérat occupe un fond ancien sur lequel vient se superposer le travertin. Les deux termes stratigraphiques sont incisés par l'érosion postérieure et le conglomérat domine le fond actuel du ravin d'environ 8m.

Le travertin peut par analogie être attribué au Quaternaire moyen. Il s'en déduit que le niveau piézométrique global a connu un abaissement généralisé au niveau régional.

- Le deuxième facteur est d'ordre local. L'observation du paysage géomorphologique local (figure n° 5.1) permet de voir l'isolement du lambeau conglomératique supportant le travertin. Il forme une colline

ou interfluve entourée partout de vallons et ravins. Ce découpage encadrant le site capture toute alimentation en eau provenant de l'est ou du nord.

La conclusion est que ce travertin inactif est un dépôt relativement ancien, contrairement au dépôt fonctionnel près de la source Asfazate. Les datations à l'Uranium / Thorium obtenues sur l'échantillon M89-15 (annexe 8) varient entre 130 ka et 142 ka BP. Cette dernière valeur peut être légèrement vieillie comme noté au laboratoire.

ii- Le travertin fonctionnel d'Ait Arbi

Il est directement relié à la source Asfazate, sur le versant gauche de la vallée du Dadès. Il s'élève à environ 1610 mètres (soit à environ 40 mètres plus bas que le dépôt du vallon affluent). Sur les parois à pente forte du versant, l'écoulement des eaux est par endroit concentré en jets assez forts. Mais dans la plupart des cas, c'est un écoulement lent, diffus ou même suintant qu'on observe sur le versant. Un tapis vert d'algues et de mousses couvre le substratum et active les processus de précipitation de la calcite. Ce couvert végétal amorce l'encroûtement des gangues calcaires parfois disposées en dômes de vingt à trente centimètres de hauteur. Ceux-ci entravent le ruissellement et contribuent localement au partage des eaux en minces filets. Ils servent aussi d'obstacles créant des petits lacs larges d'environ un mètre sans profondeur notable.

Des mini-cascades apparaissent le long du parcours. Il en résulte que les eaux s'exposent à l'ensoleillement et à l'évaporation.

Cette disposition favorable à la précipitation physico-chimique de la calcite associe l'action biologique pour la formation des travertins contemporains. Ces travertins sont d'épaisseur variable à partir de la dimension pelliculaire à l'échelle métrique selon les endroits. Ils rappellent dans certains endroits les dépôts décrits dans la littérature (Symoens, 1949; Weisrock, 1981). Le matériel précipité est souvent grumeleux. Il associe des débris de végétaux aux sables et aux galets. Il résulte en fait d'un équilibre complexe entre les phénomènes de précipitation, remaniement par les eaux et fixation biologique des carbonates. L'écoulement des eaux de la source n'est pas pérenne. Elle est souvent tarie en été. Cette saison contribue donc moins à la formation du travertin. La brutalité des pluies et les crues de l'hiver

ne sont pas favorables ni au développement ni même à la stabilité du travertin. Nos observations répétées sur le terrain montrent que la fin du printemps marque l'optimum de l'édification, en raison de ses caractéristiques hydro-climatiques et de son environnement biologique en plein épanouissement.

La source est suspendue à environ 20 mètres au dessus du lit de l'oued et le versant entre la source et l'oued est couvert de travertin détritique, peu ou pas consolidé.

Ce travertin est un travertin récent pouvant remonter au dernier épisode humide du Quaternaire (Rharbien), mais sa formation se poursuit jusqu'à présent bien qu'à un rythme moins régulier. L'environnement biologique et hydrologique actuel donne des preuves d'une telle genèse saisonnière et irrégulière.

B- Le travertin de Taltfraout au Dadès (no. 3 dans la figure 5.1; figure no. 5.3).

Il se trouve à environ six kilomètres de Boumalne, dans un affluent de la rive droite (Taltfraout). Cet affluent atteint le Dadès près de Dar El Glaoui (ancienne résidence du gouverneur local au temps du protectorat français). A l'entrée du synclinal éocène, on trouve déjà certains blocs métriques de travertins indurés qui sont arrachés au dépôt principal par les crues du ravin. Le dépôt lui même se trouve sur le coté droit de la piste menant à Boutaghrar (au M'goun). L'altitude du site est de 1600 mètres. Il est distant de Dar El Glaoui d'environ cinq cents mètres. Il s'étend sur la partie presque plane au milieu du synclinal. C'est un épandage travertineux local sur le niveau topographique moyen. Ce niveau domine l'actuel ravin d'environ dix mètres. Le faciès de ce travertin rappelle celui du travertin décrit dans le vallon affluent à Ait Arbi. Il comprend deux parties: sub- horizontale et sub-verticale. La première est bien laminée et la deuxième se compose de draperies et de couches sub-verticales mêlées aux végétaux très abondants. La trace d'un tronc d'arbre dépassant quinze centimètres de diamètre a été observée à la base du travertin. Il évoque un environnement humide et suffisamment durable pour permettre le développement du couvert végétal arboré. Ce travertin se distingue de celui d'Ait Arbi (situé à l'intérieur du vallon) par un démantèlement plus accentué (en raison de sa moindre épaisseur et probablement aussi

à cause de la fragilité du substratum argileux - marneux éocène). Les deux parties du travertin sont presque isolées l'une de l'autre.

Ce travertin est inactif et fort démantelé. Il est assez âgé puisque il est antérieur à la phase de creusement du vallon actuel. La datation à l'Uranium / Thorium effectuée sur l'échantillon M89-12 (annexe 8) attribue à cette formation un âge d'environ 9 à 13 ka BP. D'après une remarque faite au laboratoire, la haute teneur en Th 232 suggère que les âges ne sont pas très fiables. Mais on peut admettre cette attribution car certaines similarités de faciès et de position morphologique sont notées en comparaison avec la partie ancienne du travertin fonctionnel depuis l'Holocène à Ait Arbi. Cette période est donc favorable à la précipitation des travertins à une échelle spatiale assez large. La poursuite de la précipitation des carbonates n'est cependant pas actuellement en cours sauf dans les sites hydrogéologiquement favorables. Ceci n'est pas le cas à Taltfraout où les nappes aquifères sont très pauvres et peu alimentées en eaux.

C- Les travertins du haut M'goun: Ifesfas (figure n° 5.4).

Au nord d'Ait Mraou, le M'goun occupe un canyon fortement encaissé dans les calcaires secondaires massifs. A une vingtaine de kilomètres environ d'Ait Mraou, et en amont du douar dit Tighanimine, se trouve un dépôt spectaculaire. Il s'agit du travertin d'Ifesfas, près de la source principale portant le même nom au haut M'goun avant d'accéder au secteur d'Ouzighimt. Ce travertin est un dépôt à deux faciès. Le plus développé se trouve en aval du site et se présente en cascade spectaculaire d'environ dix mètres de hauteur. Des draperies superposées de calcite sont subverticales sur le versant. Les couches de la surface sont subhorizontales et donnent un replat topographique dont la superficie dépasse cent mètres carrés. Ce travertin est en général inactif malgré des suintements faibles qu'il connaît en périodes humides. Le second faciès est par contre en cours de formation. C'est un dépôt calcitique noirâtre qui apparaît en amont de la cascade précédente. La source qui le génère se trouve sur le versant gauche de la vallée à environ vingt mètres du lit actuel. Le dépôt n'est épais qu'au pied du versant où il

Figure no. 5.4. Travertin en cascade d'Ifesfas au haut M'goun.



atteint 1.5 mètre d'épaisseur. Ceci est dû aux nombreuses chutes facilitant le dégazage du gaz carbonique et la saturation progressive des eaux.

En aval du site d'Ilesfas, les encroûtements observés dans le M'goun se limitent aux minces pellicules calcitiques entourant les galets en été. C'est un couvert algo-bactérien de couleur jaunâtre à beige qui apparaît à la fin du printemps et en été. La turbulence du M'goun causant une turbidité presque pérenne de ses eaux ne permet pas un accroissement de ces pellicules. Elles sont par contre facilement détruites. La limpidité des eaux qui leur est nécessaire ne dure que peu de jours entre les orages.

A mi-chemin entre Ait Mraou et Ilesfas, près du douar Aguerzga, on peut voir des lambeaux de travertins sur le versant. Ceux d'Ilesfas restent cependant les principaux travertins du M'goun. Ce sont eux qui ont fait l'objet d'un échantillonnage et des analyses pétrographiques et géochimiques dont on discutera la signification par la suite.

2-Présentation des résultats d'analyses de laboratoire.

A-Pétrographie.

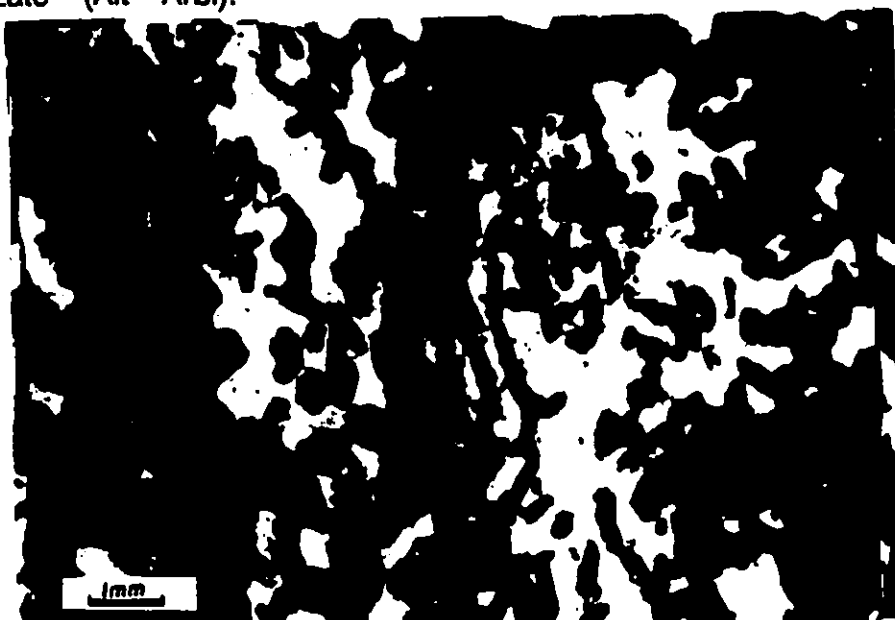
Plusieurs analyses pétrographiques ont été effectuées dans le but de caractériser la micromorphologie des dépôts étudiés. La description micromorphologique est une étape fondamentale de l'étude génétique des dépôts superficiels (Brewer, 1972; Bullock, 1985). Les travertins étudiés ont fait l'objet d'un échantillonnage généralisé. Les lames minces taillées sur les travertins du M'goun et du Dadès sont au nombre de 30. Elles sont riches d'enseignements sur les composantes du matériel et les microstructures primaires et diagénétiques.

Les deux générations de dépôts à Ait Arbi montrent en lames minces une différence de faciès. Le travertin situé à l'intérieur du vallon est riche en laminations internes dues aux ciments de comblement des vides. Ce sont des ciments secondaires précipités à la suite d'une évolution assez longue et très



Figure n° 5.5
Photomicrographie montrant les ondulations laminées dans les travertins d'Asfazate (Ait Arbi).

Figure n° 5.6
Photomicrographie montrant l'aspect biologique des travertins fonctionnels, Asfazate (Ait Arbi).



différenciée selon les saisons pour permettre l'apparition des lamines reflétant ces nuances. Leur alternance suit le rythme des variations temporelles des conditions hydrologiques, climatiques et biologiques. La matière organique est abondante dans les lamines noirâtres. Leur épaisseur varie de 0.3 à 1 millimètre. Ces lamines s'alternent avec les lamines blanchâtres calcitiques. Dans les deux cas, les cristaux sont micritiques. La structure laminée comporte cependant des vides internes en voie de comblement: ce sont ces vides séparant entre elles les ondulations qui sont à la fois des unités pétrographiques laminées (figure n° 5.5). Les vides ont une disposition verticale par rapport aux ondulations laminées.

Le travertin fonctionnel près de la source Asfazate montre en lames minces un réseau apparemment algaire ou de mousse (figure n° 5.6). Les filaments enchevêtrés sont indurés de calcite. Les vides qu'ils engendrent donnent au dépôt l'aspect spongieux qui le caractérise. C'est un travertin que l'on peut attribuer aux types de dépôts à algues et mousses dans la classification de Viles et Goudie (1990).

Enfin, le long du ruisseau issu de la source Asfazate, certains galets montrent des pellicules de calcite micritique (figure n° 5.7). Celles-ci sont actuelles et montrent une richesse organique notable.

Les microstructures observées dans les travertins de Taltfraout sont bien laminées et se composent de cristaux variés. Certaines lamines sont micritiques d'autres sont sparitiques et montrent des indices de diagenèse. Chaque couplet de lamines comporte deux zones différentes: on y distingue une zone poreuse, sombre, micritique et riche de bâtonnets algaires évidents, tandis qu'une deuxième zone est plus ordonnée et comporte un noyau sombre à la base, sur lequel se développe une sparite à la fois radiaxiale et laminée (figure n° 5.8). Cette dernière est apparemment plus affectée par la diagenèse générant à la fois des cristaux sparitiques et une structure radiaxiale. Ces structures rappellent celles que Ford (1989, p. 42) attribue aux processus de recristallisation et de néomorphisme.

Les lames minces taillées dans les travertins du M'goun montrent une similitude aux dépôts d'Ait Arbi. L'échantillon prélevé dans le travertin à mousses et algues consolidant l'éboulis du versant à

Galet Calcaire (a) à pellicule de calcite externe (b)

Lame mince (lumière polarisée)

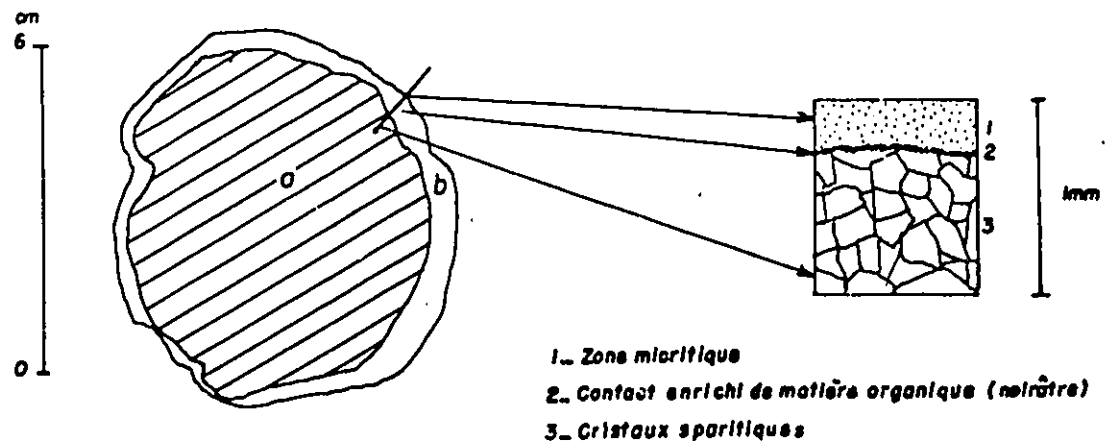
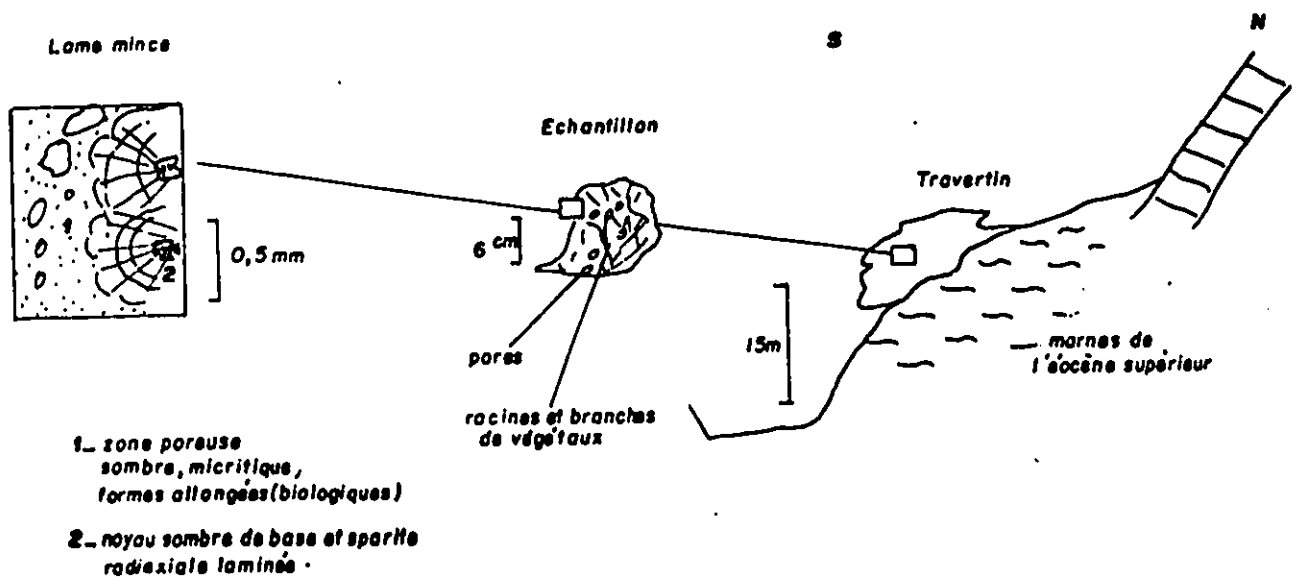


Figure n° 5.7

Pétrographie d'un galet couvert de calcite actuelle
(Prélevé dans le cour d'eau provenant de la source
d'Asfazat à Aït Arbi, Dadès)

Figure n° 5.8

Les Travertins de Taltfraout (Dadès)



Ifesfas est micritique et très homogène. Des lamines d'épaisseur parfois millimétriques forment des ondulations d'accrétion calcitiques. Des filaments sombres indurés s'observent à travers les lames. Plusieurs vides en voie de comblement par la calcite subsistent. Des produits de couleur rousse, oxydés sont piégés à l'intérieur du travertin. Qu'ils soient d'origine détritique ou provenant d'une altération sur place, ces produits indiquent des discontinuités dans la genèse du travertin. Le dépôt de cascade en aval d'Ifesfas est poreux, filamenteux et micritique dans son ensemble. Des pelloïdes noirâtres y sont abondants (figure n° 5.9 et figure n° 5.10).

A travers cette description, nous pouvons souligner deux aspects pétrographiques évidents:

-Les dépôts se différencient entre eux au niveau de l'homogénéité et de la densité globale. Certains sont fortement cimentés et moins poreux; tandis que d'autres présentent une texture clairement spongieuse. Les formes biologiques sont dans ce dernier cas abondantes et parfois intactes, ce qui indique leur jeunesse et confirme l'actualité de leur genèse. C'est le cas des dépôts observés aux sources, à Ait Arbi et à Ifesfas.

-La diagenèse assez avancée dans les autres dépôts apporte un argument quant à leur âge remontant au-delà de l'Holocène et dans certains cas au Quaternaire moyen. Les traces biogéniques s'effacent, les textures à dominance sparitique apparaissent et une structure radiaxiale se dessine dans certains cas comme à Taltfraout ou à Ait Arbi (travertin ancien à l'intérieur du vallon affluent).

Ces observations pétrographiques accusant une différence de faciès entre les dépôts travertineux étudiés concordent avec les hypothèses fondées sur la morphologie globale et sont appuyées par les résultats des analyses isotopiques.

Figure no. 5.9. Laminations micritiques noirâtres de la matière organique.

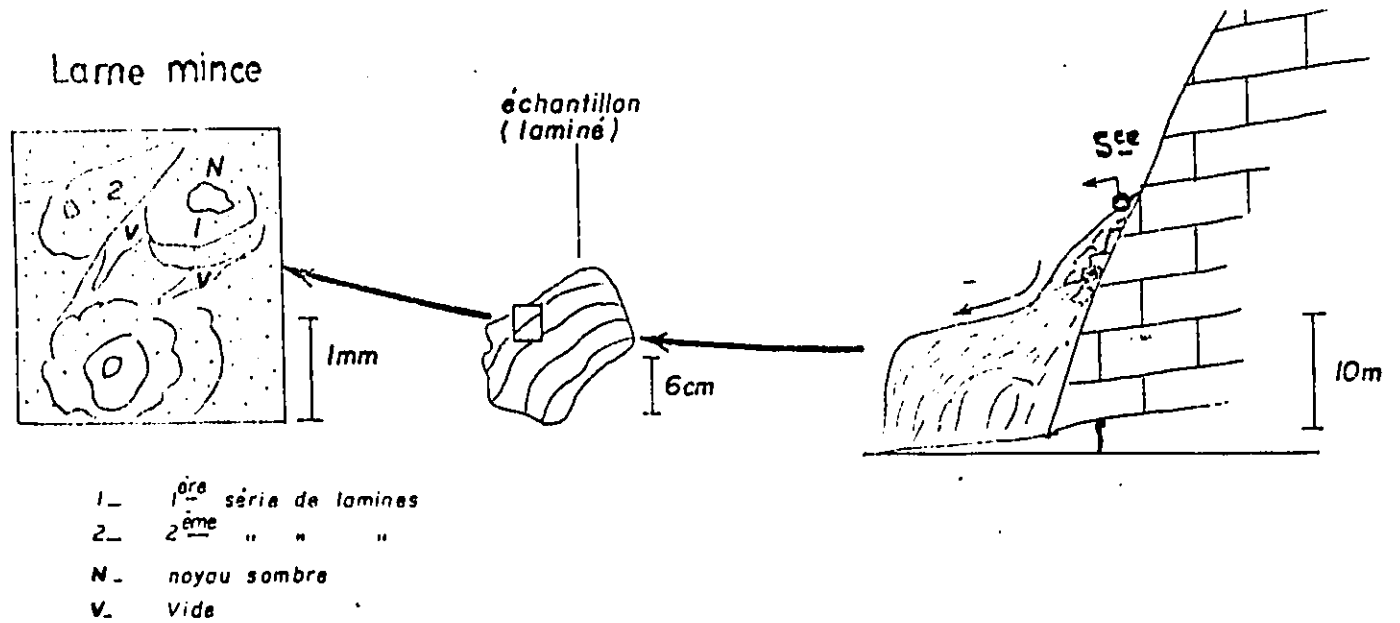


Figure no. 5.10. Travertin de la source Ifesfas. Il consolide l'éboulis de versant.

B -Géochimie isotopique.

Au Dadès et au M'goun, nous avons échantillonné les travertins selon la variété morphologique qu'ils présentent sur le terrain. L'eau de sources et des rivières a été également échantillonnée au cours de la campagne généralisée de mai 1989. Les tableaux n° 5.1 et 5.2 et leur représentation graphique (figure n° 5.11 et 5.12) en donnent les résultats. S'agissant des travertins, on observe la variation des teneurs en oxygène 18 entre -8.04 et -10.81 pour mille delta PDB. Les deux échantillons prélevés au M'goun montrent des teneurs relativement élevées, tandis que les travertins d'Ait Arbi marquent les plus basses. D'après Hillaire-Marcel (1982, p. 37) "les teneurs en Oxygène 18 plus basses reflètent une précipitation carbonatée dans une eau moins évaporée, et dont la composition isotopique se rapproche de celle des précipitations atmosphériques ou de nappes alimentant ces petits bassins". La source "Asfazate", édifiatrice des travertins d'Ait Arbi est dépendante de la pluviométrie actuelle.

Le travertin de Taltfraout montre une valeur isotopique intermédiaire d'oxygène 18 (-8.21 pour mille PDB).

La source responsable de ce travertin est actuellement tarie. La comparaison des teneurs (eau - carbonate) n'est pas dans ce cas possible.

Les valeurs de la concentration du carbone 13 des différents travertins varient entre -8.37 et -3.69 pour mille PDB. Le minimum est observé à Ait Arbi dans le dépôt fonctionnel de source; tandis que le maximum se trouve à Ifesfas. L'écart est relativement important par rapport à l'identité des teneurs en oxygène 18. Ce contraste entre la variation de l'oxygène et celle du carbone des dépôts d'un même site est précédemment observé (Allan et Mathews, 1982; Beier (1987, p. 994). L'homogénéité relative de l'oxygène 18 (tableau 5.1) est attribuée au rapide équilibre des carbonates avec l'énorme réservoir d'oxygène de l'eau; tandis que les teneurs variables en carbone 13 rendent compte d'échanges interphases solide - liquide - gaz, sans qu'un de ces réservoirs domine complètement le système (Dever et al., 1987).

Tableau no 5.1. Les teneurs isotopiques de certains travertins au Dadès et au M'goun.

Travertin	Oxygène 18	carbone 13
Ifesfas, cascade	-8.04	-3.69
" source	-7.82	-4.98
Taltfraout	-8.21	-4.48
Ait Arbi ancien	-10.24	-7.14
Ait Arbi source	-10.81	-8.37

Tableau no 5.2. Les teneurs isotopiques des eaux de certaines sources étudiées.

Source	Oxygène 18, SMOW	carbone 13, PDB
Asfazate	-9.26	-8.94
Ait Ibrirn	-9.60	-7.59
Tasbelbate	-8.93	5.66
Skoura, potable	-8.62	1.92
Idelsane	-9.08	0.72
Ifesfas amont	-9.63	-6.55
Ifesfas aval	-9.68	-6.68

Figure no. 5.11. Comparaison des résultats isotopiques de certains travertins au Dadès.

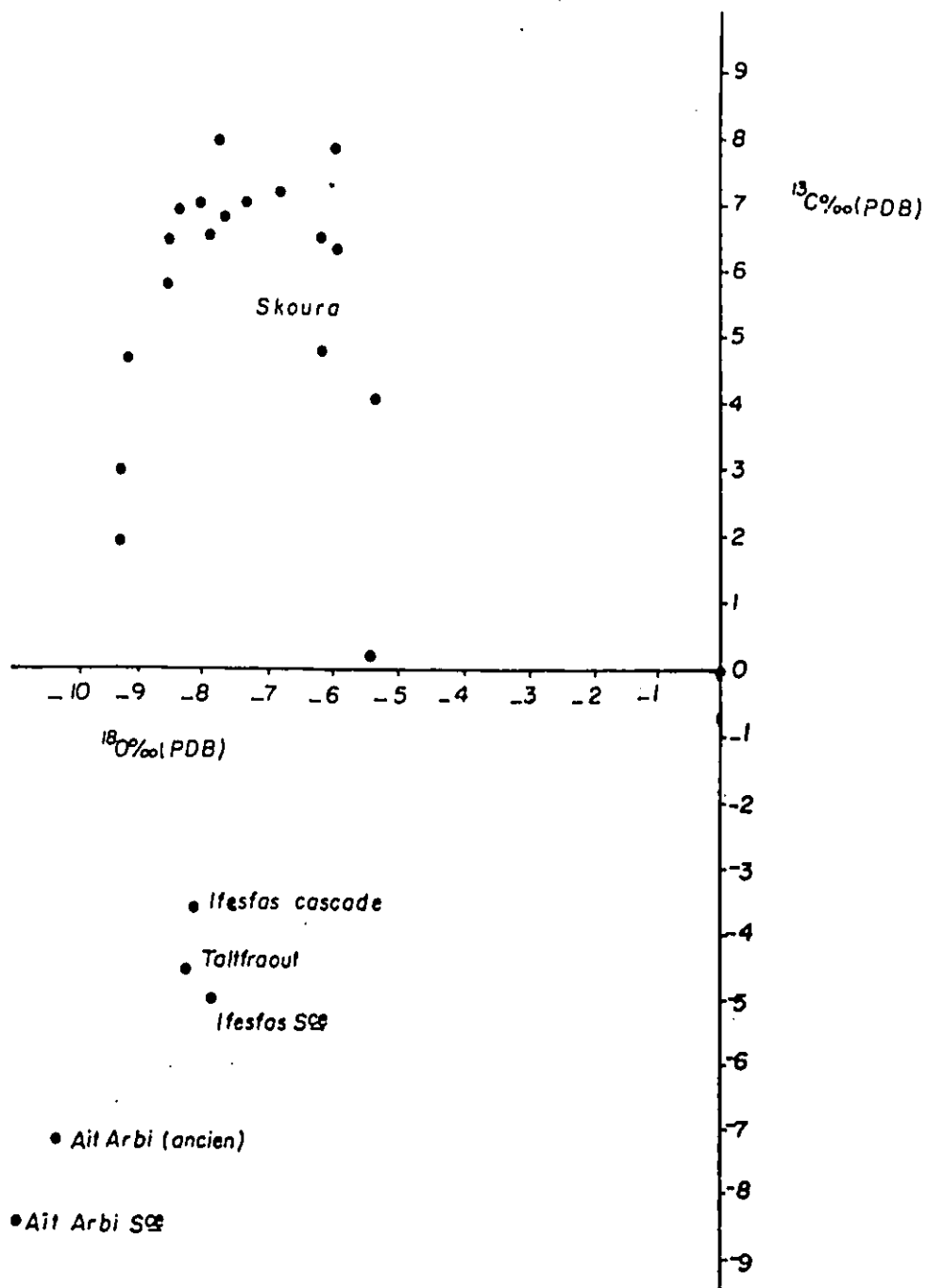
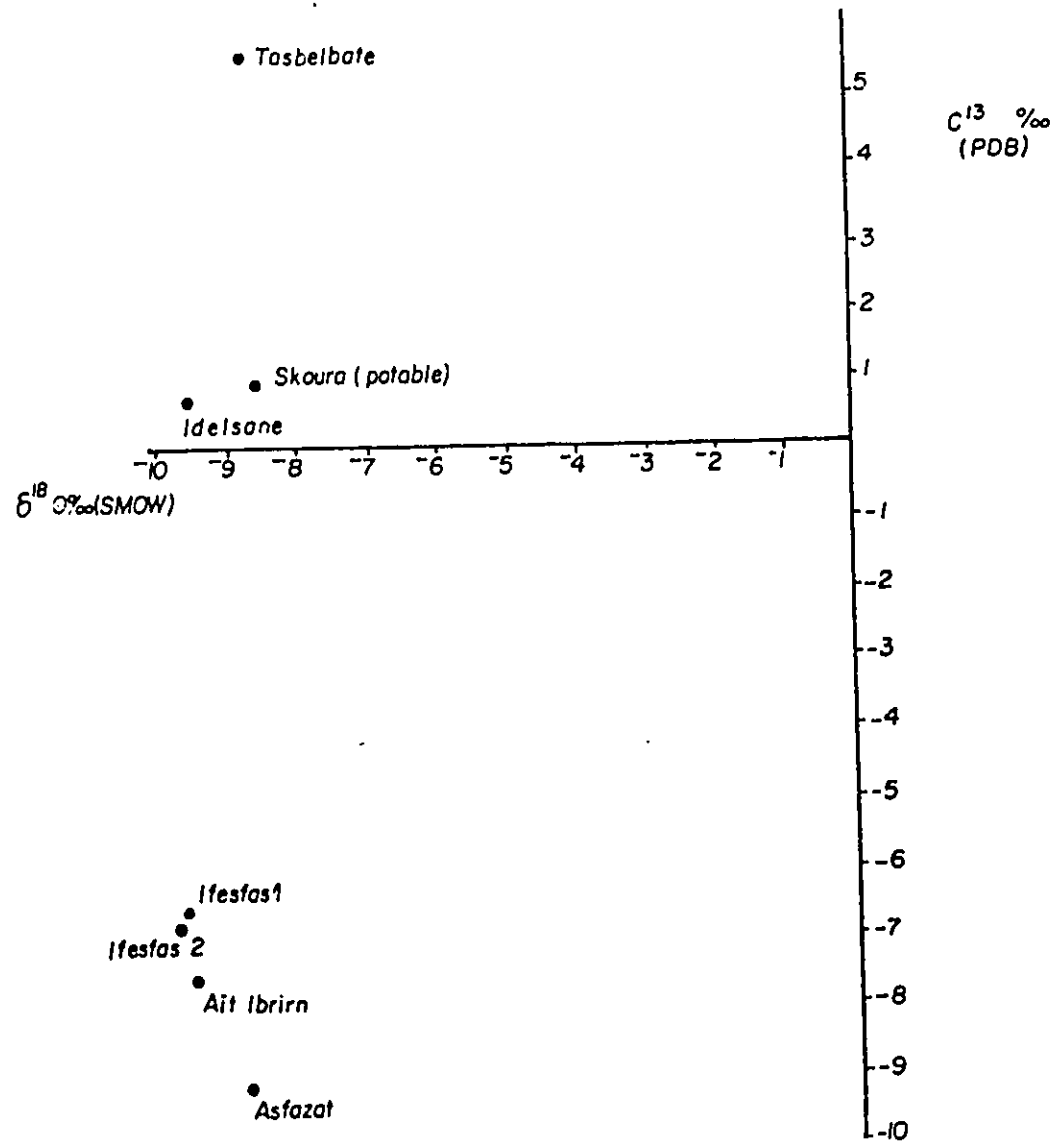


Figure no. 5.12. Teneurs isotopiques des eaux de sources du Dadès et du M'goun.



3 - Discussion des résultats.

Dans une perspective géomorphologique et environnementale visant à appréhender les aspects morphodynamiques globaux du milieu naturel, nous discuterons des résultats acquis à des échelles variées. Des enseignements utiles nous paraissent dès lors déductibles au sujet des principaux points qui suivent:

- Typologie des travertins.
- Diagenèse et évolution des dépôts.
- La dimension environnementale de la genèse des travertins.

A-Les types de travertins: subactuels et anciens.

Ils sont par leur situation des travertins de versants de vallées (actuelles ou anciennes); et par leur genèse des travertins construits de sources. Ils sont tous attribuables à des exurgences fonctionnelles ou taries. D'après nos observations de terrain et les analyses isotopiques et pétrographiques effectuées, deux types de dépôts se distinguent. Le premier est actuel. Il est facilement reconnu par son couvert algaire et végétal et l'édification en cours. Le deuxième, plus ancien est souvent perché, en cascade et élevé de dix à seize mètres au dessus du lit actuel de la rivière. Les deux types de dépôts sont décrits à Ait Arbi au Dadès et à Ifesfas au M'goun. Le travertin de Taltfraout (au Dadès) est attribuable à l'ancienne génération des dépôts précédents en raison de sa position géographique et ses caractéristiques microscopiques et macroscopiques. Des critères morphologiques militent à la faveur de l'ancienneté relative des dépôts du deuxième type. Parmi ces critères on note:

a-L'incision des vallées qui s'est faite d'environ dix à quinze mètres après la formation des dépôts. On peut ici se demander si ce type de dépôts n'est pas postérieur. C'est-à-dire que les versants sont déjà modelés avant l'accumulation du travertin. L'incision s'est poursuivie et entaille le dépôt et la terrasse qui le supporte et fait apparaître des couches du substratum. Le travertin dans ces cas est donc ancien par rapport à la phase d'incision qui a modelé la partie inférieure du versant. Cette constatation est faite

à Ait Arbi, à Taltfraout et dans la partie aval d'Iffesfas. A Ait Arbi par exemple, le travertin ancien situé à l'intérieur du vallon affluent est un édifice inactuel. Il peut remonter au-delà du dernier pluvial du Quaternaire. Cette hypothèse s'appuie sur des remarques utiles à une chronologie relative. Nous les rappelons ici:

- L'ancienneté se déduit de l'état global du dépôt. Il est suffisamment exposé aux facteurs d'érosion et a subi un démantèlement considérable.

- Les horizons friables internes au dépôt ont été largement évidés. Ils se présentent dans les joints et grottes qu'on ne peut pas confondre aux vides structuraux d'un travertin, car la matière qui les occupe est encore observable sous les abris conservés.

- Le dépôt est supporté à sa base par un conglomérat de la terrasse fluviale. Ce conglomérat est assez grossier, bien consolidé et s'élève d'une dizaine de mètres par rapport au talweg du vallon. Il est comparable au conglomérat de la terrasse tensifienne (Quaternaire moyen) supportant les villages dans la vallée principale le long du Dadès. Par analogie, ce conglomérat est attribuable au Quaternaire moyen. Il peut être considéré comme une référence chronologique puisqu'il montre que le travertin qu'il supporte ne remonte pas dans le temps au-delà de cette époque.

- Ce travertin est cependant plus ancien que le dépôt qui se forme encore actuellement. L'encaissement des ravins nécessite une durée de temps assez longue et des conditions hydrologiques importantes pour atteindre l'état actuel du creusement dans ce conglomérat assez consolidé.

Ces remarques font donc remonter la formation du travertin à la fin de l'épisode relativement humide du Quaternaire moyen. Ce qui s'est aussi confirmé au niveau des datations absolues effectuées (130 à 140 000 ans BP). Dans ce cas le travertin serait le dépôt dont la genèse vient achever une séquence morphologique aux phases suivantes: sédimentation des cailloutis fluviaux, incision des vallées induisant des ruptures de pente, ces ruptures amorcent un écoulement en cascades en périodes humides et génère l'installation d'édifices travertineux surtout à cause des paramètres physico-chimiques (évaporation - dégazage) et avec l'aide du couvert végétal et biologique.

b-L'analyse macroscopique et microscopique permettent d'observer des indicateurs confirmant la précédente différenciation entre les types de travertin. En effet l'observation des dépôts supposés anciens montre les traces d'un environnement bien plus humide que l'actuel. Les troncs d'arbres de vingt à trente centimètres de diamètre, fossilisés et l'importance de l'épandage travertineux sont à ce propos significatifs. L'analyse microscopique met en évidence une évolution diagénétique avancée comme on le discutera par la suite. Plusieurs vides de la dissolution et l'apparition de ciments divers en sont des preuves. Les résultats de l'analyse géochimique militent aussi à la faveur de cette distinction comme il a été signalé. Un écart de -0.57 pour mille PDB en carbone 13 est calculé entre les concentrations du dépôt actuel et celles du dépôt de cascade abandonnée à l'intérieur du vallon d'Ait Arbi (tableau no 5.1).

Le plus récent est à la fois influencé par le gaz carbonique atmosphérique et l'activité biologique, pédologique et végétale. Il montre des valeurs plus négatives. Ceci est d'autant plus clair que la nappe aquifère est faible. C'est-à-dire que le séjour de l'eau à l'intérieur du massif rocheux est court pour permettre le maintien des caractéristiques atmosphériques au niveau des isotopes mesurés dans l'eau ou dans le dépôt qui en provient. Tel est par exemple le cas dans les travertins d'Asfazate à Ait Arbi, alimenté par la nappe aquifère locale du conglomérat mio-pliocène. Cette hypothèse est soutenue par les résultats obtenus à Ifesfas (M'goun). Cette source, alimentée par un aquifère du calcaire massif jurassique assez puissant, montre des valeurs isotopiques révélatrices de l'origine marine de ces calcaires.

On note cependant que le dépôt de cascade, relativement ancien s'est formé dans un environnement moins influencé par les conditions atmosphériques. Le carbone 13 du dépôt de source actuelle quant à lui n'est pas aussi négatif (-4.98 pour mille) et se rapproche des valeurs mesurées dans l'eau de la source (-6.55 pour mille) et appartient donc à une génération plus jeune de travertins.

B-Diagenèse et évolution des dépôts.

Les observations pétrographiques ont permis de souligner les différences de structure entre les deux générations distinctes de dépôts: la première assez ancienne, montre des structures radiales ou

des traces moins évidentes de formes biogéniques. La diagenèse y est assez avancée à un point tel que la pétrographie montre des similarités abondantes d'un dépôt à l'autre. Les accumulations plus récentes montrent par contre des microstructures variées et bien conservées. Les formes algaires et bactériennes sont notées. La géochimie isotopique est indicatrice de l'origine et de la parenté des dépôts. Elle permet leur classification selon des caractéristiques diagénétiques ou environnementales. L'évolution des conditions du milieu s'impose cependant dans une région à climat changeant. L'amplitude thermique par exemple est en mesure de masquer un changement de la teneur originale de l'eau en oxygène 18. Newton et Grossman (1988, p. 430) évaluent son importance à 1 pour mille en oxygène pour chaque variation de 5° C en température. Mais il semble improbable que durant la période de la précipitation de la calcite dans le domaine étudié (en l'occurrence le printemps et le début de l'été), la température change de façon exagérée.

Les teneurs isotopiques peu variantes dans certains dépôts comme à Ifesfas (M'goun) indiquent soit leur appartenance au même épisode sédimentologique, ou alors à deux épisodes distincts mais de mêmes conditions environnementales. La position morphologique des dépôts et leur faciès montrent une distinction nette entre les dépôts fonctionnels et ceux de la cascade perchée, ce qui milite à la faveur de la dernière hypothèse attribuant aux phases de la formation des dépôts.

La diagenèse est un second facteur influençant la géochimie isotopique du dépôt. D'après Dickinson (1988, p.329), la tendance générale au cours de la diagenèse est une diminution des teneurs en carbone 13 et en oxygène 18. Ceci résulte des réactions des carbonates originellement marins avec les eaux météoriques moins riches en isotopes. La dissolution et la précipitation répétées de la calcite affaiblissent sa teneur isotopique en l'adaptant progressivement à l'environnement actuel. Cette tendance à l'homogénéisation géochimique en fonction de l'évolution diagénétique permet un rapprochement des teneurs observées au sein d'un même dépôt et dans les dépôts d'un même site comme c'est le cas à Ait Arbi ou à Ifesfas. Toutefois, les différences entre sites éloignés se maintiennent en raison de l'action d'autres paramètres tels que l'effet de l'altitude sur les facteurs climatiques, ou la densité et l'importance des facteurs biogéographiques. Ainsi, par leur position intermédiaire, les dépôts travertineux

de Taltfraout montrent des valeurs comprises à l'intérieur de l'intervalle déterminé par celles d'Ifesfas aux hautes altitudes du M'goun (2000m) et celles d'Ait Arbi en marge de la chaîne atlasique méridionale (1600 à 1650m). Ces différences reflètent également l'état d'avancement de la diagenèse car en fait la datation à l'Uranium / Thorium confirme la différence d'âge entre le dépôt de Taltfraout (Holocène) et ceux d'Ait Arbi (130 ka à 142 ka BP). Ce dernier plus ancien montre des valeurs isotopiques en carbone 13 plus basses, car il est suffisamment exposé aux intempéries atmosphériques pour subir une réadaptation marquante au niveau des traces isotopiques.

C-La dimension environnementale des travertins: un équilibre fragile.

Le présent travail permet de conclure que le Dadès et le M'goun ont connu dans le passé et connaissent encore par endroit une accumulation remarquable de travertins. Des conditions du milieu naturel équilibré en montagne sont reflétées. Soit à Ait Arbi, à Taltfraout ou à Ifesfas, l'alimentation en eau des sources édifiatrices se fait par un réseau souterrain à l'abri des perturbations anthropiques. Les dépôts travertineux se développent en aval d'un réseau karstique et peuvent être considérés des dépôts corrélatifs, car ils sont synchrones de l'élaboration des formes de relief en amont. Un milieu forestier ou herbacé propice à la dissolution et défavorable aux transports détritiques accuse leur genèse.

Les conditions topographiques, climatiques et hydrologiques de bassins alimentant les sources sont décisives sur l'équilibre physico-chimique des eaux à l'aval du géosystème karstique et expliquent l'importance des accumulations du travertin. D'après nos observations de terrain et l'analyse pétrographique des travertins étudiés, la population bactérienne et le couvert algaire associé à l'édification des travertins est dense en montagne et en bordure. Il l'est aussi pour les dépôts actuels ou anciens.

En somme, les différents dépôts actifs ou fossiles révèlent ce que Vaudour (1986, p. 5) appelle géosystème naturel, distingué du géosystème anthropique. Le premier ne montre qu'une pression faible des habitants sur le milieu. Le seuil décisif affectant la nature de la biomasse, sa diversité et son activité

n'est pas franchi. La qualité de l'eau est conservée. Aucune exploitation abusive des richesses naturelles n'est entamée. Dans ce cas les différents processus de formation des travertins fonctionnent. La précipitation purement inorganique du carbonate de calcium se fait en équilibre avec l'atmosphère ambiante. L'activité biologique s'associe à ces processus et prend une importance considérable comme il sera discuté ultérieurement. Les travertins résultent d'une diversité de facteurs environnementaux dont le fonctionnement est conditionné par un équilibre dynamique assez fragile. L'optimum de l'édification est indicateur d'un tel équilibre. Celui-ci a été atteint dans le passé à maintes reprises. Il continue à être atteint périodiquement dans certains sites de montagne où les dépôts s'accumulent toujours. Cette accumulation n'est pas évidente dans les lits des rivières qui subissant à l'heure actuelle une perturbation humaine d'énorme ampleur.

Conclusion:

-La formation des travertins indique un équilibre environnemental qui peut être perçu dans un cadre géosystémique global.

-Les dépôts fossiles attribuables aux phases anciennes sont des preuves de l'équilibre atteint ultérieurement dans les divers secteurs du domaine étudié. Leur extension spatiale très limitée indique une relation directe avec un écoulement (source sur les versants et épandage important sur les glacis d'Anbed) et reflète un certain équilibre environnemental nécessaire à la précipitation de la calcite. Cet équilibre n'est actuellement conservé que dans de rares sources comme à Ifesfas (M'goun) ou à Asfazate (Dadès).

-La rareté des encroûtements actuels en milieu aquatique montagnard ou bordier des rivières est un problème qui sera traité dans la troisième partie de cette thèse.

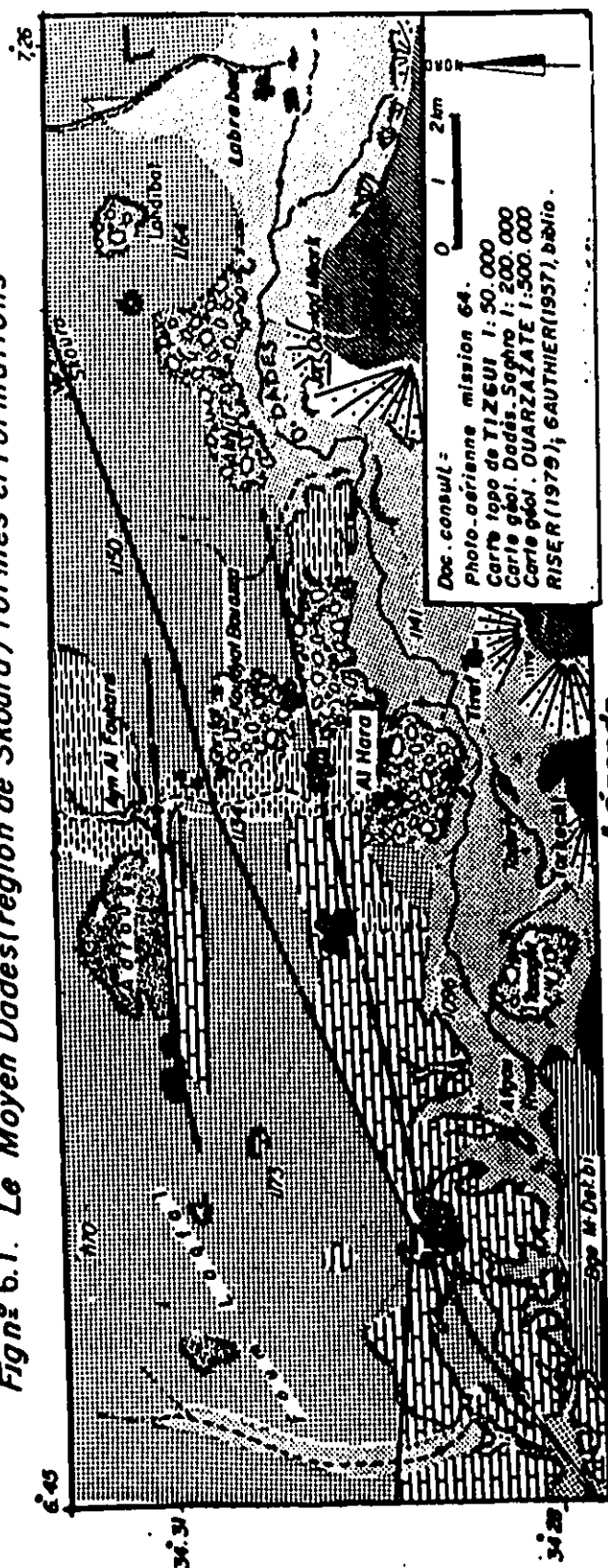
Chapitre VI

Un travertin hydrothermal: le travertin de Skoura au moyen Dadès.

L'hydrothermalisme est connu comme générateur favorable au développement d'édifices spectaculaires de travertin. Leur morphologie caractéristique montre des collines et des biohermes (Scholl et Taft, 1964; Lang et Lucas, 1973; Lang, 1975; Nicod, 1981). Ils s'identifient également par des aspects pétrographiques et géochimiques particuliers. La contribution d'organismes biologiques est confirmée dans divers types de travertins (Geurts, 1976; Chafetz et Folk, 1984; Jones et Kahle, 1985; Jones et Motyka, 1987; Clark, 1987). Des aspects d'ordre morphologique peuvent cependant subvenir dans certains cas. Les travertins de Skoura au Maroc méridional montrent des aspects reliés aux conditions structurales et hydrologiques locales. Ils sont aussi révélateurs d'influences du cadre régional environnant.

La présente contribution se fixe pour but la présentation macroscopique des coupes, l'analyse microscopique et géochimique d'une série d'échantillons, en vue de retracer le style génétique de ces dépôts en milieu semi-aride. La question d'identification de ce type de travertin se pose car il faut chercher les preuves permettant de l'attribuer au thermalisme. Nous discuterons donc de la spécificité de ces dépôts en montrant les impacts multiples: structural, hydrologique, environnemental et historique (évolution). Plusieurs aspects sédimentologiques connus dans la littérature des dépôts semblables ont été reconnus. Ils servent de base solide à nos interprétations personnelles. Les indicateurs géochimiques et morphotectoniques caractérisant ces dépôts sont mis en évidence. C'est donc une étude de cas permettant d'appréhender certaines généralités appropriées à la dynamique des carbonates.

Fig. 6.1. Le Moyen Dades (région de Skoura) formes et Formations



Légende

Dépôts et Formes Quaternaires

19 Terrasses :

- Limons, sables, argilles du Quaternaire récent et actuel
- Conglomérat du Quaternaire moyen
- Conglomérat très consolidé du Quaternaire ancien

22 Formations travertineuses :

- Travertin: génération récente.
- Travertin: deuxième génération.
- Travertin: calcaire lacustre et grès à galets.

32 Formes :

- Rebord de Terrasse
- Cône de déjection récent
- Dômes, travertineux

Géologie et hydrographie :

- Argile rouge et grès mio-pliocène.
- Socle ancien.
- Faille apparente ou probable.
- Faits humains
- Douar
- Route ou piste
- Drain permanent
- Affluent provisoire
- Source
- Source thermale "Tasbelkate"
- Lac Bge M. Dahbi

Dessiné : S. Lobo-Dessin, FES
D. Hamid.

1 - Présentation des coupes.

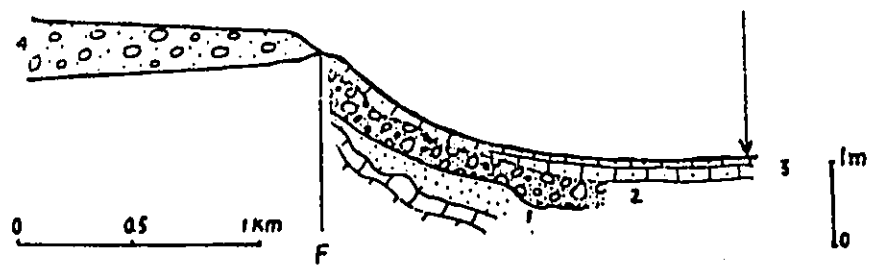
L'observation mégascopique et l'étude des coupes durant les nombreux travaux de terrain effectués en 1985, 1987 et 1989 ont permis dès l'abord de visualiser quelques aspects sédimentologiques généraux et poser des questions à aborder par une analyse microscopique et géochimique dans une étape suivante.

Le travertin se situe à mi-chemin entre Ouarzazate et Skoura. Il s'étend sur une superficie approximative de cinq kilomètres carrés. Il présente des faciès variés. Le critère morphologique permet de distinguer trois grands types de travertins différents par leur épaisseur, leur forme et la position qu'ils occupent dans l'espace. Il s'agit de dépôts du haut niveau quaternaire, épais et influencés par la néotectonique; de dépôts étalés sur le niveau intermédiaire du Quaternaire moyen, et enfin de minces dépôts au fond des ravins, ceux-ci montrent des faciès attestant de leur jeunesse.

A- L'édifice épais du niveau supérieur.

Il est épais d'environ cinq mètres. Il est fortement incliné sur le rebord du lambeau supérieur appartenant au plus ancien glacis local: Adroug (figure n° 6.1). Cette inclinaison est d'ordre tectonique comme on peut s'en apercevoir à travers l'axe de faille le traversant dans la partie supérieure (figure n° 6.2). Le dépôt se compose de trois couches différentes. La couche de base, gréseuse et calcaire-gréseuse est un dépôt révélateur d'une sédimentation lacustre car elle est épaisse d'environ un mètre et formée essentiellement de carbonates blanchâtres. On y trouve des galets calcaires bleus, arrondis, provenant des couches atlasiques ou d'un remaniement du matériel du glacis supérieur démantelé (Akdin, 1986). La partie médiane de la coupe devient franchement conglomératique. La fracturation des galets est mise en évidence par un réseau de filons calcitiques comblant les fractures et vides internes. La nature lithologique des galets révèle une double origine: on y trouve des galets quartzitiques noirâtres, provenant du socle ancien de l'Anti-Atlas et des galets de la couverture secondaire du Haut Atlas.

Figure no. 6.2. Morphologie des dépôts travertineux au nord-est de la région d'Idelsane (Skoura). 1-Grès et calcaire lacustre de base. 2-Couches à conglomérat calcaire. 3-Faciès de lamines calcitiques. La flèche indique la route de Ouarzazate.



Ces derniers dominent cependant le spectre avec une proportion d'environ 75% . Dans la partie supérieure, plusieurs lamines calcitiques blanches, alternent avec des lamines sombres enrichies de matière organique ou de manganèse d'épaisseur millimétrique et des lamines détritiques. C'est donc un dépôt révélateur sur le plan morphogénétique: tectonique, hydrologique et paléoclimatique. Il offre l'exemple d'un travertin dont l'agencement des unités au sein du paysage morphologique indique des éléments utiles à la reconstitution évolutive de ce paysage.

B- Les faciès du niveau intermédiaire.

C'est une unité topographique et morphologique distincte de la précédente, qui supporte ici les dépôts. Il s'agit du glacis intermédiaire rapporté par Riser (1979) au Quaternaire moyen. Les dépôts sont postérieurs à la phase de planation du glacis. Ils se répandent de façon presque homogène et généralisée sur ce glacis. La route principale de Ouarzazate-Skoura le traverse. C'est un travertin moins épais et différent du précédent par la variété de faciès qu'il présente. Trois morphologies distinctes s'observent à ce niveau: laminaire, en buttes et en cascadelles. Toutes montrent une dynamique contrastée du cadre physique influençant la précipitation des carbonates.

-Le faciès laminaire montre une alternance de lamines calcitiques millimétriques recouvrant la topographie (figure n° 6.3). Certaines lamines sont blanchâtres et purement calcitiques, d'autres sont roses comportant des matières détritiques argileuses et fersialitiques. Certaines sont noirâtres et riches en matière organique et/ou en oxydes manganiques. Ce faciès se répand particulièrement sur la surface plane, autour de la route principale. Il s'étend aussi dans le sens de la pente du glacis, c'est-à-dire vers la partie la plus orientale plus basse, où il se termine en abrupts sur le Dadès ou sur les vallons d'affluents secondaires.

-Le second faciès observé sur ce même niveau est un travertin en buttes isolées. Il est vrai que ces buttes sont difficilement perçues dans le paysage car elles sont très basses (un mètre de hauteur environ),

Figure no. 6.3. Travertin du niveau intermédiaire (faciès laminaire). Epaisseur deux à trois mètres.

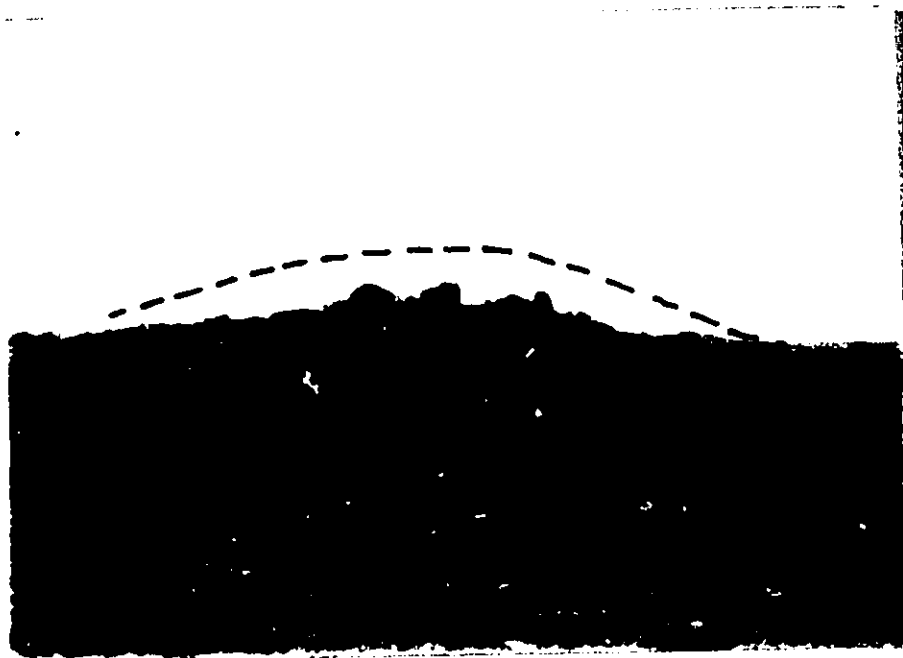


Figure no. 6.4. Faciès en buttes de Skoura. En pointillé l'allure ondulée du dépôt.

mais une observation minutieuse des ondulations topographiques et des épandages travertineux à tous les sens, à partir d'un point central culminant permet de reconstituer la forme originellement ondulée du dépôt. Certaines ont subi une érosion très avancée et d'autres permettent encore de voir ces formes correspondant aux "travertine mounds" déjà reconnues dans la littérature anglo-saxonne (figure n° 6.4).

- Le dernier faciès observable à ce niveau présente des petits barrages construits sur une topographie plus inclinée. Ce sont des cascates abandonnées d'environ dix à vingt centimètres de hauteur. Elles limitent d'anciens petits bassins actuellement secs, d'environ un mètre carré de superficie interne (figure n° 6.5). Il est important enfin de souligner la variété de faciès morphologiques des travertins de cette deuxième génération. La dynamique contrôlant la genèse des travertins n'était pas encore entravée à l'époque de la formation de ces dépôts.

C- La troisième génération des travertins.

Elle s'observe au fond du petit ravin qui découpe le glacis moyen (figure n° 6.6). C'est un travertin également laminaire mais très localisé puisqu'il occupe uniquement le fond du ravin.

Sa jeunesse se déduit de sa position sur une topographie récente, et de sa consolidation moins marquée. Elle se confirme aussi par les encroûtements datables avec plus de précision comme ceux du drain "Ségula" ramenant l'eau à l'école abandonnée depuis les années soixante-dix, quand le secteur environnant a été submergé par les eaux du barrage "Mansour Dahbi". En effet la forme de ce drain est conservée par l'encroûtement peu consolidé du même âge que la partie supérieure du travertin du fond du ravin puisqu'il se rattache à elle en amont près de la digue de dérivation.

Ces trois grands types de dépôts travertineux et les divers faciès qu'ils présentent ont été échantillonnés et étudiés en vue de comprendre les mécanismes constructeurs et les éléments qui engendrent leur diversité de faciès.

Figure no. 6.5. Faciès en cascadelles (le stylo est pour échelle).

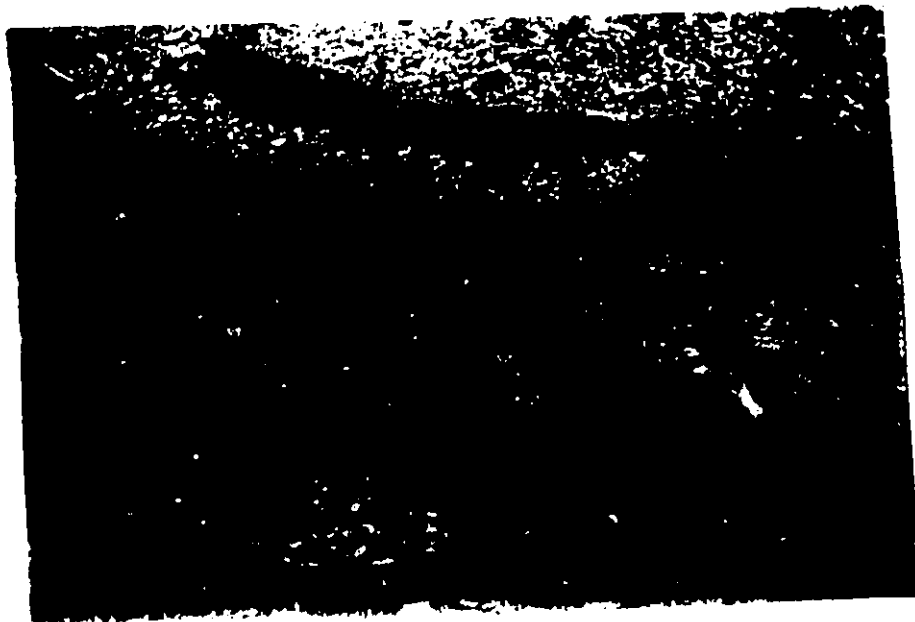


Figure no. 6.6. Au fond du ravin on voit des travertins (blancs) d'une génération récente (Skoura).

2- Description pétrographique.

L'étude des lames minces permet d'observer une variété de phénomènes pétrographiques. Plusieurs microstructures, ciments diagénétiques et horizons enrichis de manganèse et/ou de matière organique sont similaires aux phénomènes décrits dans les dépôts carbonatés d'origine marine (Lucas *et al.*, 1976; Flugel, 1982).

Les traces d'environnement continental et lacustre sont cependant abondantes dans les cas étudiés. On note la richesse des lames minces en matériel détritique et en oxydes ferreux. La texture, la forme des cristaux calcitiques et la structure globale évoquent des processus biologiques et des processus diagénétiques dans l'évolution des dépôts. Trois microfaciès distincts sont identifiables sur le plan pétrographique: laminaire, radiaxial et alvéolaire.

A - Microfaciès laminaire.

Il est composé d'une alternance de lamines à cristaux micritiques noirâtres et de lamines à cristaux sparitiques blanchâtres. Leur épaisseur varie de deux centimètres à quelques millimètres. Parfois des pellicules très minces s'observent dans le détail. Certaines lamines alternantes sont de couleur roses et composées d'argiles ou de sables fins détritiques. Les lamines à cristaux micritiques sont riches en structures bulsonnantes (figures n° 6.7, 6.8 et 6.9). Elles rappellent les formes en "shrubliques" précédemment décrites par Chafetz et Folk (1984). Ce faciès s'observe à la partie supérieure du dépôt travertineux de la coupe donnée dans la figure n° 6.2. Il se manifeste également dans les lames taillées dans les travertins laminaires du niveau quaternaire moyen. Les cristaux micritiques correspondent à des zones sombres et s'arrangent en bourrelets successifs de 0.5 à 4 mm de hauteur. Ces formes rappellent parfois les microstromatolites décrits dans les ciments de brèche de l'île de Cayman (Jones et Kahle, 1985).

Figure no. 6.7. Lamines et formes arborescentes (échelle 1mm).

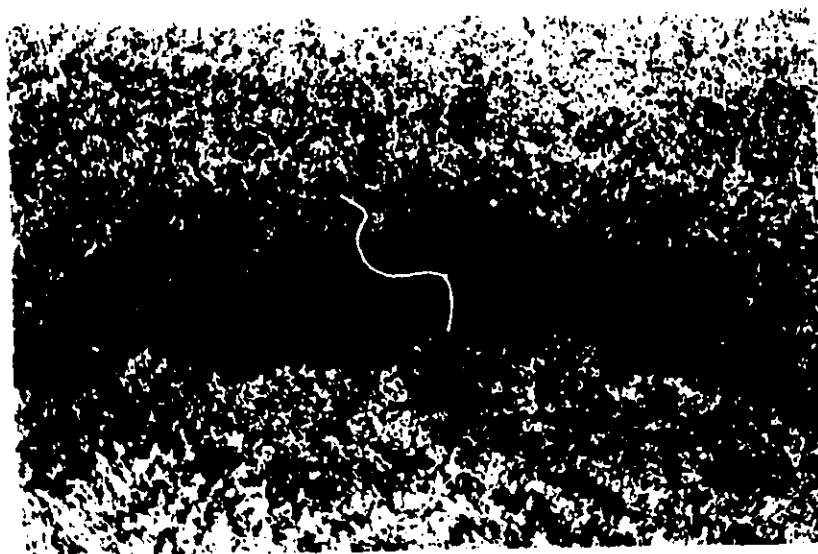
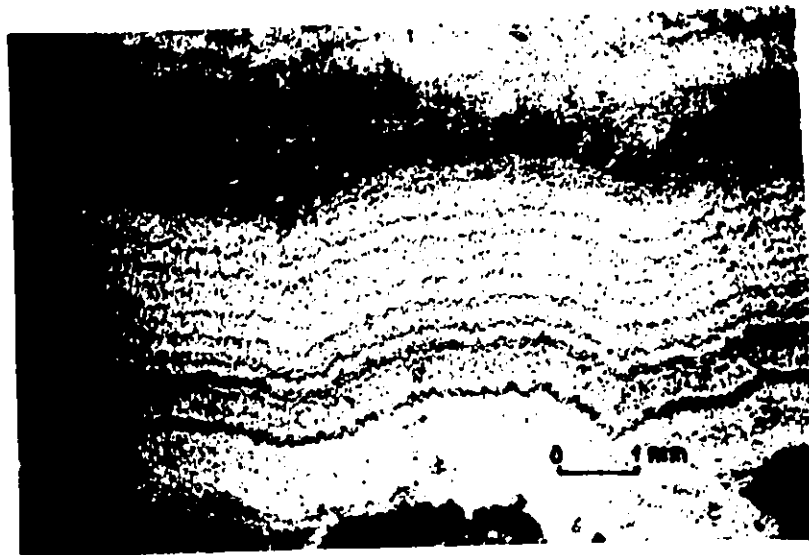


Figure no. 6.8. Agrandissement de l'horizon à formes arborescentes. (échelle 0.5 mm).

Figure no. 6.9. Matière organique en lamines et taches noires.



B- Microfaciès à structure radiaxiale:

La partie formée de calcaire lacustre montre en lames minces des structures radiaxiales. Elles se retrouvent aussi dans les horizons médians du dépôt travertineux supérieur (figure, 6.10). Elles s'accompagnent soit d'un réseau de filaments calcitiques qui forment des éventails élargis vers le haut, ou des cristaux sparitiques allongés. L'allongement des cristaux de calcite est dans ce cas spectaculaire puisqu'il peut atteindre 2 à 4 mm. La partie supérieure de ce faciès montre des irrégularités au contact avec les horizons détritiques qui les surmontent. On observe des creux comblés de calcite et entourés de taches noires. Leurs parois sont assez rigoureuses et sont entièrement encadrées par ces taches noires (figure n° 6.11). L'horizon ainsi tacheté a fait l'objet d'une observation au microscope électronique (figure n° 6.12). L'organisation des cristaux y est conservée malgré la dissolution élargissant de façon progressive les vides internes. L'élément à retenir au niveau du présent faciès est donc la richesse en indicateurs d'une histoire diagénétique assez longue; celle-ci a permis une série de phénomènes de dissolution ou de précipitation de la calcite et des phénomènes de transformation de la forme cristalline comme c'est le cas dans l'apparition des sparites dont on discutera la signification par la suite.

Figure no. 6.10. Travertin de Skoura. Lame mince de la calcite médiane du dépôt supérieur (ancien).

Sp. sparites bien développées. T. taches noires dendritiques (Mn). D. horizon détritique.

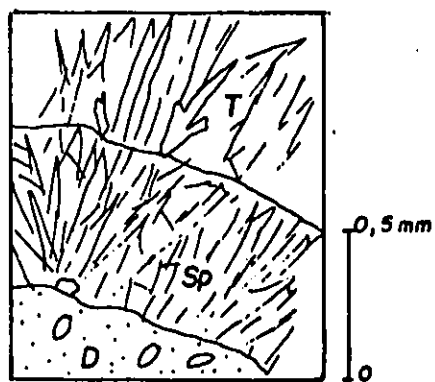


Figure no. 11. Taches noires encadrant les vides internes dans le travertin du niveau supérieur à Skoura;
échelle 1mm.

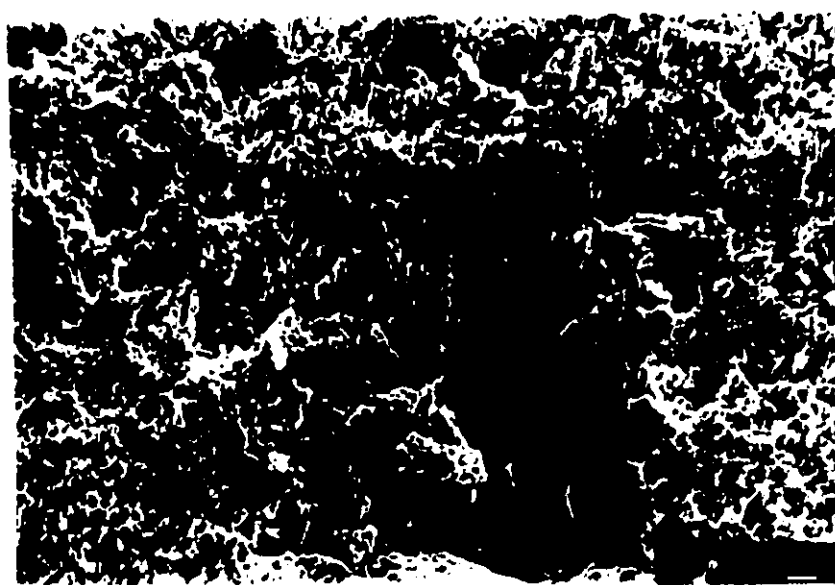
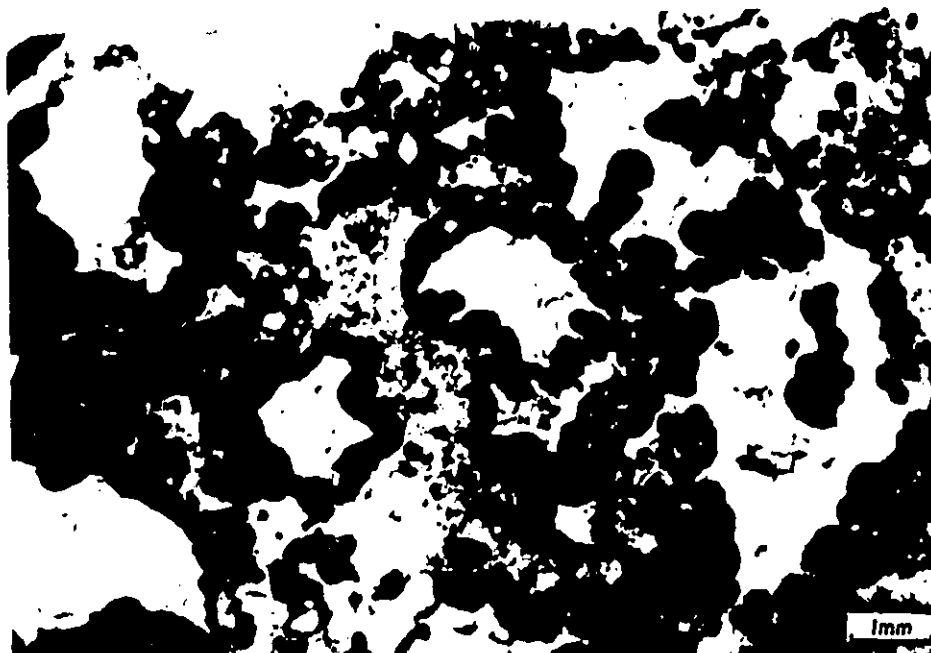


Figure no. 6.12. Photomicrographie au microscope électronique. L'organisation des cristaux est conservée malgré les nombreux vides de dissolution.

C - Microfaciès à structure alvéolaire (figure n°6.13).

On l'observe dans les travertins en buttes et dans les cascadelles abandonnées du niveau moyen. Il s'agit d'une masse de calcite spongieuse. Les pores prennent en général l'allure verticale et s'étendent à des échelles variées. D'autres pores arrondis ou de formes irrégulières apparaissent. Au microscope, on voit des vides de quelques microns à plusieurs millimètres de largeur. Contrairement aux vides signalés dans l'horizon à structure radiaxiale (qui traversent à la fois plusieurs lamines), ceux-ci s'alignent verticalement de façon concordante avec la construction filamenteuse caractérisant ce faciès. Il est donc apparent que les pores sont ici structuraux, c'est-à-dire reliés à la construction originelle du matériel et non à l'érosion postérieure (figure n° 14). Une calcite secondaire vient combler en partie ces vides. Les filaments quant à eux se sont développés suite aux recouvrements calcitiques progressifs. Certains d'entre eux sont des tubes calcitiques de 0.01 millimètre de diamètre. Le contact entre les cristaux de calcite originelle (de construction) et le recouvrement externe n'est pas brutal, mais on l'a identifié sous la lumière naturelle puisque le noyau des cristaux originaux est imprégné de matière organique, ce qui donne d'ailleurs au dépôt sa teinte noirâtre.

Figure no. 6.13 (A et B). Photmicrographie illustrant la structure caractéristique des travertins en buttes.

La matière organique s'organise en filaments noirâtres. En blanc les vides structurels.

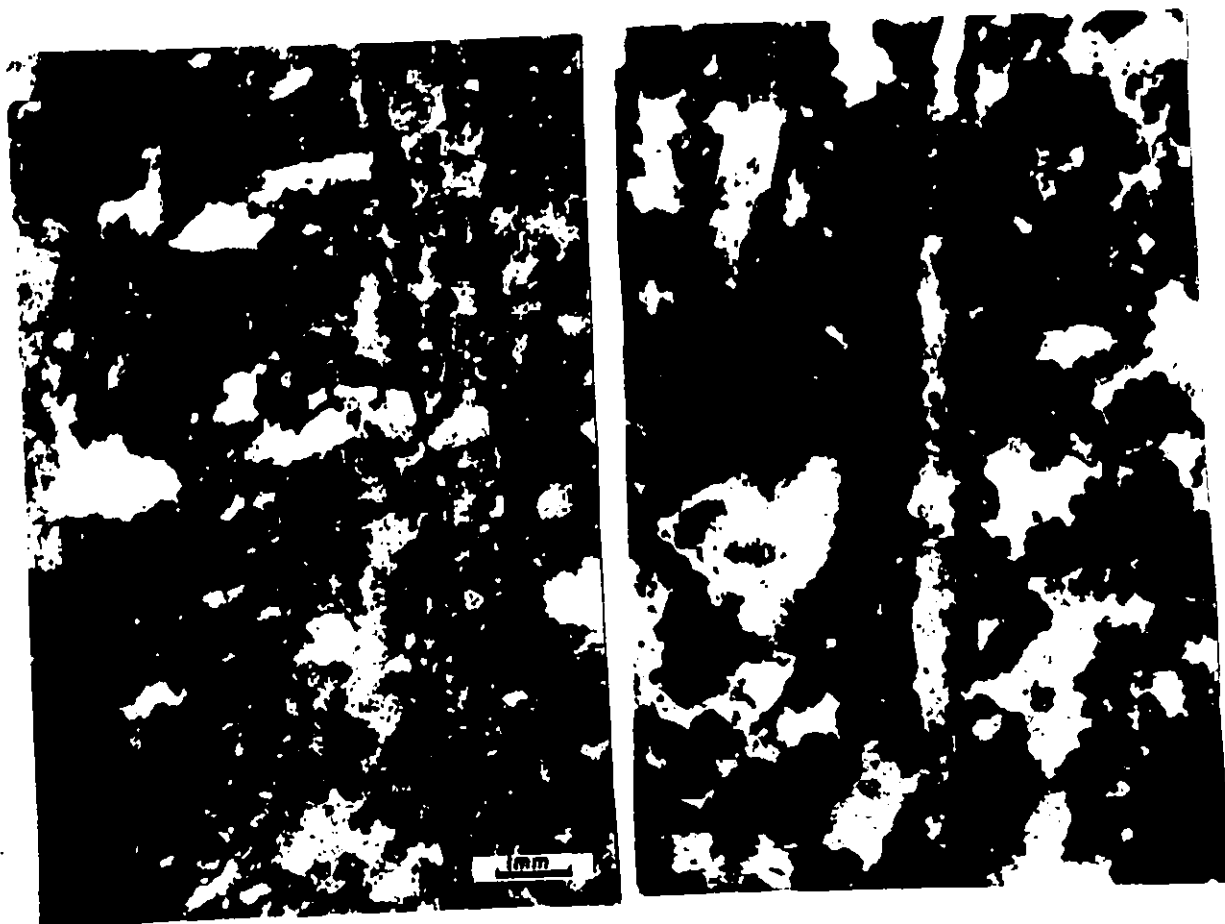


Figure no. 6.14. Aspects filamenteux de certains dépôts dans les travertins de Skoura.



En conclusion, la pétrographie confirme une diversité d'aspects génétiques des travertins hydrothermaux. La biogénèse est active et la diagenèse marque sa place dans certains cas comme il sera discuté.

3- Données de la géochimie isotopique.

La composition isotopique des différents faciès pétrographiques est donnée aux tableaux n° 6.1 et 6.2 et sur les figures n°6.15 et 6.16. Les teneurs en oxygène 18 atteignent des valeurs pouvant descendre à -9.25. Celle-ci est enregistrée dans la calcite de remplissage des fissures dans le haut niveau travertineux. C'est-à-dire dans la calcite de recristallisation d'une génération postérieure à l'accumulation du matériel. Une autre valeur assez basse d'environ -9.21 est enregistrée dans la calcite de la lamine rougeâtre comportant certains éléments détritiques dans ce faciès laminaire (figure n° 6.17). Elles s'élèvent cependant dans certains cas à des valeurs de -5.37 pour mille mesurées dans la calcite de comblement des vides du faciès en buttes précédemment décrit. La variation est ainsi notable et la différence atteint -3.88 pour mille PDB. Un enrichissement partiel en oxygène 18 est observé dans les horizons supérieurs des travertins laminaires. Les trois plus hauts horizons de ces dépôts montrent des valeurs comprises entre 7.05 et 7.9 pour mille (tableau n° 6.1). Les horizons foncés, riches en matière organique ont des teneurs en oxygène 18 plus remarquables. La valeur de -6.16 pour mille y est observée. Elle s'approche des valeurs les plus basses obtenues dans les travertins en buttes, où l'on a vu que celles-ci varient de -6.17 à 5.37 (figure no. 6.17). Dans le dépôt supérieur du travertin, des valeurs de 8.2 à 8.7 sont enregistrées au fond du profil à faciès laminaire, que ce soit dans les horizons détritiques ou dans la calcite plus ou moins pure. La composition isotopique de la calcite sparitique qui remplit les fissures à l'intérieur de ces horizons ressemble à celle du niveau conglomératique et rappelle la teneur en oxygène 18 de l'horizon rose dans le faciès laminaire. Elle est partout autour de -9.2. Les teneurs en carbone 13 varient entre 0.43 et 7.66 enregistrées respectivement

Tableau 6.1. Résultats d'analyses isotopiques (carbone 13, oxygène 18) des travertins de Skoura (première série)

no d'ordre	description	oxygène 18	carbone 13
Faciès laminaire			
M87-1	horizon détritique	-7.81	6.62
M87-2	calcite blanche	-7.90	7.61
M87-3	taches argileuses	-7.05	7.03
M87-4	calcite (h. détr.)	-8.04	6.29
M87-5	horizon argileux	-8.59	6.30
M87-6	horizon noirâtre	-6.16	7.66
M87-7	calcite pure	-8.51	6.75
M87-8	calcite radiaxiale	-8.26	6.88
Faciès en buttes			
M87-9	Horizon noirâtre	-6.17	4.62
M87-10	Horizon calcitique	-6.03	6.13
M87-11	Calcite-comblement	-5.37	3.97

Tableau 6.2. Résultats isotopiques comparés de certains faciès
de travertins à Skoura (deuxième série).

code	description	oxygène 18	carbone 13
M89-3	remplissage/dépôt sup.	-9.25	4.95
M89-4	calcite sur conglom.	-9.17	1.82
M89-5	homogène.sur conglom.	-9.18	2.96
M89-7	cascatelle abandonné	-5.34	0.43
M89-8	encroûtement séguia	-6.28	6.86
M89-9	laminaire, niveau moyen	-8.42	5.09

Figure n°: 6.15

Représentation des résultats isotopiques des travertins de Skoura .

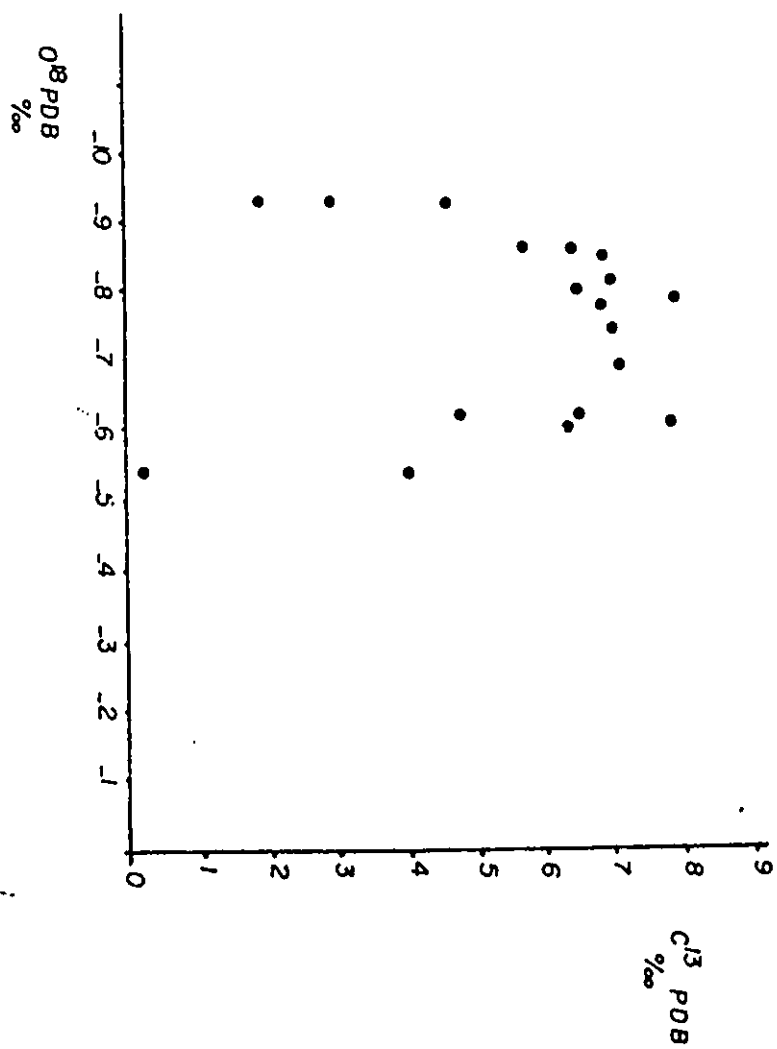


Figure n° 6.16

Teneurs isotopiques des eaux de sources

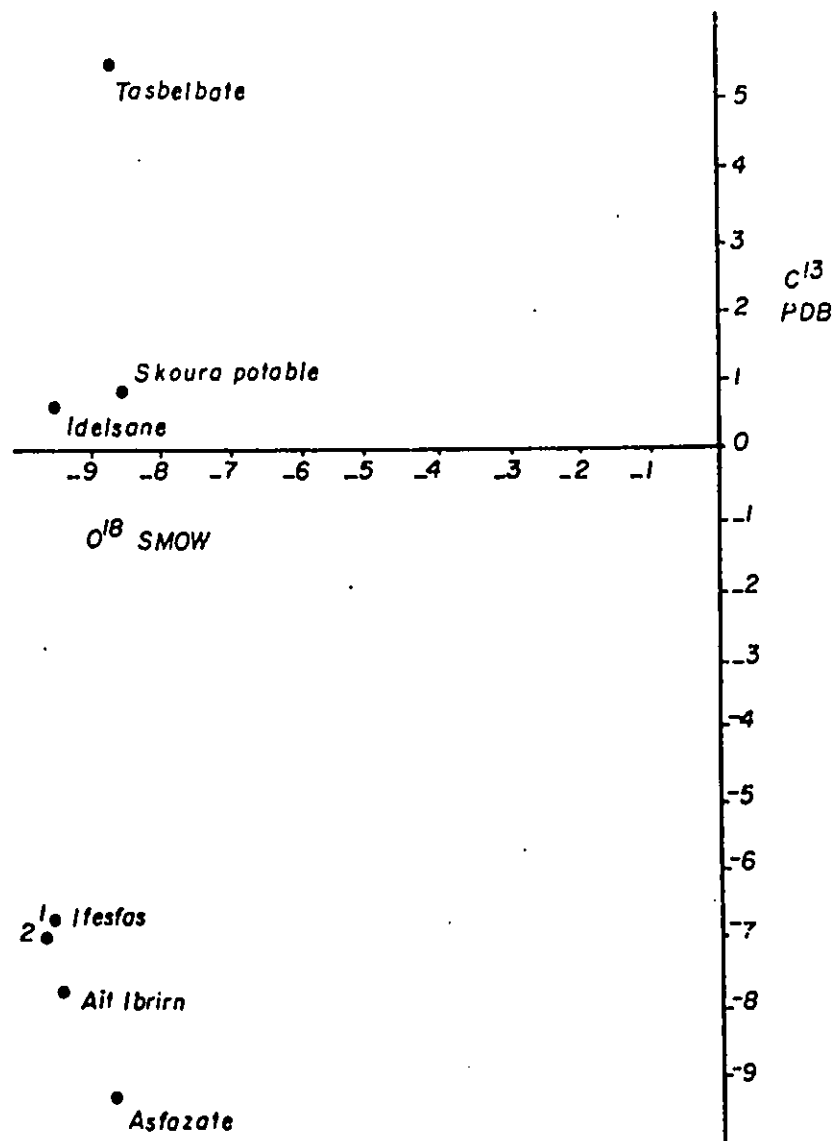
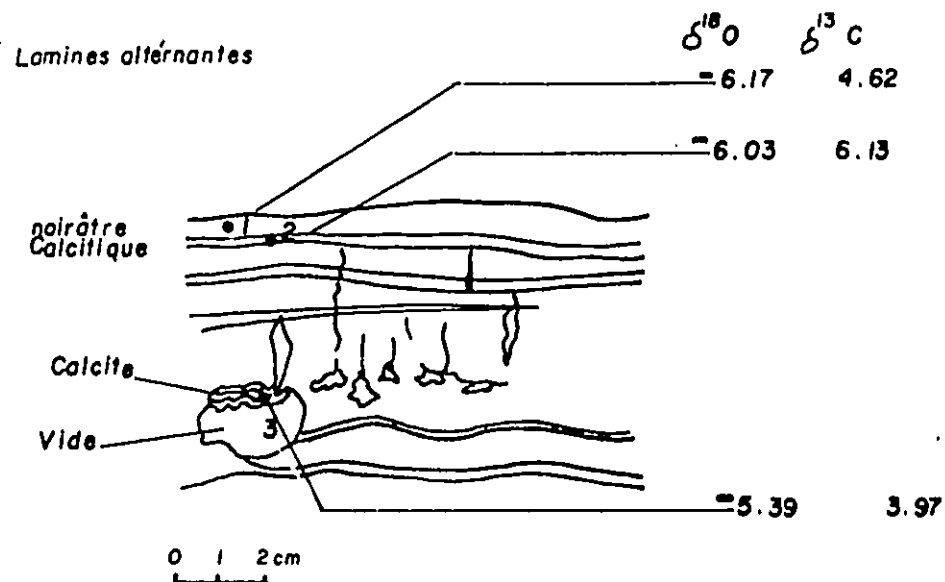
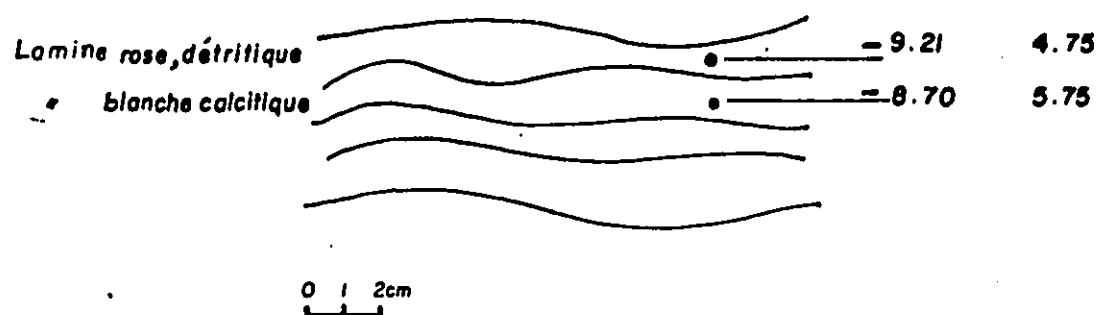


Figure n° 6.17

A_ Géochimie et structure d'un échantillon du Travertin collinaire de Skoura



B_ Echantillon du travertin (Skoura) . à faciès laminaire



dans la calcite prise aux cascates (tableau 6.2) et l'horizon noirâtre du faciès laminaire et radiaxial (tableau n° 6.1); la différence est de 7.23 pour mille. Ces variations isotopiques se confirment suivant les types de faciès pétrographiques et la morphologie du dépôt. Elles apparaissent aussi en coupe verticale d'échelle métrique. Celles-ci sont moins spectaculaires puisque la différence n'excède pas 3.00 pour mille PDB que rarement.

Conclusion.

La géochimie isotopique variable montre ainsi un développement polygénique des travertins hydrothermaux de Skoura. Ceci concorde avec les résultats macromorpho ---logiques où l'on a distingué des générations différentes de travertins.

4 - Discussion et portée de l'étude de ce cas.

L'interprétation des compositions isotopiques de nos travertins exige certaines précautions. Contrairement aux dépôts marins dont la relative homogénéité facilite le retraçage isotopique (Hillaire-Marcel, 1982), les travertins sont soumis aux influences environnementales variées, d'où la nécessité d'une connaissance avancée du milieu par l'analyse multidisciplinaire. L'information ainsi recueillie sur la pétrographie et la géochimie du travertin de Skoura permet de discuter les points suivants:

- Les influences génétiques ou le modèle de formation général de ce type de dépôt versus les particularités locales.
- La diagenèse et les cycles de cristallisation - dissolution de la calcite.

Cette discussion sera basée à la fois sur nos données personnelles et sur la littérature largement consultée. Celle-ci permettra des comparaisons à grande échelle et éclaircira aussi certains problèmes identiques posés dans notre cas.

A - Influences génétiques.

La genèse des travertins de Skoura s'avère complexe et comporte des signes d'interventions multiples. Les résultats d'analyses mégascopiques, microscopiques et géochimiques confirment

ensemble cet état de fait. Des indicateurs du rôle de la biogénèse, des facteurs physico-chimiques et des facteurs hydrologiques se manifestent à des degrés différents. Il est difficile de séparer l'action de certains facteurs, car ils agissent simultanément mais à des intensités différentes. Carozzi (1972, p. 194) désigne du terme "biochimique" les carbonates, vue cette difficulté de déterminer la part revenant à chaque processus dans la genèse du matériel.

La difficulté de distinction entre la calcite diagénétique et la calcite d'origine biologique se complique sachant que le produit final des deux processus prend des aspects identiques dans certains cas. L'exemple des ciments formés d'aiguilles aragonitiques générées par la sursaturation des eaux et leur similarité à celles liées à la décomposition cyanobactérienne est à ce propos significatif. L'investigation géochimique devient dans ces cas nécessaire.

Les travertins de Skoura ne montrent pas d'aspects aussi confus. Les traces biogéniques sont clairement distinguées et sont semblables à plusieurs égards aux traces décrites dans la littérature (Casanova, 1981; Chafetz et Folk, 1984; Chafetz et al., 1985; Emels et al., 1987).

La question qui se pose est de savoir comment ces facteurs régissent la genèse du matériel. C'est un problème longuement discuté (Symoens et Van Der Werf, 1951; Scholl et Taft, 1964; Adolphe, 1969; Doemel et Brock, 1974; Geurts, 1976; Julia, 1983; Casanova, 1981; 1984).

Le consensus n'est pas acquis. Dans le cas des travertins pleistocènes du Compégnac en France, Casanova (1984, p. 220) montre que les cristaux ne sont ni ficelés ni piégés, mais orientés autour des filaments; ce qui est aussi confirmé dans le pourtour du Bassin Natron-Magadi entre la Tanzanie et le Kenya (Casanova et Hillaire - Marcel, 1987, p. 141), où l'absence de piégeage et de ficelage de particules détritiques par les filaments algales semble être la règle. Les algues bleues, vertes, les mousses et les plantes hydrophiles ont un fort pouvoir de calcitisation relié à l'assimilation chlorophyllienne et à l'utilisation du gaz carbonique en solution dans l'eau. Des gaines et même des cellules de Phormidium incrustatum observées au microscope polarisant présentent des fibres ou des grains de calcite, malgré la décalcification préalable à l'acide acétique (Geurts, 1976, p. 13). Il en ressort que la calcite est bien interne aux cellules des algues et que les microorganismes fixent donc

directement le carbonate du calcium.

Dans le cas des travertins de Skoura, l'identification algaire n'a pas été faite pour des raisons techniques, mais de nombreuses traces biogéniques sont observées en lames minces. En effet les filaments algaires orientant la cristallisation dans un sens ou dans un autre ont été décrits dans les différents faciès (figures n° 6.7, 6.8 et 6.9). L'hydrothermalisme n'est donc pas défavorable à l'action biologique. Les deux processus coexistent et contribuent ensemble à la genèse des dépôts de travertins. Une population bactérienne et algaire adaptée à l'environnement hydrothermal est en tous cas soulagée et maintenue par les mélanges d'eaux douces provenant des précipitations ou des nappes sub-superficielles locales.

L'encroûtement est aussi influencé par des processus physico-chimiques. Ils agissent conjointement à différents degrés d'importance. Ils sont influencés par la position latitudinale de notre terrain en marge du domaine semi-aride. Ils sont aussi sensibles aux conditions locales telles que la topographie et la dénivellation due à la tectonique quaternaire. La morphologie en cascadelles observée dans certains travertins le long du ravin d'Idelsane sont tant de conditions favorables à l'évaporation et la perte du gaz carbonique accentuant le processus de précipitation des carbonates.

Les preuves d'activité physico-chimique dans la genèse des travertins de Skoura sont apparentes surtout au niveau des ciments de comblement des vides, qui comme il sera discuté reflètent des mécanismes de dissolution, précipitation et recristallisation de la calcite. Au niveau de la cristallisation primaire, ces processus agissent entre la pression du gaz carbonique, la température de l'air ambiant d'une part et ceux du milieu aqueux souterrain d'autre part. Le contact au niveau des sources accuse dans ce cas la sédimentation accélérée. C'est la raison de l'abondance de ces dépôts dans les régions à climat méditerranéen (White, 1988).

Le thermalisme est un facteur génétique essentiel dans le cas des travertins de Skoura. Nous en avons vu des preuves en étudiant la morphologie des travertins collinaires et leur composition en manganèse. Son abondance dans les roches du socle ancien et leur couverture du secondaire est confirmée par les recherches géologiques anciennes (Orcel, 1933; 1942; Malinovsky).

1952; Bouladon et Jouravsky, 1958). Certains de ces auteurs expliquent même les réserves en manganèse des grands gîtes de la région par un hydrothermalisme ancien.

Martini (1953, p. 16) remarque que l'hydrothermalisme est un facteur principal dans la formation des gisements du manganèse. Il donne comme exemple les gisements de la région de Ouarzazate (Anti Atlas) et du Maroc nord oriental (Oujda) où l'on trouve des filons hydrothermaux de manganèse économiquement exploitables.

Suite à ces travaux, nous pouvons donc déduire que:

- le lien entre le thermalisme et l'abondance de manganèse est jadis prouvé;

- dans la dépression de Ouarzazate, les dépôts travertineux étudiés sont dans une position médiane, c'est-à-dire une position isolée sur un substratum argillo-gréseux mio-pliocène, pauvre en manganèse. Les couches du socle primaire et celles du Crétacé, riches en manganèse sont très profondes. Elles représentent cependant la source principale de ce minéral en surface et dans les travertins. Les nombreuses failles servent de drains et de passages verticaux des eaux.

"Tasbelbate", source à émanations gazeuses actuelles, donne l'exemple du réseau hydrologique pouvant surgir au passé. Elle atteste de l'origine profonde des eaux. Le minéral une fois présent dans le dépôt, subit une évolution diagénétique et une dissolution- précipitation communes aux autres minéraux carbonatés. Les circulations hydriques internes au dépôt ont un rôle primordial dans l'épigenèse et la réorganisation des éléments au sein du profil. Ainsi par exemple naissent des phénomènes de seconde génération comme les taches noirâtres observées autour de certains vides. Ces taches peuvent se développer verticalement à partir d'une fissure interne ou d'une zone de contact entre les lamines. C'est-à-dire à partir d'une zone d'alimentation en eau. Leur forme peut être en branches d'arbres (figure n° 6.18). Elles rappellent la structure dendritique bien connue dans la littérature (Jones et Kahle, 1985, p. 450). Elle s'explique soit par l'influence d'algues filamenteuses ou s'attribue à la diagenèse de certains métaux (Doherty, 1980, p.495). Laouina (1987, p. 468) rappelle que les rubans noirs des croûtes de la région d'Oujda au Maroc oriental "sont avant tout métalliques".

Figure no. 6.18. Taches noires de manganèse dendritique à Skoura.



Dans les travertins de Skoura, ces éléments sont aussi métalliques et de nature manganisifère. A une échelle macroscopique, des filons d'accumulation de ce métal sont exploités de façon artisanale pour l'extraction du minéral de manganèse à Idelsane (grotte). L'abondance de tels éléments dans le milieu facilite leur apparition au sein des encroûtements et des travertins, surtout après une longue phase de diagenèse permettant l'individualisation des métaux et leur assemblage en couches ou en taches distinctes. C'est donc l'évolution sur place des dépôts qui régit la réorganisation des matières d'origine profonde au sein des travertins. On peut se demander si ces matières (manganèse) ne proviennent pas horizontalement des massifs bordiers de l'Anti-Atlas. Cette hypothèse est écartée car ces massifs contenant effectivement des roches du socle ancien (donc riches en Mn) sont entièrement isolées des glacis supportant les travertins de Skoura par la vallée encaissée du Dadès.

L'origine profonde des manganèses est à notre avis convainquante. L'aspect hydrothermal des travertins est donc appuyé par leur richesse en manganèse. Il n'est pas le seul argument, puisque la géochimie isotopique est également concordante à ce propos. Les traces isotopiques rappellent l'origine hydrothermale et métamorphique des matières.

D'après Turi (1986, p. 213) une concentration en carbone 13 élevée montre une décarbonatation des roches calcaires souterraines au contact avec la zone métamorphique. Les teneurs isotopiques des travertins de Skoura dépassent les valeurs de +5 pour mille signalées par cet auteur. Elles atteignent dans certains cas 7.6 pour mille PDB. Cette situation s'explique par le processus de la méthanogenèse (Stiller et Magaritz, 1974; Hillaire-Marcel, communication orale). Elle produit une perte du carbone lourd au substrat (ici en profondeur) et par conséquent un enrichissement notable de l'eau en Carbone 13. C'est un appui à l'hypothèse hydrothermale expliquant la genèse de ces travertins. Onze échantillons sur 19 au total ont des teneurs supérieures à 6 pour mille PDB. Elles sont identiques aux résultats donnés pour les travertins hydrothermaux du Yellowstone Park aux Etats-Unis (Friedman 1970, p.1306).

PAGINATION ERROR.

ERREUR DE PAGINATION.

TEXT COMPLETE.

LE TEXTE EST COMPLET.

NATIONAL LIBRARY OF CANADA.

BIBLIOTHEQUE NATIONALE DU CANADA.

CANADIAN THESES SERVICE.

SERVICE DES THESES CANADIENNES.

On peut donc conclure en confirmant l'aspect hydrothermal des travertins de Skoura, surtout après cette confrontation d'enseignements morphologiques, microscopiques et géochimiques tous concordants.

Ces conditions génétiques se complètent dans le cas des travertins de Skoura par le rôle joué par l'écoulement superficiel. Le faciès laminaire comporte plusieurs horizons internes détritiques révélant des écoulements en nappes cycliques. Chaque horizon de calcite pure ou riche en matière organique se suit d'un horizon plus ou moins épais de sables et argiles. Il s'en déduit que l'hydrologie de surface est un élément actif dans ce modèle local. Elle remanie la matière et contribue au développement des faciès laminaires.

B - Cristallinisation et évolution diagénétique.

L'analyse par diffraction aux rayons X des carbonates montre seulement la présence de la calcite dans les échantillons étudiés. En lames minces, les micrites sont souvent observées en zones sombres, enrichies de matière organique et de formes biologiques. Les cristaux sparitiques viennent couvrir les zones micritiques et se développent vers le centre des vides internes au sein d'une zone micritique poreuse. Ainsi, on peut établir un lien de parenté entre les micrites et les conditions déterminant une vitesse relative de cristallisation: sursaturation du milieu, abondance de microorganismes algaires et bactériens et abondance de centres de nucléation déclenchant le processus.

Les sparites quant à elles semblent indiquer un milieu sursaturé en carbonate de calcium, où la cristallisation est moins rapide mais continue par des processus physico-chimiques, pour donner des cristaux bien allongés comme ceux observés dans le faciès laminaire et radlaxial. Ceci concorde avec les observations de Bathurst (1975) et de Love et Chafetz (1988, p. 445) à propos des sparites. Elles sont considérées comme des ciments, ce qui suppose leur postériorité par rapport aux zones micritiques, et d'un autre côté suggèrent des processus de dissolution et de recristallisation de la calcite. Il est cependant opportun de signaler que la calcite sparitique des ciments peut être d'origine externe,

due à un apport nouveau par les eaux infiltrées, ou bien d'origine locale, suite aux dissolutions d'une calcite primaire.

Les preuves de la dissolution sont révélées par l'étude des lames minces, où l'on peut voir des lamines différentes traversées indifféremment par des vides reliés à ce processus. Les dépôts anciens sont soumis à une évolution temporelle suffisamment longue pour subir la dissolution, la précipitation de la calcite et la diagenèse. Celle-ci est très avancée dans les horizons de base les plus anciens. L'exemple des travertins supérieurs à faciès laminaire est à ce propos significatif.

La calcite de remplissage des fissures y est observable. Celle-ci est confirmée ancienne par les mesures de déséquilibre Uranium / Thorium. Les essais faits sur l'échantillon M89-3 (annexe 8) donnent un âge plus ancien que 300 ka BP; et la chronologie relative établie permet de l'attribuer au Quaternaire ancien. L'exposition suffisamment longue de ces dépôts accuse une diagenèse bien avancée. Ces exemples montrent une perte en carbone 13 et en oxygène 18 très marquée. La calcite de remplissage des fissures montre des valeurs respectives de -9.25 et 4.95. D'après Dickinson (1988, p.329) une telle perte est le résultat de la réaction du matériel avec les eaux météoriques au cours de la diagenèse.

- Les tableaux de valeurs isotopiques (no 6.1 et 6.2) permettent une telle confirmation car la calcite du niveau supérieur et celle des cascadelles abandonnées du niveau moyen donnent des valeurs isotopiques en carbone 13 franchement inférieures à celles de la calcite des encroûtements de la "Ségouia" ou celle du fond de la vallée. La première est égale à 0.43 pour mille alors que les deux dernières sont respectivement égales à 6.46 et 6.86. Ces derniers faciès, dont la jeunesse se déduit de la position morphologique et de l'indicateur historique (Ségouia) montre donc une diagenèse peu avancée. Leurs valeurs isotopiques assez élevées gardent encore plus les traces hydrothermales du milieu original. Celles-ci comme l'indiquent les eaux de la source sulfureuse Tasbelbate avec un résultat de 5.66 sont assez positives pour révéler l'origine interne du carbone issus des roches marines ou de la méthanogenèse interne. L'écart isotopique est considérable entre l'eau hydrothermale et les eaux de sources potables d'Alt Ibrim (-7.59) ou d'Asfazate (-8.94). Celles-ci montrent clairement l'origine atmosphérique du carbone (autour de -7 pour mille) alors que les deux sources de Skoura (Idelsane

et potable) montrent un mélange évident entre les eaux de pluie et l'eau souterraine. Elles ont respectivement une teneur en carbone 13 égale à 0.72 et 1.92 pour mille PDB. Ce mélange est logiquement concevable car elles se trouvent dans le secteur approché de Tasbelbate. La perte isotopique observée dans certains horizons peut être expliquée ainsi soit par une diagenèse - recristallisation ou encore par une modification de l'environnement hydrothermal par les eaux superficielles apportant un carbone d'origine atmosphérique ou bio-pédologique. Cette hypothèse est vraisemblable au niveau des travertins récents des cascates ou du fond de la vallée. Elle l'est moins pour les travertins du haut niveau, dont l'âge est suffisamment ancien pour permettre une action diagénétique bien avancée.

La perte isotopique signalée peut également se produire dans le cas d'une recristallisation. Les horizons sparitiques de nos échantillons sont soit le fruit de ce processus, soit issus d'une précipitation sous forme de ciments d'une calcite dissoute dans les zones micritiques. Comme les horizons superficiels sont plus exposés aux réactions de l'air atmosphérique / roche, et comme la porosité se réduit progressivement en profondeur suite aux fortes pressions et aux comblements des vides internes par la calcite, l'appauvrissement isotopique est donc compréhensible dans la transition entre un système hydrochimique ouvert et un système presque fermé en profondeur. Mises à part certaines variations réduites dues au fractionnement biologique, on note que la plupart des résultats du carbone 13 des travertins laminaires se rapprochent entre elles. Elles montrent ainsi un environnement dont le facteur principal reste hydrothermal; les variations qu'apporte l'évolution saisonnière ou cyclique sont faibles et n'effacent pas dans tous les cas l'aspect hydrothermal des dépôts.

Conclusion

L'approche pétrographique et géochimique contribue considérablement à la connaissance des travertins de Skoura resté jusqu'à présent énigmatique.

L'étude de ce cas permet d'en tirer certaines idées concordantes avec le modèle génétique des travertins hydrothermaux. L'existence d'activité biologique et son rôle sont confirmés à travers les

microstructures mises en évidence par l'étude pétrographique et les signes isotopiques du fractionnement biologique qui les accompagne.

- L'aspect hydrothermal du dépôt est prouvé au niveau microscopique et morphologique. L'évolution diagénétique se résume en un changement de structures et une redistribution de la calcite en générations de cristaux distincts et de ciments, en plus d'un changement important dans la concentration isotopique en carbone 13. L'influence de l'hydrologie de surface est perçue dans le remaniement du dépôt et l'imprégnation de certains horizons riches en oxydes de fer et dépôts détritiques, et l'organisation de faciès laminaires à grande échelle. Les teneurs isotopiques des travertins comparées à celles des sources de la région permettent de voir les liens confirmés avec l'hydrothermalisme original et les modifications rapportées aux mélanges externes des eaux.

La dernière conclusion est de souligner la diversité de faciès reliée à la diversité de morphologies et de générations. Les datations absolues et les observations morphologiques ainsi que la pétrographie et la géochimie isotopique des travertins de Skoura permettent de reconnaître plusieurs types de dépôts et donc de confirmer que le processus d'encroûtement par l'hydrothermalisme n'est pas continu durant le Quaternaire; il est au contraire actif dans certains épisodes responsables de la formation des dépôts et presque arrêté dans les autres dépendamment du jeu tectonique conditionnant l'alimentation en eau des sources thermales.

Chapitre VII

L'hydrochimie actuelle des eaux.

Dans le présent chapitre, il sera question de la structure spécifique à l'hydrochimie des eaux de notre terrain et la variabilité des ions majeurs à l'échelle temporelle et spatiale. L'analyse factorielle et la classification des données ont été utilisées. Un autre point fondamental relatif à l'hydrochimie des eaux étudiées serait la connaissance du degré de saturation des eaux vis-à-vis des matières carbonatées. Ce sera l'objet de discussion dans une étape suivante.

1- Analyse globale des données hydrochimiques.

Les techniques manuelles d'analyse et de représentation, comme les courbes ou les histogrammes ne permettent qu'une visualisation comparative de données restreintes. Elles sont cependant peu pratiques dans notre cas. Le nombre assez élevé d'analyses et la variété de données testées impose le recours aux techniques d'analyse multivariée. L'analyse factorielle en composantes principales et la régression multiple ont été effectuées à l'aide du programme S.A.S (Statistical Analysis System). Chacune de ces deux démarches est autonome, mais elles sont complémentaires. Elles visent ensemble à dégager les liens structurels explicatifs de nos données.

Pour l'analyse factorielle en composantes principales, on a voulu explorer la structure d'ensemble, de tous les échantillons à tous les points d'eau considérés. Le but est d'en extraire au mieux l'information utile pour la compréhension du fonctionnement du système étudié. L'analyse en composantes principales est à ces fins très utile. Elle a été utilisée en domaines variés comme en géographie humaine et en aménagement (Mignerot, 1972; Yeates, 1974, p. 209; Beguin, 1979 p. 162). L'option est à priori descriptive mais elle permet une investigation analytique et projective puisqu'elle donne des fondements théoriques pour l'élaboration d'hypothèses partielles au sein de notre programme de recherche globale.

L'observation analytique de données et la détection de corrélations servira d'outil de reconnaissance de la structure interne spécifique à nos données et leur degré d'organisation. Il y a donc lieu de se questionner: dans quelle mesure les six points d'eau (lieux échantillonnés) reflètent-ils la même dynamique?

Nous présentons les résultats de l'analyse en composantes principales, avant de discuter la signification des valeurs reflétées par les indices de corrélation et les composantes retenues.

A-Présentation des points d'eau échantillonnés (figure n° 2.2 dans le chapitre 2).

Le choix des points d'eau soumis à l'échantillonnage vise la comparaison des eaux de surface aux eaux souterraines et les stations d'amont à celles d'aval; ainsi nous avons étudié des sources et points d'eau en mesure d'éclaircir ces aspects.

Pour des fins pratiques de calcul, nous avons utilisé des lettres conventionnelles pour désigner les points d'eau étudiés.

Le Todgha, bassin hydrologique oriental dans ce domaine, est représenté par les échantillons prélevés aux points A et B. La première lettre indique les échantillons prélevés dans la source principale d'Imarighène. Ils représentent l'hydrosystème souterrain dans ce bassin. La lettre B indique les échantillons prélevés au niveau du radier de l'oued à Tineghir.

Le bassin versant du Dadès d'un autre côté, est représenté par le point d'eau C pour les eaux souterraines, indiquant les échantillons prélevés à la source d'Ait Ibrim, tandis que les eaux superficielles de ce bassin ont été échantillonnées dans la station hydrologique d'Ait Mouted en amont du centre urbain de Boumalne. Ces échantillons sont indiqués dans la figure par la lettre D. En raison de la longueur du Dadès, dépassant la centaine de kilomètres, une deuxième série d'analyses d'eau superficielle prélevée à son amont a été traitée. Il s'agit des eaux prélevées à M'semrir, centre administratif dans le haut Dadès en pleine montagne. Ces échantillons sont représentés dans la figure par la lettre F. Le troisième bassin versant étudié est situé dans la partie occidentale à proximité du Dadès. Il s'agit du M'goun dont les eaux superficielles échantillonnées sont indiquées dans la figure par la lettre E.

Notre tableau de données originales comprend 11 caractères (variables) et 102 analyses (échantillons d'eau), donc nous avons au total 1022 observations à traiter.

B - Matrice des corrélations.

Le tableau n° 7.1 donne les corrélations entre les variables. On y voit la forte corrélation positive entre le calcium (Ca^{2+}), les sulfates (SO_4^{2-}) et le total dissout (TD). Sachant que les fortes corrélations sont généralement celles qui s'approchent de 1 ou de -1, on peut dire que le calcium est peu corrélé avec la température (T), et le pH. Leurs valeurs négatives égales respectivement à -0.15 et -0.19 sont assez faibles. Le rapport du magnésium sur le calcium montre également une corrélation faible malgré sa valeur égale à -0.48. Des indices de corrélation forte s'observent entre le magnésium (Mg), le total dissous (TD), les ions du sodium (Na^+), des sulfates SO_4^{2-} et le rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$. Ils montrent une évolution différente de celle du pH, qui est corrélé négativement à l'ion Mg bien qu'à une valeur faible.

Le sodium et les chlorures (Cl^-) montrent une corrélation maximale de l'ordre de 0.92 et une autre relativement forte avec le total dissous (0.72). Le plus négatif des indices de corrélation avec le sodium s'avère être celui le reliant avec les bicarbonates HCO_3^- , sa valeur égale à -0.12 n'est cependant pas clairement nuancée, et reflète une corrélation faible et donc non significative. L'ion potassium (K^+) quant à lui montre des corrélations faibles avec le reste des variables. Les chlorures et le total dissous évoluent ensemble dans le même sens avec un indice de corrélation positif de 0.61. Les sulfates et le total dissous montrent un sens d'évolution semblable avec un indice de corrélation cependant plus fort de 0.89. La corrélation entre l'ion HCO_3^- et le pH est de -0.35. Elle reste la plus révélatrice des corrélations au niveau de cet ion malgré sa valeur faible. Enfin la corrélation de la variable chlorure à la température mérite d'être signalée. Bien qu'aussi faible (0.41), elle reste la plus remarquable des corrélations au niveau de la température.

Tableau n° 7.1

	ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES									
	CORRELATIONS									
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TD	T	PH
HCO ₃ ²⁺	0.26788	0.51646	-0.07450	-0.15377	-0.35853	-0.24905	0.01032	-0.05186	-0.07450	0.08624
Na ⁺	0.32939	0.04896	0.92241	-0.10007	-0.19270	0.34803	-0.01788	-0.11482	-0.22153	
K ⁺	0.00087	0.49006	0.47140	-0.05792	0.41322	-0.09288	-0.03201	0.07775		
CL ⁻	0.21079	0.36283	-0.12208	0.02517	0.41151	-0.00052	-0.10341			
SO ₄ ²⁻	0.71345	0.01246	-0.12208	-0.02517	0.41151	-0.09288	-0.03201			
HCO ₃ ⁻	0.30614	0.66901	0.72464	0.02517	0.41151	-0.09288	-0.03201			
TD	0.78879	0.28079	0.28849	-0.13261	-0.01530	-0.08408	-0.10341			
T	-0.15965	-0.10389	-0.05677	-0.06028	-0.01530	-0.08408	-0.10341			
PH	-0.19409	-0.10389	-0.05677	-0.06028	-0.01530	-0.08408	-0.10341			
RAPPORT	-0.48693	0.59331	0.06625	0.08527	0.10291	-0.08408	-0.10341			

C - Les composantes.

Les besoins de la présente recherche se résument comme signalé plus haut à une connaissance de la structure d'ensemble caractérisant nos données. Cette structure est reflétée au niveau de la variance elle-même exprimée par les composantes retenues. Chacune de ces composantes est constituée par l'association de plusieurs classes hydrochimiques. Celles-ci sont déterminées en fonction des coefficients de saturation permettant de regrouper en composantes principales la série de données à notre disposition, sans redondance et tout en minimisant la perte d'information. Le nombre des composantes retenues peut varier selon le critère choisi pour le déterminer. La possibilité de négliger toutes les composantes dont le pourcentage de corrélation est inférieur au pourcentage moyen de chaque variable est un exemple de critère applicable à ce choix. Il détermine le nombre de composantes en s'arrêtant par exemple à 9% quand le nombre des variables est de 11. La procédure d'analyse informatique que nous avons adoptée dans ce travail se base sur un critère automatique, consistant à retenir les composantes dont la valeur propre (eigenvalue) excède 1. Ces composantes sont au nombre de quatre comme le montre le tableau n° 7.2B. Les quatre premières composantes expliquent 79.76% de la variation totale (tableau n° 7.2A). Ce pourcentage se décompose selon les composantes de la manière suivante:

Première composante expliquant 35.99%

Deuxième composante expliquant 18.93%

Troisième composante expliquant 13.03%

Quatrième composante expliquant 11.82%

i- Première composante.

Elle est à première vue unipolaire (tableau, n° 7.2B). Un premier groupe de variables s'individualise à ce niveau. Il est composé des TD, SO_4^{2-} , Na et dans une certaine mesure des éléments Cl^- et Mg^{2+} . Ces

Tableau n° 7.2

EIGENVALUES OF THE CORRELATION MATRIX: TOTAL = 11 AVERAGE = 1.

EIGENVALUE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DIFFERENCE	3.92587	2.00209	1.43354	1.29979	0.84591	0.62332	0.54879	0.07310	0.04694	0.04347	0.00424
VARIATION	1.07649	0.64054	0.43374	0.40187	0.22317	0.07334	0.49388	0.00626	0.02494	0.04010	0.00094
CUMULATIVE	0.3599	0.5392	0.6793	0.7776	0.8783	0.9311	0.9829	0.9893	0.9956	0.9996	1.0000

4 FACTORS WILL BE RETAINED BY THE MINIGEN CRITERION

FACTOR PATTERN

	FACTOR1	FACTOR2	FACTOR3	FACTOR4
CA ²	0.65010	-0.70717	0.03405	-0.01965
MG ²	0.74888	0.35181	0.15028	-0.41302
NA ²	0.84360	0.33742	0.00692	-0.24648
K ²	-0.01976	-0.10689	-0.20482	-0.68676
SL ²	0.77142	-0.26759	-0.03762	-0.27842
SH ²	-0.81392	-0.28337	-0.33716	0.12337
HCOS ²	-0.96916	-0.28506	0.75407	0.15337
TD	0.92379	-0.22907	-0.05910	-0.06200
T	0.23379	0.27174	-0.41724	-0.26624
PH	-0.12241	0.32179	-0.69396	-0.19334
RAPPORT	0.05526	0.72346	0.07140	0.34066

VARIANCE EXPLAINED BY EACH FACTOR

FACTOR1	FACTOR2	FACTOR3	FACTOR4
3.92587	2.00209	1.43354	1.29979

FINAL CORRELATION ESTIMATES: TOTAL = 8.774032

CA ²	0.926528	MG ²	0.889086	NA ²	0.828119	K ²	0.573569	SL ²	0.859165	SH ²	0.902604	HCOS ²	0.751117	TD	0.988704	T	0.615503	PH	0.597441	RAPPORT	0.886377
-----------------	----------	-----------------	----------	-----------------	----------	----------------	----------	-----------------	----------	-----------------	----------	-------------------	----------	----	----------	---	----------	----	----------	---------	----------

SCORING COEFFICIENTS ESTIMATED BY REGRESSION

SQUARED MULTIPLE CORRELATIONS OF THE VARIABLES WITH EACH FACTOR

FACTOR1	FACTOR2	FACTOR3	FACTOR4
1.000000	1.000000	1.000000	1.000000

variables montrent des saturations positives distinctes, variant dans l'intervalle 0.74 et 0.96. Un deuxième groupe de variables faiblement associées à ce facteur s'individualise. Il s'agit des éléments hydrochimiques K^+ , HCO_3^- et de la variable pH. Leurs saturations varient entre -0.12 et -0.019. Ils reflètent en réalité une certaine neutralité vis-à-vis de cette composante.

ii- Deuxième composante.

Dans toute la série de données analysées, une caractéristique essentielle se dégage à ce niveau. Cette composante met en évidence une deuxième série de variables ayant une évolution opposée comme la variable rapport Mg^{2+}/Ca^{2+} et la température. Ces variables sont fortement associées à cette composante avec des saturations respectives de 0.76 et 0.57. Cette même série contient aussi les variables chlorures, sodium et magnésium, mais leurs saturations sont très faibles. On constate une évolution concordante des saturations du calcium, des bicarbonates et dans une certaine mesure du potassium et des sulfates. Les valeurs propres à ces variables sont négatives et varient dans une fourchette s'étendant de -0.10 à -0.7. Elles sont faiblement associées à cette composante.

iii- Troisième composante.

L'ion HCO_3^- s'oppose franchement au pH au niveau de cette composante. La première variable montre une saturation de 0.75 tandis que la deuxième est de -0.69. En d'autres termes les pH les plus élevés ne correspondent pas toujours aux concentrations similaires en bicarbonates. Ceci représente en soit une remarque essentielle qui mérite une discussion plus profonde car elle soulève le problème des particularités exceptionnelles de certaines situations hydrochimiques, comme on le verra par la suite à notre essai d'interprétation. La température est aussi associée à ce facteur avec une saturation de 0.41. Les autres variables comme le potassium et les sulfates le sont moins. Elles évoluent dans un sens négatif similaire à celui des pH.

iv- Quatrième composante.

Sa contribution dans l'explication de la variance totale est moindre. Elle est cependant expressive car elle met en évidence certains liens non moins révélateurs comme nous verrons en discutant de sa signification. Elle oppose un ensemble comportant K^+ , Mg^{2+}/Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- à un deuxième ensemble de variables regroupant Cl^- , T, Na^+ et pH. Les variables les plus associées à cette composante sont le potassium et le rapport Mg^{2+}/Ca^{2+} avec des saturations respectives de 0.68 et 0.54.

D-Interprétation.

i - Quelques principes généraux.

Pour les fins d'interprétation, nous considérons à priori que nos variables expriment des enseignements différents selon la nature de la variable. Le calcium, magnésium et bicarbonates par exemple, quand ils sont reliés ensemble par des corrélations significatives, donnent à notre avis une information liée au substratum géologique. D'autres interprétations peuvent cependant être attribuées à ces mêmes variables dépendamment du comportement des autres variables; ainsi peut-on en déduire l'influence de certains aquifères sur l'hydrochimie des eaux, pourvu que les caractéristiques de ces aquifères soient connues.

D'autres variables comme la température et le pH renseignent d'abord sur le cadre climatique et hydrologique. Cette dernière est cependant assez complexe car elle est influencée par des paramètres multiples, biotiques et abiotiques. Cette même remarque est d'ailleurs aussi vraie pour les bicarbonates pouvant provenir d'origines diverses. Ces exemples illustrent donc les risques d'erreur d'interprétation hâtive. La connaissance du cadre physique régional, des comportements hydrologiques et hydrochimiques est très utile comme fondement d'interprétation. Cette interprétation se base à la fois sur les indices de corrélation, les saturations, les notes factorielles (tableaux 7.1; 7.2) et sur les résultats de la classification effectuée (figure n° 7.1 et figure n° 7.2).

Figure. 7.1

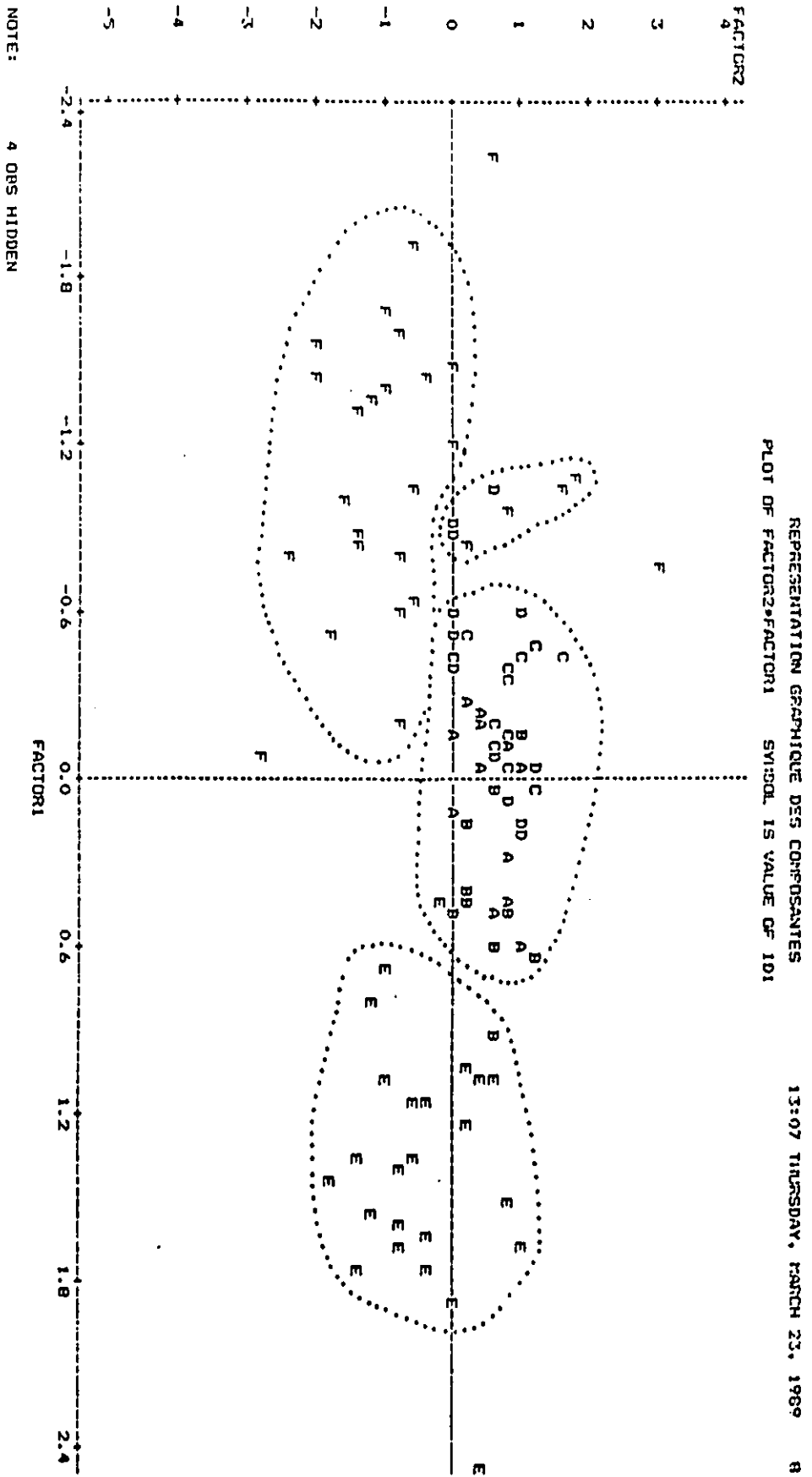
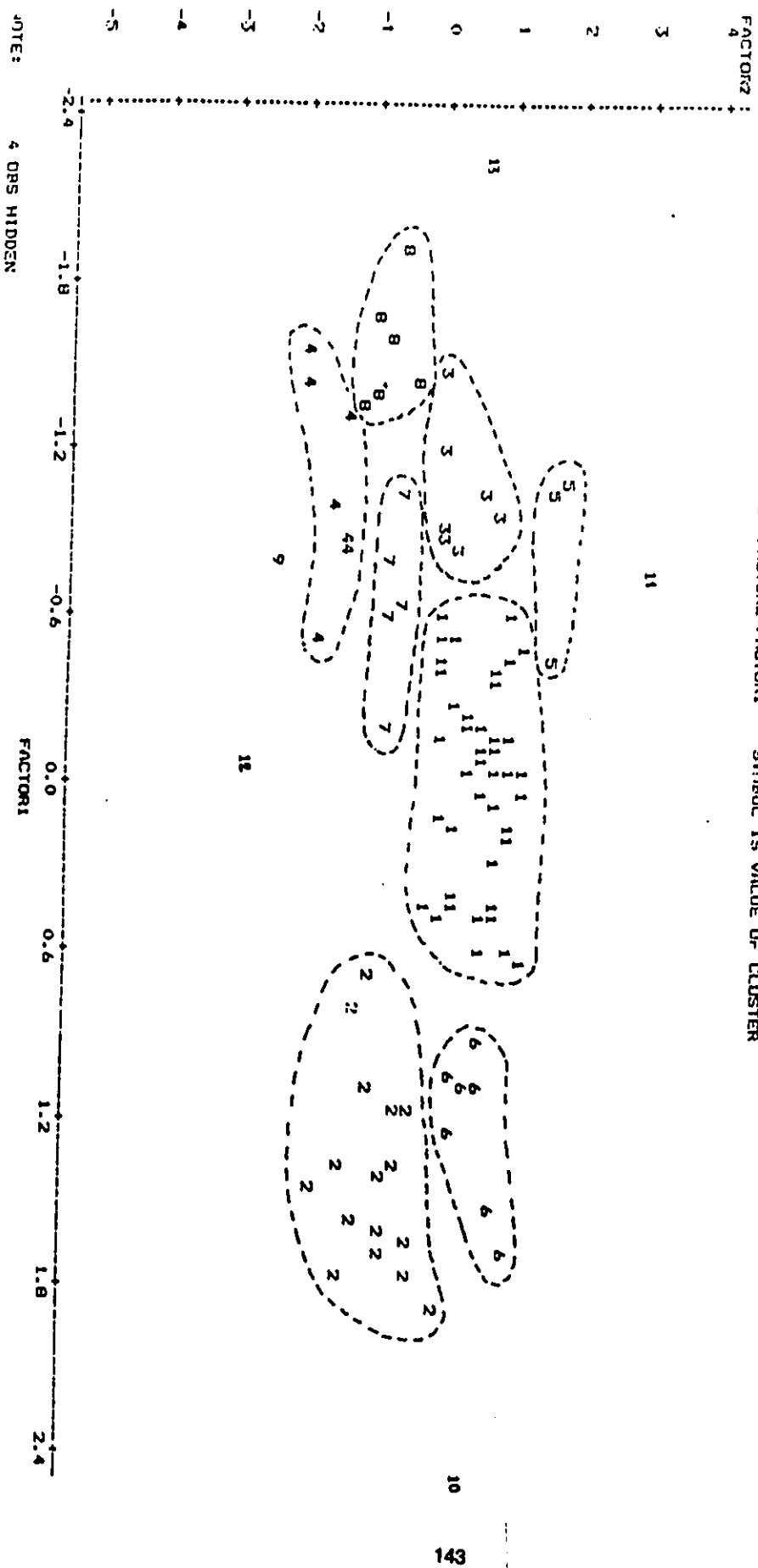


Figure 7.2

REPRESENTATION GRAPHIQUE DES GROUPEES RETENUS
PLOT OF FACTOR2*FACTOR1 SYMBOL IS VALUE OF CLUSTER

13:07 THURSDAY, MARCH 23, 1989 23



L'essentiel de la variation globale des paramètres analysés est résumé par les quatre composantes. Certaines particularités renseignant sur des situations complexes apparaissent au niveau de chaque composante. Elles impliquent des paramètres saisonniers climatiques et hydrologiques, lithologiques et spatio-temporels.

ii - La première composante.

Elle est le reflet d'une saisonnalité climatique et hydrologique et d'une variabilité régionale des variables. Elle exprime les fluctuations des variables qui lui sont associées suivant l'influence des facteurs climatiques comme les précipitations, la température de l'air, l'évaporation, et des facteurs hydrologiques comme le débit et le régime saisonnier. Cette interprétation n'est pas gratuite. Elle repose sur le fondement suivant: l'influence de la saisonnalité climatique et hydrologique s'exprime à travers des variables comme le sodium, chlorures et sulfates dont on connaît le lien avec la forte évaporation d'été. L'impact d'une telle évaporation se réduit par contre en hiver. Il s'en suit que les variables reliées à ce phénomène connaissent une fluctuation saisonnière considérable. L'observation des corrélations de la température avec différentes variables (tableau 7.1) montre des valeurs généralement faibles.

La seule corrélation relativement importante est celle l'unissant aux chlorures (0.41). Elle reflète la forte évaporation reliant à la fois les hautes températures et les fortes concentrations des chlorures dans l'eau.

- Le total rocheux dissous est une variable essentielle dans le réseau de corrélations et des saturations qui se dessine. Ceci se déduit au niveau des paires réciproques observées dans la matrice des corrélations (0.89 avec le SO_4^{2-} , 0.78 avec le Ca^{2+} , 0.72 avec le Na^+). Il se confirme aussi au niveau des composantes, où par exemple on atteint une saturation égale à 0.96 dans la variation partielle relative au TD dans la première composante.

-Le sodium se place en deuxième position d'importance dans ce groupe d'éléments actifs. Sa forte corrélation s'observe avec les chlorures montrant un indice de 0.92 dans la matrice des corrélations et 0.84 au niveau de la première composante. On peut se demander si cette corrélation ne s'explique pas par la

composition géologique des roches dans les bassins versants. C'est une condition à considérer dans un bassin riche en sels et en gypses comme dans notre domaine. Il est cependant connu que les roches à faciès gypso-salifères sont très localisées dans l'espace et leur contribution à la géochimie des eaux est contrôlée par les paramètres hydrologiques, qui sont influencés par le climat et son évolution saisonnière.

Cette première composante détermine d'autres variables à considérer malgré leurs valeurs de corrélation moindres. Il s'agit en particulier des sulfates, chlorures, calcium et magnésium. Ces variables s'influencent - elles de façon mutuelle ou bien leur comportement s'explique par le rôle d'un (ou plusieurs) autre(s) paramètre(s). Certaines des variables analysées sont de nature à évoquer l'interaction et l'influence mutuelle. C'est le cas par exemple des TD, dont le poid n'est qu'un reflet direct de la contribution partielle d'autres éléments. Les chlorures s'avèrent aussi logiquement associés au sodium, conformément à la composition géochimique des sels associés aux effets climatiques saisonniers. Cette saisonnalité se reflète aussi au niveau d'autres variables comme le magésium et le calcium.

La variation des débits et le bilan des apports hydrologiques atmosphériques et terrestres selon les saisons est en mesure d'expliquer leur comportement. En effet, les concentrations accrues d'été, période des faibles débits sont très différentes des concentrations d'hiver, ou du printemps. Celles-ci sont réduites à cause de la dilution par les eaux de pluie et la fonte des neiges des hauts sommets atlasiques. La variation saisonnière des conditions climatiques et hydrologiques semble aussi affecter ces variables mais à des degrés d'importance variés. Le pH, dont la faible saturation de -0.12 est une variable pouvant paraître anormale au niveau de cette composante. Il ne varie pas beaucoup dans la réalité. Il s'associe faiblement à cette composante. L'observation des données brutes montre en effet que ses valeurs ne sortent pas à l'extérieur d'une fourchette s'étendant de 7 à 9.6. Une seule mesure dans toute la série traitée descend à 6.6. Il est donc clair que cette variable n'est pas très influencée par les fluctuations saisonnières, car même en pleine période pluvieuse les pH n'atteignent pas des seuils d'agressivité critique. Sa faible association à la première composante est ainsi logique et compréhensible.

La variable HCO_3 d'un autre côté ne s'associe que faiblement à cette composante saisonnière. Elle est

plutôt influencée par d'autres conditions d'ordre chimiques et hydrogéologiques comme on le discutera dans les paragraphes qui se rapportent aux deuxième et troisième composante. Notons enfin que cette première composante met en évidence l'opposition entre deux bassins versants fort éloignés l'un de l'autre (figure n° 7.1). Le M'goun (Edans la figure) est situé à l'ouest. Il est plus élevé, et mieux alimenté en précipitations et neiges. Son débit est mieux soutenu. La saisonnalité qui l'influence est différente de celle observée à M'semrir (F dans la figure) située au nord-est. Ce dernier souffre d'une sécheresse plus accentuée. En d'autres termes quand les eaux montrent les traces d'une forte évaporation par exemple à M'semrir, le M'goun est encore sous l'effet des fontes de neiges s'étendant parfois jusqu'au début d'été. Ceci influence l'hydrochimie de façon clairement contrastée en comparant ces deux bassins versants.

La figure n° 7.1 donne une illustration graphique des valeurs de corrélation classées à base des deux premières composantes. Elle permet de voir l'opposition des deux stations géographiquement éloignées: Aïfer au M'goun (station E) et M'semrir au Dadès (station F). L'opposition maximale entre ces deux stations apparaît entre E (observation 51 dans l'annexe n° 5) et F (obs. 88 dans le même tableau) correspondant simultanément aux échantillons prélevés aux mois de mars et de mai. Une certaine similitude s'observe entre les points d'eau de la bordure atlasique dans le Todgha et le Dadès (points A, B, C et D de la figure 7.1 et tableau annexe 5). Les eaux de ces deux bassins semblent se rapprocher pour former un groupe intermédiaire, mais ils sont loin de montrer une homogénéité absolue car la procédure de classification adoptée les subdivise en sous groupes différents (figure n° 7.1).

iii- La deuxième composante.

Elle peut s'interpréter en relation avec la nature des aquifères et l'origine des eaux, car elle influence les variables reliées à la nature du substratum géologique, et à l'origine des eaux. Cette constatation s'exprime surtout au niveau du calcium, du rapport Mg^{2+}/Ca^{2+} , et de la température des eaux. Les deux premières sont directement influencées par l'origine de l'eau. Quand elle provient d'aquifères calcaires, elle montre des concentrations élevée en calcium. Le magnésium quant à lui, s'accroît dans les eaux provenant des aquifères dolomitiques ou calcaro-dolomitiques. Ils sont d'ailleurs abondants dans ce domaine.

L'origine des eaux est variable selon les points d'eau considérés. Son influence sur la structure hydrochimique est évidente au niveau de cette deuxième composante. Dépendamment de l'aquifère en fonction, la concentration de ces variables marque donc l'origine de l'eau. Cette interprétation est confirmée par la variable température des eaux. Suivant cette composante, une dichotomie hydrothermique se distingue d'abord entre les eaux de surface et les eaux souterraines, et ensuite entre les eaux provenant d'aquifères différents selon les réserves, la stabilité de l'aquifère et ses relations avec l'extérieur.

La température des eaux superficielles, plus influencées par l'atmosphère varie plus considérablement que celle des eaux souterraines. Celle-ci est en général plus stable surtout quand l'aquifère est bien soutenu de façon à être indifférent à la température des eaux de réalimentation saisonnière. Ceci est le cas des sources d'aquifères liasiques comme à Imarighène au Todgha et Ait Ibriïn au Dadès. Leurs températures sortent rarement de l'intervalle 18 - 23 degré Célcius. calcium et le bicarbonate sont des ions à comportements semblables vis à vis de cette deuxième composante mais avec une intensité différente.

L'origine des eaux influence la concentration en bicarbonate, mais de façon moindre comparativement au calcium. Le bicarbonate peut se former aussi par processus chimique en contact de l'eau avec le gaz carbonique atmosphérique, il est donc moins associé à la composante origine des eaux, tandis que le calcium vient en majorité de la dissolution des roches, et montre donc un lien plus fort avec cette composante. Les deux ions connaissent des variations lentes régressives ou progressive à l'échelle temporelle. Ces variations sont commandées par des processus physico-chimiques réguliers. La distinction du comportement des ions Ca^{2+} et HCO_3^- comparativement avec celui de la température est donc compréhensible dans un cadre régional et à un niveau d'étude assez détaillé. Les deux ions évoquent une origine calcaire des eaux; ce qui ne semble pas faire l'exception dans un domaine où l'hydrologie s'avère fortement liée aux nappes atlasiques. La variabilité structurale, altimétrique et bio-climatique est nettement observable dans ce cadre physique. Les résultantes hydrochimiques en sont fortement reliées.

En tenant compte de cette réalité on s'aperçoit que la deuxième composante montre un autre phénomène logique au niveau des variables T, Mg^{2+} et rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ comparativement avec la variable calcium. On remarque que le comportement des trois premières variables s'oppose à celui du calcium. Nous

essayons d'expliciter ce fait dans les lignes suivantes. La géologie du terrain étudié montre une structure caractérisée par l'abondance des couches devenant plus purement calcaire vers l'amont. Les couches les plus massives ou légèrement entrecoupées d'intercalations marneuses apparaissent aux alentours d'Ait Toumerte, M'semrir et Ait Hani. Les couches dolomitiques et calcaire - dolomitiques aptes à apporter des quantités considérables de magnésium sont surtout concentrées sur les bordures, tout au long de l'accident tectonique sud-atlasique majeur. Les eaux qui en proviennent sont plus chargées d'ions magnésiens que les eaux provenant des aquifères calcaires d'amont. La charge accrue en magnésium influence la variable rapport Mg^{2+}/Ca^{2+} qui augmente au même rythme. L'origine des eaux est donc essentielle pour la compréhension des concentrations ioniques et de leur nature.

La question se pose maintenant à propos du comportement de la température. La deuxième composante de cette analyse rend compte d'un état de faits confirmé par la réalité de notre domaine. Les hautes températures s'enregistrent dans les eaux superficielles en été, et pour les eaux souterraines en automne. Cette période se caractérise parallèlement par une sécheresse pesante sur le régime hydrologique régional. La majorité des sources alimentent des ruisseaux locaux. Les rivières principales, Dadès, Todgha et en partie M'goun sont généralement coupées en courts tronçons. Les eaux d'amont n'atteignent l'aval qu'en période humide, ce qui n'est pas le cas en été.

Ainsi comprendrait-on que les systèmes actifs en période sèche sont les systèmes dolomitiques ou calcaire-dolomitiques du Lias dans les bordures. Ils influencent considérablement la teneur en magnésium et la valeur de la variable Mg^{2+}/Ca^{2+} . Cette même période correspond aux températures élevées surtout pour les eaux superficielles. Les eaux provenant d'aquifères calcaires pauvres en magnésium et principale source de calcium n'arrivent aux points étudiés qu'en période humide. C'est à dire pendant les périodes où la température s'abaisse. Ce processus est clairement mis en évidence au niveau de cette composante interprétée comme résumant l'influence des origines hydrologiques sur la structure hydrochimique.

iv-La troisième composante.

Elle est déterminée par une structure opposant les HCO_3 et le pH avec des saturations respectives de 0.75 et -0.69 (tableau 7.2B). L'interprétation d'une telle situation peut montrer diverses causes toutes chimiquement admises. Un pH agressif évoque un hydrosystème où les ions H^+ s'activent en abondance.

Il évoque des températures assez basses pour permettre la combinaison du gaz carbonique et par la suite d'activer les processus de dissolution des calcaires. Le bicarbonate peut en réalité avoir deux sources principales: hydro-aérienne ou hydro- géologique. Dans la première se réalise la réaction suivante:



et dans la seconde, les carbonates s'associent aux H^+ supplémentaires de l'eau



Dans les deux cas un pH assez bas favorise une tendance à élever la concentration des bicarbonates comme le montre la troisième composante de l'analyse.

Ces considérations confirment les particularités des hydrosystèmes d'oasis. Dans ces milieux de forte intervention humaine et d'intense couvert végétal concentré le long de terroirs fortement exploités et régulièrement irrigués, l'hydrochimie n'est aucunement à l'abri d'influences d'un milieu de ce type.

Cette composante reflète des réactions hydrochimiques compréhensibles dans un contexte environnemental. Nous pensons que les facteurs biologiques et anthropiques sont responsables de la variation qu'elle exprime. L'argumentation en provient des considérations suivantes:

- la période de forte association des variables à cette composante s'avère être celle d'opérations agricoles multiples. Le tableau (annexe 5) des notes factorielles des échantillons traités montre la valeur

de -2.18 correspondant au mois de juin au M'goun (60 E sur le tableau), -2.44 correspondant au mois de février à M'semrir (87 F sur le tableau), et -2.99 correspondant au mois de mars dans la même station (88 F sur le tableau).

- D'intenses activités biologiques et végétales surviennent aux mêmes moments, car c'est l'optimum végétatif du printemps.

L'effet de montagne peut expliquer un certain retard jusqu'en juin à M'semrir.

- les variables les plus associées à cette composante sont des variables directement influencées par le couvert végétal, les organismes vivants et les activités humaines. Il s'agit surtout du pH et de HCO_3^- . Les deux sont influencées par la respiration des arbres, le CO_2 atmosphérique et organique et la pollution des eaux.

Un récent article de Henriskon et Brakke (1988) démontre les liens entre les ions provenant de fertilisants agricoles et l'acidité du milieu aquatique au Norway en Angleterre. Ces considérations évoquent ainsi le sens de la troisième composante de cette analyse. Elle est surtout d'ordre environnemental.

v-La quatrième composante.

Elle résume l'essentiel de la variation résiduelle. Nous l'interprétons comme résumant l'impact des paramètres spatio-lithologiques. L'évidence de cette interprétation est donnée par la concordance des résultats de l'analyse à la réalité du terrain.

Cette composante montre la forte association des variables potassium, rapport et magnésium. Les sources principales des ions K^+ et Mg^{2+} sont des roches très localisées au point de vue spatial. Le premier provient surtout des affleurements gypsifères de la bordure atlasique et des roches triasiques affleurant dans les diapirs d'amont. Le second rentre dans la constitution des roches dolomitiques de bordure comme il a été précédemment signalé. La distribution géographique de ces affleurements montre une abondance marquée aux régions d'ouest de notre terrain. Quelques affleurements triasiques apparaissent également sur les axes des plis-faillés et des diapirs en amont du Dadès et du Todgha.

Au bassin versant du M'goun, on trouve des affleurements gypso- salifères du Trias assez répandus, comme à l'affluent assif n'Ait Ahmed.

La disparité régionale reliée à la composition lithologique variable, s'exprime par des concentrations en potassium plus fortes au M'goun et à M'semrir. Ces affleurements éloignés et isolé n'interviennent que sporadiquement dans l'hydrochimie des eaux dans les points échantillonnés. Quand ils interviennent par l'intermédiaire des crues d'hiver, ils élèvent remarquablement les concentrations du potassium et du magnésium dans les points d'eau étudiés. Il en résulte que la variable K est peu fluctuante dans la structure globale de nos analyses. Les indices de corrélations en donnent la preuve (tableau 7.1) avec la faiblesse de valeurs.

Le facteur quatre quant à lui rend compte de cette association lithologique et de sa disparité spatiale en démontrant la similitude de son comportement avec le magnésium influençant de son côté celui du rapport. Ces liens sont entre autres des éléments en faveur d'une hypothèse de travail que nous avons retenue, à savoir l'impact anthropique sur le chimisme des eaux dans ce domaine anciennement et densément peuplé. Les phosphates sont en général un autre indicateur tangible pour confirmer cet impact, mais ils sont moins utiles dans notre cas. Ils sont abondants à l'état naturel dans certains secteurs de notre domaine en particulier dans les calcaires éocènes (Gauthier, 1957). Les nitrates et le potassium sont plus significatifs. L'étude de leur variabilité temporelle et spatiale nous paraît dès lors plus convainquante comme le montrent les régressions dont on présentera les résultats ultérieurement. Il est pour l'instant légitime de soumettre ces hypothèses à un nouveau test, permettant de voir au mieux les liens entre les variables. Il serait plus significatif de tenir compte de la dimension spatiale; c'est à dire des différences intra-régionales à tous les niveaux. Nous avons amorcé des analyses de régression simple et de régression multiple pour éclaircir ces points. Les résultats en seront donnés dans le chapitre neuf.

E-Classification des variables.

Une classification automatique basée sur la méthode des centroides a été effectuée. Elle montre sur le plan des deux premières composantes un nombre total de treize classes (figure n° 7.2). La typologie

régionale précédemment signalée entre les différents bassins versants reste apparente. Mais on retrouve la diversité interne et la spécificité des sous groupes dans chaque bassin versant. Les variables appartenant au M'goun par exemple se trouvent regroupées en deux classes distinctes: 2 et 3 sur la figure. La deuxième composante interprétée comme révélatrice des variations hydrochimiques appropriées à l'origine des eaux montre en effet une certaine différence à l'intérieur du bassin versant du M'goun. Les deux sous groupes apparus reflètent le poids de cette variabilité hydrologique, car comme il a été discuté, certains échantillons sont fortement influencés par l'affluent d'Alt Ahmed, issu d'un substrat essentiellement gypso-salifère. Son drainage uniquement saisonnier serait en mesure de différencier les deux sous groupes (2 et 6) dans l'ensemble des variables du M'goun. La même remarque s'observe à M'semrir en amont du Dadès. La connaissance du réseau d'affluents secondaires de la rivière et la diversité spatiale des conditions physico-humaines apporterait l'explication des sous groupes déterminés par la classification.

Les événements exceptionnels tels que les orages d'été et les sécheresses irrégulières peuvent créer des situations particulières, dans lesquelles l'hydrochimie de l'échantillon l'identifie dans toute la série des variables du groupe. Ainsi, on peut voir des groupes composés d'une seule variable comme ceux portant les numéros 11 ou 12.

Nous concluons que la diversité et la complexité de l'environnement physique et humain des bassins versants étudiés s'est explicitement exprimée, que ce soit au niveau des composantes ou dans la classification effectuée.

2-Charge rocheuse et saturation des eaux:

Dans une première étape nous discuterons des résultats de calcul des taux rocheux véhiculés par les eaux. La deuxième sera consacrée à l'évaluation du degré de saturation en utilisant les méthodes d'estimation globale mises au point par Hakim (1982) et le programme WATSPEC basé sur l'équilibre thermodynamique des eaux. Il s'agit d'une formulation des mêmes principes et lois précédemment appliquées à des hydrosystèmes karstiques (Geurts, 1976; Backalowitch, 1979; Lauriol, et al. 1987).

A-Evaluation de la charge rocheuse véhiculée par les eaux.

I-Méthode:

Dans le but d'évaluer le taux d'éléments rocheux évacués par les différentes sources et points d'eau, nous avons procédé par l'application de la méthode d'évaluation de la dissolution spécifique (Hakim, 1982; 1984; 1987). Elle permet en même temps de mettre en évidence l'importance du tonnage exporté et l'origine dominante des matières dissoutes.

Deux ensembles sont à ce propos différenciés: les éléments carbonatés (E.O.C) et les éléments gypso-sulfatés (E.G.S). Cette distinction est une étape utile pour des comparaisons spatiales et temporelles (entre les sources différentes et les cours d'eau superficiels). Elle l'est aussi pour l'évaluation globale des taux. La quantité rocheuse dissoute dans chaque échantillon étant égale à la somme des poids spécifiques de tous les ions issus des deux ensembles. Les données analysées sont des données brutes comportant des variables d'origine (ions) et des variables calculées (E.O.C et E.G.S) et l'indice "k". Celui-ci mettant en rapport le total dissout et la conductivité (TRD/Cté) est un indice de comparaison significatif. Il est un moyen rapide pour se faire une idée approximative sur la minéralisation d'une eau en se basant sur l'unique mesure de la conductivité. Ceci-dit, sa validité n'est cependant pas confirmée quand il ne résulte pas d'analyses préliminaires suffisamment nombreuses pour permettre une généralisation crédible de cet indice.

II-Présentation des résultats:

L'observation des résultats d'analyses permet de classer les points d'eau sur le critère du tonnage rocheux moyen exporté dans chaque point d'eau. Par ordre de croissance, nous obtenons ainsi la succession suivante: le Dadès à M'semrir (numéro dans l'inventaire des ressources en eaux IRE n° 257/46) avec 280 mg/l. La source d'Ait Ibrim à la bordure du versant sud-atlasique (IRE n° 515/55) avec une charge minérale 336mg/l. Le Dadès à la station d'Ait Mouted (IRE n° 509/55) montre une valeur de 338 mg/l.

La source d'Imarighène au Todgha (IRE n° 336/55) avec 380 mg/l. La rivière du Todgha près de Tineghir

avec 410 mg/l et enfin le M'goun à la station d'Aïfer (IRE n°510/55) avec une charge moyenne de 607 mg/l.

Les effets d'altitude sont donc traduits avec un accroissement des charges vers l'aval des bassins versants et dans les parties orientales de la région. La comparaison des éléments carbonatés aux éléments salins et gypseux est significative. Elle permet de distinguer deux types d'eau.

En montagne et dans certains puits de la bordure, les taux d'éléments carbonatés sont franchement supérieurs aux taux d'éléments gypseux et salins. Tel est par exemple le cas à M'semrir au Dadès, où seules cinq analyses parmi vingt six permettent une conclusion différente. Des analyses d'eau de certains puits creusés dans les conglomérats mio-pliocènes aux alentours de Boumalne (donc en aval) montrent une équité ou parfois une légère supériorité des éléments carbonatés (tableau n° 7.3). Les eaux d'un puit à la mosquée d'Oughroud (IRE n° 424/55) montrent à ce propos une différence de 87 mg/l en 1977 et 222.4 mg en 1978. Un autre puit du même aquifère (puits d'Ilemchi à Silou, IRE n° 443/55) montre des concentrations presque égales en 1977 avec 273 mg/l pour les éléments carbonatés et 276mg/l pour les éléments gypseux et salins. tandis qu'en 1978 le taux des premiers est supérieur avec des valeurs consécutives de 298.7 et 240 mg/l. D'autres échantillons en provenance de puits du même aquifère ont cependant une composition hydrochimique nuancée. Ces puits sont plus proches du secteur agricole; l'exemple en est aux deux douars d'Ait Bouallal et du Boumalne, où l'on a vu un taux moyen de 238.7 mg/l pour les EOC et 427 mg/l pour les EGS, au puit de Ali ou Addi (IRE n° 438/55) à Ait Bouallal et 215 mg/l pour les EOC et 308 mg/l pour les EGS au puit d'Abdous (IRE n° 434/55) à Boumalne.

Un deuxième type d'eau est reconnu dans la série des échantillons étudiés. Il s'agit des analyses d'eau montrant une supériorité des taux d'éléments gypseux et salins. Ce sont les eaux prélevées aux rivières du Dadès, Todgha et M'goun, particulièrement vers l'aval des vallées à la sortie de la chaîne atlasique.

Neuf échantillons sur treize montrent des concentrations en éléments gypseux et salifères supérieures à celles des éléments carbonatés à Ait Ibrirn. Toutes les analyses faites sur les eaux du Todgha (24 échantillons) confirment cette observation. Il reste cependant confirmé que le M'goun à Aïfer est la plus

Tableau 7.3 Analyses hydrochimiques de certains puits à Boumoline .

Cughrout (Mosquée) 424 / 55				Ilmchi (Silou) 443 / 55		Ali ou addi (Aït Bouellal) 438 / 55			Abdous (Blie) 434/55		Ighraz (Jido) 425/55	
Date	7-11-79	30-11-78	11-8-77	8-11-78	8-11-77	7-11-79	30-11-76	7-11-77	7-11-79	30-11-78	8-11-77	18-3-67
p ^o	29,4	18,2	18,6	17,6	18	19	17,4	18,8	18,7	18,2	26,4	17,5
pH	8,5	8	8,1	8,0	7,7	8,2	8	8,1	8,2	8	8,3	
condé ^{25°}	917	862	866	983	994	132,6	1171	1836	887	887	829	677
Ca ²⁺	92	84	60	100	80	116	108	84	98	90	60	76
Mg ²⁺	58,2	33,9	42	41	42	58	38,7	53,2	43,5	32,6	48,4	36
Na ⁺	13,8	32,2	40	34,5	49	60	62	102	23	26,5	40,2	2,3
K ⁺	2,3	2,3	3,1	10,9	12	21,1	23,4	31	4,3	3,9	3,9	3
Cl ⁻	62,1	62,1	79,9	79,8	88,7	159	169	177	88,7	79,9	44,3	121
SO ₄ ²⁻	134,4	115	43,2	76,8	100,8	139	76,8	48	115,2	153,6	9,6	118
HCO ₃ ⁻	329,4	748	342	396	360	317	311	335	256	329,4	329,4	201
r _{Ca}	4,6	4,2	3	5	4	5,8	5,4	4,2	4,9	4,5	3	3,8
r _{Mg}	4,4	2,8	3,5	3,4	3,2	4,2	3,2	4,4	3,6	2,7	4	3
r _{Na}	0,6	1,4	1,7	1,5	2,1	2,6	2,7	4,4	1	1,15	1,7	10,2
r _K	0,06	0,06	0,08	0,28	0,3	0,5	0,6	0,8	0,1	0,1	0,1	0,08
r _{Cl}	1,7	1,7	2,2	2,2	2,5	4,5	4,7	5	2,5	2,25	1,2	3,4
r _{SO4}	2,8	2,4	0,9	1,6	2,1	2,9	1,6	1	2,4	3,2	0,2	
r _{HCO}	5,4	5,7	5,6	6,5	5,9	5,2	5,1	5,5	4,2	5,4	5,4	3,3
EOC	235,2	460	262	298,7	273	221,9	229,6	264,7	181,4	248,6	251,2	160,8
ES.S ^{mg/l}	284,6	237,6	174,4	240	276,6	487,1	401,2	395,2	317,2	299,9	117,2	714,3
T.R.D	519,8	697,6	436,4	538,7	549,5	709	630,2	659,9	498,6	548,5	368,4	
Indice "k" TRD/Ce	0,57	0,81	0,50	0,54	0,55	0,53	0,53	0,43	0,56	0,61	0,61	

riche des rivières locales en éléments gypso - salifères. Ceux-ci ont en général des taux supérieurs à ceux des d'éléments carbonatés avec des proportions allant du double au triple.

Il s'avère ainsi clair que le M'goun montre une structure hydrochimique particulière. Elle diffère de celle observée au Dadès et au Todgha par une supériorité durable des taux d'éléments salins et gypseux. C'est-à-dire que le M'goun se caractérise à ce propos par une régularité relative des concentrations montrant toujours la richesse en éléments salins et gypseux. L'effet saisonnier est négligeable au niveau de la composition hydrochimique de ce drain malgré les fluctuations du débit; ce qui n'est pas le cas des autres drains étudiés. Il en ressort qu'une différenciation spatiale est évidente, ce qui s'est d'ailleurs traduit au niveau des composantes 1,2 et 4 de l'analyse précédente.

B - Saturation des eaux.

i-Saturation théorique:l'équilibre thermodynamique calcul par WAT\$PEC.

L'approche d'évaluation des taux globaux néglige les particularités ioniques de la solution. Leur variabilité s'efface dans les sommations multiples de l'analyse. Cette même approche ne révèle pas l'état thermodynamique de la solution. Elle ne permet donc pas de cerner la saturation de l'eau par rapport à certaines argiles ou à la calcite, gypse ou autre. Il a été également démontré que le comportement des ions est relié à leur activité plus qu'à leur concentration. Dans son étude consacrée à la genèse des travertins de fond de vallées en Belgique, Geurts (1976, p. 22) évalue l'état des eaux vis-à-vis de la calcite. Elle se sert du rapport du produit d'activité ionique sur la constante d'équilibre thermodynamique. Celle-ci est dépendante de la température et de la pression, tandis que le produit ionique se calcule à partir du pH qui fournit directement l'activité de l'hydrogène (a_H) et à partir des concentrations de Ca^{2+} (nCa) et de HCO_3^- ($mHCO_3$) exprimées en moles de $CaCO_3$ par litre. Il est certain que ces calculs nécessitent une attention particulière pour contraindre les risques d'erreur. Ces considérations sont derrière l'invention du programme mathématique de traitement hydrochimique WAT\$PEC (Wigley, 1977) que l'auteur présente

comme modèle d'équilibre thermodynamique applicable aux solutions aqueuses. C'est un modèle basé sur les formules précédemment élaborées (Garrels et Christ, 1965; Plummer et Wigley, 1976). Il évalue les équilibres dus aux ions individuels mis en activité chimique (calcium, sulfates etc...) et ceux actifs en paires, c'est-à-dire ceux composant une matière soumise à la dissolution comme le calcaire (CaCO_3) ou le gypse (CaSO_4) ou autres.

En utilisant des relations empiriques, le programme est en mesure de résoudre des équations non linéaires en tenant compte des constantes thermodynamiques, de la pression, température et des forces ioniques dans chaque solution. Le pH et l'alcalinité sont deux variables de base pour la détermination de l'ensemble du système carbonaté en action. Les indices de saturation (S.I) sont calculés par rapport à certains minéraux et produits géochimiques comme la calcite, l'anhydrite, l'aragonite ou la magnésite.

Ils montrent l'état d'équilibre thermodynamique d'une solution par rapport à un minéral spécifique. C'est en connaissant la constante thermodynamique "k" d'une solution et son activité ionique (A.I) qu'on peut saisir son degré de saturation (S.I.C). Celui-ci se résume par l'équation $\text{S.I.C} = \log (A.I / k)$. Pour la calcite un S.I.C inférieur à 0 exprime une activité ionique inférieure à la valeur de la constante thermodynamique k et une sous-saturation de la solution en calcite. Tandis qu'un $\text{S.I.C} > 0$ montre la saturation évidente. Cet indice est utile pour saisir les potentialités de la dissolution et de la précipitation éventuelle des minéraux. Le programme permet également de calculer la pression du gaz carbonique en solution. Cette variable est essentielle dans la stabilité de l'état géochimique de l'eau.

Dans le domaine de la présente étude, les indices de saturation vis-à-vis des matières carbonatées ou gypseuses sont pour la plupart positifs. Il est cependant remarquable de noter que rares sont les échantillons qui montrent un indice dépassant 1 au Todgha. Les eaux sont souvent saturées en calcite sans toutefois atteindre des seuils critiques de sursaturation (tableau n° 7.4). Elles sont souvent saturées en dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) et en magnésite (MgCO_3) bien que certaines valeurs montrent pour celle-ci des valeurs négatives faibles en sources et dans la rivière (six échantillons sur vingt cinq). L'aragonite suit, avec une sous saturation de cinq échantillons sur vingt cinq. La plupart des valeurs s'approchent de la valeur d'équilibre 0. La pression du gaz carbonique étant infime et exprimée en cologarithme

Tableau no 7.4.

Les indices de saturation de l'eau vis-à-vis de certaines matières calculés par WATSPEC, programme géochimique proposé par Wigley (1977).

A-Source Imarighène 1980-1981.

B-Oued Todgha 1980-1981.

A -

date	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
calcite	0.18	0.11	0.05	0.52	0.7	0.86	0.7	0.63	0.59	0.47	0.49	0.41
aragonite	-0.09	-0.16	-0.22	0.26	0.47	0.59	0.43	0.34	0.33	0.2	0.2	0.14
dolomite	0.16	0.09	-0.02	0.98	1.3	1.54	1.09	0.95	1.14	0.93	0.88	0.82
magnésite	-0.33	-0.32	-0.37	0.15	0.29	0.37	0.08	0.02	0.24	0.15	0.09	0.1
-log PCO2	2.29	2.17	2.2	2.87	3.31	3.01	2.93	3.04	2.67	2.58	2.6	2.47

B -

date	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
calcite	0.45	0.70	1.03	0.75	0.55	0.53	1.03	0.79	0.72	0.34	0.67	0.05
aragonite	-0.73	0.41	0.75	0.48	0.26	0.24	0.74	0.53	0.46	0.06	0.4	-0.22
dolomite	-1.07	1.22	1.81	1.34	0.98	0.88	1.82	1.46	1.45	0.62	1.2	-0.06
magnésite	-0.93	0.22	0.48	0.28	0.13	0.05	0.49	0.37	0.43	-0.03	0.22	-0.42
-log PCO2	1.84	2.96	3.23	3.06	3.13	3.02	3.02	2.77	2.77	2.5	2.69	2.23

(-logPCO₂); ses valeurs sont peu différentes des chiffres de référence donnés par Wiley (1977, p. 14). Pour l'auteur la valeur du $\log PCO_2$ dans l'atmosphère est d'environ 3.5. Pour la majorité des eaux souterraines elle varie entre un et trois.

Ces valeurs de référence ont facilité l'interprétation de nos résultats calculés au M'goun, Dadès et Todgha. Huit échantillons sur vingt cinq montrent des résultats compris entre 3 et 3.5; Elle est donc relativement forte mais elle ne sort pas de l'ordinaire pour les solution aqueuses. Le tableau n° 7.5 présente les résultats des indices de saturation au Dadès et dans la source d'Ait Ibrirn aux alentours de Boumalne. Les eaux sont également saturées vis-à-vis de la calcite et de la dolomite. Pour cette dernière les indices s'approchent parfois de 2. La magnésite et l'aragonite ont des indices équilibrés (autour de zéro). Aucune de leurs valeurs ne dépasse pas 1, et certaines sont même négatives (octobre, décembre et mars pour la magnésite et décembre pour l'aragonite).

La pression du gaz carbonique montre des valeurs normales variant de 2.5 à 3.2. Les plus fortes pressions de CO₂ dans l'eau apparaissent d'octobre jusqu'en avril. Elles évoquent l'influence du froid, souvent considéré facteur de dissolution du gaz carbonique dans l'eau.

La conclusion qui s'impose est donc de souligner la légère saturation qui caractérise la majorité des échantillons analysés. Il est vrai que cette saturation varie selon les espèces minéralogiques considérés, mais rares sont les échantillons qui montrent une agressivité notable.

Tableau no 7.5.

Les indices de saturation de l'eau vis-à-vis de certaines matières calculés par WATSPEC, programme géochimique proposé par Wigley (1977).

A-Source d'Ait Ibrine 1980-1981.

B-Ait Mouted (Dadès) 1980-1981.

A-

date	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
calcite	0.35	1.07	0.56	0.59	0.6	0.66	0.82	0.73	0.43	0.57	0.62	0.61	0.42
aragonite	0.09	0.81	0.3	0.33	0.33	0.4	0.55	0.46	0.17	0.31	0.36	0.34	0.16
dolomite	0.55	2.15	1.12	1.25	1.13	1.21	1.66	1.25	0.89	1.16	1.2	1.25	0.83
magnésite	0.11	0.78	0.25	0.36	0.23	0.24	0.53	0.21	0.15	0.28	0.27	0.34	0.10
-log PCO ₂	2.36	3.18	2.8	3.15	3.02	2.99	3.18	2.79	2.6	2.7	2.68	2.8	2.46

B-

date	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
calcite	0.93	1.05	0.28	0.82	0.53	0.38	0.35	0.8	0.6	0.4	0.73	0.54	0.57
aragonite	0.65	0.77	-0.02	0.55	0.24	0.08	0.06	0.54	0.34	0.14	0.47	0.27	0.3
dolomite	1.62	1.9	0.3	1.45	0.8	0.6	0.67	1.5	1.14	0.87	1.49	1.1	1.1
magnésite	0.38	0.54	0.025	0.33	0.0	0.007	0.01	0.4	0.24	0.16	0.46	0.25	0.22
-log PCO ₂	3.11	3.17	2.8	2.87	2.88	3.07	3.15	2.94	2.7	2.7	2.76	2.7	2.7

ii-Saturation des eaux d'après les courbes de Roques

Les courbes proposées par Roques (1972) sont un outil simple d'évaluation de l'état d'équilibre et de saturation des eaux. Elles se basent sur des variables mesurées (pH et température) et des variables calculées comme le titre hydrotimétrique (TH) calculé en degré français ($rCa + rMg \times 5$); r indique la quantité dissoute en milléquivalent. Ces courbes (figures n° 7.3; 7.4 et 7.5) ont l'avantage d'illustrer les trois états probables dans une solution (agressivité, équilibre et saturation) et permettent une lecture directe selon la position des points représentatifs d'échantillons à l'intérieur du diagramme.

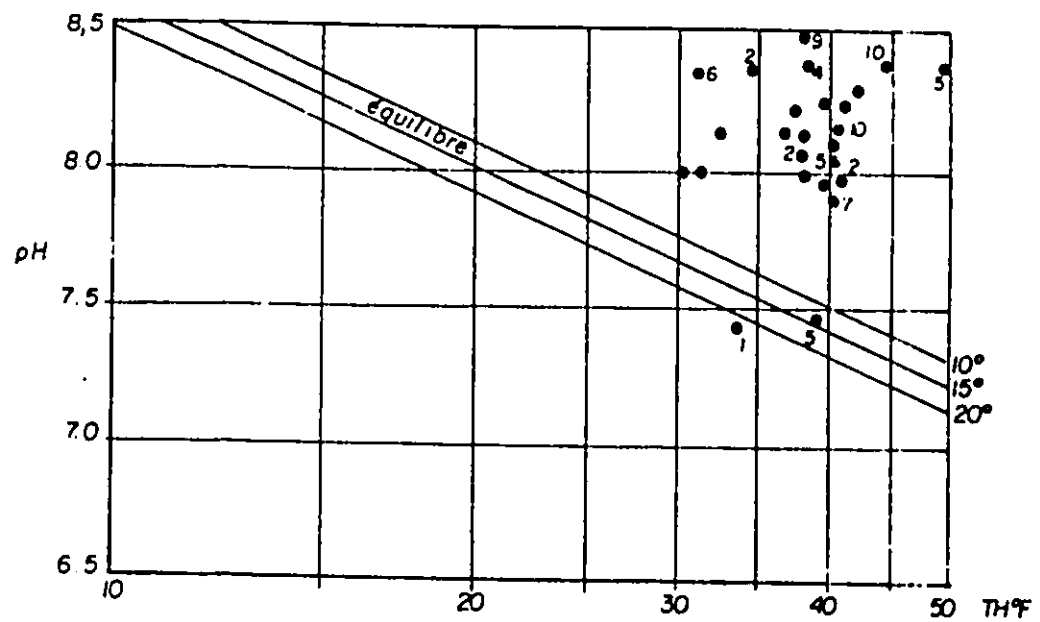
Dans le domaine étudié, les résultats d'application de ces diagrammes montrent la saturation des eaux dans de nombreux échantillons prélevés aux sources et rivières de la région (Dadès, Todgha et M'goun). Les analyses s'abaissant à l'état d'équilibre sont rares. Seuls les échantillons d'automne et du début de l'hiver montrent une faible agressivité dans les trois bassins versants.

La source d'Ait Ibrim est représentative des fluctuations que connaît le système des nappes aquifères du Lias. Elle montre une agressivité des eaux en octobre, novembre et décembre (figure n° 7.5b). Les eaux superficielles des rivières sont plus influencées par les températures de l'air ambiant. Sachant que celles-ci descendent parfois au-delà de 5°C dans certains mois d'hiver et au début du printemps, dans les eaux du Dadès la tendance vers une légère agressivité s'observe en décembre, février et mars.

Les mois d'avril et de juillet montrent aussi cette tendance, mais elle ne saurait s'expliquer dans ces cas par l'effet thermique, car ces mois connaissent un réchauffement relatif. D'autres raisons peuvent être citées dans ce cas, comme l'apport de produits externes au système, tels que les fertilisants dont on connaît l'influence sur l'agressivité du milieu aquatique. Ceci sera discuté plus en détail dans la troisième partie de ce travail. Enfin, il est possible de conclure en soulignant la complexité structurelle et la saturation relative caractéristique de l'hydrochimie des eaux étudiées. La structure hydrochimique et le degré de saturation noté apportent des idées significatives au sujet de l'environnement qui nous préoccupe. Les paramètres influents comme la géologie, le climat, l'hydrologie, l'hydrogéologie et l'impact humain ont été

Figure n° 7.3

Saturation des eaux du M'goun (1975-84)



Les chiffres indiquent certains mois de référence .

Fig 7.4

Saturation des eaux de rivières 1980-81 .

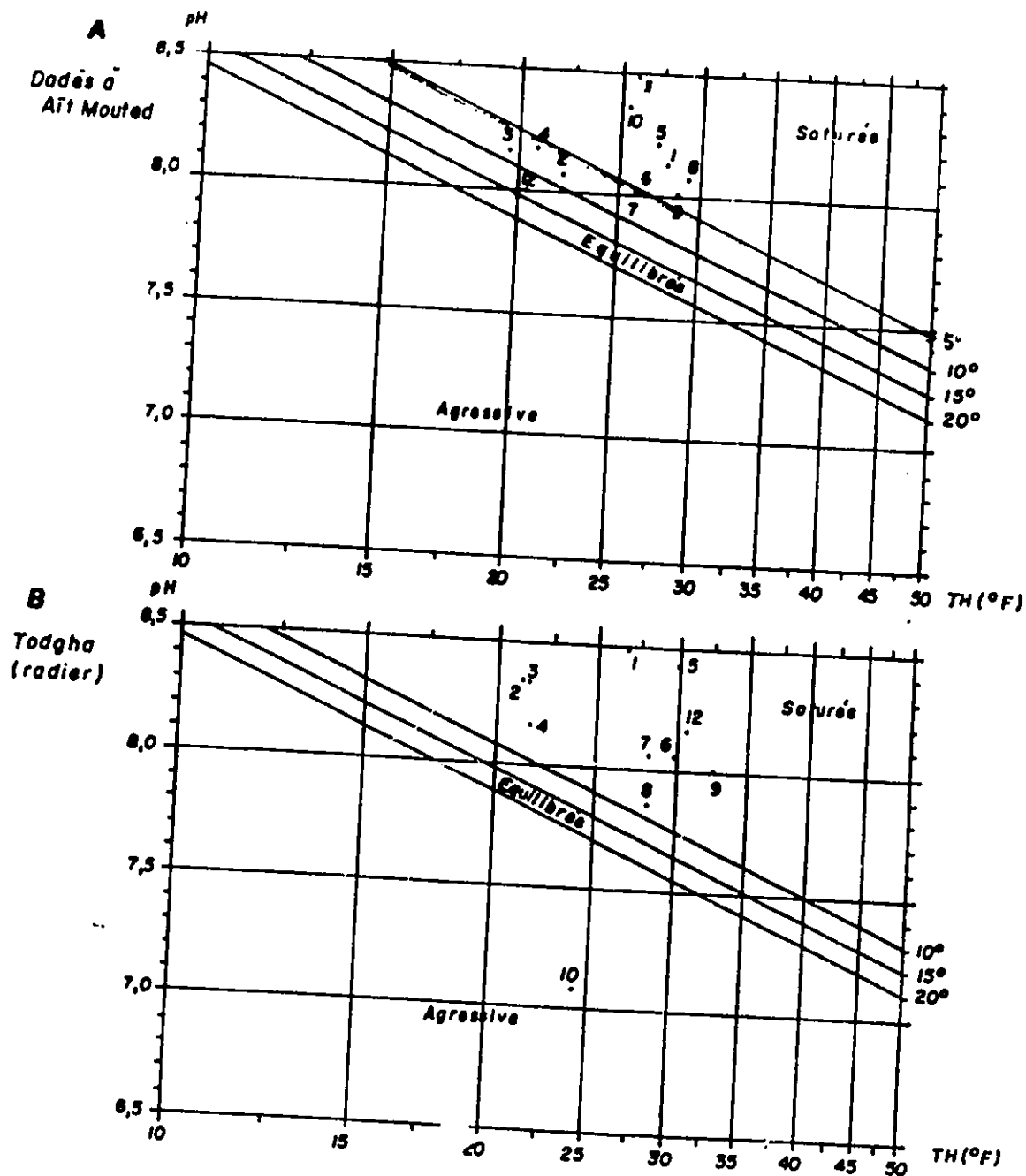
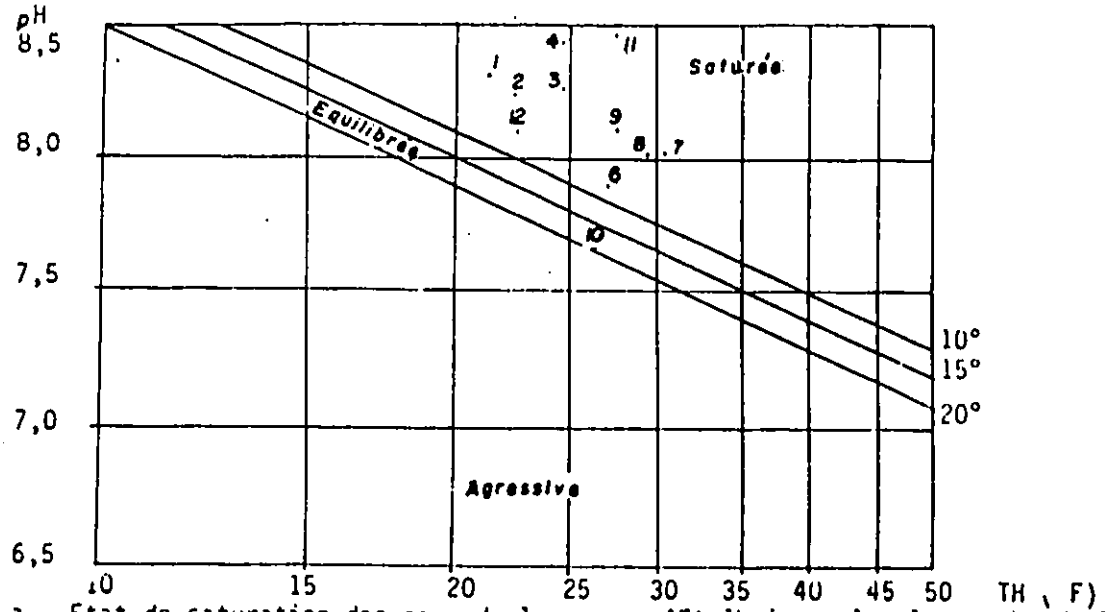
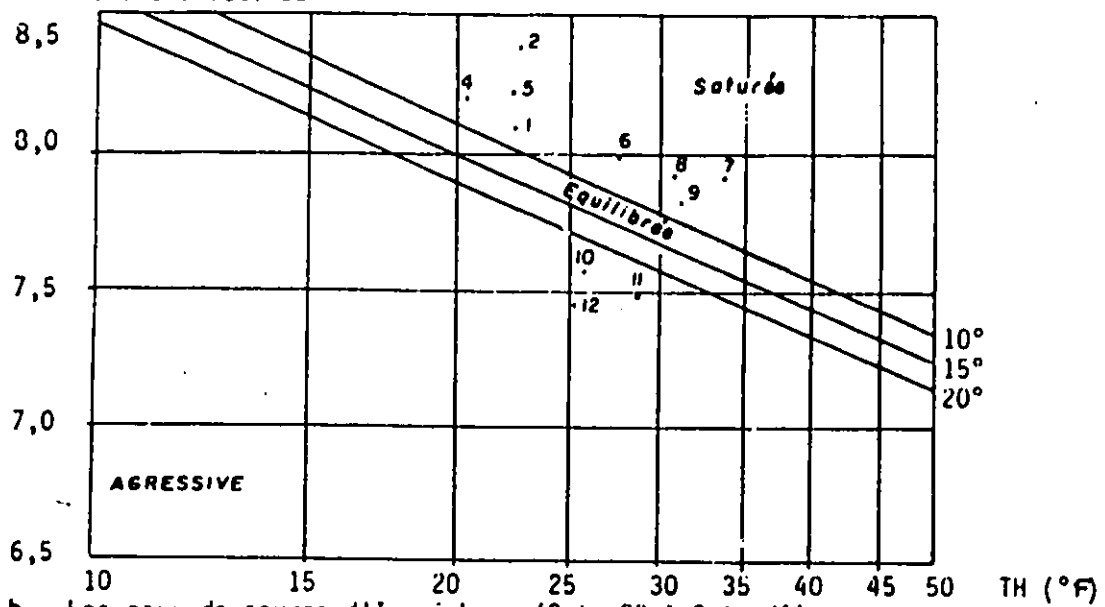


Fig n° 7.5 Saturation des eaux selon les courbes de Roques



a - Etat de saturation des eaux de la source Aft Ibrirn selon la courbe de Roques Oct. 80 à Oct. 81



b - Les eaux de source d'Imarighene (Oct. 80 à Oct. 81)

discutés à base des résultats acquis. Les liens entre l'encroûtement, l'hydrochimie et l'environnement global sont étroits. Les implications génétiques de ce trinôme seront traitées ultérieurement.

3-Variation mensuelle de certaines caractéristiques hydrochimiques.

Les courbes d'évolution des constituants majeurs des eaux de sources et rivières au Dadès, M'goun et Todgha connaissent des fluctuations mensuelles considérables. Ces fluctuations ne sont pas régulières d'une année à l'autre. Leur changement traduit une réalité physique assez complexe, dans laquelle des effets multiples se combinent pour influencer l'état hydrochimique des eaux.

En prenant comme exemple la courbe d'évolution du calcium à M'semrir (figure n° 7.6), on observe un accroissement général en été et au début de l'automne (septembre, octobre 1975; juin et octobre 1976; et septembre, octobre 1977). Des maximums dépassant 70 mg/l et pouvant atteindre 100 mg/l sont enregistrés. Des teneurs minimales sont cependant probables au cours de cette même période, comme on l'a vu au mois d'août 1976. La concentration en calcium a enregistré une valeur d'environ 35 mg/l dans ce mois d'été et fait exception. Un orage d'été par exemple peut en effet diluer les eaux, et renverser brutalement la tendance des concentrations ioniques. La variabilité périodique des différentes caractéristiques hydrochimiques est également notable en aval, avec une amplitude plus importante pour la majorité des ions (figure n°7.7).

Que ce soit en amont ou en aval des bassins versants, l'hydrochimie des sources et des rivières étudiées est indissociable de la diversité des facteurs intervenants. L'origine des eaux apporte des nuances selon les roches traversées par les eaux souterraines ou les affluents superficiels qui alimentent les rivières. Au M'goun par exemple, la conductivité s'abaisse en période de hautes eaux du printemps (dilution) et le pH atteint son maximum en août et en septembre (évaporation et concentrations maximales en sels). Les couches calcaires ou dolomitiques liasiques représentent le principal réservoir pourvoyeur d'éléments carbonatés.

Fig 7. 6 Variation de certains paramètres physico-chimiques du Dodès à M'SEMRIR .

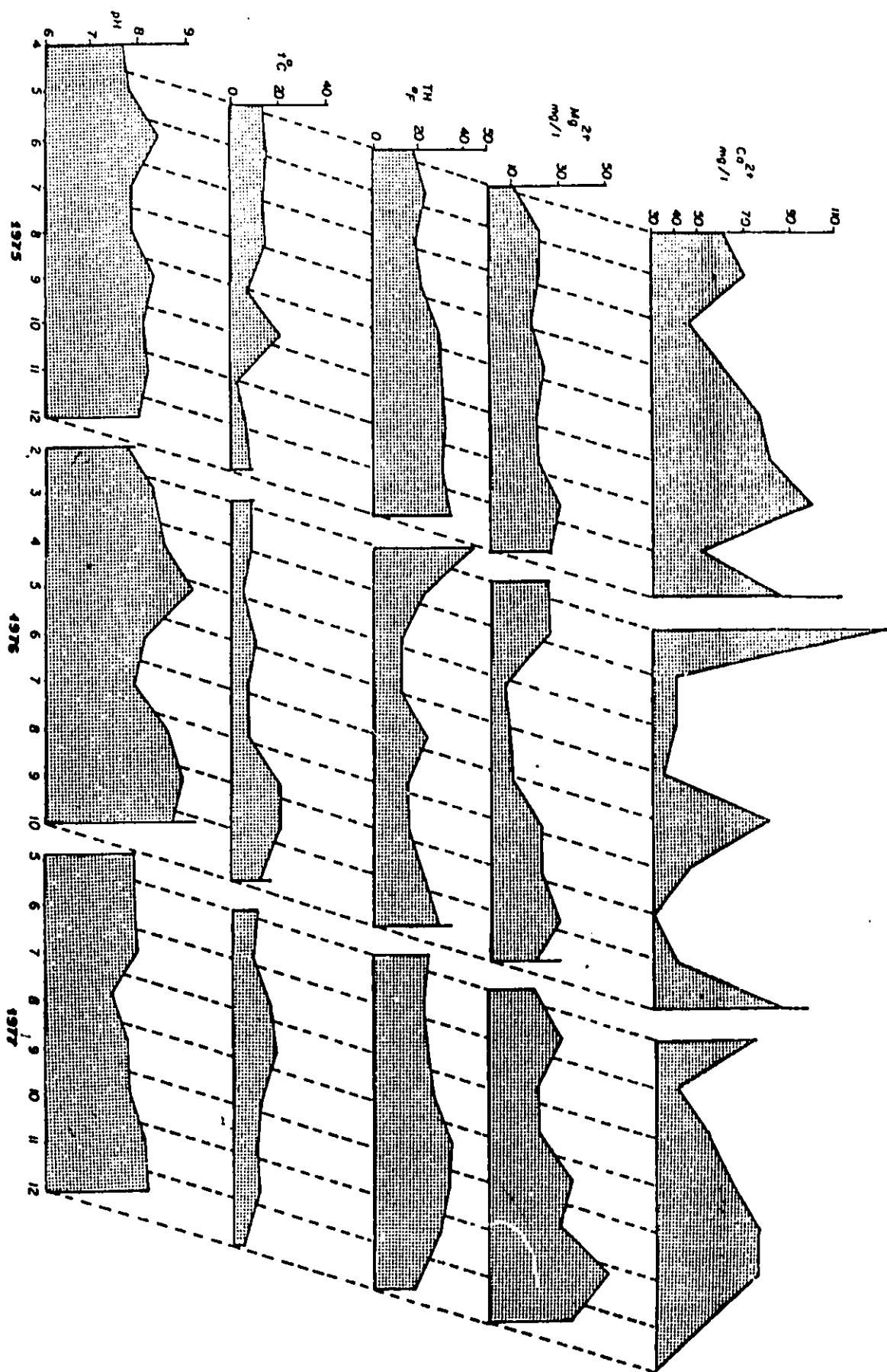
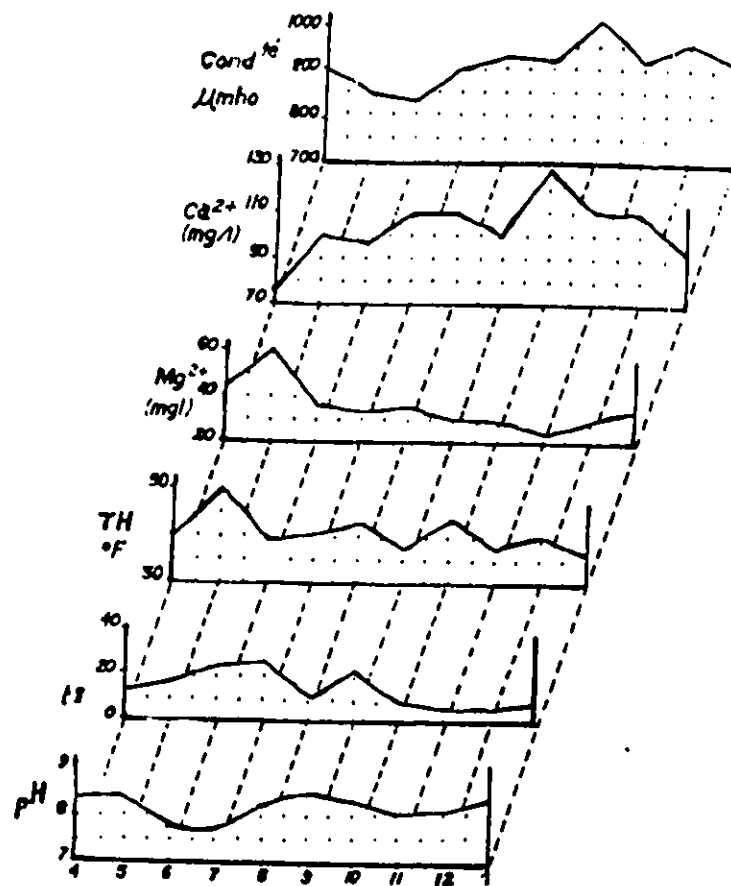


Fig. n° 7.7



Evolution de quelques éléments qui caractérisent la chimie des eaux du M'goun à Aïr (1975-1976).

Les couches du complexe argilo-basaltique et salin du Trias, qui sont en mesure d'élever la concentration des eaux en chlorures, sulfates et sodium affleurent largement au M'goun, dans la haute vallée d'Alt Ahmed, son affluent nord occidental. Une certaine augmentation de la minéralisation s'observe progressivement avec le temps. Le total en éléments rocheux (E.R) traduit cet augmentation comme il est noté au Dadès, dans la station d'Alt Mouted (figure n° 7.8). La sécheresse accentuée durant l'année d'échantillonnage 1980-1981 expliquerait cette augmentation progressive. L'impact de l'évaporation ajouté à la diminution des débits et au tarissement des sources concentre progressivement les sels dans l'eau. Ceci se traduit également au niveau de la conductivité tendant au maximum vers la fin de la période illustrée. Il importe aussi de noter la grande variabilité de l'ion sulfate au Dadès à la station d'Alt Mouted. Le maximum et le minimum enregistrés se poursuivent dans un intervalle de temps s'étendant de mars à mai. Nous discuterons la signification de ce comportement attribué entre autres à l'intervention humaine dans la troisième partie de ce travail.

Conclusion

* La majorité des eaux souterraines soumises à l'étude montrent une hydrochimie complexe en raison d'interactions multiples qu'impose l'environnement variable de la région.

* Une certaine saturation globale s'observe au niveau des caractéristiques thermodynamiques et d'après les courbes de Roques appliquées à l'hydrochimie; mais on ne voit pas d'état de sursaturation excessive, ce qui n'est pas habituel dans un milieu à substrat carbonaté, à climat suffisamment chaud et évaporant. D'un autre côté, nous n'avons pas observé de cas montrant une agressivité notable.

Un environnement régulateur est actif dans ce milieu. Il influence la dynamique des carbonates en ralentissant l'accumulation des encroûtements.

* La variabilité hydrochimique et l'irrégularité des comportements ioniques s'expliquent par un impact à la fois physique et humain. Ce dernier fera l'objet d'une discussion au chapitre 9.

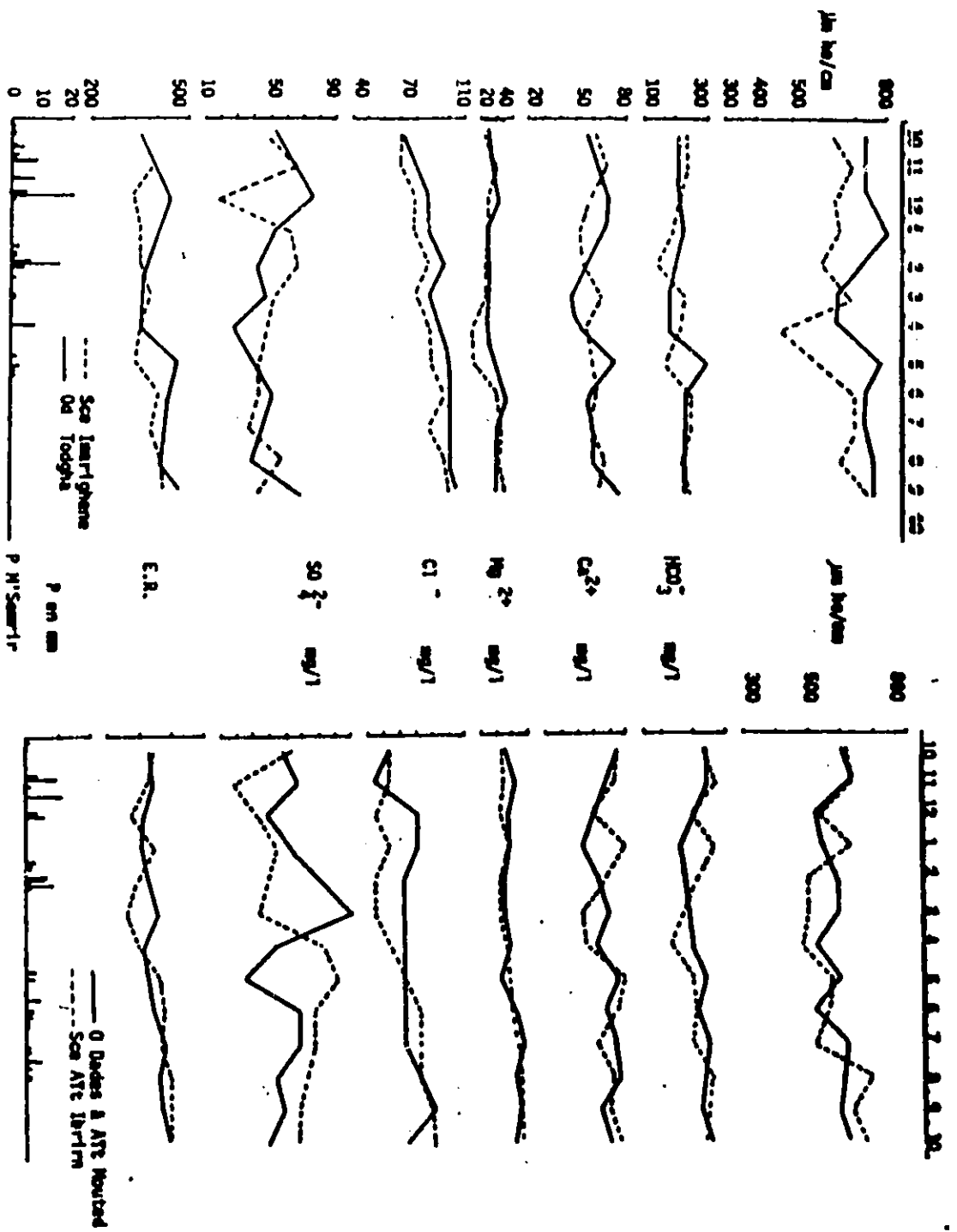


Fig. 7.8 : EVOLUTION DES PRINCIPAUX CONSTITUANTS HYDROCHIMIQUES DE L'EAU (entre oct.80 et Oct.81)

Troisième partie

les relations géodynamiques et les implications génétiques

Cette partie discute des aspects environnementaux qu'a connu l'évolution de l'encroûtement quaternaire. La genèse des dépôts étudiés montre une variation temporelle reflétant une histoire polyphasée. Elle comporte des éléments révélateurs de l'évolution paléoclimatique et des effets morphostructuraux. Il est donc significatif de traiter ces aspects dans un chapitre à part; en essayant de montrer que l'encroûtement est aussi dans le passé le reflet d'une série de conditions changeantes. Un autre chapitre (9) est consacré à l'impact environnemental actuel. Encore ici, le cadre physique intervient par ses composantes (climatiques, géologiques, etc...) mais l'intervention humaine prend une dimension principale. En résumé les deux chapitres qui suivent s'intéressent successivement aux transformations paléoenvironnementales et aux conditions expliquant le ralentissement de l'encroûtement actuel.

Chapitre VIII

Transformations paléoenvironnementales.

1-Les phases d'encroûtement ancien.

Les travertins sont des indicateurs pertinents de phases morphodynamiques anciennes. Ils illustrent la karstification qu'ils accompagnent et permettent de distinguer la variation des conditions hydrologiques et paléoclimatiques qui la contrôlent (Ambert, 1982; Bellion et Magnosc, 1982). Vaudour (1985) cite les nombreuses études qui ont établi un lien génétique entre la formation des grands cônes rocheux et les amas travertineux à leur aval, et les différentes phases morphodynamiques de leur genèse. Cette abondante littérature s'accorde à nuancer des phases d'incision de celles de l'édification des travertins. Dans le domaine étudié au Dadès et au M'goun, la rareté des dépôts ne permet pas de faire une interprétation généralisable. Au M'goun, à Taltfraout et ailleurs, les travertins observés sont localisés sur les versants et sont proches des fonds de vallées principales ou affluentes.

Leur signification morphologique est d'ordre local (liée à la topographie du versant et à l'extension de la nappe aquifère qui alimente les sources). Ils révèlent cependant des événements d'ordre climatologique régional ou global et donnent des jalons théoriques qu'on peut confronter aux modèles établis dans d'autres régions septentrionales du Maroc. Il est notable de constater l'absence d'une séquence assez complète de travertins suivant l'ordre chronologique du Quaternaire. Deux hypothèses sont alors envisageables:

-la première se fonde sur un postulat de la destruction probable des édifices autrefois formés. Le soulèvement généralisé auquel la région est soumise (néotectonique) favorise la destruction des dépôts anciens qui sont installés sur des versants structurellement instables.

-La deuxième hypothèse néglige l'existence de dépôts très anciens, car on peut imaginer que le pendage des couches conglomératiques aquifères du Mio-Pliocène est depuis le début du Quaternaire très fort sur le flanc méridional du synclinal d'Alt Sâirat. Le soulèvement généralisé des couches affecte

le niveau piézométrique. Les nappes se font de plus en plus profondes et les sources aptes à édifier des travertins n'ont fonctionné que récemment (au Rharbien et près), au moment où le creusement des vallées a atteint le seuil de la zone de saturation hydrique.

La dernière hypothèse n'est pas solide car elle se base sur une vision catastrophique et violente de la tectonique récente (soulèvement brutal au début), ce qui n'est pas réel puisque on connaît l'aspect progressif et l'intensité variable de la néotectonique de cette région (Couvreux, 1981). Elle suppose aussi l'absence de précipitation de carbonates aux précédentes phases du Quaternaire, ce qui ne s'accorde pas avec nos remarques confirmant l'activité de ce processus sous formes variées (croûtes, encroûtements ...) aux diverses périodes quaternaires.

Un dallage de dépôts pelliculaires précédemment signalés sur le plateau d'Anber à Boumaline offre l'exemple d'encroûtements anciens. Il remonte au Plio-Villafranchien puisqu'il est antérieur aux phases de creusement des vallées. Ce dallage serait donc attribuable au Quaternaire ancien. Ceci se confirme par datation absolue à l'Uranium / Thorium. Les deux générations les plus importantes trouvées dans les travertins de fond de vallées sont assez anciennes. D'après la datation absolue à l'Uranium / Thorium, l'accumulation travertineuse d'Ait Arbi (vallon affluent) remonte au Quaternaire moyen (échantillon n° M89-15), tandis que celle de Taltfraout (M89-12) est approximativement Rharbien (9 à 13000 ans).

Plusieurs accumulations moins massives et discontinues cimentent les conglomérats de terrasses fluviales attribuées au Quaternaire moyen. Des encroûtements carbonatés recouvrent les versants, glacis et cônes de cette époque. Ces éléments évoquent l'ancienneté du phénomène d'encroûtement malgré la rareté des dépôts massifs. Ils militent à la faveur de la première hypothèse supposant l'importance effective de l'érosion quaternaire sur les dépôts travertineux. L'évolution géomorphologique complexe qu'a connue la région au Quaternaire subit une succession d'événements aux conséquences opposées (e.g. destruction-édification des dépôts). Laouina (1987, p. 395) parle de "cycles" dont chacun est caractérisé par la succession de plusieurs phases de remaniement des altérites, accompagné d'une ablation, atteignant des horizons profonds, et des phases de fixation des carbonates.

L'ordre de la succession ou de la simultanéité de certaines phases est posé, particulièrement quand

un dépôt d'origine détritique s'encroûte et se consolide par un abondant ciment calcaire. L'accumulation du calcaire peut être contemporaine de l'apport des matériaux détritiques; dans d'autres cas elle peut être postérieure (Laouina, 1987, p. 503). Dans notre cas, la coupe d'Ait Arbi montre clairement le déphasage des phénomènes. Elle met en évidence la succession suivante: un conglomérat de la terrasse fluviale (érosion/sédimentation), une érosion au moins partielle qui entaille le conglomérat de la terrasse, puis un travertin assez épais en cascade (équilibre environnemental) et une phase d'érosion attaquant à la fois la terrasse et le dépôt (début d'un nouveau cycle).

Conclusion:

Nos observations permettent ainsi de confirmer la dynamique cyclique qu'ont connu les travertins au Quaternaire. Ils se développent vers la fin de cycles morphologiques au moment où l'humidité est encore suffisante pour véhiculer les carbonates sans turbulence ni érosion mécanique assez violente. La phase d'accumulation principale de travertin remonte à 130.000 ans BP. mais une deuxième phase est indiquée par les travertins de Taltfraout et d'Ait Arbi. Elle est approximativement équivalente du Rharbien.

2-Les implications morphostructurales

L'activité tectonique et morphotectonique se traduit d'une façon directement interprétable quand un dépôt de travertin se trouve retouché par une manifestation tectonique apparente, une faille par exemple, une flexure ou un plissement. Cet aspect est détectable avec prudence car il faut toujours tenir compte des faciès originaux des dépôts (avec leur pendage, étagement ou autre aspect pseudotectonique) qui peuvent être trompeurs.

Une illustration de la néotectonique apparente dans la dalle travertineuse du Paestum en Italie a été présentée par Lippman et Vernet (1986, p. 51) qui ont trouvé des preuves d'instabilité endogène. La tectonique peut être le facteur principal de la genèse de travertins, quand elle crée des ruptures de pente, ou modifie les niveaux de base de l'écoulement. Elle oriente le drainage souterrain des eaux et permet leur remontée à la surface pour développer les grands édifices de travertins hydrothermaux. Ceci-dit, nous comprendrons l'importance des accumulations carbonatées dans le secteur étudié

et la signification morphostructurale de leur distribution dans certains sites comme au fond de la dépression synclinale de Ouarzazate, à Skoura où l'hydrothermalisme a été reconnu et argumenté précédemment dans cette étude.

D'un autre côté, en marge méridionale du massif haut atlasique des preuves de la néotectonique ont été trouvées dans de nombreux sites relativement proches de la région étudiée. Des chevauchements, failles et plissements divers ont été documentés (Laville, 1975; Couvreur, 1981; Akdim, 1983; 1985). Le synclinal alimentant en eau les sources d'Ait Arbi est formé de conglomérats mio-pliocènes plissés par des mouvements tectoniques quaternaires. La même poussée néotectonique signalée ailleurs intéresse également ce secteur et ses conséquences hydrologiques sur l'encroûtement sont importantes. Aussi peut-on considérer comme facteur de déstabilisation globale la néotectonique qui, à Ait Arbi permet à la fois un soulèvement du massif et un plissement en synclinal du conglomérat mio-pliocène d'Ait Sedrate. L'importance du soulèvement exposant aux facteurs d'érosion les travertins formés et leur substratum est évidente.

La forme structurale en synclinal influence le régime et l'hydrogéologie de la source responsable des travertins d'amont dans le vallon d'Ait Arbi. Une concentration des eaux se fait à la faveur des zones centrales assez basses du synclinal et la source edificatrice subit ainsi un tarissement causé essentiellement par l'effet néotectonique. La source d'Asfazate, encore active est bien alimentée par la basse partie saturée du synclinal d'Ait Sedrate.

Conclusion

On peut ainsi conclure que la tectonique récente est un facteur de la destruction indirecte des travertins. Elle apporte une explication partielle à la problématique précédemment posée à propos de la rareté des accumulations carbonatées dans certains secteurs. Il s'agit donc d'une dynamique mécanique détectée en marge du faisceau crétacé-éocène peu stable dans ce domaine. La néotectonique a été également documentée dans les différents dépôts hydrothermaux de Skoura, confirmant ainsi une évolution dynamique mais lente des paysages soumis aux pressions internes de la tectonique quaternaire.

3-Les indications paléoclimatiques.

Dans les précédents chapitres, plusieurs observations avaient déjà fait entrevoir une évolution variée des conditions climatiques au Quaternaire. La discontinuité qu'a connue cette évolution s'est exprimée dans l'alternance des phases humides et d'autres plutôt sèches. Des arguments multiples à la faveur d'une tendance d'assèchement progressif peuvent être tirés de la morphogénèse des glacis dominant la dépression de Ouarzazate.

La stratigraphie et la sédimentologie du matériel détritique des glacis et des terrasses de cette région révèlent la même tendance (Akdîm *et al.*, 1991). L'étude des encroûtements, croûtes calcaires et travertins de la région permettent quant à eux de dresser un bilan paléoclimatique de la même tendance. L'abondance des précipitations et l'importante humidité du Quaternaire ancien s'explique au niveau de l'expansion des croûtes et encroûtements à l'échelle régionale dans la dépression de Ouarzazate. Il est vrai que celle-ci est topographiquement un milieu récepteur favorable à la sédimentation / précipitation des carbonates et des matières détritiques, mais un environnement paléoclimatique suffisamment chaud et humide expliquerait l'épanouissement d'un couvert végétal nécessaire à une dynamique aussi spectaculaire des carbonates.

La morphogénèse active en montagne en modulant les grands canyons du Dadès, Todgha et M'goun a livré des quantités de carbonates accumulés dans la dépression de Ouarzazate en aval. L'épaisseur métrique des croûtes zonaires indique une période suffisamment longue, caractérisée par une humidité importante, avec toutefois des variations périodiques. Celles-ci se déduisent des variations de faciès, de l'alternance précédemment décrite des lamines construites, calcitiques et détritiques rougeâtres.

Les croûtes et les encroûtements du Quaternaire moyen sont par contre moins épais, plus localisés sur les versants et les terrasses révélant une humidité décroissante par rapport à la période précédente. Les lamines se multiplient sans atteindre des épaisseurs considérables et les faciès changent. Les galets et l'aspect conglomératique du matériel de base indiquent une certaine hydrologie

changeante et plus irrégulière. L'interprétation paléoclimatique de ces éléments indique un environnement moins humide à précipitations plus sporadiques et de courte durée. Les dernières phases du Quaternaire ont connu une morphogenèse avancée pour pouvoir démanteler une grande partie des croûtes anciennes. L'eau, élément conditionnel de l'encroûtement n'est plus aussi généralisé dans l'espace comme aux phases précédentes. Il se concentre dans les canyons et vallées. Les grandes artères sont issues de sources alimentées par les nappes aquifères de l'Atlas.

La distribution des encroûtements sous toutes leurs formes est dès lors un phénomène localisé. L'aridité accrue du climat n'en permet plus l'occurrence qu'à deux sites potentiellement (hydrologiquement) favorables: le long des vallées et autour des sources. L'évolution contemporaine de ces milieux est confrontée aux perturbations limitant le processus d'encroûtement dans certains cas. Les changements environnementaux sont considérables dans les vallées peuplées comme au Dadès et autour de certaines sources. Nous discuterons de ces conditions au chapitre neuf. Le phénomène d'encroûtement est donc actuellement possible et réel dans les sites protégés de l'impact anthropique perturbateur.

La signification paléoclimatique qu'on attribue souvent aux travertins d'Afrique du nord est surtout une humidification accrue (Ballais, 1981; Bellion et Magnosc, 1982; Weisrock, 1986); mais on est en mesure de confirmer que sous climat semi-aride actuel, la précipitation se poursuit à condition d'avoir de l'eau et en l'absence d'une perturbation anthropique. Le phénomène d'encroûtement est donc pour ces raisons très limité dans l'espace. Il faut signaler que la majorité des phénomènes géomorphologiques s'activent en période de transition entre les phases climatiquement distinctes. C'est à ce moment que se déroule l'essentiel des mécanismes d'érosion et de sédimentation.

Les travertins se forment essentiellement à la fin du cycle géomorphologique (érosion / sédimentation) car c'est le moment d'un certain équilibre environnemental (humidité suffisante et biogéographie assez stable). Les plus beaux travertins de la région ont donné à l'Uranium / Thorium des âges de 130000 BP pour les plus anciens (Ait Arbi en amont du vallon) et 9000 - 13000 BP pour les dépôts récents. Les premiers correspondent à la fin de la période froide précédant l'Eémien (Tensiftien marocain) alors que les derniers travertins correspondent au Rharbien (Holocène) mais ils se développent jusqu'à présent là

où les conditions environnementales sont favorables. Nous pensons que la période idéale à l'édification des travertins serait surtout la fin des épisodes humides, car à ce moment l'eau est sursaturée, encore abondante et peu turbide en raison de l'importance du couvert végétal subsistant.

Conclusion:

On peut conclure que l'encroûtement et les dépôts travertineux du domaine étudié indiquent une histoire geomorphologique dynamique. La notion de phases (érosion, sédimentation, érosion) composant le cycle géomorphologique s'illustre dans le paysage par la signification spatio-temporelle de ces accumulations.

L'interprétation paléoclimatique des formations carbonatées continentales est très parlante. Le modèle que nous reconnaissons à la suite de cette étude montre trois phases principales d'encroûtement actif au Quaternaire: la première correspond aux accumulations généralisée du Quaternaire ancien. La deuxième serait active à environ 130 - 140 milles ans BP. La dernière phase d'encroûtement considérable correspond au dernier épisode pluvial du Rharbien. Les datations absolues des travertins de cette épisode sont de 9000 à 13000 ans BP. Les encroûtements et travertins expriment donc une abondante humidité et un équilibre relatif du milieu à la fin des épisodes pluviaux. Les épisodes pluviaux mis en évidence au Maroc méridional se raccordent bien avec ceux reconnus dans l'Afrique de l'Est et tropicale à travers l'étude des paléolacs (Gaven, et al., 1981; Hillaire Marcel, 1982; Casanova et Hillaire-Marcel, 1987; 1991).

Chapitre IX

Le ralentissement de l'encroûtement actuel.

Après avoir exposé les aspects de l'encroûtement ancien et vu certains exemples de dépôts résiduels, nous discuterons ici des facteurs en mesure d'expliquer le ralentissement actuel de ce processus, en particulier dans les rivières du Dadès et du M'goun. Ces deux vallées semblent être peu favorables à l'encroûtement actuel. Ces spécificités ne se généralisent pas à la totalité des vallées du versant sud du Haut-Atlas, car dans le bassin versant bordier du Ghris, un environnement encroûtant est toujours actif. Des travertins de fond de vallée fonctionnels sont décrits dans la région de Tifounassine aux alentours de Goulmima (Belhaj, 1990, p.42). Les vallées du Dadès et du M'goun sont plus peuplées et intensément exploitées. Elles subissent des transformations affectant l'équilibre environnemental nécessaire à l'édification des travertins et à la biocalcification. Nous discuterons cette problématique en exposant les éléments explicatifs du ralentissement actuel de l'encroûtement dans ces vallées. Les points fondamentaux abordés sont: les transformations environnementales et la biocalcification; les facteurs hydrologiques et anthropiques peu favorables à l'encroûtement. Dans une deuxième partie nous discuterons des implications génétiques de ces facteurs quant à la formation des travertins.

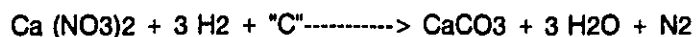
1-Les transformations environnementales.

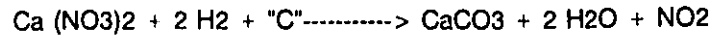
Avant d'aborder les résultats de nos analyses, un bref rappel des principes de la biocalcification sera donné. Les fondements expérimentaux confirmant l'importance du processus et les facteurs qui l'affectent seront discutés à la lumière de l'analyse bibliographique. Nous procédons ensuite par la présentation des indicateurs d'impact humain sur l'hydrosystème des rivières étudiées et enfin par la présentation des résultats d'analyses bactériologiques confirmant l'affectation de la biomasse par les interventions humaines.

A-La biocalcification et l'équilibre écologique.

La biocalcification englobe tous les processus menant d'une façon ou d'une autre à la précipitation de la calcite sous l'action des facteurs biologiques. Ceux-ci peuvent être de nature variée comme les bactéries, les champignons ou les algues. Les liens entre la microbiologie et la géologie se traduisent au niveau de la cristallogenèse des carbonates. Ceci est mis en évidence depuis les années cinquante (Symoens, 1949). Les travaux de Lang (1975), Geurts (1976) et de Castanier (1987) confirment par exemple les relations génétiques et structurales les plus intimes entre le monde vivant et le monde minéral. En effet malgré la précipitation de la calcite par pure action physico-chimique, les processus biologiques contribuent considérablement à la formation des carbonates. La photosynthèse est un processus biochimique fondamental caractérisant la vie des plantes, des algues et de certaines espèces de bactéries. Le processus induit plusieurs opérations fines de transformation d'énergie solaire en énergie chimique générant par la suite de la formation de la matière composant les cellules à partir du carbone.

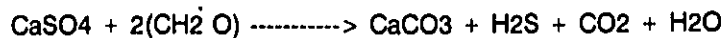
Krumbein (1979, p.48) présente une série d'équations illustrant les réactions chimiques accompagnant la photosynthèse. Il conclut d'une part que l'assimilation du gaz carbonique par la photosynthèse est un processus majeur de la saturation aquatique en matières dissoutes et donc un processus de formation des travertins ou de dépôts carbonatés lacustres. Il ajoute d'autre part que la consommation du CO₂ ne s'interrompt pas pendant la nuit, car de nombreux microorganismes en fixent des quantités considérables pouvant ainsi provoquer en même temps la fixation de la calcite. En effet les mécanismes d'assimilation du gaz carbonique par ces microorganismes sont reliés à ceux contrôlant le pH et l'échange ionique, donc par conséquent sont associés aux mécanismes de l'assimilation des carbonates et du calcium. D'autres processus de la précipitation de la calcite peuvent être cités, comme ceux relatifs aux activités physiologiques des bactéries dites "anaérobies". Il s'agit de l'oxydation de la matière organique par des ions autres que l'oxygène, comme les nitrates ou les sulfates. Leur réduction peut être accompagnée de la formation de carbonate du calcium conformément aux réactions suivantes:





"C" représente le carbone organique.

La réduction des sulfates peut aussi générer la précipitation du carbonate du calcium conformément à la réaction suivante:



Le calcium peut être directement absorbé ou rejeté par les microorganismes à travers leur membranes dépendamment des différences de pH extra et intra-cellulaire et de l'étape de croissance des cellules (Krumbein, 1979, p.53). Cet auteur distingue deux types de calcification: environnementale et physiologique. La première est surtout fonction des conditions environnementales extra-cellulaires, comme le pH, la composition de l'eau ou l'absence des ions inhibiteurs dans le milieu environnant. La deuxième est par contre contrôlée par le fonctionnement et "l'apparatus" cellulaire des algues et des bactéries.

Dans une synthèse, Krumbein (1986) discute des liens étroits entre les deux processus précédents. Les cycles biocristallins illustrent des influences et interactions multiples. On y reconnaît notamment les interactions de bactéries avec les fluctuations cycliques du carbone, d'oxygène, du soufre etc... Les influences microbiennes sur la transformation des minéraux et des roches ont été évoquées. L'auteur cite enfin les interactions biotiques attribuables aux dynamiques exogènes comme l'orogénèse ou la tectonique des plaques; celles-ci modifient selon les cas la nature des environnements et les populations biologiques appropriées. Il donne l'évidence du rôle des bactéries et des tapis biologiques qu'elles élaborent sur la cristallogénèse, particulièrement celle des carbonates.

Ces résultats concordent avec les conclusions de Pentecost et Filding (1986) qui se sont occupés du rôle des cyanobactéries dans la calcification. Ils décrivent plusieurs cas où la calcification reflète plus les interactions entre les facteurs environnementaux et biologiques que la nature même de ces derniers.

En effet les espèces édifcatrices des carbonates, comme Phormidium, Homeothrix, Rivularia,

Schizothrix, etc... sont significativement influencés par des conditions telles que la stabilité de l'eau, sa salinité, l'évaporation, l'éclairage ou la température ambiante par exemple.

En conclusion, la biogénèse de la calcite est importante mais elle est fortement conditionnée par l'équilibre environnemental.

B-Les fondements expérimentaux

De nombreuses études expérimentales sur les mécanismes de biocalcification ont été effectuées depuis les années soixante dix. Nous citerons à titre d'exemple certains travaux significatifs. Ceux d'Adolphe sont pertinents. Cet auteur publia une note exposant les résultats d'analyses des calcins en chou-fleur de France (Adolphe, 1969, p.2329). Ces dépôts sont d'origine physico-chimique et biologique voisins des constructions dues aux algues calcaires. Sa contribution à l'étude des encroûtements carbonatés de l'aqueduc romain du Pont du Gard dans la région de Nîmes en France confirma les conclusions précédentes puisque ces dépôts renferment des colonies de cyanophycées (Adolphe, 1973). Elles sont observées après dissolution des encroûtements, à travers les filaments algaires obtenus.

Au même moment des essais de biosynthèse de la calcite par culture in-vitro de quelques bactéries extraites des concrétions actives se multiplient. Une reproduction expérimentale a été menée par Adolphe et Billy (1974). Ils ont vu l'évidence d'activité bactérienne dans les manifestations rapides de voiles blanchâtres accrochés tout au long des tiges feuillées de mousses. Après isolement de ces voiles, ils ont obtenu une association bactérienne productrice de la calcite. Elle se compose des germes du genre Bacillus, Pseudomonas et Flavobacterium. Ces mêmes germes ont été encore observés dans une analyse bactériologique consacrée aux accumulations calcitiques des cavernes (Billy et Chavignac, 1976).

L'accumulation de la calcite se fait autour des filaments qui servent de support dans certains cas (Casanova, 1981, p.50). Elle se produit aussi à l'intérieur des cellules vivantes des filaments algaires (Geurts, 1976; Adolphe, 1981, p. 20). Des algues, bactéries et champignons cultivés in vitro montrent la dépendance des formes cristallines observées des organismes associés et de la composition chimique du milieu nutritif. La diversité de ces phénomènes traduit celle des organismes associés et les

variations temporelles du changement environnemental (Adolphe, 1986). Castanier (1987) montre notamment l'ubiquité des bactéries, leur diversité et la multiplicité des voies de la cristallogénèse (voie active membranaire et voie passive par modification du milieu extérieur). La stimulation expérimentale aboutit à la proposition d'une séquence biocristallogénique d'oïdes et d'agrégats biominéraux de carbonates calcitiques et magnésiens.

En Afrique du nord, des observations du terrain effectuées au Maroc et en Algérie par Adolphe *et al.* (1989) montrent l'aspect biologique des nombreuses accumulations étudiées. Des variations paléomicrobiologiques ont été reconnues suite aux analyses microscopiques et expérimentales des dépôts de diatomées cimentés par du carbonate du calcium d'origine bactérienne. Ces résultats sont compatibles aux conclusions de Lyon *et al.* (1984) au sujet des carbonates étudiés dans certains lacs du Sina en Egypte.

La conclusion qui s'impose suite à ces travaux est donc que le rôle biologique est principal dans la construction des édifices carbonatés naturels. Certains auteurs vont même jusqu'à estimer la quantité de calcite biogénique dans quelques environnements à 95% du total précipité (Chafetz et Folk, 1984). La littérature nous apporte ainsi l'information utile et suffisante sur l'écologie des microorganismes constructeurs et sur la biominéralisation. Il reste à discuter le deuxième volet du problème qui nous intéresse, à savoir les conditions défavorables à la biocalcification; c'est-à-dire celles qui ralentissent ou bloquent définitivement ce processus en agissant sur la vie ou l'activité des microorganismes ou sur le chimisme des eaux.

C-Quelques facteurs inhibiteurs de la biocalcification.

L'intervention humaine sur l'équilibre écosystémique est une composante principale à ce propos. La pollution des eaux et de l'atmosphère agit sur le milieu biologique. Les arguments déduits d'études expérimentales appuient cette réalité comme on le verra par la suite. Nous rappelons à ce propos des études bactériologiques basées sur des observations expérimentales pour confirmer l'impact des produits de traitement agricole sur la biomasse calcifiante.

Le développement du tapis algaire et des populations bactériennes est régi par certains principes fondamentaux en termes d'analyse écosystémique, comme la compétition, la succession et la cohabitation des espèces (Topham, 1977). Les variations environnementales déclenchent des processus d'ajustement pouvant dans bien des cas être défavorables à certaines espèces à la faveur des autres. La propriété d'adaptabilité s'effectue par l'intermédiaire de mécanismes physiologiques. Elle varie selon les espèces. Celles qui ne s'adaptent pas émigrent ou meurent. L'élimination de quelques espèces est souvent compensée par le développement d'autres espèces, mais pas nécessairement édificatrices des carbonates.

La biocalcification est donc directement influencée par les activités agricoles et industrielles. On discutera par la suite quelques exemples d'influence de ces pratiques humaines. Les traitements de sols par herbicides ont des conséquences écologiques considérables.

Wainwright (1978, p. 288) rapporte que ces conséquences peuvent être importantes au-delà de certaines doses. Les organismes nitrificateurs sensibles surtout en milieu acide sont profondément affectés par certains de ces produits. Les concentrations élevées influencent également la respiration dans les sols. Il ajoute cependant que l'effet négatif de ces produits sur la fertilité des sols est négligeable quand les doses sont raisonnables.

Les recherches menées sur les cyanophycées encroûtantes du Var en France mettent en évidence les conséquences catastrophiques de l'impact anthropique sur les populations biologiques de ces milieux (Casanova, 1985; 1986). Les communautés algaires édificatrices de véritables biohermes continentaux au Quaternaire ont subi une importante régression et sont de nos jours limitées à certaines zones refuges. La comparaison du tapis algaire dans les zones polluées et les zones à stromatolites lui permet de commenter la perte du pouvoir encroûtant des cyanophycées en liaison avec la qualité de l'eau. Il note ce qui suit:

"Les valeurs les plus faibles pour le sodium et les sulfates sont obtenues dans la zone de précipitation des carbonates. Cependant, la concentration en phosphore apparaît comme l'élément déterminant de la limitation de l'encroûtement carbonaté. La teneur du phosphore dans les algues augmente dans les zones soumises aux rejets polluants; de même, la concentration en orthophosphate est inversement corrélée à

la quantité de la calcite précipitée... Les orthophosphates ont un effet inhibiteur de la précipitation de la calcite pour des concentrations supérieures à 0.05 mg/l" (Casanova, 1985, p.2810).

Ces mêmes conclusions ont été confirmées par l'auteur dans une publication récente (Casanova, 1986, p. 179). Une étude expérimentale basée sur des cultures de bactéries sélectionnées, y compris les Pseudomonas met en évidence l'effet de certains inhibiteurs chimiques sur l'activité des espèces étudiées (Klein et Alexander, 1986). C'est donc une entrave directe à la biocalcification puisqu'on trouve des bactéries calcifiantes parmi les espèces inhibées.

En traitant des aspects microbiens de la pollution des eaux naturelles, Champiat et Larpent (1988, p. 24) signalent que les cyanophycées peuvent être utilisées comme indicateurs de la pollution, car certaines de leurs espèces survivent difficilement dans ces milieux. Ainsi Chamaespheron polunius et Calothrix sont caractéristiques des eaux non polluées tandis que Oscillatoria, Chlorina et Spilurina peuvent survivre dans les eaux non polluées et pauvres en oxygène. Phormidium est présent quand les eaux sont moyennement polluées, particulièrement si la pollution est organique.

Oremland et Capone (1988, p. 285) donnent une synthèse des facteurs spécifiques inhibiteurs de l'activité des microorganismes en écologie microbienne. Les nombreux exemples qu'ils citent apportent un éclair sur ce problème. Leurs conclusions affirment la multiplicité des facteurs inhibiteurs et la variation de leur modalités d'action. Ils agissent sur la croissance des espèces et leurs métabolismes physiologiques. Certains fertilisants comme le Nitrapym ont été cités comme exemples d'inhibiteurs bactériologiques pour des concentrations fortes (100 microgrammes par millilitre). L'incidence de l'épandage répété de soufre élémentaire sur les terres agricoles est considérable (Gupta et al., 1988, p.463). Cette étude basée sur une observation durant cinq années consécutives met en évidence l'abaissement du pH des sols, l'augmentation des teneurs en sulfates et l'abaissement de 25 à 50 % du carbone de la biomasse microbienne due à ces pratiques agricoles. La respiration, ainsi que plusieurs activités physiologiques des populations bactériennes sont étudiées. La décroissance du nombre des individus est confirmé. La conclusion à souligner est une affirmation du rôle des produits chimiques et des fertilisants agricoles sur l'activité et la densité des microorganismes calcifiants. C'est une conclusion fondamentale

pour l'avancement de nos recherches, car ceci semble apporter un autre élément utile à la résolution du problème du ralentissement de l'encroûtement posé.

A ce stade, une recherche bactériologique s'impose, pour mettre en évidence l'état de la biomasse dans les différents points d'eau et sources de la région étudiée. C'est-à-dire qu'avant même d'accuser la pollution comme étant parmi les facteurs responsables du ralentissement de l'encroûtement via la réduction ou l'élimination de certaines espèces biocalcifiantes, il faut d'abord appréhender l'existence ou l'absence de ces espèces dans diverses sources et points d'eau.

D-Signification du contrôle biologique

La prémisse de base de ce travail provient d'une abondante littérature permettant deux déductions fondamentales:

- affirmation des liens entre l'encroûtement et le monde vivant aquatique.
- Influence des fertilisants et des produits chimiques agricoles sur l'activité biologique et l'acidité du milieu aquatique. L'hypothèse selon laquelle les pratiques humaines dans le domaine agricole provoquent des effets notables sur la diversité et la densité de la biomasse nous intéresse dans la mesure où les organismes biocalcifiants sont affectés. Contrôler l'absence ou la présence de certaines espèces dans des milieux différemment soumis aux risques de la pollution anthropique est un test de la validité des hypothèses reliant les trois composantes du système étudié: l'encroûtement, la biomasse et les facteurs anthropiques. Nous n'entrerons pas dans une étude physiologique des bactéries et des algues, car ceci nous imposerait une orientation plutôt biologique qu'environnementale. Nous nous limiterons donc à rechercher dans l'eau, des bactéries reconnues à la fois calcifiantes et intoxiquées par les fertilisants ou les produits chimiques de traitement agricole.

Les Pseudomonas seraient l'exemple type de ces bactéries. Elles ont été expérimentalement prouvées actives dans le processus de l'encroûtement (Adolphe, 1973; 1986; Adolphe et Billy, 1974; Billy et Chalignac, 1976; Adolphe et Maréchal, 1977; Lyon et al., 1984; Castanier, 1987; Adolphe et al., 1989). Elles ont été, d'un autre côté, trouvées très sensibles à l'avènement de produits ammoniacaux ou pesticides

considérés inhibiteurs des bactéries (Wainwright, 1973; Casanova, 1985, 1986; Klein et Alexander, 1986; Champiat et Larpent, 1988). Leur absence dans les eaux de rivières plus soumises aux risques de la pollution anthropique serait un argument à la faveur de l'hypothèse précédemment posée. Dans ce but un programme d'échantillonnage des eaux a été établi. Il s'étend pour la période de juin à septembre 1990. Il vise la connaissance des variations spatiales et temporelles des Pseudomonas dans les différentes sources et points d'eau. Des sites représentatifs d'aquifères naturels encore vierges ou peu anthropisés sont choisis. Il s'agit de sources "Ifefas" en amont du M'goun, ainsi que celle d'Ait Arbi dite "Asfazate" dont on connaît les limites de la nappe aquifère l'alimentant. Ces limites excluent toute activité agricole et l'intervention humaine y est très faible à cause de sa position perchée.

D'autres sites échantillonnés sont ceux considérés régulièrement perturbés par les activités humaines. Il s'agit des fonds de vallées du M'goun et du Dadès, où l'eau subit souvent des interventions humaines ou des perturbations naturelles. Un nombre total de vingt échantillons équitablement répartis dans le temps et dans l'espace nous a donné les résultats que nous présentons sur le tableau n° 9.1. Seul au mois de mai, les Pseudomonas apparaissent dans certains points d'eau. Ils ont été observés exclusivement dans les eaux de sources de la région marginale du massif atlasique. C'est-à-dire dans les eaux de la source Asfazate, source actuellement edificatrice d'Ait Arbi et dans la source d'Ait Ibrim. Cette dernière ne donne pas d'encroûtements. Ses eaux sont entièrement captées et exploitées pour l'irrigation et le jardinage des environs. Aucun des mois d'été n'a cependant pas montré des résultats similaires pour les dites sources. Mais il faut signaler que rares sont les travertins qui se forment au cours de cette saison. La faiblesse des débits de sources y est décisive.

Les eaux de rivières n'ont en aucun cas permis d'isoler des Pseudomonas, que ce soit au M'goun ou au Dadès. Le facteur biologique contribuant à l'encroûtement est donc absent dans cet hydrosystème si l'on se limite à ce type de bactéries. D'autres peuvent éventuellement exister mais leur effet d'encroûtement est en tous cas négligeable. Les causes de l'absence du Pseudomonas seraient multiples et de nature physique ou anthropique, mais ces dernières nous paraissent évidentes au Dadès et au M'goun.

Tableau no 9.1.

Résultats bactériologiques. (P) présence de Pseudomonas,

(-) son absence et (o) analyse ratée.

Date	15.5.90	6.7.90	31.8.90	10.9.90
Source Ifesfas	-	-	-	-
Rivière M'goun	-	-	-	-
Source Asfazate	P	o	-	-
Source A. Ibrirn	P	o	o	-
Rivière Dadès	-	-	-	-

Au M'goun, notons que la seule issue reliant le haut pays des zones en aval est un canyon étroit d'environ vingt à trente mètres de largeur et long d'une cinquantaine de kilomètres. C'est le seul passage quotidien des mulets de la tribu M'gouna et des Ait Bougmez transitant vers "Ouzighimt" en amont du M'goun.

Les eaux sont souvent perturbées et turbides soit pour cette même cause ou en raison des crues dues aux orages d'été. Les pentes assez fortes accélèrent les écoulements au M'goun et maintiennent ces conditions de violence naturelle. Cet environnement physico- humain serait défavorable à l'épanouissement des facteurs biogènes voire même physico-chimiques de l'encroûtement, en particulier l'excès de turbulence qui permet le déplacement des galets détruisant par le fait même les minces pellicules de la calcite formée saisonnièrement.

Dans les eaux de la source Ifefas au haut M'goun, il est étonnant d'observer l'absence des Pseudomonas. Aucun échantillon n'a permis d'isoler cette bactérie et pourtant la formation de travertin en cascade se poursuit. La position perchée de cette source sur le versant est une condition suffisante au dégazage du CO₂ et donc à la formation de travertin par effet physico- chimique. Il pose cependant un problème purement biologique à propos de l'écologie du Pseudomonas; c'est-à-dire son milieu naturel préféré et les limites de température et d'altitude qu'elle supporte. Ces questions se trouvent à l'extérieur du champs d'intérêt géographique malgré leur importance primordiale à ce propos.

Au Dadès le facteur anthropique serait parmi les causes principales de l'absence du Pseudomonas. Ce germe encroûtant est sensible aux fertilisants. Les quantités d'engrais distribuées toute l'année (au fond et à la surface des sols) ainsi que l'utilisation des pesticides de plus en plus fameux au jardinage local, apporterait une explication au moins partielle. Des traces hydrochimiques significatives sont observées et interprétées dans ce sens comme il sera discuté ultérieurement.

E-Des indicateurs hydrochimiques

L'hypothèse d'éventuels liens entre la dynamique hydrochimique et l'environnement humain s'avère intéressante. Elle reste cependant à confirmer par des analyses crédibles comme les tests bactériologiques

précédemment signalés ou les analyses hydrochimiques dont on donnera les résultats dans le présent chapitre. Le problème méthodologique mérite à ce propos une brève introduction, avant même d'aborder la présentation et la discussion des résultats de l'analyse.

a-Type d'approche

Elle commence par un long programme de collecte des informations et le choix des indicateurs à explorer et des sites à étudier. L'orientation de l'étude est comparative à des niveaux variés:

- * Entre milieux naturels vierges de haute montagne et milieux fortement humanisés des vallées en aval.
- * Entre les sources représentatives de nappes aquifères souterraines et eaux superficielles plus soumises aux risques de la pollution.
- * Entre certaines rivières et les canaux d'irrigation "séguia". Ceux-ci traversent en général les périmètres agricoles et traduisent mieux les impacts éventuels.

La première et la deuxième considération nous ont incité à étudier des sources isolées de la haute montagne et des points d'eau en aval. Nous avons choisi la station d'Alfer au M'gouni et celle d'Ait Mouted au Dadès comme des stations reflétant les conditions environnementales dans ce milieu perturbé leur situation est conforme à nos critères de choix (bordure) et les données précédemment accumulées sur ces points sont abondantes. Pour la troisième considération, le transect soumis à l'étude est aux alentours de Boumalne. On y trouve des canaux d'irrigation suffisamment contrôlés par des analyses et observations nombreuses.

Il y a donc des possibilités de comparaison avec l'état de la rivière principale dont ils sont dérivés. Les données étudiées proviennent de deux sources distinctes, mais elles sont soumises aux normes de contrôle identiques. Une série d'analyses sont effectuées à l'initiative personnelle dans des laboratoires tels que celui de la direction de l'hydraulique à Beni-Mellal ou par l'intermédiaire du service d'agriculture dans la même ville. D'autres données proviennent des archives de la direction de l'hydraulique à Rabat et Ouarzazate.

Le problème de choix des indicateurs hydrochimiques pertinents est posé. Nous avons opté pour les ions capables d'indiquer de façon directe ou indirecte des relations évidentes. Les sulfates, les nitrates et les

chlorures s'avèrent donc essentiels. Ils sont des produits de base de fertilisants dans ce secteur. Ils sont donc révélateurs de leur origine probable. La période de prélèvement et la continuité chronologique des analyses sont aussi des considérations essentielles. Cette dernière est nécessaire, de façon à intéresser un ou plusieurs cycles hydrologiques et couvrir plusieurs saisons.

b-Les données de l'analyse

*** Le Dadès à M'semrir et les sources environnantes**

La figure n° 9.1 et le tableau n° 9.2 représentent les concentrations en potassium et en sulfates des dix-sept analyses mensuelles prélevées à M'semrir. La concentration minimale en potassium y est égale à 0.39 mg/l. Elle est enregistrée le 6.4.1976. Le mois de mai marque encore des basses teneurs en potassium comme on le voit en 1975 et en 1976, avec une concentration égale à 1.17 mg/l pour les deux cas. Deux mois plus tard, c'est-à-dire vers la fin de juin, le potassium montre une valeur grandissante d'environ 2 en 1975 et 8.9 mg/l en 1976. Le maximum atteint est de 10.16 mg/l le 6.7.1976. L'énorme écart entre les extrêmes est observé et la spécificité saisonnière ou simplement mensuelle semble apparaître. Le printemps connaît encore des concentrations faibles. Celles-ci sont par contre élevées en été (entre 2 et 9 mg/l).

Une autre valeur importante (5.08mg/l) est obtenue pour l'analyse du 5.10.1976. Elle est indicatrice de fluctuations probables d'automne. Les sulfates montrent également des valeurs minimales au mois de mai. Celles-ci sont de l'ordre de 24 mg/l en 1975 et de 14.4 seulement en 1976. Des valeurs maximales sont par contre enregistrées dans la période s'étendant de février à mars. Elles varient autour de 100 mg/l. Les chlorures peu variables, marquent des concentrations inférieures à 20 mg/l. En raison de l'accessibilité du terrain en été, nous avons échantillonné certaines sources d'altitude dans la région de M'semrir; en particulier la principale source du Dadès dénommée "Bou Ikoulla". Elle est issue du massif calcaire alimentant le Dadès. Le tableau n° 9.3 montre les résultats de ces analyses de contrôle effectuées pour le mois d'août 1981. On y observe pour l'ion potassium des valeurs inférieures à l'unité. La source "Ain Lalla Mariam" représente l'exception. Elle est située en marge

Fig. 9.1 Variation des ions potassium et sulfates dans l'eau de rivière (Dades) à M. Semir.

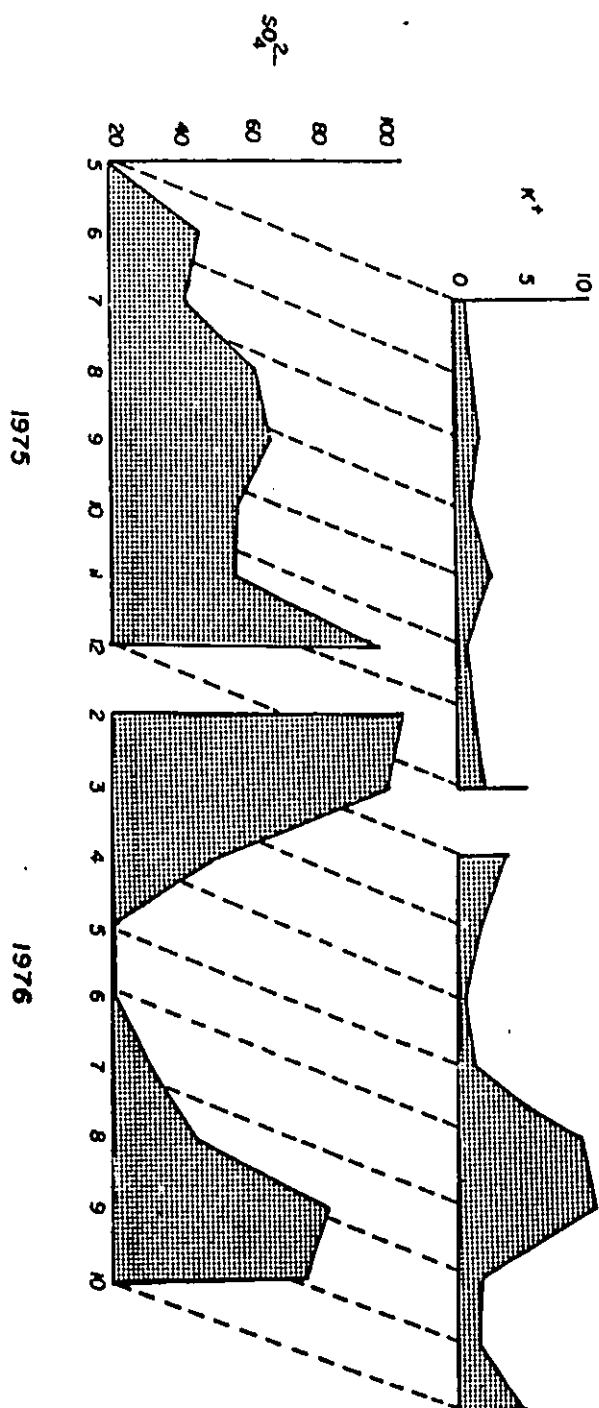


Tableau no. 9.2. Concentration des eaux du Dadès en potassium, sulfates et chlorures.

Station hydrologique	date																			
M'Semrlir (amont) I.R.E 257/46	K ⁺ mg/l	1.17	1.17	1.56	1.95	1.56	2.34	1.17	1.56	2.34	3.12	2.3	0.39	1.17	8.9	10.16	1.9	1.9	5.08	
	SO ₄ ²⁻	24	19.20	48	43	62	67	57	57	96	105	100	48	14.4	19.2	33.6	57	81	76	
	Cl ⁻	46.2	35.5	35.5	35.5	46.2	63.9	53.2	33.2	46.2	53.2	53.2	48	28.4	17.7	46.2	46.2	46.2	35.5	
Alt. Mouted (Aval) I.R.E 509/55	K ⁺	1.56	-	3.5	2.3	2.3	3.9	1.56	2.7	2.3	1.9	2.3	1.6	1.17	-	3.2	2	5.47	5.3	
	SO ₄ ²⁻	72	-	76	81.6	81.6	96	67	91	100	100	72	48	33.6	-	67	86	120	76	
	Cl ⁻	46.2	35.5	35.5	35.5	46.2	63.9	53.2	33.2	46.2	53.2	53.2	48	28.4	17.7	46.2	46.2	46.2	35.5	

des exploitations agricoles des Ait Morghad de M'semrir. Tous les autres ions gypso-salifères montrent des valeurs faibles, comparativement aux moyennes usuelles des eaux de surface. La teneur en sulfates des eaux de Bou Ikoulla est égale à 9.6 mg/l. C'est la plus basse observée dans toute la série d'analyses à notre disposition partout dans le terrain d'étude.

*** Composition des eaux en aval** (figure 9.2 et tableau 9.3).

L'eau prélevée dans la station d'Ait Mouted et les deux canaux d'irrigation "Ségua" bordiers, montre des concentrations plus élevées comparativement à celle d'amont. Dans toute la série d'analyses à disposition, le potassium à M'semrir reste inférieur par rapport à Ait Mouted; exception faite des trois mois de pointe précédemment signalés à M'semrir (juin, juillet et octobre 1976). La même remarque est faite pour la comparaison des concentrations de sulfates. En aval elle atteint souvent le double de la concentration d'amont pour le même mois. La concentration moyenne des sulfates à M'semrir est d'environ 56 mg/l, tandis qu'à Ait Mouted celle-ci atteint 74. Il est cependant remarquable de noter qu'un certain parallélisme se voit quant à l'évolution des concentrations propres aux sulfates entre l'amont et l'aval. Elles sont maximales dans les deux cas en septembre, décembre et en février, avec des concentrations variables autour de 100 mg/l. Les chlorures, moins fluctuantes à M'semrir, marquent une évolution contrastée à Ait Mouted.

L'intervalle s'étendant entre le minimum de 17.7 mg/l (juin 1976) et le maximum de 63.9 mg/l (septembre 1975) est plus étendu, soit avec un écart de 46.2 mg/l.

Nous constatons que les teneurs en chlorures des eaux à Ait Mouted dépassent celles du Dadès à M'semrir suivant une proportionnalité atteignant le double dans la majorité des mois. La remarque qui s'impose est de souligner l'influence subite durant la trajectoire de l'eau. Cette influence est traduite par

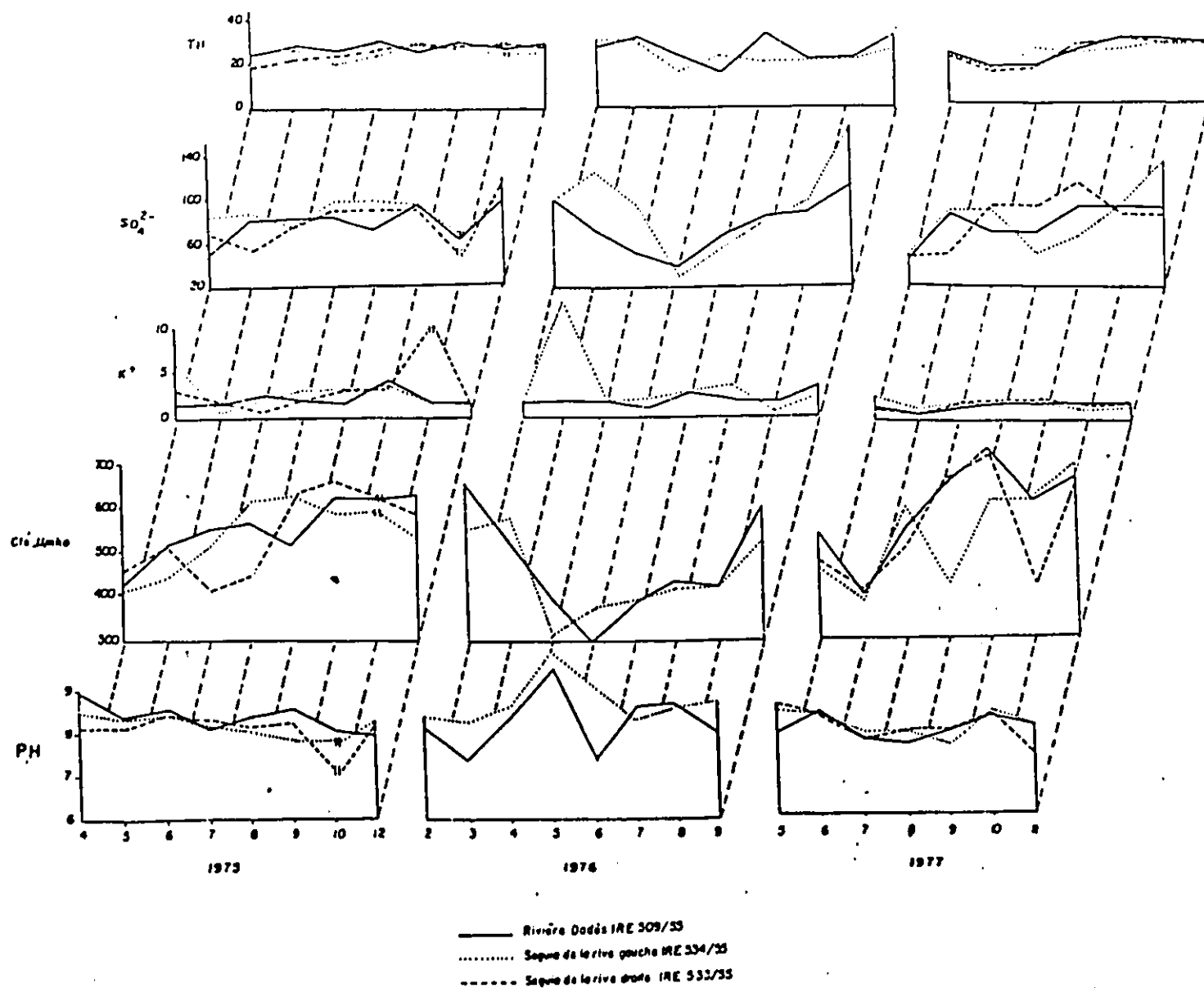


Figure no. 9.2. Comparaison de quelques caractéristiques hydrochimiques entre le Dadès et les séguías bordières à Ait Mouted.

Tableau no. 9.3. Les ions du sulfate, potassium et chlorure dans les eaux de sources représentatives d'aquifères "naturels" peu ou pas anthropisés en haute montagne (campagne du 11.8.91).

	K ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻
Source Bou Ikoulla Gouffre; extrême amont Dadès	0,70	9,6	14,2	8,9
Aïn Lalla Mariam (amont Dadès) région M'Semrir	2,14	57,6	6,5	26,6
Aghbalou N'Cubarbach (Région de M'Semrir)	0,9	76	10	8,9
<i>Moyenne (usuelle) des eaux de surface (M 'Semrir)</i>	2,7	50,4	10,2	39,8

l'accroissement de la salinité et la distribution particulière des concentrations de certains ions. Celle-ci semble refléter l'intervention humaine sur l'hydrosystème naturel. Un autre type d'examen permettrait de confirmer cette déduction. Il s'agit d'une recherche de corrélations entre ces ions influencés par l'homme et le total rocheux dissout dans l'eau. Ce dernier est supposé refléter une saisonnalité plus ou moins régulière, parce qu'il est conséquent des conditions hydro-climatiques globales de la région. La figure n° 9.2 montre les différences entre le Dadès et les canaux d'irrigation bordiers. Ces canaux traversent le secteur agricole et sont plus soumis aux risques de contamination. Des surplus de sulfates et de potassium sont notés à plusieurs reprises.

*** Les corrélations ioniques mises en évidence par régression**

Les figures n° 9.3, 9.4 et 9.5 représentent le résultat d'analyse par régression de toute la série de données acquises sur le Dadès, le M'goun et le Todgha. Elles permettent de comparer les corrélations entre le total dissout (TD) et le calcium (Ca^{2+}). Ce dernier, purement d'origine physique dans notre terrain montrerait le comportement "normal" d'un ion vis-à-vis du total dissout à travers toutes les saisons. Le sulfate quant à lui, a des origines diverses et fait l'exemple d'ions à comportement perturbé.

Dans le cas du calcium, la tendance semble être unique dans la distribution des corrélations avec le total dissout. Aucun effet saisonnier n'est indiqué. L'augmentation du total dissout s'accompagne en général d'une augmentation des teneurs en calcium. Le nuage de points est moins concentré autour de la droite médiane, mais l'évolution générale des deux variables semble être identique.

Pour les sulfates, la figure n° 9.4 montre une distribution différente. Encore ici l'effet saisonnier est moins évident. Les corrélations avec le total dissout sont moins nettes. Deux groupes de données s'identifient: le premier se caractérise par des valeurs de TD influentes. Leur augmentation marquée donne à la courbe une tendance presque verticale au début. Dans ce groupe rassemblant les deux tiers des données

Figure no. 9.3. Corrélations entre le total dissous (TD) et le calcium dans tous les points étudiés au Dadès et au Todgha.

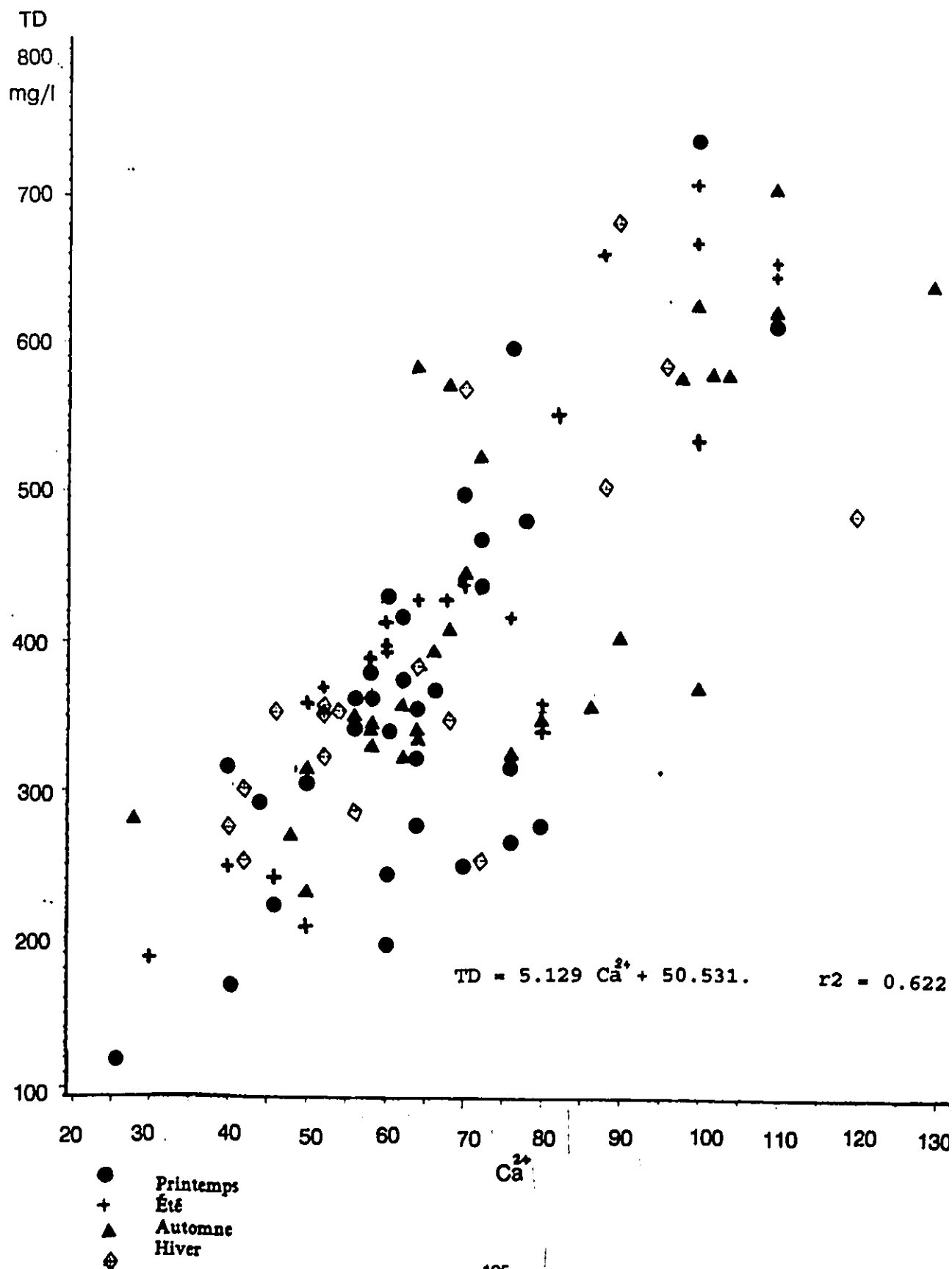


Figure no. 9.4. Corrélations entre le total dissous et les sulfates aux points d'eau étudiés au Dadès, Todgha et M'goun.

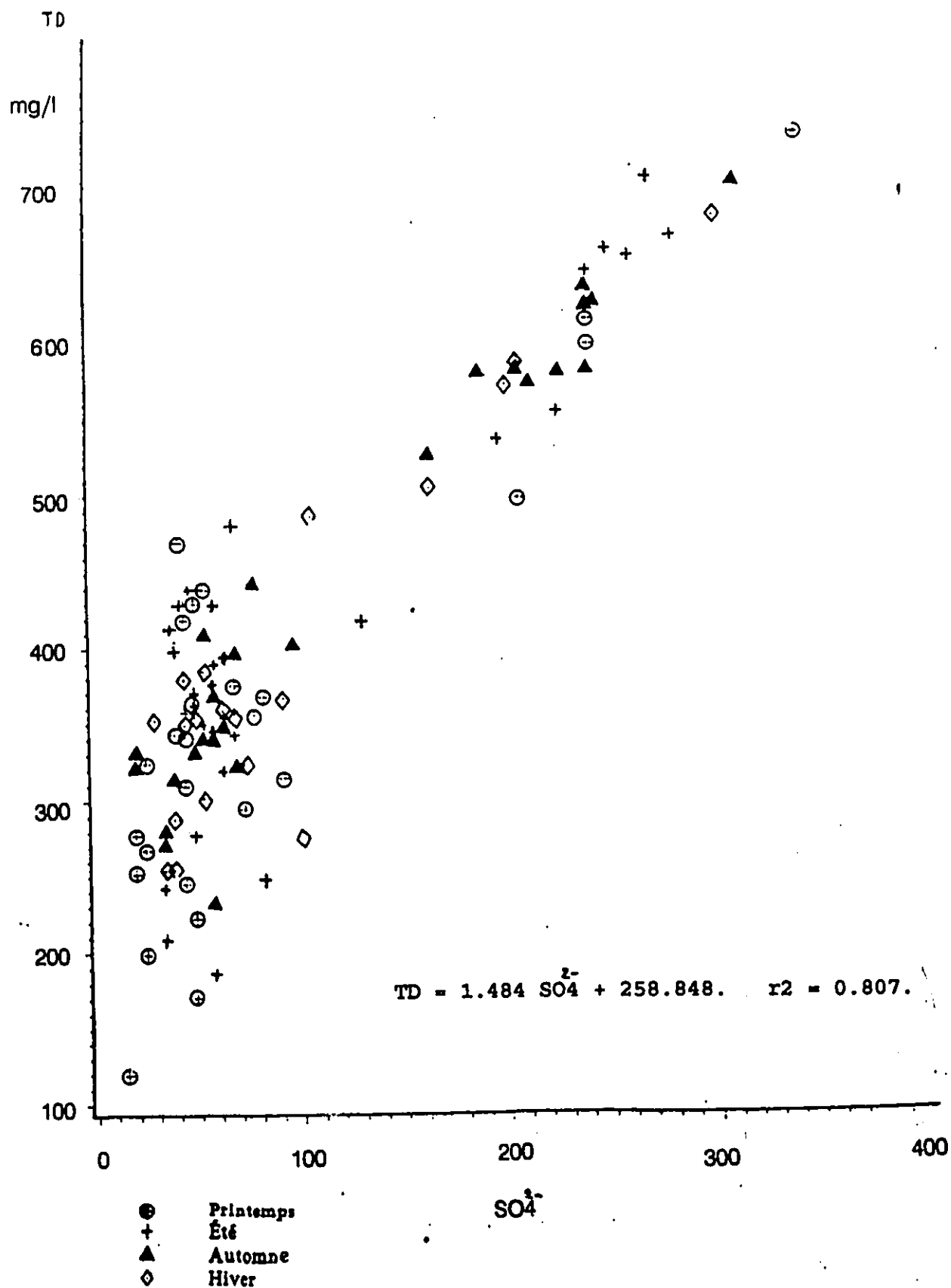
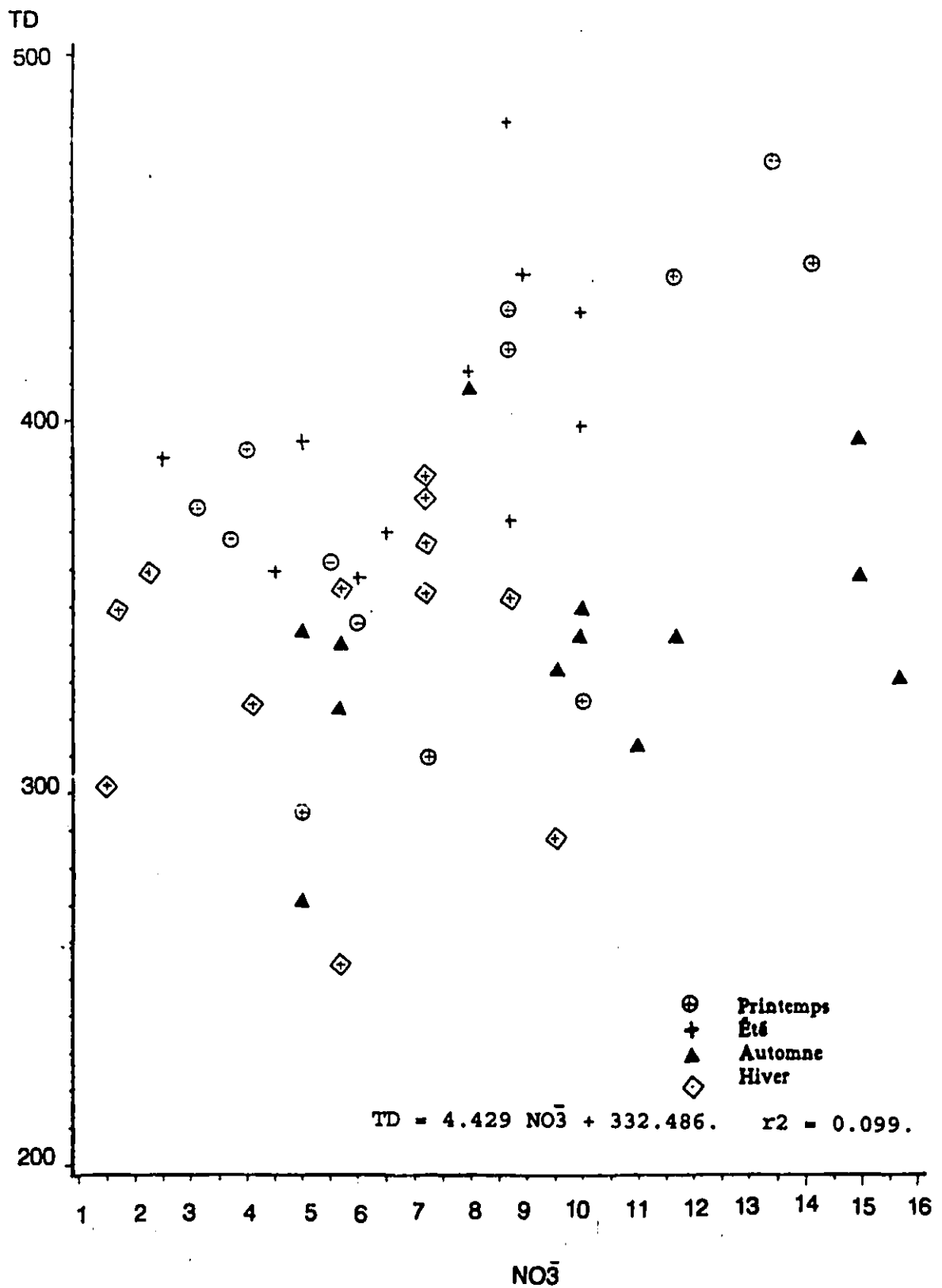


Figure no. 9.5. Corrélations entre le TD et nitrates aux points d'eau étudiés au Dadès et au Todgha.



analysées, l'augmentation du TD est accompagnée d'une stabilité relative des sulfates. Le deuxième groupe montre des corrélations plus fortes. Une évolution conforme est indiquée; soit une augmentation du même rythme entre les deux variables (TD et sulfates). Le nuage de points est plus serré et mieux ordonné autour de la droite médiane. Celle-ci serait plus oblique et montre une tendance différente de celle du premier groupe.

La conclusion qui s'en déduit est de souligner qu'en règle générale, les sulfates sont moins corrélés aux TD. Il arrive cependant aux deux variables de suivre une évolution à tendance identique (1/3 des données seulement) ce qui s'expliquerait par des conditions particulières, dues essentiellement à l'intervention humaine. En d'autres termes, les sulfates ne varient pas souvent, et ne suivent pas les TD, sauf dans certains cas, où un apport supplémentaire des sulfates provient d'une origine autre que celle qui domine habituellement. Cette origine serait probablement anthropique puisqu'on connaît l'importance d'utilisation des engrais mélangés à certains moments de l'année. La figure n°9.5 montre les corrélations existantes entre le TD et les nitrates aux points d'eau étudiés. Nous avons introduit la composante saisonnière au programme de régression, afin d'illustrer les variations de corrélations suivant le paramètre temporel. Cette figure permet de constater la perturbation évidente des ions. La distribution des points occupe une surface importante, surtout ceux représentatifs des saisons d'automne et du printemps.

Un désordre de comportement des nitrates est donc observé (il n'y a pas de relation linéaire avec les TD). Celui-ci est accompagné d'une influence saisonnière qu'on peut saisir à la fois à travers le poids du TD et la variabilité des nitrates.

En d'autres termes, les points représentatifs d'échantillons d'eaux du Dadès et du Todgha sont répartis sur le diagramme et ne montrent pas de corrélation linéaire entre le TD et les nitrates. Les valeurs relativement élevées des nitrates au printemps et en été indiquent une perturbation probablement d'origine humaine. Les deux saisons connaissent une activité agricole maximale et l'emploi de fertilisants et l'irrigation dont on connaît les conséquences directes sur la qualité de l'eau.

2-Discussion: les indicateurs d'impact environnemental.

La situation hydrochimique ainsi exposée montre des influences multiples. Certaines sont purement physiques et s'expliquent par l'environnement local ou régional. La géologie et le climat ainsi que l'influence du régime hydrologique conditionnent la composition hydrochimique de l'eau. L'intervention humaine est aussi considérable. Les vallées agricoles d'oasis subissent une action de fertilisants sans précédent. Les ions gypso-salifères étudiés reflètent cette action. Avant de discuter l'effet d'une telle intervention sur l'équilibre physico-chimique et la saturation en carbonates, nous traitons d'abord les autres facteurs marquant leur influence. Le but en est d'inventorier toutes les influences probables pour mieux saisir la dynamique des carbonates et appréhender l'action liée aux facteurs anthropiques.

A-La géologie et le climat: deux constantes à effet modifié.

Dans une publication antérieure (Akdîm, 1986), nous avons essayé de mettre en évidence les nuances apportées à l'hydrochimie du M'goun suivant l'origine des eaux et la nature lithologique de l'aquifère alimentant ses affluents. Ces nuances ne manquent pas au Dadès, dont la longueur dépasse la centaine de kilomètres. Elles imposent des modifications liées à la géochimie des roches traversées. En effet, le Dadès à M'semrir est influencé par les eaux provenant de nappes aquifères calcaro-marneuses ou calcaires du Bajocien ou du Lias. Les eaux sont surtout bicarbonatées calciques. Les ions gypso-salifères (sulfates, chlorures, potassium, sodium et potassium) n'ont d'importance quantitative notable qu'en bordure sud-atlasiques. Le faisceau crétacé-éocène longeant cette bordure se compose de couches enrichies de gypse, sels et phosphates. Il expliquerait une partie de l'enrichissement relatif observé dans les teneurs de ces ions à Ait Mouted (Dadès) et à Alfer (M'goun).

La pérennité d'influence de ce facteur impose donc une stabilité relative dans l'évolution de la composition hydrochimique spécifique à ces ions. La perturbation notée dans leur comportement et évolution s'expliquerait par d'autres paramètres, en particulier climatiques et anthropiques.

Le climat régional est méditerranéen. Il est cependant modifié par deux conditions majeures: l'effet

d'altitude et la proximité présaharienne. L'altitude des points d'eau étudiés dépasse partout 1600 mètres. Les hauts sommets des chaînes d'amont atteignent 3000 m et plus. Cette considération est essentielle en hydrochimie vu l'effet qu'elle engendre dans l'équilibre hydrochimique (t^* de l'eau, dissolution du CO_2 , pH, etc...). L'effet qui en découle ne peut également qu'être saisonnier dans son comportement global. Cette saisonnalité typique est cependant réduite ou complètement effacée dans le régime hydrochimique des points étudiés. Elle l'est encore plus dans le cas des orages torrentiels d'été. Ceux-ci provoquent des situations hydrochimiques qu'il conviendrait d'interpréter dans ce cadre particulièrement local. C'est-à-dire que les variables à caractère temporel peuvent subir l'influence d'événements stochastiques et purement aléatoires, tels que ces orages d'été exceptionnels.

B-L'effet grandissant des fertilisants

La fertilisation par engrais est une composante principale de la modernisation agricole. L'utilisation exagérée des produits phosphatés, potassiques ou ammoniés a été considérée néfaste et polluante d'un point de vue environnemental. Ils affectent la qualité de l'eau (Young, 1983; Halberg, 1987; Etchanchu et Probst, 1988; Faillat et Rambaut, 1988; Turin, 1990).

Le problème ainsi connu en Occident et même en Asie du sud-est (Jacks et Sharma, 1983) n'est pas encore documenté ni évalué dans les pays d'Afrique. Dans le cas du Maroc, il est possible d'admettre l'éventualité d'un tel impact dans les plaines agricoles fertiles et les périmètres d'exploitation moderne au nord. On s'attend moins à l'observer dans les caïsses et vallées de la haute montagne. Celles-ci sont exploitées jusqu'à une époque récente de façon traditionnelle (Mountasser, 1985; Ait Hamza, 1986). Mais les résultats de la présente étude montrent que les oasis et les vallées de montagnes sont maintenant elles aussi affectées, car ils confirment l'existence de comportements hydrochimiques indicateurs d'impact humain surtout dans les eaux de rivières en aval des vallées étudiées.

Plusieurs sortes d'engrais sont utilisées. Les produits à base d'azote synthétique affectent plus la qualité de l'eau (Halberg, 1987) car ils sont plus utilisés. Les sources du nitrogène dans le milieu aquatique sont nombreuses. Il provient d'engrais synthétiques, du sol, de rares affleurements géologiques et de rejets animaux; mais la principale source reste l'usage agricole d'engrais (Keeney, 1986).

D'après Olson et al. (1970) les nitrates répandus dans un champs de maïs au Wisconsin (E.U) polluent les eaux souterraines. Ils insistent cependant que cette pollution est lente à cause d'une infiltration pouvant atteindre des années.

Dans les oasis sud-atlasiques, la majorité des sols occupent les basses terrasses soltano-rharbiennes. C'est-à-dire les terrasses de fond de vallée à texture sableuse ou sablo - limoneuse. Il en résulte un bon drainage des eaux et par conséquent une communication directe avec la rivière. Les concentrations maximales apparaissent généralement peu de temps après l'usage de fertilisants. Ce phénomène inaperçu dans les nappes aquifères de haute montagne comme on le remarque dans les analyses d'eau de sources données au tableau n° 9.2, devient majeur dans les eaux superficielles de la rivière et dans les "ségua" bordières à Ait Mouted (figure n° 9.2).

L'utilisation de fertilisants connaît en effet un développement énorme dans ce domaine. Les statistiques officielles des services d'agriculture habilités à vulgariser ces produits montrent la croissance rapide de la consommation des différents types d'engrais dans les communes rurales de Boumalne et d'Ait Sedrate. Le tableau n° 9.4 permet de voir l'importance de cette augmentation. En cinq années, le taux distribué s'est doublé. C'est à partir de 1986 qu'une légère réduction est observée. Elle est due à une politique d'encouragement momentanée, achevée en 1986 au bénéfice du secteur de commercialisation privé. Ce changement de politique est progressif au fur et à mesure que la conscience des bienfaits de ces produits se développe chez les agriculteurs. Une enquête sur le terrain a montré qu'en l'absence des produits subventionnés par l'état, le marché libre de commercialisation des engrais est très actif à Boumalne. Cinq dépôts de commerçants grossistes fournissent des quantités mensuelles dépassant du triple les quantités distribuées par l'office d'agriculture. Dans cet état de faits, on voit s'acheminer d'énormes quantités d'engrais sur le secteur agricole étroit le long de cette vallée large de moins d'un kilomètre et longue de plus de 100 km différentes sortes de fertilisants sont utilisées suivant la saison.

Les périodes d'enfouissement se situent à novembre - décembre pour les engrais de fond (A.S.P et 14.28.14; engrais mélangés). D'autres produits sont répandus en mars, avril comme les engrais azotés

Tableau no 9.4.

Distribution des engrais par la circonscription régionale d'agriculture à Boumalne (engrais subventionnés par l'état).

Année	1981	1982	1983	1984	1985*	1986	1987	1988
Boumalne	230	260	330	380	495	384	106	160
A. Sedrate	180	225	267	257	400	388	118	110

Le chiffre en quintaux totalise toutes les sortes d'engrais (A.S.P.; 14.28.14 et Urée). (*) Année après laquelle on a réduit la distribution de produits subventionnés.

(urée et sulfates d'ammonium). Ces engrais ont une action directe sur l'écosystème. L'apport de nitrate d'ammonium ($\text{NH}_4 \text{NO}_3$) améliore l'alimentation azotée des plantes, celui de superphosphate ($\text{Ca} (\text{H}_2 \text{PO}_4)_2$) l'alimentation en phosphore. Une action bénéfique leur est aussi reconnue car ils améliorent les propriétés agrologiques du sol et l'environnement qui conditionne l'alimentation des plantes.

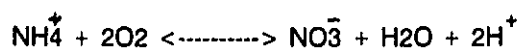
Ces avantages ne peuvent cependant cacher les risques d'utilisation exagérée, que ce soit sur l'équilibre de l'écosystème pédo-agricole, ou sur la qualité de l'eau. Les poussées notées dans la distribution saisonnière des ions originaires d'engrais (potassium, sulfates, chlorures) sont à ce sujet significatives. Des états semblables ont été prouvés nuisibles à certains types de bactéries en Europe et en Amérique du nord (Young, 1983). Les cyanophycées encroûtantes sont aussi affectées par l'exagération des concentrations d'engrais dans l'eau comme discuté précédemment. Ces conséquences biologiques s'accompagnent en même temps d'effets purement chimiques. Ils sont observés dans l'acidité du milieu aquatique et au niveau de la dynamique des ions carbonatés.

C-Effets hydrochimiques

Dans la série de données analysées, nous avons constaté une moyenne d'environ 7.9 pour le pH des eaux au Dadès dans la station d'Ait Mouted. Dans la majorité des cas, il est dans l'intervalle de 7 à 8. Il montre donc un milieu équilibré peu alcalin. Malgré les conditions d'évaporation, de la température élevée et le substratum géologique riche en éléments alcalins, une superalcalinité évidente n'est jamais observée. D'un autre côté, nous constatons que les périodes où les pH tendent vers 7 connaissent en même temps des concentrations élevées en sulfates ou en potassium ou dans les deux à la fois. Sur les figures d'évolution des concentrations des ions dans les différents points d'eau (e.g. figures 9.1, 9.2), nous pouvons voir les valeurs maximales enregistrées pour ces variables, dans bien des cas, tandis que le pH reste inférieur à la moyenne annuelle.

Nous constatons ainsi une relation directe entre l'abondance d'ions provenant de fertilisants dans l'eau et l'état d'équilibre de cette eau.

Ceci confirme un processus récemment décrit dans les eaux du Rhin et de la Garonne en France (Golterman et Meyer, 1985; Etchanchu et Probst, 1988, p.254). Ces auteurs rapportent que les produits issus de fertilisants participent à la dissolution des carbonates. La nitrification de N-fertilisants libère les cations H^+ qui contribuent à l'acidité du milieu. Ce phénomène s'expliquerait par les réactions suivantes:



donc l'équilibre global peut s'écrire ainsi



Dans les premiers jours qui suivent l'épandage d'engrais, le sol s'alcalinise un peu, ensuite au fur et à mesure que la nitrification progresse, sa réaction se dévie vers une légère acidité. Sur les sols acides renfermant à l'état absorbé peu de calcium et beaucoup d'ions d'hydrogène comme c'est le cas des sols siliceux, sablo-limoneux des fonds de vallées au Dadès et au M'goun, de l'acide nitrique HNO_3 se forme dans la solution du sol, c'est pourquoi elle s'acidifie (Smirnov et al., 1977, p. 98).

Les résultats de notre étude convergent sur ce point avec les travaux ainsi cités. L'acidification du sol et des eaux s'y infiltrant est soutenue d'un autre côté par l'oxydation et l'altération des matières organiques. Celles-ci produisent des acides et gaz actifs en hydrochimie; ces acides peuvent agir sur la dissolution de la calcite. La logique d'abondance d'ions comme les nitrates dans l'eau du Dadès est compréhensible au niveau des particularités chimiques des ions composant les engrais ammoniac - nitriques utilisés; dans l'interaction du nitrate d'ammonium ($NH_4 NO_3$) avec le complexe absorbant du sol, le cation NH_4^+ est absorbé par le sol, tandis que l'anion NO_3^- reste dans la solution et conserve une grande mobilité. Dans une étude récente, Henrikson et Brakke (1988) confirment ces conclusions et rapportent ce qui suit:

"The nitrate ion can act as a mobile anion and contribute to the acidity in the same way as sulfate. Thus, nitrate can potentially contribute significantly to acidification of freshwaters".

Cette acidité est donc à retenir, en raison de ses répercussions directes sur la genèse des carbonates faisant matière principale de notre préoccupation. La mobilité des nitrates et d'autres ions est accentuée par l'irrigation absolument nécessaire dans le milieu des oasis.

D-Irrigation et géochimie des sols de fonds de vallées.

Le lessivage d'une quantité énorme de sels minéraux et organiques composant le sol des basses terrasses est un phénomène observable à travers l'étude des eaux infiltrées et les profils pédologiques. Dans une étude récemment effectuée par l'office régional d'agriculture de Ouarzazate sur les aptitudes pédologiques des sols dans le périmètre irrigué de Skoura du Dadès (ORMVAO, 1985) nous avons pu déduire des preuves d'une dynamique de lessivage considérable dans les sols irrigués.

La comparaison entre les deux profils distincts est révélatrice. Le premier représente les sols plus élevés, non irrigués et le deuxième concerne les sols régulièrement irrigués. La figure n° 9.6 donne l'illustration des résultats obtenus sur le profil de sols non irrigués à cause de leur situation perchée. On y observe une certaine homogénéité dans la distribution des composantes chimiques. Seule la matière organique montre une concentration significative en surface (à l'horizon 20-30 cm du profil). La figure n° 9.7 représentant le taux de sels solubles dans le deuxième profil permet d'observer le changement des concentrations ioniques en profondeur. Le lessivage des horizons superficiels est responsable des accumulations notables à la profondeur médiane de 0.9 à 1.2 mètre.

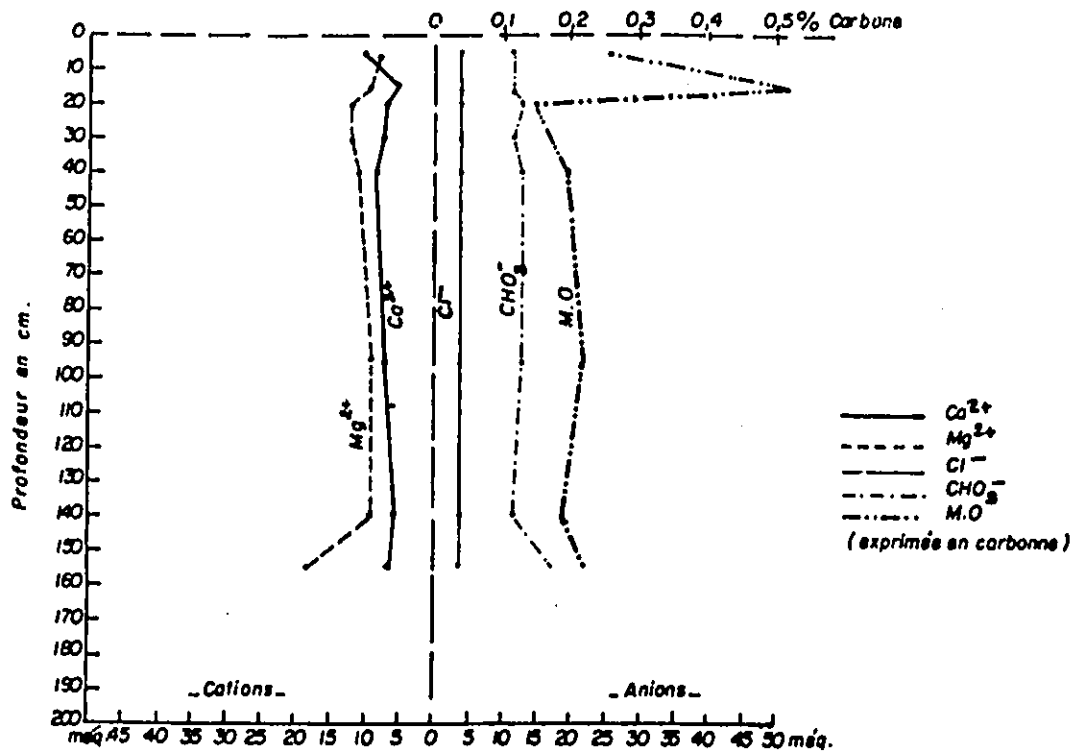
En effet l'enrichissement de tels horizons internes en carbonates se traduit par des accumulations cristallisées en taches blanches de formes variées et des concrétions granulées. La comparaison des deux profils met en évidence le lessivage dû à l'irrigation. Celle-ci est intensément pratiquée dans les oasis depuis très longtemps. Elle a permis de créer des conditions d'hydromorphie presque permanentes. A cela s'ajoute l'individualisation des sels, de fer oxydé et la richesse accrue d'argiles en profondeur seraient liées à ces conditions génétiques favorables.

Figⁿ 9.6 PERIMETRE DE SKOURA DU DADES

— LES SELS SOLUBLES —

En milliéquivalent-grammes pour 100 grammes de terre

PROFIL 1



D'après ORMVAO 1985

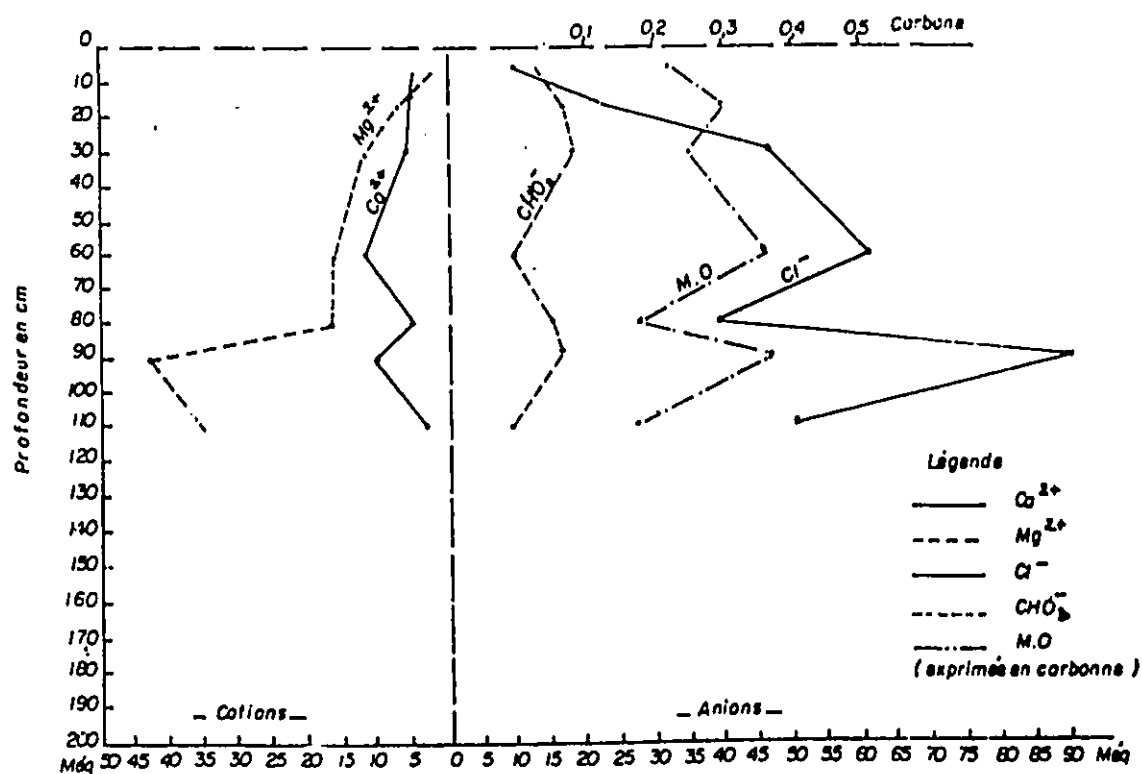
Fig. 9.7

PERIMETRE DE SKOURA DU DADES

— LES SELS SOLUBLES —

En milliéquivalent — grammes pour 100 grammes de terre

PROFIL 2



d'après ORMVAO, 1985

Par ailleurs le drainage des eaux parcourant ces profils pédologiques n'a aucune issue externe (superficielle). L'eau infiltrée et chargée d'ions solubles à travers les profils, suinte en bordure des terrasses. L'eau suit le pendage du matériel sablo-limoneux, souvent incliné vers le milieu de la vallée. Elle est orientée vers la rivière principale. Elle l'atteint par écoulement hypodermique. Dans les deux cas cette eau est en mesure de moduler le chimisme des eaux du Dadès et apporterait ainsi un élément précieux à la compréhension du chimisme des eaux de la rivière et du poids de l'impact humain.

Conclusion.

A travers cette étude basée à la fois sur l'hydrochimie, l'observation et l'analyse des profils pédologiques, la connaissance des conditions humaines des oasis et les résultats déjà acquis dans la littérature sur les phénomènes hydrochimiques similaires, nous pouvons en guise de conclusion souligner certains faits et constatations. Celles-ci sont considérées essentielles pour l'équilibre de l'hydrosystème et la dynamique des carbonates qui nous préoccupent.

- * - La comparaison des comportements d'ions du potassium et du sulfate dans diverses conditions altitudinales et hydrologiques confirme deux faits: dans les bas fonds de vallées, ces ions sont plus abondants et plus perturbés. Leur importance s'aggrandit parallèlement à celle des débits sans influence de la dilution logiquement attendue dans un système purement naturel.
- * - La comparaison des profils de sols soumis à l'irrigation perpétuelle et des profils de sols non irrigués confirme la perturbation des composantes géochimiques à l'intérieur des profils irrigués. Le lessivage est donc confirmé et l'alimentation des oueds en fertilisants et autres matières dissoutes dans les profils est conséquente.
- * - L'étude de terrain a permis de localiser plusieurs points d'adduction d'eau provenant des basses terrasses agricoles vers la rivière principale prouvant ainsi la possibilité de contamination directe. Des suintements périodiques sont partout visibles après l'irrigation des champs.
- * - Les quantités croissantes de fertilisants utilisées sont aussi considérables tout au long des oasis. Les ions inhibiteurs de l'encroûtement sont donc soit d'origine naturelle ou anthropique.

* - Peu importe l'origine (naturelle ou anthropique) des ions nitrates et sulfates, leur effet hydrochimique sur l'acidité du milieu est notable.

* - L'équilibre hydrochimique le plus fréquent est le maintien d'une acidité relative ou d'une saturation peu importante sans jamais observer une supersaturation (théoriquement probable vues les conditions naturelles du milieu). Cet équilibre résulte des interactions ioniques précédemment signalées et expliquerait le maintien du statu-quo quant à la genèse des travertins actuels dans les eaux de rivières. En effet nous avons vu comment l'encroûtement est entravé par les produits fertilisant d'abord en agissant sur l'activité de la biomasse puis ensuite sur l'acidité relative de l'eau.

Chapitre X

Conclusions générales

Le présent travail apporte des réponses fondamentales aux questions précédemment posées à travers les objectifs et les hypothèses retenues. Son apport scientifique se perçoit à travers la méthodologie adoptée (approche multidisciplinaire), à travers le thème abordé (liaison des facteurs, processus et dépôts résultants), et à travers la vision spatiale et chronologique qu'il s'attache d'éclaircir dans les différentes étapes de la recherche.

La démonstration d'une transformation environnementale décisive s'est faite à base d'indicateurs variés: distribution des accumulations carbonatées, faciès pétrographiques, hydrochimie et bactériologie des eaux.

La problématique de base étant de voir les liens entre le trinôme: encroûtement, hydrochimie et facteurs anthropiques; on s'est donc depuis le début posé plusieurs questions relatives à cette problématique:

- 1) - L'encroûtement (actuellement ralenti) était-il plus actif à une période quelconque du Quaternaire?
- 2) - Quels sont les types de dépôts carbonatés trouvés et quelles sont les preuves et les critères de leur différenciation?
- 3) - Quels sont les indicateurs d'une transformation environnementale au cours du Quaternaire, dans le cas où celle-ci a eu lieu?
- 4) - Quel est le degré de saturation des eaux à l'heure actuelle et quels sont les facteurs explicatifs d'une telle saturation hydrochimique?

Les deux dernières parties de cette thèse apportent l'information utile à la compréhension des divers aspects de cette problématique. La typologie des dépôts montre une distinction pétrographique et géochimique des croûtes et encroûtements calcaires, des travertins d'eau douce et des travertins hydrothermaux.

Le levé géomorphologique a montré les faits suivants:

1) - Les croûtes zonaires les plus importantes en épaisseur et en extension occupent le plus haut niveau quaternaire des glacis de la dépression de Ouarzazate. Elles moulent parfois des topographies variées mais elles sont toujours élevées (perchées) dans le paysage géomorphologique. Elles attestent d'une dynamique active des carbonates (dissolution, précipitation) au début du Quaternaire. Des croûtes moins épaisses et plus localisées sont décrites sur les versants et les terrasses mais elles indiquent une réduction d'importance de l'encroûtement avec le temps. Une diminution du phénomène d'encroûtement au cours du Quaternaire a été notée. Seuls des travertins localisés autour de rares sources continuent à précipiter à l'heure actuelle.

2) - La position altitudinale des encroûtements reflète une différence d'épaisseur, d'induration, de caractéristiques pétrographiques et géochimiques et d'âge des encroûtements. Les plus récents sont très localisés et peu perchés aux pieds de versants (Ifesfas et Ait Arbi fonctionnel); ils sont moins épais et gardent les traces pétrographiques et géochimiques de l'environnement actuel.

3)- Les dépôts hydrothermaux se reconnaissent par leur morphologie collinaire et par les laminations enrichies de manganèse parfois épais et noirâtre.

4) - Les accumulations carbonatées anciennes et hydrothermales sont affectées par la néotectonique quaternaire et montrent des manifestations telles que les failles ou les pendages documentés à Skoura et dans certaines croûtes de Boumalne et d'El Gourmt. Des preuves ont été ainsi apportées sur la néotectonique dans un domaine qui peut à première vue paraître stable.

Dès à présent l'analyse mégascopique montre une évolution contrastée du phénomène d'encroûtement. L'importance connue au Quaternaire ancien s'efface avec le temps, attestant ainsi d'une évolution environnementale régressive. Celle-ci est influencée par les facteurs climatiques et hydrologiques reflétant une sécheresse accentuée. La stabilité structurale n'est pas aussi acquise car d'un côté l'encroûtement est généré par la tectonique (travertins hydrothermaux) et d'un autre côté il se trouve affecté par celle-ci (failles et pendages au sein des accumulations).

Conformément aux modèles génétiques appliqués à l'Anti-Atlas (Riser, 1979) et au Haut-Atlas calcaire

(Couvreur, 1981), nous confirmons ainsi une évolution paléoclimatique fluctuante avec la tendance à un assèchement accru au cours du Quaternaire.

Les effets tectoniques sur l'encroûtement et l'hydrothermalisme ont été complètement négligés dans les précédentes études sur le Maroc. La présente thèse intègre ce facteur au modèle morphogénétique global en documentant les dépôts attribuables à l'hydrothermalisme et les principales phases de son activité à Skoura. Ce facteur est considéré parmi les éléments environnementaux multiples agissant sur le phénomène d'encroûtement.

Ces interprétations nous ont été permises par un outillage technique et méthodologique varié et instructif. La présente étude se distingue ainsi des contributions précédentes par un appui à la fois pétrographique, géochimique et isotopique. Ces techniques sont appliquées aux différents types d'accumulations (croûtes, travertins etc...) dans le but d'une connaissance approfondie des environnements spécifiques et des processus génétiques.

Les analyses pétrographiques ont montré les faits suivants:

- 1) - Des traces biogéniques révélatrices de celles signalées uniquement dans les travertins par Geurts (1976), Casanova (1981) et Chafetz et Folk (1984). La présente étude en documente aussi dans les croûtes, dans les travertins d'eau douce et dans les travertins hydrothermaux. Le rôle des facteurs biogéniques est donc généralisable mais à des degrés d'importance variés.
- 2) - L'alternance de faciès détritiques et de faciès calcitiques dans les travertins ainsi que dans certaines croûtes atteste d'une saisonnalité de l'édification des accumulations. La variété des facteurs intervenants s'est confirmée par la reconnaissance des effets attribuables à l'écoulement (laminations, éléments transportés par l'eau etc...), des effets d'origine biologique (traces cyanobactériennes, restes de végétaux etc...), des effets éoliens (Quartz picotés et probablement une partie des carbonates encroûtés). La présente étude se veut d'être environnementale et intéressant des paramètres variés.
- 3) - L'évolution diagénétique appréhendée dans les croûtes et les différents types de travertins est comparable à celle décrite par Laouina (1987), dans la mesure où une série d'événements microscopiques se reconnaissent au niveau de la dissolution et de la précipitation de la calcite à l'intérieur des profils. Les

manifestations diagénétiques illustrées par Love et Chafetz (1988) se retrouvent dans les échantillons de travertins étudiés. Il nous est permis en plus de suivre les changements de textures et structures pétrographiques dans les dépôts. En effet l'étude du trinôme (dissolution, précipitation et recristallisation de la calcite) nous a permis de reconnaître les vides de la dissolution, de les illustrer et de les distinguer des vides structuraux. Les ciments secondaires précipités en aval de ces vides ont été décrits et les formes de recristallisation sparitique due à la diagenèse ont été étudiées.

Ces enseignements pétrographiques donnent un fondement solide à la typologie des accumulations carbonatées. Ils éclairent le degré d'évolution diagénétique et l'âge relatif des dépôts. La géochimie isotopique appliquée à la fois aux croûtes, aux travertins et aux eaux courantes est une contribution originale. Elle nous a permis une connaissance approfondie de l'environnement génétique des accumulations.

L'apport de la géochimie se résume dans les points suivants:

1) - La nature hydrothermale des travertins de Skoura est confirmée. Des hypothèses avancées dans les études précédentes (Riser, 1979; Akdim, 1986) se confirment après cette étude basée sur des preuves géochimiques. En effet, nous avons observé des valeurs élevées du carbone 13 dans les travertins de Skoura ainsi que dans les eaux de la source "Tasbeibate"; ce qui indique une origine interne du carbone et révèle l'aspect hydrothermal du travertin de Skoura et son lien génétique avec la dite source hydrothermale. Ce travertin n'est donc plus énigmatique comme précédemment. Son isolement au milieu de la dépression de Ouarzazate s'explique dans un cadre morphodynamique et structural.

2) - L'environnement pédo-biologique et sédimentaire caractérisant les croûtes calcaires est reconnu. Ces accumulations ne sont ni purement sédimentaires comme l'avait Vogt (1984), ni uniquement d'origine biologique ou pédologique comme tendent à le soutenir certains auteurs; elles sont riches d'indicateurs révélateurs de l'intervention des facteurs multiples. Nous ajoutons que la dimension temporelle et évolutive doit être tenue en compte dans leur modèle génétique. Beaudet et Laouina (1989, p.39) insistent sur la lenteur des processus génétiques des croûtes et la difficulté de replacer leur incrustation dans les cadres chronologiques habituels. Ils soulignent même la quasi-impossibilité de fixer un âge à une croûte calcaire.

Cette dernière conclusion ne se généralise cependant pas. Dans notre cas, l'évolution diagénétique n'a pas entièrement modifié les caractéristiques originales des dépôts. L'âge (Quaternaire ancien) des croûtes de Boumalne et d'El Goumt se déduit de leurs aspects géomorphologiques et se confirme par les datations à l'Uranium / Thorium effectuées.

Nous rejoignons ainsi l'avis de Gerstenhauer (1987) qui a obtenu des âges de 1.1 et même 2.2 Ma pour les croûtes calcaires tapissant les mogotes des surfaces anciennes du Yucatan au Mexique. Les croûtes calcaires sont donc parfois datables.

3) - Les comparaisons entre les travertins et les eaux de sources actuelles ont permis l'établissement de liens entre les dépôts et l'hydrosystème qui en est responsable.

4) - Les teneurs en isotopes stables démontrent d'une part que les précipitations carbonatées (croûtes et travertins) semblent se produire dans des conditions proches d'un équilibre isotopique avec une eau dont la teneur en oxygène 18 est comparable à celle de l'eau actuelle. Les quelques teneurs différentes ont été interprétée comme étant influencées par l'évaporation, exception faite des travertins hydrothermaux. Ceux-ci montrent des caractéristiques qui leurs sont propres.

5) Les travertins hydrothermaux de Skoura ont connu une histoire polyphasée de plusieurs générations. Cette distinction entre les différentes générations de dépôts se base sur des indicateurs variés (géomorphologiques, sédimentologiques et géochimiques). Les essais de datation à l'Uranium / Thorium sont cependant décisifs à ce propos. Ils permettent de reconnaître l'ancienneté des croûtes (âge estimé à plus de 300000 ans BP); et ensuite de reconnaître les dépôts de travertins remontant au Quaternaire moyen, comme ceux d'Ait Arbi en amont du vallon (130000 ans BP environ); et enfin de préciser l'âge des travertins de Taltfraout et leur équivalent à Ifesfas au M'goun remontant au Rharbien (13000-9000 ans BP.). Ces informations nous ont permis une certaine chronologie des principales phases d'encroûtement. Même au sein des croûtes, des générations distinctes ont été reconnues et la différence entre les croûtes situées sur le glacis supérieur et celles des versants est évidente. Ceci nous a facilité l'interprétation paléoenvironnementale et climatique.

L'évolution des manifestations carbonatées reflète une dégradation environnementale qui est d'abord

d'ordre physique (assèchement climatique et hydrologique, tarissement des sources et concentration des eaux le long des vallées), ensuite la dégradation est d'origine anthropique dans les dernières années. Ce dernier aspect a été discuté en étudiant la dynamique actuelle des processus d'encroûtement dans l'eau.

La dynamique actuelle des eaux à travers le comportement de certains ions révélateurs est significative. Des corrélations évidentes se retrouvent entre les ions originaires de fertilisants agricoles (chlorures, sulfates potassium, etc.). La perturbation du comportement naturel de ces ions apparaît dans leur distribution saisonnière. Les saisons d'activité agricole éminente enregistrent les fortes concentrations de ces ions. Leur origine anthropique est donc fort probable.

Les ions tels que les nitrates et les sulfates ont une importance énorme dans l'étude du processus d'encroûtement qui nous intéresse à présent. Quelque soit leur origine (anthropique ou purement physique), ces ions contribuent à l'acidité du milieu aquatique. Ce phénomène déjà connu (Krumbeln, 1979) expliquerait le ralentissement de l'encroûtement actuel dans les eaux de rivières (Dadès et Todgha). Les saisons d'été et du printemps réputées pour être favorables à la précipitation des carbonates dans d'autres domaines, n'ont qu'une contribution faible dans l'encroûtement en milieu aquatique des oasis étudiées. Les crues d'hiver et d'automne suffisent à démanteler les minces pellicules de la calcite précipitée.

Le test bactériologique effectué vise la recherche des Pseudomonas dans les différents points d'eau. Cette bactérie est connue par sa forte participation au processus d'encroûtement. D'après nos analyses elle est saisonnièrement présente dans les eaux de source encroûtante d'Ait Arbi. Aucun échantillon d'eau de rivière n'a permis d'isoler les Pseudomonas. Son absence dans les eaux de la source (également encroûtante) d'Ilesfas pose des interrogations encore suspendues quant à l'écologie et les conditions environnementales qu'exige cette bactérie.

Enfin rappelons qu'il se forme actuellement des petits dépôts de travertins sur les versants, quand la source domine de quelques mètres le fond de la vallée (donc quand elle est protégée partiellement du piétinement et de la pollution), c'est le cas au M'goun (Ilesfas) et à Ait Arbi (Asfazate); c'est aussi le cas des dépôts révélés anciens par les datations à l'Uranium / Thorium. Les fonds de vallées sont trop perturbés: les eaux turbides, soit pour des raisons anthropiques ou purement physiques, ne permettent

pas de produire de beaux travertins. L'homme n'améliore certainement pas les conditions favorisant la précipitation des carbonates.

Enfin rappelons que l'édification des carbonates n'est plus active soit à cause d'un assèchement plus marqué du climat, à cause de l'impact humain dans certains endroits (Dadès) ou simplement pour des raisons mécaniques quand l'écoulement est très turbulent (M'goun). Dans ce dernier cas, les crues d'hiver sont suffisantes pour démanteler les minces pellicules de calcite formées au printemps.

Bibliographie.

- Adolphe, J.P.**, 1969. Nature et genèse du calcin en chou-fleur de France. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 268: 552-55.
- 1970. Etude comparée des calcins en chou-fleur du Moyen Nord canadien, de France et du Liban. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris, série D: 1080 - 1083.
- 1973. Contribution à l'étude des encroûtements carbonatés de l'aqueduc du Pont du Gard (France). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 277, D, 2329-32.
- 1981. Exemples de contribution microorganique dans les formations carbonatées continentales pp. 15-30, in Nicod (éd.), formations carbonatées externes; Actes du colloque de l'Association de Géographes Français; Paris.
- 1986. Biocristallogénèse et écomorphologie des tufs et travertins. Enseignements tirés d'exemples naturels et expérimentaux. Méditerranée, 57, 1-2.
- 1987. Exoscope comparée de cryoségrégation calcique et de cristallisations carbonatées biogènes. pp. 227-33; in Pecsli and French (ed.) Loess and periglacial phenomena. Akademiai Kiado Budapest. 311p.
- Adolphe, J.P. et Billy, C.**, 1974. Biosynthèse de la calcite par une association bactérienne aérobie. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 278 D: 2873-75.
- Adolphe, J.P. et Maréchal, C.**, 1977. Minéralisation des dépôts carbonatés expérimentaux d'origine microbienne. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 284 D: 1381-85.
- Adolphe, J.P., Hourimeche, A., Loubière, J.F., Paradas, J. et Soleilhavoup, F.**, 1989. Les formations carbonatées d'origine bactérienne. Formations d'Afrique du Nord. Bulletin de la Société Géologique de France, 5, 1: 55-62.

- Ait Hamza, M.**, 1986. Aspects du changement socio-spatial dans la vallée du M'goun. Thèse D.E.S, Rabat.
- Akdim, B.** 1983. Contribution à l'étude géomorphologique et hydrologique des bassins Dadès et Todgha. Thèse D.E.S, Rabat.
- 1983. Cadre géoclimatique et érosion dans le Dadès et Todgha. Travaux de l'E.R.A. 282 du CNRS, Aix-En-Provence, no. 13: 17-27.
- 1985. Aspects géomorphologiques du haut Dadès et Todgha. Revue de la Faculté des Lettres, Fès, numéro spécial (géographie), no. 1: 1-7 (en arabe).
- 1986. Les travertins du Moyen-Dadès; cuvette d'Ouarzazate (Maroc). Méditerranée, 57, 1-2: 180-183.
- 1986. Chimisme et hydrologie du M'goun à Aïfer. Revue de Géographie du Maroc, 10: 7-16.
- 1987. Méthodes d'évaluation de l'érosion en domaine karstique. Meknassat (Revue de la Faculté des Lettres, Meknès), no. 2; (en arabe).
- 1989. Les travertins de Skoura (Maroc méridional): indicateurs morphotectoniques. Annales de l'ACFAS, UQAM, 57: 177.
- Akdim, B., French, H. et Geurts, M.-A.**, 1991. Les aplanissements de Ouarzazate, genèse et confrontation aux modèles théoriques. Dirassat (Revue de la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Agadir); no. 4; sous presse.
- Allan, J.R. and Mathews, R.K.**, 1982. Isotope signatures associated with early meteoric diagenesis. Sedimentology, 29: 797-917.
- Al-Sulaimi, J.**, 1988. Calcrete and near surface geology of Kuwait city and suburbs. Sedimentary Geology, 54, 4: 331-45.
- Ambert, P.**, 1982. Les travertins de Millau. Mémoires de l'Association Française de Karstologie, 3: 9-14
- Anderson, T., Arthur, M., Kaplan, I., Veizer, J. and Linton, L.**, 1983. Stable isotopes of oxygen and carbone and their application to sedimentologic and paleoenvironmental problems. Society of Economic Petrologists and Mineralogists, Short Course No. 10: 1-151.
- Aristarian, L.N.**, 1971. On the definition of caliche deposits. Zeitschrift für Geomorphologie, 15: 274-88.

- Ashley, R.P. and Lloyd, J.W., 1978.** An example of the use of factor analysis and cluster analysis in groundwater chemistry interpretation. Journal of Hydrology, 39: 355-364.
- Backalowitch, M., 1979.** Contribution de la géochimie à la connaissance de l'aquifère karstique et la karstification. Thèse d'état, Université Pierre et Marie-Curie, Paris 6, 269p.
- Ballais, J.L., 1982.** Les critères de reconnaissance des phases arides du Quaternaire au Maghreb: l'exemple des Aurès (Algérie). Bulletin de l'Association de Géographes Français, 483 - 84.
- Bathurst R.G.C., 1975.** Carbonate sediments and their diagenesis. Elsevier Scientific Publication Cy. Amsterdam, 658p.
- Beaudet, G., 1971.** Le Quaternaire marocain: état des études. Revue de Géographie du Maroc, 20: 1-20.
- 1986. A propos des croûtes calcaires. Annales de Géographie, 95, 531: 617-27.
- Beaudet, G., et Laouina, A., 1989.** Le contexte géomorphologique des encroûtements calcaires généralisés: le cas du Maroc nord-oriental. Méditerranée, 68, 2-3: 29 - 40.
- Beguin, H., 1979.** Méthodes d'analyse géographique quantitative. Litec, Paris, 260p.
- Beier, J.A., 1987.** Petrographic and geochemical analysis of caliche profiles in a Bahamian pleistocene dune. Sedimentology, 34, 6: 991-98.
- Belhaj, A., 1990.** Contribution à l'étude hydrologique et des encroûtements au Ghrls. Mémoire de 4e année Géographie; Université de Fès.
- Bellion, J. et Magnosc, C., 1982.** Les travertins de Kef Sefiane (confins de la Hodna, Algérie), position et signification dans le contexte morphogénétique régional. Phénomènes Karstiques 3; Mémoires et documents du CNRS.
- Berner, R.A., 1971.** Principles of chemical sedimentology. McGraw-Hill, New York, 240p.
- Billy, C., 1975.** Isolement d'une association bactérienne productrice de calcite. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 281 D: 621-23.
- Billy, C. et M.-A Chavignac, 1976.** Rôle des facteurs biologiques dans la calcification des grottes de Lascaux et Font-de-Gaume. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 283: 207.
- Birot, P., 1955.** Les méthodes de la géomorphologie. Orbis, Paris, 177p.

- Blank, H.R. et Tynes E.W.**, 1965. Formation of caliche in-situ. Geological Society of America, Bulletin, 76: 1387-92.
- Bogli, A.**, 1964. Minchungs korrosion. Erkunde, 18: 83-92.
- Boileau, A.**, 1981. Diversité, adaptation. Décarie éditeur. 168p.
- Bouladon, J., and Jouravsky, G.**, 1958. The manganese deposits of Morocco. Rapport inédit, n 32, géologie Rabat.
- Brewer, R.**, 1977. The basis of interpretation of soil micromorphological data. Geoderma, 8: 81-94.
- Brownlow, R.M.** 1979. Geochemistry. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 498p.
- Brunet R.**, 1968. Les phénomènes de discontinuité en géographie. Mémoires et Documents (dir. Dresch). Édition du CNRS, Paris, 117p.
- Bruni, S.F., and Wenck, H.R.**, 1985. Replacement of aragonite by calcite from the San Cassiano formation (Italy). Journal of Sedimentary Petrology, 55, 2: 159-70.
- Budd, D.A.**, 1988. Aragonite to calcite transformation during fresh-water diagenesis of carbonates: Insights from pore water chemistry. Geological Society of America Bulletin, 100: 1260-70.
- Bullock, P.**, 1985. The role of micromorphology in the study of quaternary soil processes. pp. 45-68; in Boardman, J. (ed.), Soils and evolution. John Wiley, 391p.
- Carozzi, A.**, 1972. Microscopic sedimentary petrology. Robert E. Krieger Publishing. New York, 485p.
- Casanova, J.**, 1981. Morphologie et biolithogénèse des barrages de travertins. p. 45-54. In J. Nicod (éd.), Actes du Colloque de l'Association de Géographes Français, Paris, 290p.
- Casanova, J.**, 1984. Genèse des carbonates d'un travertin pleistocène: Interprétation paléoécologique du sondage Peyre 1 (Aveyron). Géobios, mémoire spécial, 8: 219-225.
- Casanova, J.**, 1987. Les travertins. pp. 481-502, in Tiercelin et Vincens (coordonnateurs), le demi-graben de Boringo-Bogoria, Kenya. Bulletin des Centres de Recherche et d'Exploitation-Production Elf-Aquitaine, 11, 2: 249-540.
- Casanova, J. et Hillaire-Marcel, C.**, 1987. Chronologie et paléohydrologie des hauts nappes quaternaires du bassin du Natron-Magadi (Tanzanie) composition isotopique des stromatolites karstiques. Sciences

Géologiques, Bulletin, 40: 121-134.

Casanova, J. et Hillire-Marcel, Cl., 1991. Chronology and paleohydrology of late Quaternary high lake levels in the Manayara Basin (Tanzania) from isotopic data on fossil stromatolites. Quaternary Research (sous presse).

Castanier, S., 1987. Microbiogéologie: processus et modalités de la carbonatogenèse bactérienne. Thèse d'état, Nantes, 541p.

Castanier, S., Maurin, A. et Bianchi, A., 1984. Participation bactérienne à la précipitation des carbonates. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 299, Série II, 19: 1133-3.

Chafetz, H.S., 1986. Marine peloids: a product of bacterially induced precipitation of calcite. Journal of Sedimentary Petrology, 56, 6: 812-17.

Chafetz, H.S. et Folk R., 1984. Travertines: Depositional morphology and the bacterially constructed constituents. Journal of Sedimentary petrology, 54: 289-316.

Chafetz, H.S., Wilkinson, B. and Love, K., 1985. Morphology and composition of non marine carbonate cementation in near surface settings. pp. 337-348. in Schneidermann N. and Harris, P.M. (ed.), Carbonate cements. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special publication, 37, Tulsa, Oklahoma, 379p.

Chafetz, H., Rush, P.F. and Utech, M., 1991. Microenvironmental controls on mineralogy and habit of CaCO₃ precipitates: an example from an active travertine system. Sedimentology, 38: 107-126.

Champliat D., et Larpent, J.P., 1988. Biologie des eaux. Masson, Paris, 374p.

Chojnki, Z. and Czyz, T., 1975. Some problems in the application of factor analysis in geography. Geographical Analysis, 8:413-427.

Chorley R.J., Shumm, S.A. and Sudgen D.E., 1985. Geomorphology. Methuen, London, 605p.

Choubert, G., 1948. Au sujet des croûtes calcaires quaternaires.

Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 26: 20-21.

Clark, I., 1987. Groundwater resources in the Sultanate of Oman: origin, circulation times, recharge processes and geochemical approaches. Thèse, Paris-sud, 264p.

- Coates, D.R. and Vitek, J.D. (ed.), 1980.** Thresholds in geomorphology. George Allen and Unwin, London, 498p.
- Coque, R., 1962.** La Tunisie présaharienne: étude géomorphologique. Colin, Paris, 476p.
- Corbel, J., 1959.** Erosion en terrain calcaire. Annales de Géographie, 398: 385-412.
- Coudé-Gaussen, G. et Rognon, P., 1988.** Origine éolienne de certains encroûtements calcaires sur l'île de Fuerteventura (Canaries orientales). Geoderma, 42: 271-93.
- Couvreur, G., 1981.** Essai sur l'évolution morphologique du Haut-Atlas central calcaire, Maroc. Thèse d'état Strasbourg, Atelier de Lille, 877p.
- Craig, H., 1961.** Isotopic variations in meteoric waters. Science, 133: 1702-1703.
- Dandurand, J.L., Gout, R., Hoefs, J., Menschel, G., Schott, J. and Usdowski, E., 1982.** Kinetically controlled variations of major components and carbon and oxygen isotopes in a calcite-precipitating spring. Chemical Geology, 36: 299-315.
- Dauphiné, A., 1973.** L'analyse factorielle: ses contraintes mathématiques et ses limites en géographie. L'espace Géographique, 1: 74-80.
- Degens, E.T., 1965.** Geochemistry of sediments, a brief survey. Prentice Hall, N.Y., 342.
- Dever, L. Fontes, J.Ch. and Riche, G., 1987.** Isotopic approach to calcite dissolution and precipitation in soils under semi-arid conditions. Chemical Geology, 66: 307-14.
- Dewez, V., 1988.** Sources, limites d'extension et fusion des glaciers au Wisconsinien supérieur dans la chaîne Rubby et le bassin d'Alshihik, Territoire du Yukon. Thèse de PhD, Université d'Ottawa, 321p.
- Dewolf, Y., Joly, F. et Raynal, R., 1975.** La zonation géographique des croûtes calcaires en Afrique du nord. Colloque de Strasbourg.
- Dickinson, W., 1988.** Isotopic and petrographic evidence for carbonate diagenesis in non marine sandstones, Green River Basin, Wyoming. Journal of Sedimentary Petrology, 58, 2: 327-38.
- Doemel, W.N. and Brock, T.D., 1974.** Bacterial stromatolites: Origin of laminations. Science, 184: 1083-1085.
- Doherty, R.D., 1980.** Dendritic growth. pp. 463-83. In Pamplin (ed.), Crystal growth. Pergamon.

- Doornkamp, J.**, 1971. Numerical analysis in geomorphology. St Martin's Press, New York, 372p.
- Drake, J.J. and Harmon, R.S.**, 1973. Hydrochemical environments of carbonate terrains. Water Resources Research, 9, 4: 949-57.
- Dresch, J.**, 1982. Géographie des régions arides. PUF, Paris.
- Drever, J.**, 1982. The geochemistry of natural waters. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Ducloux, J., Laouina, A.**, 1989. The pendant calcretes in semi- arid climates: an example located near Tafaralt, NW Morocco. Catena, 16: 237-49.
- Durand, J.H.**, 1959. Les sols rouges et les croûtes en Algérie. Direction de l'Hydraulique et Equipement Rural, Publication, n°2; 188p.
- Ek, C.**, 1969a. Facteurs, processus et morphologie karstique dans les calcaires paléozoïques de la Belgique. Thèse de doctorat, Liège, 476p.
- Ek, C.**, 1969b. L'effet de la loi de Henry sur la dissolution du CO₂ dans les eaux naturelles. Problems of karst denudation. Brono, 53-56.
- EK, C. et Roques, H.**, 1972. Dissolution expérimentale des calcaires dans une solution de gaz carbonique, note préliminaire. Transactions, Cave Research Group of Great Britain, 14, 2: 67-72.
- El Gharbaoui, A.**, 1980. La terre et l'homme dans la péninsule tingitane. Essai sur l'homme et le milieu naturel dans le Rif occidental. Thèse d'état, Paris VII.
- Emeis, K.C., Richnow, H. and Kempe, S.**, 1987. Travertine formation in Plitvice National Park, Yugoslavia: Chemical versus biological control. Sedimentology, 34: 595-605.
- Emiliani, C.**, 1955. Pleistocene temperatures. Journal of geology, 63: 538-78.
- Erhart, H.**, 1967. La genèse des sols en tant que phénomène géologique. Masson, Paris, 177p.
- Etchanchu, D. and Probst, J.L.**, 1988. Evolution of the chemical composition of the Garonne. Hydrobiological Sciences Journal, 33; 3: 243-56.
- Faillat, J.P. et Rambaud, A.**, 1988. La teneur en nitrates des nappes de fissures de la zone tropicale humide en relation avec les problèmes de déforestation. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 30, 6, II: 1115-20.

- Farres, P.**, 1978. The role of time in the crusting process. Earth Surface Processes, 3: 243-54.
- Fassi, D.**, 1978. Contribution à l'étude des terres rouges méditerranéennes en pays calcaire. Revue de Géographie du Maroc, 2: 87-94.
- Faure G.**, 1977. Principles of isotope geology. John Wiley and Sons, New York, 464p.
- Flügel, E.**, 1982. Microfacies analysis of limestones. Springer Verlag; NY, 633p.
- Folk, R L.**, 1959. Practical petrographic classification of limestones. Bulletin of the Association of Petroleum Geologists, 43, 1: 1-38.
- Folk, R., and Asserto, R.**, 1976. Comparative fabrics of length- slow and length-fast calcite and calcitized aragonite in holocene speleothem, New Mexico. Journal of Sedimentary Petrology, 46, 3: 486-96.
- Ford, D.C.**, 1978. Threshold and limit effects in geomorphology. pp. 345-462, in Coates and Vitek (ed.), Thresholds in geomorphology, George Allen and Unwin, London, 498p.
- Ford, T.D.**, 1989. The whole dam story. Cave Science, 16, 2: 39-49.
- French, H.M. and Racine, J.-B.** (ed.), 1971. Quantitative and qualitative geography. La nécessité d'un dialogue. Éditions de l'Université d'Ottawa, 216p.
- Freytet, P., et Verrecchia, E.**, 1989. Les carbonates continentaux du pourtour méditerranéen: microfaciès et milieux de formation. Méditerranée, 68, 2-3: 5 - 28.
- Friedman, I.**, 1970. Some investigations of the deposition of travertine from hot springs - 1. The isotopic chemistry of a travertine - depositing spring. Geochimica et Cosmochimica Acta, 34: 1303-1315.
- Garrels, R.M. and Christ, C.L.**, 1965. Solutions, minerals and equilibria. Harper and Row, New York. 450p.
- Gauthier, H.**, 1957. Contribution à l'étude géologique des formations post liasiques des bassins du Haut Dadès et Todgha. Thèse; Notes et Mémoires du Service Géologique, Rabat, n°119, 212p.
- Gaven, C., Hillaire-Marcel, Cl. et Petit-Maire, N.**, 1981. A pleistocene lacustrine episode in southeastern Libya. Nature, 290: 131-135.
- Gerstenhauer, A.**, 1987. Kalkkrusten und kalkformenschatz auf Yucatan (Mexico). Erkunde, 41: 30-36.
- Geurts, M.-A.**, 1976a. Formation des travertins de fond de vallée sous climat tempéré océanique. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris, série D, 282: 275-276.

- Geurts, M.-A.**, 1976b. Genèse et stratigraphie des travertins de fond de vallée en Belgique. Acta Geographica Lovaniensia. 104p.
- Given, R.K. and Wilkinson, B.H.**, 1985. Kinetic control of morphology, composition and mineralogy of abiotic sedimentary carbonates. Journal of Sedimentary Petrology, 55: 109-19.
- Golterman, H.L. and Meyer, M.L.**, 1985. The geochemistry of two water rivers, The Rhine and the Rhone. Part 3: The relation between calcium bicarbonate, sulfate and pH. Hydrobiologia, 126: 21-24.
- Gonfiantini, R., Panichi, C. and Tongiorgi, E.**, 1968. Isotopic disequilibrium in travertine deposition. Earth Planetary Science Letters, 5: 55-58.
- Goudie, A.**, 1972. On the definition of calcrete deposits. Zeitschrift fur Geomorphologie, 16, 4: 464-68.
- Goudie, A. (ed.)**, 1981. Geomorphological techniques. British Geomorphological Research Group. Georges Allen and Unwin, London, 395p.
- Gregory, K.J.**, 1985. The nature of physical geography. Edward Arnold, London, 262p.
- Greensmith, J.T.**, 1971. Petrology of sedimentary rocks. Hafner publishing company, N.Y. 502p.
- Guigo, M.**, 1983. Géographie physique, statistique et informatique. Annales de Géographie, 511: 268-283.
- Gupta, V., Lawrence, J. and Germida, J.**, 1988. Impact of elemental sulfur fertilisation on agricultural soils. Canadian Journal of Soil Science, 68: 463-73.
- Hakim, B.**, 1975. Recherches d'hydrologie et de morphologie karstique au Liban central. Thèse de 3e cycle, Aix-en-Provence, 158p.
- Hakim, B.**, 1982. Recherches hydrologiques et hydrochimiques sur quelques karsts méditerranéens: Liban, Syrie, et Maroc. Thèse d'état, Aix-Marseille 2, 667p.
- Hakim, B.**, 1984. Nouvelle approche pour l'évaluation de la dissolution spécifique. Karstologia, 4, p. 56.
- Hakim, B.**, 1987. Karst libanais, carte de la dissolution spécifique. pp. 399-403, in Godard et Rapp (éds.), Processus et mesure de l'érosion. Édition du CNRS, Paris, 572p.
- Halberg, G.R.**, 1987. The impact of agricultural chemicals on groundwater. Geojournal, 15, 3: 283.
- Harrison, R.S.**, 1977. Caliche profiles: indicators of near surface subaerial diagenesis, Barbados. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 25, 1: 123-73.

- Harvey, D.**, 1969. Explanation in geography. St Martin's Press, New York, 521p.
- Hauser, D.P.**, 1974. Some problems in the use of stepwise regression techniques in geographical research. Canadian Geographer, 18: 148-158.
- Hay, R.L. and Wiggins B.**, 1980. Pellets, ooids spiolites and silica in the calcretes of the SW United States. Sedimentology, 27: 559-576.
- Hennig, G.J., Grun, R. and Brunnacker**, 1983. Speleothems, travertine and paleoclimate. Quaternary Research, 20: 1-29.
- Henrikson A. and Brakke, D.**, 1988. Increasing contributions of nitrogen to the acidity of surface waters in Norway. Water, Air and Soil Pollution, 42: 183-201.
- Herman, J.S. et Lorah, M.M.**, 1987. CO₂ outgassing and calcite precipitation in Falling Spring Creek, Virginia. Chemical Geology, 62: 251-62.
- Hillaire-Marcel, Cl.**, 1982. Paléohydrologie isotopique. pp. 34-43, in Petit-Maire (éd.), le Shati (lac pleistocène du Fezzan, Libye), CNRS, Marseille, 118p.
- Hillaire-Marcel, Cl.**, 1986. Composition isotopique (carbone 13, oxygène 18, carbone 14 et Thorium/ Uranium) des carbonates biogéniques de paléolacs d'Afrique intertropicale: message hydrologique et effets diagenétiques. INQUA, Symposium de Dakar; p. 187-189.
- Hoeft, J.**, 1980. Stable isotope geochemistry. (2d edition), Springer-Verlag, New York, 208p.
- Horowitz, A.**, 1987. Travertines of the arid regions, O isotopes, ages and late Quaternary climates of Israel. Quaternary Research, 27: 103-105.
- Huggett, J.R.**, 1985. Earth surface systems. Springer-Verlag, Berlin, NY. 270p.
- Humbert, L.**, 1976. Éléments de pétrologie dynamique des systèmes calcaires. Technip, Paris, 2t. 213p.
- James, N.P.**, 1972. Holocene and Pleistocene calcareous crust profiles: criteria for a subaerial exposure. Journal of Sedimentary Petrology, 42, 4: 817-36.
- Jennings, J.N. and Sweeting, M.**, 1961. Caliche pseudoanticlines in the Fitzroy basin, Western Australia. American Journal of Science, 259: 635-39.
- Jones, B.**, 1986. Dendritic calcite crystals formed by calcification of algal filaments in a vadose

- environment. Journal of Sedimentary Petrology, 56: 217-27.
- Jones, B. and Kahle, C.F.**, 1985. Lichen and algae: agents of diagenesis in karst breccia from Grand Cayman Island. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 33: 446-61.
- Jones, B. and Motyka, A.**, 1987. Biogenic structures and micrite in stalactites from Grand Cayman Island, British W. Indies. Canadian Journal of Earth Sciences, 24: 1402-11.
- Joly, F.**, 1960. Études sur le relief du sud-est marocain. Rabat.
- Julia, R.**, 1983. Travertine. pp. 64 - 72, in Scholle et al., Carbonate depositional environments. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, 708p.
- Kaemmerer, M. et Revel, J.C.**, 1989. Signification des précipitations d'origine biologique de fer et de manganèse dans les alluvions quaternaire du Sebou, Maroc. Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire, 40, 4: 213-18.
- Keeney, D.R.**, 1986. Sources of nitrates to groundwater. Critical Reviews in Environmental Control, 16, 3: 257-304.
- Kendall, A.C.**, 1985. Radiaxial fibrous calcite: A reappraisal. in Carbonate cements, Paul Harris et al., Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, Oklahoma, Special Publication, 36: 59-75.
- Kendall, A.C. and Tucker, M.E.**, 1973. Radiaxial fibrous calcite: a replacement after acicular carbonate. Sedimentology, 20: 365 -
- Kevin, G. and Wilkinson, B.H.**, 1985. Kinetic control of morphology composition and mineralogy of abiogenic sedimentary carbonates. Journal of Sedimentary Petrology, 55: 109-119.
- Klappa, C.F.**, 1979. Calcified filaments in Quaternary calcrete organo-mineral interactions in the subaerial vadose environment. Journal of Sedimentary Petrology, 49: 955-68.
- Knox, G.J.**, 1977. Caliche profile formation, Saldanha Bay, South Africa. Sedimentology, 24: 657-74.
- Klein, T. and Alexander, M.**, 1986. Bacterial inhibitors in lake water. Applied and Environmental Microbiology, 52, 1: 114-18.
- Kobluk, D. and Risk, M.**, 1977. Micritization and carbonate grain binding by endolithic algae. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 61, 7: 1069-82.

- Koster, E.H. and Steel, R.J., 1984.** Sedimentology of gravels and conglomerates. Canadian Society of Petroleum Geologists, McArea Printing Ltd, Calgary, 441p.
- Krumbein, W.C., 1934.** Size frequency distribution of sediments. Journal of Sedimentary Petrology, 4: 65-77.
- Krumbein, W.C. and Pettijohn, F.J., 1938.** Manual of sedimentary petrography. Appleton, New York, 549p.
- Krumbein, W.C. and Sloss, L.L., 1959.** Stratigraphy and sedimentation. Freeman and Company, San Francisco, 495p.
- Krumbein, W., 1979.** Calcification by bacteria and algae. pp. 47- 68, in Trudinger and Swaine (eds.), Biogeochemical cycling of mineral forming elements. Elsevier, Amsterdam.
- Krumbein, W., 1986.** Biotransfer of minerals by microbes. in Leadbeater and Riding (eds.), Biomineralisation in lower plants and animals. Clarendon, 401Pp.
- Lalou, C., 1957.** Studies on bacterial precipitation of carbonates. Journal of Sedimentary Petrology, 27, 2: 190-95.
- Lang, J., 1975.** Un modèle de sédimentation molassique continentale en climat semi- aride. Bassins intra- montagneux de l'Afghanistan Central. Thèse d'état, Université Pierre et Marie-Curie. 626p.
- Laouina, A., 1983.** Approche du phénomène de l'encroûtement calcaire; étude de l'encroûtement des argiles des Bessara (carrière de la cimenterie de l'Oriental). Revue de Géographie du Maroc, 7: 73-87.
- Laouina, A., 1987.** Le Maroc nord- oriental: reliefs, modelés et dynamique du calcaire. Thèse d'état, Paris 1, 542p.
- Lauriol, B., Roberge, J. et St Pierre, L., 1987.** Les relations entre la géomorphologie, le climat et l'hydrochimie dans la caverne à la Patate; Ile d'Anticosti, Canada. Zeitschrift fur Geomorphologie, 31, 4: 419-31.
- Laville, E., 1975.** Tectonique et microtectonique d'une partie du versant sud du Haut-Atlas marocain. Thèse de 3e cycle, Montpellier, 94p.
- Leclerc, H., Izard, D., Husson, M.O. et Wattre, P., 1988.** Microbiologie générale. Doin; 369p.
- Leeder, M.R., 1982.** Sedimentology, process and product. George- Allen and Unwin, London, 344p.

- Lerman, A.**, 1979. Geochemical processes. Wiley-Interscience, New York, 481p.
- Lindholm R.C.**, 1987. A practical approach to sedimentology. Allen and Unwin, London, 276p.
- Lippman, M. et Vernet, J.L.**, 1986. Les travertins holocènes du Paestum (Italie méridionale). Méditerranée, 1-2: 45-52.
- Lohman, K.C.**, 1987. Geochemical patterns of meteoric diagenetic systems and their application to studies of paleokarst. pp. 58-80. in James N.P. and Choquette, P.W. (ed.). Paleokarst. Springer Verlag.
- Love, K.M. and Chafetz, H.S.**, 1988. Diagenesis of laminated travertine crusts, Arbuckle Mountains, Oklahoma. Journal of Sedimentary Petrology, 58, 3: 441-445.
- Lucas, G., Cros, P. et Lang, J.**, 1976. Les roches sédimentaires, étude microscopique des roches meubles et consolidées. Doin, Paris, 503p.
- Lyons, B., Long, D., Hines, M. et Armstrong, P.**, 1984. Calcification of Cyanobacterial mats in Solar lake; Sina. Geology, 12: 623-26.
- Macaïre, J.J.**, 1990. L'enregistrement du temps dans les dépôts fluviaux superficiels: de la géodynamique à la chronostratigraphie. Quaternaire, 1: 41 - 49.
- Malinovsky, M.**, 1952. Note sur les affleurements reconnus de manganèse sédimentaire. Rapp. inédit, Géologie, Maroc, n°5, 2p.
- Martini, J.H.**, 1953. Rapport sur l'étude de deux gîtes de minerais de manganèse au Maroc. Rapport inédit, Géologie, Maroc, n°6, 17p.
- Mark, D.M. and Peucker, T.K.**, 1978. Regression analysis and geographic models. Canadian Geographer, 22: 51-64.
- Marker, M.E.**, 1971. Waterfall tufas: a facet of karst geomorphology in South Africa. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement, 12: 138-152.
- Marshall, J.R. (ed.)**, 1987. Clastic particles. Scanning electron microscopy and shape analysis of sedimentary and volcanic clasts. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 346p.
- Martin, C.**, 1987. Les mesures de l'érosion chimique dans les bassins versants de roches cristallines: différentes méthodes d'investigation dans le massif des Maures (Var, France).

Zeitschrift fur Geomorphologie, 31: 73-84.

Martin, J., 1977. Le moyen Atlas central: étude géomorphologique. Thèse d'état, Paris 7.

Matalas, N.C. and Reihel, B.J., 1967. Some comments on the use of factor analysis. Water Resources Research, 24, 7: 907-912.

Mignerot, J.G., 1972. L'utilisation de l'analyse factorielle en planification urbaine et régionale. Revue de Géographie de Montréal, 26, 3:251-70

Moroney, M.J., 1970. Comprendre la statistique. Collection Marabout, Paris, 445p.

Mosley, M.P. and Zimpfer, G.L., 1976. Explanation in geomorphology. Zeitschrift fur Geomorphologie, 20: 381-90.

Mountasser, M., 1986. Collectivités traditionnelles et espaces montagnards dans les zones d'arrière pays atlasique. Thèse, Aix-En-Provence, 681p.

Müller, G., 1967. Methods In Sedimentary Petrology. Hafner, N.Y.

Muxart, T., 1981. Processus de précipitation des carbonates: Rapport, pp. 179-185, J. Nicod (éd.), Actes du colloque de l'Association de Géographes Français, Paris, 290p.

Nahon, D., Ducloux, J., Butel, P., Augas, C. et Paquet, H., 1980. Néof ormation d'aragonite, première étape d'une suite minéralogique évolutive dans les encroûtements calcaires. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 291D: 725-27.

Newton, M.S. and Grossman, E., 1988. Late Quaternary chronology of tufa deposits, Walker lake, Nevada. Journal of Geology, 96: 417-33.

Nicod, J. (éd.), 1981. Les formations carbonatées externes: Tu fs et travertins. Actes du Colloque de Paris, Mémoire de l'Association Française de Karstologie, 290p.

Nicod, J., 1986. Facteurs physico-chimiques de l'accumulation des formations travertineuses. Essai de synthèse. Méditerranée, 57, 1-2: 161-164.

Nicod, J. et Vaudour, J. (éd.), 1986. Les formations carbonatées externes holocènes: Tu fs et travertins. Actes de la table ronde organisée à Aix-en-Provence, France, Méditerranée, 57: 1-2, 190p.

Olsen, R.J., Hensler, R.F., Attoe, O.J. and Peterson, L.A., 1970. Fertilizer nitrogen and crop rotation in

- relation to movement of nitrate-nitrogen through soil profiles. Soil Sciences of America Proceeding, 34: 448-52.
- Orcel, J.**, 1933. Etude des roches encaissantes du gite de manganèse d'Imini, Ouarzazate. Rapp., Géologie, Rabat; 3, 16p.
- Orcel, J.**, 1942. Le manganèse, quelques gites du Maroc. Rapport, Géologie Rabat; n°3, 16p.
- Ordenez, S. and M.A., Garcia Del Cura**. 1983. Recent and tertiary fluvial carbonates in central Spain. Special Publication of the International Association of Sedimentologists, 6: 485-497.
- Oremland, R. and Capone, D.**, 1988. Use of specific inhibitors in biogeochemistry and microbial ecology. pp. 285-383; in Marshall (ed.) Advances in microbial ecology. Volume 10; Plenum Press; 447p.
- ORMVAO** (Office Régional de Mise en Valeur Agricole, Ouarzazate), 1985. Etude des sols dans le périmètre irrigué de Skoura. Rapport inédit, 100p.
- Parfenoff, A., Pomerol, C. et Tourenq, J.**, 1970. Minéraux en grains, étude et détermination. Masson, Paris, 571p.
- Pazdur, A., Pazdur, M.F. and Starkel, L.**, 1988. Stable isotopes of Holocene calcareous tufa in southern Poland as paleoclimatic indicators. Quaternary Research, 30: 177-189.
- Pentecost, A. and Riding, R.**, 1986. Calcification in Cyanobacteria. pp. 73-90; in Leadbeater and Riding (ed.), Biom mineralization in lower plants and animals. Clarendon, 401p.
- Peryt, T.M.** (ed.), 1983. Coated grains. Springer Verlag, NY, 655p.
- Perrin, B. et Tabling, P.**, 1991. Les dendrites. La Recherche, 232: 668-640.
- Pirkle, F.L., Pirkle, E.C., Pirkle, W.A. and Dicks, S.E.**, 1985. Evaluation through correlation and principal component analysis of a delta origin for the Hawthorne and citronelle sediments of Peninsular Florida. Journal of Geology, 93: 493-501.
- Plummer, L. N. and Wigley, T.M.L.**, 1976. The dissolution of calcite in CO₂ saturated solutions at 25c and 1 atmosphere total pressure. Geochimica et Cosmochimica Acta, 40: 191-202.
- Price, W.A.**, 1925. Caliche and pseudoanticlines. American Association of Petroleum Geologists. Bulletin,

- Raynal, R.,** 1961. Plaines et piémonts des bassins de la Moulouya. Thèse d'état, Paris, 617p.
- Read, J.F.,** 1974. Calcrete deposits and Quaternary sediments, Shark Bay, W. Australia. pp. 250-282; in
Evolution and diagenesis of carbonate sequences. Publication of The American Association of
Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma.
- Reeves, J.R.,** 1976. Caliche, classification, morphology and uses. Estacado Books. Texas, 233p.
- Reid, J.M., McLeod, D.A. and Cresser, M.S.,** 1981. Factors affecting the chemistry of precipitation and
river water in an upland catchment. Journal of Hydrology, 50: 129-145.
- Riser, J.,** 1979. Le Jbel Sarhro et sa retombée saharienne (sud-est marocain), étude géomorphologique.
Thèse d'état, Aix-en-Provence.
- Rivière, A.,** 1977. Méthodes granulométriques: techniques et interprétation. Masson, Paris, 170p.
- Rognon, P.,** 1987. Late Quaternary climatic changes for the Maghreb (North Africa). Palaeogeography
Palaeoclimatology Palaeoecology, 52: 11-34.
- Roques, H.,** 1964. Contribution à l'étude statique et cinétique des systèmes gaz carbonique-eau-carbonate.
Annales de Spéléologie, 19, 2: 250-482.
- Roques, H.,** 1972. Sur une nouvelle méthode graphique d'étude des eaux. Annales de Spéléologie, 27, 1:
79-92.
- Saad, M. and Turgeon, A.,** 1988. Application of principal component analysis to long term reservoir
management. Water Resources Research, 24, 7: 907-912.
- Saaldi, E.,** 1988. Géologie du Quaternaire marocain. SMER, Rabat, 439p.
- Salomon, W., Goudie, A. and Mook, K.G.,** 1978. Isotopic composition of calcrete deposits from Europe,
Africa and India. Earth Surface Processes and Landforms, 3: 45-57.
- Samuel, D. and Osman, M.A.,** 1981. Chemistry of natural waters. Ann Arbor Science, Michigan, 400p.
- Sauvage, Ch.,** 1963. Etages bioclimatiques. Notice explicative de l'Atlas du Maroc, Rabat, pp. 1-44.
- Schneidermann, N. and Harris, P.M. (ed.)** 1985. Carbonate cements. Society of Economic Paleontologists
and Mineralogists, Special Publication no. 36, Tulsa, Oklahoma, 379p.

- Schlesinger, W.H.**, 1985. The formation of caliche in soils of the Mojave desert, California. Geochimica et Cosmochimica Acta, 49: 57-66.
- Scholl, D.W. and Taft, W.**, 1964. Algae contribution to the formation of calcareous tufa; Mono-lake California. Journal of Sedimentary Petrology, 34, 2: 309-319.
- Schoeller, H.**, 1962. Les eaux souterraines. Masson et Cie, Paris, 642p.
- Schumm, S.A.**, 1973. Geomorphic thresholds and complex response of drainage systems. pp. 299-310, in Morisawa, M. (ed.), Publication in Geomorphology, Suny, Birghampton, N.Y., 314p.
- Schumm, S.A. and Lichty, R.W.**, 1965. Time, space and causality in geomorphology. American Journal of Science, 263: 110-119.
- Simoneau, A.**, 1969. Les chasseurs-pasteurs du Draa moyen et les problèmes de la néolithisation dans le sud marocain. Revue de Géographie du Maroc, 16: 97-116.
- Smirnov, P., Mouravine, E. et Storozhenko, V.**, 1977. L'agorchimie. Edition MIR, Moscou, 280p.
- Starkel, L.**, 1984. The reflection of abrupt climatic changes in the relief and sequence of continental deposits. pp. 135-146, in Morner and Karren (ed.), climatic changes on a yearly millennial basis. D. Reidel Publishing Cy.
- Stiller, M. and Magaritz, M.**, 1974. Carbon 13 enriched carbonate in an interstitial waters of lake Kinneret sediments. Limnology and Oceanography, 19: 849-853.
- Stumm, W. and Morgan, J.J.**, 1981. Aquatic chemistry. 2d edition, Wiley-Interscience, New York, 583p.
- Symoens, J.J.**, 1949. Note sur les formations de tuf calcaire observées dans le Bois d'Hautmont, Belgique. Bulletin de la Société Royale de Botanique de Belgique, 82: 81- 95.
- Symoens, J.J. et Van Der Werff, A.**, 1951. Note sur les formations de tuf calcaire des environs de Consdorf, Grand Duche du Luxembourg). Bulletin de la Société Royale de Botanique de Belgique, 83, 213-218.
- Szabo, B.**, 1990. Ages of travertine deposits in Eastern Grand Canyon, National Park, Arizona. Quaternary Research, 34: 24-32.
- Thibaudeau, P., Roberge, J. et Lauriol, B.**, 1988. Agressivité des eaux dans les massifs calcaires du

- nord du Yukon. Canada. Revue de Géomorphologie Dynamique, 37, 2: 61-71.
- Topham, P.B.**, 1977. Colonization, growth, succession and competition. pp. 31-68; in Seaward (edit), Lichen ecology. Academic Press, 550p.
- Tricart, J.**, 1963. Géomorphologie des régions froides. Presses Universitaires de France, Paris, 289p.
- 1965. Principes et méthodes de la géomorphologie. Masson, Paris, 496p.
- 1985. Problèmes méthodologiques en géomorphologie: les seuils. Annales de géographie, 94:321-334.
- Tricart, J. et Cailleux, J.**, 1963. Initiation à l'étude des sables et des galets. C.D.U, Paris, 366p.
- Turi, B.**, 1986. Stable isotope geochemistry of travertines. in Fritz P. and Fontes, J.Ch. (ed.), Handbook of environmental isotope geochemistry Volume 2, Elsevier, Amsterdam, pp. 207-238.
- Turin, A.**, 1990. La pollution des eaux souterraine par les nitrates en Lorraine. Revue Géographique de L'Est, 30, 3-4:257-273.
- Twenhofel, W.H. and Tyler, S.A.**, 1941. Methods of study of sediments. Mc Graw-Hill Book Cy, New York, 183p.
- Uzdowski, E., Hoefs, J. and Menschel, G.**, 1979. Relationship between C 13 and O 18 fractionation and changes in major element composition in a recent calcite depositing spring. A model of chemical variation with inorganic CaCO₃ precipitation. Earth and Planetary Science Letters, 42: 267-276.
- Vatan, A.**, 1967. Manuel de sédimentologie. Technip, Paris, 397p.
- Vaudour, J.**, 1985. Les travertins de piedmont: contribution à l'étude des géosystèmes karstiques méditerranéens. Travaux de l'Unité Associée 903 du CNRS. 14: 1-12.
- Vaudour, J.**, 1986. Introduction à l'étude des édifices travertineux holocènes. Méditerranée, 57, 1-2: 3-10.
- Vaudour J. et Clauzon G.**, 1976. Chronique de pédologie méditerranéenne. Les croûtes ont-elles une origine pédologique? Méditerranée, 1: 71-81.
- Vaudour, J., Verrecchia, E. et Freytet, P.**, 1989. Etude des croûtes calcaires complexes des environs de Madrid. Méditerranée, 68, 2-3: 61-73.

- Vernet, J.L., 1986. Travertin et végétation holocène méditerranéenne. Méditerranée, 57, 1-2: 25-27.
- Verrecchia, E., 1987. Le contexte morphodynamique des croûtes calcaires. Zeitschrift für Geomorphologie, 31, 2:179-93.
- Viles H.A. and Goudie, A.G., 1990. Tufas, travertines and allied carbonate deposits. Progress in Physical Geography, 14: 19-41.
- Vogt, T., (éd.), 1975. Types de croûtes et encroûtements calcaires et leur répartition régionale. Colloque de Strasbourg, 146p.
- Vogt, T., 1984. Croûtes calcaires: types et genèse, exemples d'Afrique du nord et de France méditerranéenne. Université Louis Pasteur, Strasbourg. 240 p.
- Wainwright, M., 1978. A review of the effect of pesticides on microbial activity in soils. Journal of Soil Science, 29: 287-98.
- Wallis J.R., 1968. Factor analysis in hydrology - An agnostic view. Water Resources Research, 4: 521-527.
- Warren, J.K., 1983. Pedogenic calcrete as it occurs in quaternary calcareous dunes in coastal South Australia. Journal of Sedimentary Petrology, 53: 787-96.
- Watts, N.L., 1977. Pseudo-anticlines and other structures in some calcretes of Botswana and South Africa. Earth Surface Processes, 2: 63-74.
- Weiscrock, A., 1980. Géomorphologie et paléoenvironnements de l'Atlas atlantique (Maroc). Thèse d'état, Paris, 931p.
- 1981. Morphogenèse des édifices tuffeux d'Imouzzer Ida ou Tanane (Maroc); 157-170 in Nicod (éd.) tufs et travertins; Paris, 290p.
- Whalley, B., edit., 1978. Scanning electron microscopy in the study of sediments, a symposium. Geo-Abstracts, Norwich, England, 414p.
- White, W.B., 1988. Geomorphology and hydrology of karst terrains. Oxford University Press, Oxford. 464p.
- Wigley, T.M.L., 1977. WATSPEC: a computer program for determining the equilibrium speciation of aqueous solutions. British Geomorphological Research Group. Technical Bulletin, 20.
- Williams, A.G., Ternam, J.L. and Kent, M., 1983. Stream solute sources and variations in a temperate

granite basin. in Webb, B. (ed.) I.A.H.S. symposium, Dissolved loads of rivers and surface water quality. Publication no. 141: 299-310.

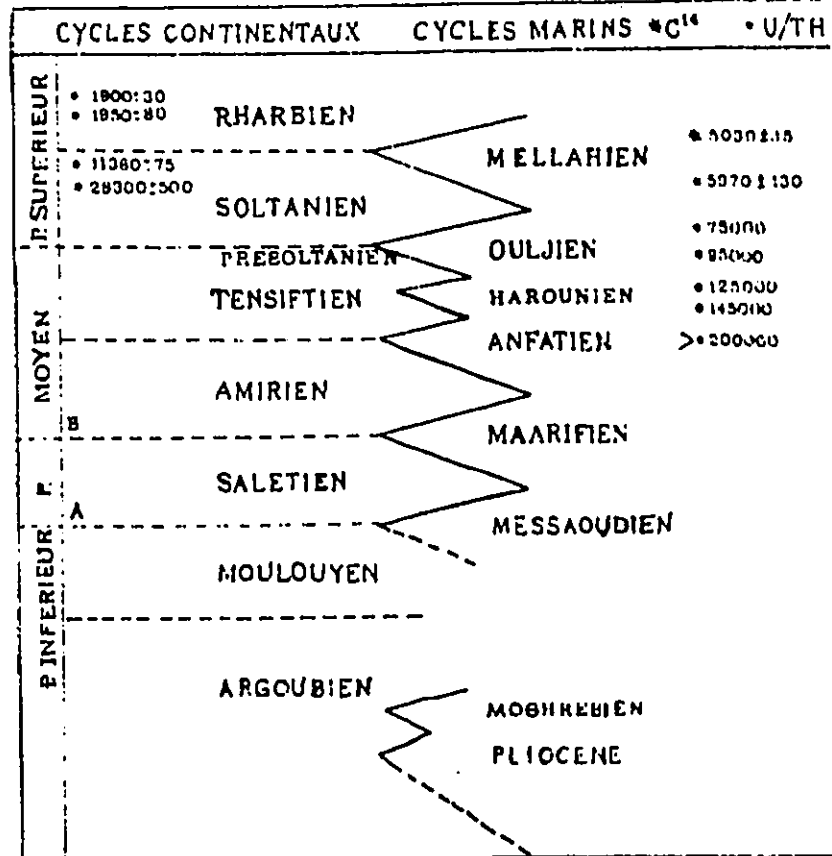
Wright, V.P.; Platt, N.H. and Wimbledon, W.A., 1988. Biogenic laminar calcretes: evidence of calcified root-mat horizons in paleosols. Sedimentology, 35: 603-20.

Yeates, M., 1974. An introduction to quantitative analysis in human geography. Mc Graw Hill, 300p.

Young, C.P., 1983. Data acquisition and evaluation of groundwater pollution by nitrates. Environmental Geology, 5, 1: 11-18.

Annexe n° 1. A

Cadre stratigraphique du Pléistocène
du Maroc.



d'après J.J. Jaeger, in Saadi, E, 1988.

Corrélations classiques entre les stratigraphies continentale et marine du Quaternaire marocain*

STRATIGRAPHIE CONTINENTALE		STRATIGRAPHIE MARINE	
Corrélation avec la stratigraphie alpine	Niveaux pluviaux	Transgressions (= Interpluviaux)	Corrélation avec la Méditerranée et l'Europe
Episode frais (?) post-Flandrien non défini	Rharbien		
		Mellahien	Versilien (Flandrien)
Würm récent ?	Soltanien		
		Ouljien	Néotyrhénien ? (= interstade Würm I-II ? ou Riss-Würm ?)
Würm I ?	Pré-Soltanien ?		
		Rabatien-Harounien	Eutyrrhénien ? (= Interglaciaire Riss-Würm ou interstade Riss ?)
Riss	Tensiftien		
		Anfatien	Paléotyrhénien (Interglaciaire Mindel-Riss)
Mindel	Amirien		
		Maarifien	Sicilien (Sicilien II ?, Milazzien ?)
Günz	Salétien		
		Messaoudien	Calabrien ? Sicilien I ?
Danube II ?	Régréuien ?		
		Pas de transgression connue	
Danube I ?	Moulouyen		

* Point d'interrogation = pas d'accord explicite ou divergence entre les auteurs.

Annexe n°2.

Nouvelle méthode d'évaluation de la dissolution spécifique: méthode Hakim (1984).

Cette méthode se résume en trois types d'opérations majeures:

I - Calculs préparatoires ayant pour but le contrôle de la validité des analyses hydrochimiques effectuées. Il s'agit d'établir une balance ionique en calculant le pourcentage d'erreur

$$\text{ERR} = \frac{\text{S cations} - \text{S anions}}{\text{S cations} + \text{S anions}}$$

avec S désignant la somme. Les ions sont exprimés en milliéquivalents. L'analyse est qualifiée bonne quand ERR est inférieure à 5%; elle est admissible entre 5 et 10%; au delà de 10% elle est douteuse et non interprétable.

Dans cette série de calculs préparatoires on inclut aussi la transformation de HCO_3 en CO_3 . Le but de cette opération est d'établir un rapport immédiat en quantité de roche éliminée par dissolution. La transformation s'effectue en appliquant HCO_3 (en mg par litre) / 61 multiplié par 30 = CO_3 . Le dernier

calcul préparatoire consiste à évaluer le rCa excédentaire, ou le Mg c'est à dire la quantité de calcium ou de magnésium dissous dans l'eau mais dont l'origine est gypseuse ou saline et non carbonatée.

Elle s'obtient par $(rCa + rMg) - (rHCO_3 + rCO_3) = x$; ensuite x est à multiplier par 20 ou par 12 selon l'ion Ca ou Mg abondant dans la solution.

ii - Calcul des taux évacués selon leur origine lithologique.

Éléments salins et gypseux d'une part, et éléments carbonatés d'une autre. Le taux des premiers est égal à: Ca excédentaire + Na + Cl + SO₄

et le taux des second est égal à: (Ca-Ca excédentaire) + Mg + HCO₃ (transformé) + CO₃.

iii - Le total rocheux dissous dans l'eau (TD ou ER) serait égal à la somme des deux précédents taux. Il est différent du CaCO₃ équivalent, de la minéralisation totale (somme des ions en milligrammes par litre, et du résidu sec (poids du résidu après séchage).

Annexe 3

Programme SAS pour l'analyse en composantes principales
et procédure de classification des données hydrochimiques

```
DATA CHIM1.O2;
SET CHIM1.O;
PCA=(CA/TD)*100;
PMG=(MG/TD)*100;
PNA=(NA/TD)*100;
PK=(K/TD)*100;
PCL=(CL/TD)*100;
PSO4=(SO4/TD)*100;
PNO3=(NO3/TD)*100;
PHCO3=(HCO3/TD)*100;
KEEP ID1 ID2 CA MG NA K CL SO4 NO3 HCO3 TD T PH;
PROC PRINT DATA=CHIM1.O2;
TITLE 'MATRICE DE DONNEES ORIGINALES';
PROC FACTOR DATA=CHIM1.O2 OUT=B CORR METHOD=PRINCIPAL ROTATE=N MIN=1
NFACTOR=12;
TITLE 'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES';
PROC PRINT DATA=B;
VAR ID1 FACTOR1-FACTOR12;
TITLE 'LES COMPOSANTES PRINCIPALES';
PROC PLOT DATA=B;
    TITLE 'REPRESENTATION GRAPHIQUE DES COMPOSANTES';
    PLOT FACTOR2*FACTOR1-ID1/HREF=0 VREF=0;
PROC CLUSTER DATA=B OUTTREE=C METHOD=CEN;
    ID ID1;VAR FACTOR1-FACTOR12;
    TITLE 'REGROUPEMENT DES SOURCES SELON LEUR COMPOSITION CHIMIQUE';
PROC TREE DATA=C OUT=D LIST HEIGHT=NCL NCLUSTERS=13;
    ID ID1;
    COPY FACTOR1 FACTOR2;
TITLE 'ARBRE DE CLASSIFICATION';
PROC PLOT DATA=C;PLOT HEIGHT * NCL ;
    TITLE REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA PERTE D'INFORMATION';
PROC PLOT DATA=D;PLOT FACTOR2*FACTOR1=CLUSTER;
    TITLE 'REPRESENTATION GRAPHIQUE DES GROUPES RETENUS';
PROC PLOT DATA=B;
TITLE 'REPRESENTATION GRAPHIQUE DES COMPOSANTES';
PLOT FACTOR2*FACTOR1-ID1/HREF=0 VREF=0;
RUN;
```

Annexe 4

Procédure SAS pour l'analyse des données hydrochimiques
par régression.

```
DATA A;
  SET CHIM1.O;
  IF ID2=7 OR ID2=8 OR ID2=9 THEN ETE=1 ;
    ELSE ETE=0;
  IF ID2=10 OR ID2=11 OR ID2=12 THEN AUTOMN=1 ;
    ELSE AUTOMN=0 ;
  IF ID2=1 OR ID2=2 OR ID2=3 THEN HIVER=1 ;
    ELSE HIVER=0 ;
  PROC REG DATA=A;
  MODEL TD=CA MG CL SO4 K NA ETE AUTOMN HIVER;
  ID ID1;
  OUTPUT OUT=B P=MODEL1 R=RESID1;
  PROC PLOT DATA=B;
    PLOT TD*CA;
    PLOT TD*MG;
    PLOT TD*CL;
    PLOT TD*SO4;
    PLOT TD*K;
    PLOT TD*NA;
    PLOT TD*ETE;
    PLOT TD*AUTOMN;
    PLOT TD*HIVER;
    PLOT MODEL1*CA MODEL1*MG MODEL1*SO4
      MODEL1*K MODEL1*NA MODEL1*ETE MODEL1*AUTOMN
      MODEL1*HIVER=.'/OVERLAY;
  PLOT RESID1*TD/VREF=0;
  RUN;
```

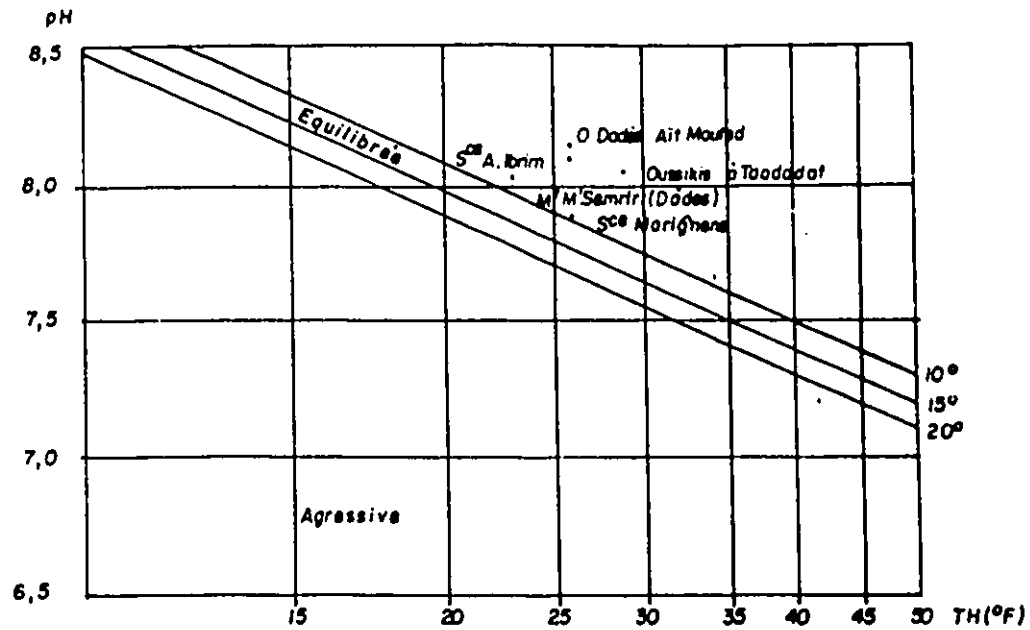
Annexe 5

Procédure de représentation graphique des résultats de l'analyse
des données hydrochimiques par régression (gplot)

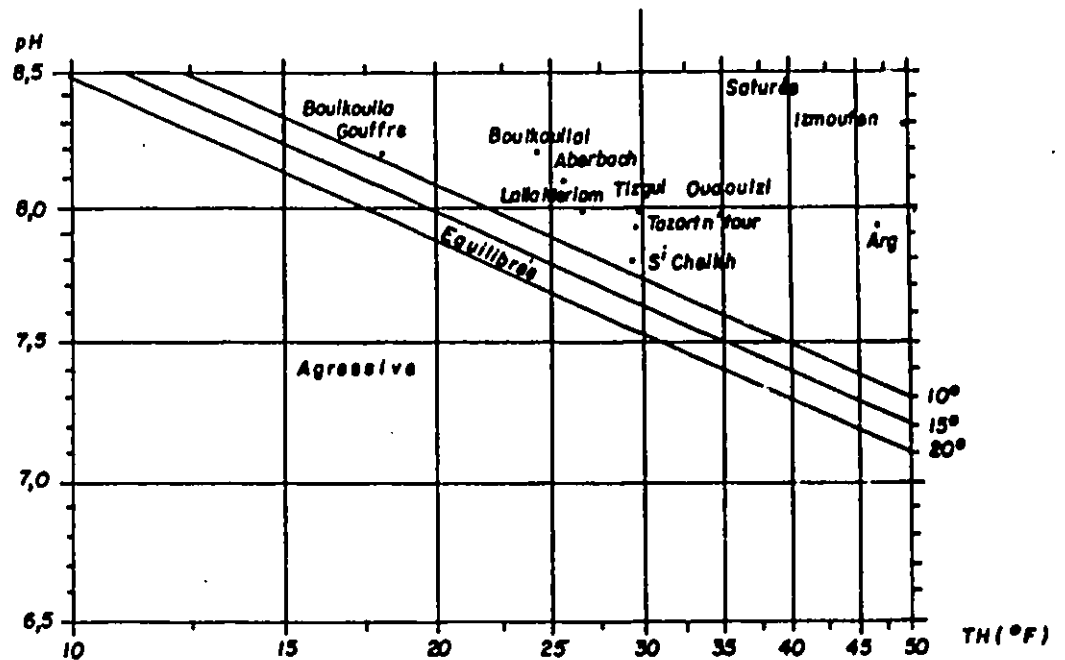
```
DATA A;  
  SET HYDR.O;  
  IF ID2=7 OR ID2=8 OR ID2=9 THEN ETE=1 ;  
    ELSE ETE=0;  
  IF ID2=10 OR ID2=11 OR ID2=12 THEN AUTOMN=1 ;  
    ELSE AUTOMN=0 ;  
  IF ID2=1 OR ID2=2 OR ID2=3 THEN HIVER=1 ;  
    ELSE HIVER=0 ;  
  PROC REG DATA=A;  
  MODEL TD=CA MG CL SO4 K NA ETE AUTOMN HIVER;  
  ID ID1;  
  OUTPUT OUT=B P=MODEL1 R=RESID1;  
  GOPTION DEVICE=PLOTTER;  
    -IBM3179; (écran)  
  PROC gPLOT DATA=B;  
    PLOT CA*SO4=AUTOMN;  
run;
```


Annexe 7

A. Saturation dans certains points d'eau (données moyennes)



B. Saturation des eaux de certaines sources du Dadès et Todgha selon la courbe de Roque



Annexe 8 Résultats des datations à l'Uranium/Thorium

sample	U (ppm)	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	Age ka
M893	1.10	1.78 ± 0.04	1.10 ± 0.10	>1,000	>300.
	1.09	1.60 ± 0.02	1.10 ± 0.06	>1,000	>300.
	1.12	1.75 ± 0.03	1.07 ± 0.12	>1,000	>300.
M8912	0.77	1.52 ± 0.01	0.08 ± 0.00	2.66	9.09 ± 0.44
	0.65	1.59 ± 0.01	0.12 ± 0.01	2.18	14.21 ± 0.66
	0.91	1.62 ± 0.02	0.10 ± 0.01	2.66	11.30 ± 0.7
M8925	0.09	2.09 ± 0.05	0.75 ± 0.04	>1,000	130.14 ± 10.5
	0.08	2.11 ± 0.07	0.80 ± 0.03	30.83	142.2 ± 10.0