

UNIVERSITÉ CADI AYYAD
FACULTÉ DES SCIENCES SEMLALIA
MARRAKECH

N° d'ordre :

THÈSE

présentée à la Faculté pour obtenir le grade de

Docteur

UFR : Sciences et Techniques des eaux

Spécialité : **Hydrobiologie souterraine**

**Biodiversité, écologie et qualité des eaux souterraines
de deux régions arides du Maroc : le Tafilalet et la région
de Marrakech**

par

Ali AÏT BOUGHROUS

(DESA Sciences et techniques des eaux)

soutenue le 07 juillet 2007 devant la commission d'examen :

Président :	Mohamed MESSOULI	PES	Université Cadi Ayyad Marrakech
Examineurs :	Patrick MARTIN	Directeur de Recherches	Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique
	Claude BOUTIN	PES	Université Paul Sabatier Toulouse III
	Nicole COINEAU	Directeur de Recherches	Université Paris VI
	Khalid OUFDOU	PES	Université Cadi Ayyad Marrakech
	Khadija ESSAFI	PES	Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès
	Mohamed YACOUBI-KHEBIZA	PES	Université Cadi Ayyad Marrakech
	Mohamed BOULANOUAR	PES	École Normal Supérieur, Marrakech

À la mémoire de ma mère

À mon père

À mes sœurs et frères

À mes chers amis

Remerciement

Avant d'exposer les résultats de ce travail, je tiens à remercier Monsieur le professeur M. MARZAK, Président de l'Université Cadi Ayyad et Monsieur E.Lahcen. AMEZIANE Doyen de la Faculté des Sciences Semlalia, pour l'intérêt qu'ils portent à la recherche scientifique.

Je tiens aussi à remercier plus particulièrement Monsieur M. Yacoubi-Khebizza, Professeur à la Faculté des Sciences Semlalia, qui m'a confié ce sujet et m'a initié à la recherche scientifique. Sa gentillesse et sa modestie, son enthousiasme pour la recherche, sa compétence scientifique resteront pour moi un exemple. Qu'il trouve dans ces quelques mots l'expression de ma vive reconnaissance.

Monsieur C. Boutin, Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, à bien voulu assurer le suivi de ce travail, je le remercie pour ses conseils, pour ses remarques et pour l'intérêt avec lequel il a suivi ce travail. Je le remercie également d'avoir accepté d'être rapporteur de ce travail et de participer à mon jury de thèse.

Madame N. Coineau, Directeur de recherche au CNRS et spécialiste des Isopodes, Observatoire Océanologique de Banyuls, Université Paris 6, a suivi mon travail avec grand intérêt. Je tiens à lui exprimer mes remerciements les plus respectueuses.

Monsieur M. Boulanouar, Professeur à l'école normale supérieure de Marrakech, par sa disponibilité, son soutien inconditionnel, son encouragement, ces qualités humaines, m'a fait bénéficier de ces aides ces conseils et ces remarques ; il a suivi ce travail avec grand intérêt, qu'il trouve dans ces quelques mots ma profonde reconnaissance et mes meilleurs remerciements.

Je tiens également à remercier Monsieur M. Messouli, Professeur à la Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech, il a participé fortement à la réalisation de ce travail que soit sur le terrain qu'au laboratoire. Qu'il me soit permis de lui adresser mes très vifs remerciements.

Mes chaleureux remerciements s'adressent à Monsieur P. Martin, Directeur de recherches à l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, pour sa gentillesse ces remarques et ces encouragements. Je tiens à lui remercier également d'avoir m'accueilli dans son laboratoire et m'initié à la taxinomie des Oligochètes aquatiques dulçaquicoles du Maroc et de participer à mon jury de thèse.

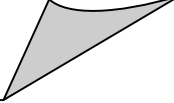
Je tiens à remercier Madame K. Essafi, Professeur à la Faculté des Sciences Université Sidi Mohamed Ben Abdellah et Monsieur K. Oufdou, Professeur à la faculté des Sciences Semlalia, d'avoir accepté d'être rapporteur de ce travail et de participer à mon jury de thèse.

Je tiens également à remercier Madame N. Ouazzani, professeur à la faculté des Sciences Semlalia et Monsieur A. Douikssi, technicien au laboratoire d'Hydrobiologie, d'Ecotoxicologie et d'Assainissement, pour leur aide durant la période des analyses physico-chimiques.

Je ne saurais remercier avec peu de mots, Mademoiselle F. Boukhoubza, doctorante à notre laboratoire d'hydrobiologie, d'Ecotoxicologie et d'assainissement, elle a suivi par intérêt ce travail. Je la remercie également pour sa gentillesse, son encouragement et son aide infinie.

De même je remercie mes amis (es), A. Kacha, A. Qasmy, A. El Allaoui, D. Magouri, M. Azizi, M. Achak, F. Hallam, Ainsi que les amis du DESA Sciences et Techniques de l'eau (2001-2003) pour leur gentillesse et leurs encouragements.

Je remercie finalement mon Père, mes Sœurs et Frères, qui m'ont toujours épaulé durant toutes mes années d'études.



FICHE PRÉSENTATIVE DE LA THÈSE

- Nom et Prénom de l'auteur : **AIT BOUGHROUS Ali**
- Intitulé du travail : **Biodiversité, écologie et qualité des eaux souterraines de deux régions arides du Maroc : le Tafilalet et la région de Marrakech.**

- Encadrant :
 - nom, prénom et grade : **YACOUBI-KHEBIZA Mohammed, PES**

 - laboratoire et institution : **Laboratoire Hydrobiologie, Écologie et Assainissement, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech.**

- Lieux de réalisation des travaux (laboratoires, institution,...) : **Laboratoire d'Hydrobiologie, Écologie et Assainissement, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech.**

- Période de réalisation du travail de thèse : **de décembre 2003 à juin 2007**
- Rapporteurs autres que l'encadrant (nom, prénom, grade, institution) :
 - **Khalid OUFDOU, PES, Université Cadi Ayyad Marrakech,**
 - **Khadija ESSAFI, PES, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah,**
 - **Claude BOUTIN, PES, Université Paul Sabatier Toulouse III**

Cadres de coopération (ou de soutien) :

- **Bourse d'excellence octroyée par l'Institut Nationale des recherches Scientifiques et Techniques**
- **Projet de GTI de l'institut Royale des Sciences Naturels de Belgique**
- **Convention d'échange entre le CNR marocain et le CNR italien**

- Ce travail a donné lieu aux résultats suivants:

Publications :

- 1- A. AIT BOUGHROUS, M. BOULANOUAR, M. YACOUBI, N. COINEAU 2007. The first Microcharon (Crustacea Isopoda, Microparasellidae) from the Moroccan North Saharan Platform. Palaeobiogeography and origin. *Contributions to Zoology*, 76 (1) 19-32.
- 2- M. YACOUBI-KHEBIZA, A. AIT BOUGHROUS, CRISTIANO GABBANINI, MOHAMED MESSOULI et GIUSEPPE MESSANA (2006). Impact of waste discharges on the water quality and interstitial community structure of two Mediterranean rivers. *Italian Journal of Zoology*, 73(2): 153-166;

Communications :

YACOUBI KHEBIZA M. & AIT BOUGHROUS A. (2004). Diversity and distribution of groundwater fauna in Tafilalet plain (Oriental Anti-Atlas Morocco). Le 24 et le 30 novembre 2004, symposium international of Biospeology, en Inde.

YACOUBI KHEBIZA M., AIT BOUGHROUS A., BOULANOUAR M., MESSANA G. & BARRATI M. (2004). Morphology and genetics of Magniezia populations (Crustacea Isopoda Asellota) from Morocco. le 24 et le 30 novembre 2004, symposium international of Biospeology, en Inde.

A. AIT BOUGHROUS, M. ELADNANI, A. NEJMEDDINE & M. YACOUBI-KHEBIZA (2005) : Impact d'une activité minière sur la biodiversité et la qualité des eaux souterraines près de Marrakech (Maroc). Paris, 24-28 janvier 2005. Conférence Internationale « Biodiversité : Sciences et Gouvernances ».

Résumé

La biodiversité et la qualité des eaux souterraines ont été étudiées comparativement dans la plaine du Haouz, près de la ville de Marrakech et dans la région d'Errachidia, au sud-est du Maroc. Des analyses physico-chimiques et biologiques ont été réalisées sur l'eau d'une trentaine de stations comprenant des puits, des sources et le sous-écoulement des cours d'eau.

À Marrakech, la diversité stygobiologique moyenne est élevée dans l'eau des puits qui sont situés à l'amont hydraulique de la ville, où les teneurs en nitrates et en orthophosphates sont relativement faibles. Les puits situés dans la zone d'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech se distinguent au contraire par la rareté ou l'absence totale des espèces stygobies; il s'agit de puits dont la conductivité de l'eau et les teneurs en nitrates, nitrites et ammonium sont relativement élevées.

Dans la région d'Errachidia, l'eau souterraine est généralement et naturellement très minéralisée. Une dizaine d'espèces stygobies ont été récoltées; certaines proviennent de sources chaudes. Ces espèces sont essentiellement des Crustacés Péracarides et des Mollusques Gastéropodes.

Il a été constaté dans les deux régions étudiées, qu'en cas de pollution locale de l'eau des puits ou de la nappe phréatique, la richesse spécifique de la zoocénose des puits diminue et que c'est la faune stygobie qui est la plus sensible à la pollution, qui se réduit en premier et disparaît complètement en cas de contamination importante. Cette relation entre la biodiversité et la qualité de l'eau exprimée en termes physico-chimiques, déjà observée ailleurs dans les eaux de surface se trouve vérifiée aussi dans les eaux souterraines; elle pourrait donc présenter un caractère général.

De point de vue biologique, le peuplement aquatique souterrain des deux régions présente des similitudes qui sont en relation très probablement avec leur histoire géologique comparable; principalement avec les différents cycles eustatiques transgressions-régressions marines, qui ont été à l'origine de la mise en place de la plupart des ancêtres des espèces actuelles. L'orogénèse atlasique a séparé par la suite les deux régions, ce qui a entraîné une évolution différente des peuplements ancestraux au Nord et au Sud de l'Atlas, et des phénomènes de spéciation par vicariance.

Abstract

The biodiversity and the quality of subterranean waters have been comparatively studied in the Haouz plain near Marrakesh as well as in the Tafilalet plain, in south-eastern Morocco. For this purpose, physicochemical and faunistic analyses were carried out on the water of wells and springs and in the underflow of rivers located in the area of Marrakesh on the one hand, and in Errachidia region on the other hand.

In the wells of Marrakesh, the average of the stygobiologic diversity is high in the wells located upstream of the city where groundwater presents low contents of nitrates and orthophosphates. In contrast, the wells located in the spreading zone of Marrakesh waste waters are characterized by the scarcity or the complete absence of stygobitic species; in these latter wells, the water is highly polluted. It is rich in nitrates, nitrites, ammonium, and the conductivity is rather high.

In the area of Errachidia the faunistic inventory gathers several species, some of them coming from hot springs were collected. These species belong mainly to Crustacea and Mollusca (gastropods). The subterranean water from this area is highly mineralized.

In the two studied areas, the biodiversity decreases when well water is locally polluted, and the subterranean fauna, more sensitive to water quality, completely disappears if the degree of contamination is important. This relation between biodiversity and water quality expressed in physicochemical terms, already observed in surface waters and which had already appeared in the wells of Marrakesh, was also enlightened during this study; it could be general.

Indeed, the groundwater fauna of the two areas presents similarities in relation, very likely, to their similar geological history, mainly with the various cycles of marine transgression-regression, which were at the origin of the settlement of the ancestors of many extant species, and the Atlasic orogenesis which separated the common ancestral populations into two separated stocks, north and south of the Atlas range, inducing a different evolution of the ancestors and finally a speciation by vicariance.

ملخص

الغاية من هذه الأطروحة هي الدراسة بالمقارنة لنسبة التنوع البيولوجي وكذا جودة المياه الجوفيتين بكل من واحة الحوز، على مقربة من مدينة مراكش و منطقة الرشيدية، جنوب شرق المغرب.

لأجل هذا قمنا بالتحاليل الفيزيوكيميائية والبيولوجية لمياه ثلاثين نقطة مائية تتكون من اباروعيون ومجاري تحارضية لبعض الوديان.

لقد أثبتت الدراسة أن النسبة المتوسطة للتنوع البيولوجي جد مرتفعة في مياه ابار منطقة مراكش المتواجدة في الناحية العليا اتجاه مجرى المياه الجوفية، حيث تنخفض نسبة الفسفوروالنترات. عكس ذلك فالأبار المتواجدة في منطقة صرف المياه العدمة تتميز بضعف النسبة المتوسطة أو الغياب الكلي للأنواع الحيوانية التحارضية ؛ هذه الآبار تحتوي على مياه ذات ملوحة مرتفعة و نسب جد عالية من الفسفور و النترات و النترات و الأونيوم.

اما في منطقة الرشيدية فان هذه الدراسة أثبتت ان المياه الجوفية نسبيا معدنة. لقد تم العثور على اثنا عشرة نوعا حيوانيا، البعض منها في العيون ذات المياه الساخنة. هذه الأنواع تتكون خصوصا من القشريات و من الحلزونيات الرخوية.

لقد تم الإثبات في كل المنطقتين المدروستين، أنه في حالة تدهور جودة مياه الآبار أو الفرشة المائية فان نسبة التنوع البيولوجي تنخفض وبالأخص نسبة الأنواع التحارضية و التي تبدي تأثيرا أكبر لتلوث المياه التي تعيش فيها. يبدو أن هذه النسبية بين التركيبية البيولوجية وجودة المياه لها طابع عام كما هو الشأن بالنسبة للمياه السطحية.

فيما يخص التنوع البيولوجي فان الدراسة تبين تقاربا واضحا بين التركيبية البيولوجية لكلتا المنطقتين المدروستين وقد يعزى هذا التقارب بين المتركتين إلى العوامل التاريخية التي طبعت التاريخ الجغرافي القديم للمنطقتين وخصوصا تعاقب تقدم و تراجع البحر فوق اليابسة خلال الحقب التاريخية القديمة و التي ساهمت في انتقال الأنواع البيولوجية الحالية ذات الأصول البحرية إلى المنطقتين. وبعد ذلك جاء دور العوامل التكتونية التي كونت سلسلة الأطلس الكبير، لتساهم في عزل المنطقتين وبالتالي ظهور أنواع بيولوجية مختلفة في شمال و جنوب الأطلس الكبير ناتجة عن تطورات مختلفة لأصولها البحرية.

Sommaire

<u>Introduction</u>	1
<u>1^{ère} partie</u> : Généralités, milieu et méthodes d'étude	
Généralités	5
1°/ Eaux souterraines	5
2°/ Eaux souterraines au Maroc	5
3°/ Classification du monde aquatique souterrain	6
a- Terrains perméables en petit	6
b- Terrains perméables en grand	7
4°/ Diversité biologique des eaux souterraines	7
5°/ Caractéristiques et rôle de la faune aquatique souterraine	8
Milieu d'étude	9
I – La plaine du Haouz et la région de Marrakech	9
1°/ Situation géographique	9
2°/ Données climatiques	11
3°/ Données géologiques	11
a - Zone des Jbilet	11
b - Zone de Marrakech	12
4°/ - Ressources en eau	14
II - La Plaine de Tafilalet et la région d'Errachidia	15
1°/ Situation géographique	15
2°/ Données climatiques	16
3°/ Données géologiques	18
4°/ Ressources en eau	24
Matériel et Méthodes	28
1°/ Échantillonnage du peuplement au niveau des puits	28
1- Filet phréatobiologique	28
2- Pièges appâtés	28
3- Filtration de l'eau pompée	30
2°/ Au niveau du sous écoulement des cours d'eau	30
1- Sondage Karaman-Chappuis	30
2- Pompage Bou-Rouch	30
3°/ Au niveau des sources	30
4°/ Localisation et description des stations	31
5°/ Analyses physico-chimiques de l'eau	34
1- Facteurs mesurés sur le terrain	34
2- Facteurs analysés au laboratoire	34
6°/ Analyses bactériologiques de l'eau	42
1- Coliformes	42

2- Streptocoques fécaux	42
7°/ Traitements statistiques des données	43
1- Analyses en composantes principales	43
2- Analyses hiérarchiques	43
<u>2ème partie</u> : Qualité des eaux souterraines	
et relation avec la biodiversité	
<u>Chapitre 1</u>: Qualité des eaux souterraines dans les deux	
régions d'étude	44
Introduction	44
A/ Cas de la nappe du Haouz et de la région de Marrakech	45
1°/ Caractéristiques générales de la nappe	45
a- Facteurs physiques	45
b- Facteurs chimiques	48
c- Typologie des stations (Spectre physicochimique)	55
2°/ Classification des stations (ACP)	56
1- Signification des axes	56
2- Conclusion	62
3°/ Impact de l'activité minière sur la qualité de la nappe du Haouz	63
1- Introduction	63
2- Qualité des eaux	63
2-1 Paramètres physico-chimiques	63
2-2 Paramètres indicateurs de la pollution minérale	64
2-3 Éléments métalliques	64
3- Analyse en composante principale	65
4- Discussion	70
Conclusion	71
B/ Cas de la nappe du Tafilalet et des environs d'Errachidia	72
1° Caractéristiques générales des nappes	72
2°/ Typologie des stations et impact des activités humaines	77
3°/Analyse en composante principale	80
Qualité comparée des eaux Errachidia – Marrakech	86
1- Discussion	89
2- Conclusion	91
<u>Chapitre 2</u> : Biodiversité des eaux souterraines étudiées	
Peuplement des stations	93
Introduction	93
1°/ Inventaire faunistique	94
2°/ Nappes du Tafilalet	99
a- Inventaire	99
b- Biotypologie des stations	103
c- Discussion	104
3°/ Nappe du Haouz	110

3-1 Ville de Marrakech et ses environs	110
a- Inventaire	110
b- Typologie des stations	113
c- Discussion	118
3-2 Région Draâ Sfer	119
a- Inventaire faunistique	119
b- Biotypologie des stations	120
c- Discussion	124
3-3 Conclusion	125
Corrélation entre la biodiversité et la qualité des eaux	127
1- Introduction	127
2- Haouz : ville de Marrakech et site minier de Draâ Sfer	128
3- Errachidia	134
4- Discussion et conclusion	138
Qualité bactériologique des eaux souterraines	139
Introduction	139
A/ Marrakech	139
B/ bactériologie des eaux souterraines d'Errachidia	141
C/ Discussion	144
Conclusion	145
3^e partie : Répartition géographique de la faune stygobie et corrélations transatlasiques	146
Introduction : origine de la faune stygobie	146
I- Répartition géographique de quelques espèces	148
A- Classe des Mollusques Gastéropodes	148
B- Classe des Crustacés	151
1°/ Isopodes	151
a- Microparasellidae : Genre <i>Microcharon</i>	151
b- Les Microcerberidae: Le Genre <i>Microcerberus</i>	152
c- Les Cirolanidae du Genre <i>Typhlocirolana</i>	156
d- Les Cirolanidae du Genre <i>Maroccolana</i>	160
e- Stenasellidae du Genre <i>Magniezia</i>	160
2°/ Amphipodes	163
a- Metacrangonyctidae	163
b- Bogidiellidae	165
c- Salentinellidae	165
3°/ Thermosbaenacés	166
4°/ Ostracodes	168
C- Les annélides Oligochètes	168
1- Origine	168
2- Oligochètes aquatiques au Maroc	169

a- Les Naididae	169
b- Les Lumbriculidae	170
II- Aperçu sur la paléogéographie des deux régions	171
1°/ Le Tafilalet : Bassin Errachidia-Boudnib-Erfoud	171
2°/ Haut-Atlas de Marrakech	172
III- Origine des Crustacés Péracarides : Biogéographie historique	173
1- Les Amphipodes Metacrangonyctidae	173
2- Les Isopodes	174
a- Les Cirolanides	174
b- Les Stenasellidés : <i>Magniezia</i>	177
c- Les Microparasellidés	177
3- Les Thermosbaenacés	181
Discussion et conclusion générale	184
Annexes	189
Bibliographie	193

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Carte du Maroc indiquant la localisation géographique des zones d'étude.
- Figure 2 : Situation géographique du Tafilalet
- Figure 3 : Carte géologique simplifiée des bassins de l'oued Ziz et de l'oued Rhéris ;
- Figure 4: Coupe du forage type traversant le Cénomaniens de la région d'Errachidia (provenant d'un Rapport Anonyme de la DRH d'Errachidia, 2000)
- Figure 5 : Schéma du filet phréatobiologique utilisé.
- Figure 6 : Schéma de la nasse utilisée au cours de ce travail. En haut, vue latérale de la nasse posée sur le fond du puits; en bas vue arrière de l'entonnoir d'entrée.
- Figure 7 : La pompe Bou-Rouch. À gauche éclaté montrant les différentes parties de l'appareil; à droite schéma de l'appareil et de la sonde crépinée, en place dans le sédiment, d'après PASCALIS, 2006
- Figure 8 : Schéma d'un sondage Karaman-Chappuis d'après DELAMARE DEBOUTTEVILLE (1960)
- Figure 9 : Situation géographique des puits étudiés dans les quartiers nord de la ville de Marrakech et aux environs.
- Figure 10 : Situation géographique des puits étudiés dans la zone minière de Draâ Sfer. M: emplacement de la Mine; P1 à P7 les 7 puits étudiés; la flèche indique le sens de l'écoulement de la nappe.
- Figure 11 : Situation géographique des puits étudiés dans le Tafilalet. A: ensemble des stations de la vallée de l'Oued Ziz; B: détail de la région d'Errachidia.
- Figure 12 et 12 bis : Valeurs moyennes (et écarts-types) des principales variables physico-chimiques de l'eau des puits étudiés dans la ville de Marrakech et au nord de la ville.
- Figure 13 : Spectres de la qualité de l'eau des puits étudiés situés dans la ville de Marrakech et ses environs. Les concentrations des éléments chimiques sont exprimées en mg.L^{-1} et la conductivité électrique (CE) qui est donnée en mS.cm^{-1} .
- Figure 14 : Projection des composantes physicochimiques de l'eau (A) et des stations (B) sur le plan des deux premiers axes de l'analyse en composantes principales (cas des puits situés dans la ville de Marrakech et ses environs). Ce: conductivité électrique; O2: oxygène dissous; NO_3^- : nitrates; NO_2^- : nitrites; NH_4^+ : ammonium; PO_4^{2-} : Orthophosphates;

K+: Potassium; SO₄²⁻: Sulfates; Tac: Titre alcalimétrique complet (total); Ca²⁺: Calcium; Mg²⁺: Magnésium; Cl⁻: Chlorures; CaCO₃: Dureté totale.

Figure 15 : Dendrogramme résultant d'une analyse hiérarchique effectuée sur les résultats de l'analyse en composantes principales des stations étudiées dans la région de Marrakech, décrites par les caractéristiques physico-chimiques de leur eau.

Figure 16 : Projection des composantes physico-chimiques de l'eau (A) et des stations du secteur minier (B) sur le plan factoriel des deux premiers axes (F1 et F2) de l'ACP. CE: conductivité électrique; O₂: Oxygène dissous; K+: Potassium; Na+: Sodium; SO₄: Sulfates; Ca²⁺: Calcium; Mg²⁺: Magnésium; Cl⁻: Chlorures; Cu: Cuivre; Cd: Cadmium; Zn: Zinc; Fe: Fer; Pb: Plomb.

Figure 17 : Dendrogramme obtenu à partir d'une classification hiérarchique des stations, effectuée sur les résultats des analyses en composantes principales d'un tableau descripteurs physicochimiques de l'eau / stations étudiées, dans la région de Draâ Sfer.

Figure 18 et 18 bis : Valeurs moyennes (et écart-types) des principales variables physico-chimiques de l'eau des 14 stations étudiées dans le Tafilalet.

Figure 19 et 19 bis : Spectres illustrant la qualité de l'eau des puits étudiés dans la région d'Errachidia et ses environs.

Figure 20 : Projection, sur les deux premiers axes factoriels de l'ACP, des principaux descripteurs physico-chimiques de l'eau (A) et des stations (B), avec l'individualisation des 5 groupes de stations de la région d'Errachidia.

Figure 21 : Dendrogramme obtenu à partir d'une classification hiérarchique des stations de la région du Tafilalet, effectué sur les résultats d'une analyse en composantes principales du tableau stations / descripteurs physico-chimiques.

Figure 22: Importance relative de l'abondance des différents groupes taxonomiques récoltés (Pourcentages des nombres de taxons récoltés appartenant à chaque groupe).

Figure 23 : Nombre total de taxons récoltés (épigés et hypogés) dans chacune des 14 stations de la région du Tafilalet.

Figure 24 : Projection sur le plan des deux premiers axes factoriels (F1 et F2) de l'ACP, des divers taxons stygobies et épigés récoltés dans la région du Tafilalet. gdsp : Gastéropode sp.; gfm : *Guistia aff. meskiensis*; gms : *Guistia meskiensis* ; gsp : *Guistia sp.* ; ost : Ostracode sp. ; mcat : *Monodella cf. atlantomaroccana* ; typh : *Typhlocirolana nsp.* ; mchr :

Microcharon oubrahimae ; mcr : *Microcerberus remyi* ; mgd : *Magniezia aff. Gardei* ; lon : *Metacrangonyx longicaudatus* ; msp : *Metacrangonyx sp* ; pan : *Metacrangonyx panousei* ; sal : *Salentinella sp.* ; olg : Oligochètes ind. ; pac : *Physa acuta* ; lima: Limacidae ; eycy : *Eucyclops n.sp.* ; trop: *Tropocyclops prasinus*; dia : Diamesinae ; cae : *Caenis sp.* ; eph : *Ephemerella ignita* ; tan : sF. Tanyponidae ; chi : sF. Chironominae ; limo: Limoniidae ; cer : Ceratopogonidae ; dat : Daticidae ; Pot : Potamonthidae.

Figure 25 : Projection des 4 groupes de stations du Tafilalet, tels qu'ils résultent de l'ACP d'un tableau stations/espèces (et de la classification hiérarchique représentée Fig. 26).

Figure 26 : Dendrogramme représentant la classification hiérarchique des stations, réalisée sur les résultats d'une Analyse en Composantes Principales de la composition de la faune totale des stations étudiées dans la région du Tafilalet.

Figure 27: Histogramme représentant le nombre total de taxons récoltés (épigés et hypogés) dans chacune des stations de Marrakech et des environs.

Figure 28 : Projection des puits étudiés dans la ville de Marrakech et ses environs sur le plan des deux premiers axes de l'Analyse en Composantes Principales d'un tableau de données stations / faune.

Figure 29 : Dendrogramme obtenu à partir des résultats de l'Analyse en Composantes Principales (d'un tableau stations / faune) pour les puits étudiés dans la ville de Marrakech et ses environs.

Figure 30 : Projection des principaux taxons stygobies et épigés rencontrés dans les eaux de la nappe de Marrakech, sur le plan des deux premiers axes de l'ACP d'un tableau de données stations / Faune. gg : *Guistia gofasi* ; han : *Heideella. cf. andreae*; anb : *Heideella andreae boulanouari* ; matl : *Monodella atlantomaroccana* ; typh : *Typhlocirolana haouzensis* ; typl : *Typhlocirolana leptura* ; mrd : *Marocolana delamarei* ; mrsp : *Marocolana sp.2* ; mch1 : *Microcharon. sp.1* ; spn : *Metacrangonyx pinicaudatus* ; pau : *Metacrangonyx paurosexualis* ; mmr : *Maghrebidiella maroccana* ; lim : Limacidae ; cyc : Copépodes Cyclopoïdes ; harp : Copépodes Harpacticoïdes ; culx : *Culex sp.* ; hym : Hyménoptère ind. ; culc : sF Culicinae ; tab : Tabanidae ; psy : Psychodidae.

Figure 31 : Histogramme représentant le nombre total de taxons récoltés (épigés et hypogés) dans chacune des stations de la zone minière de Draâ Sfer à l'Ouest de Marrakech.

Figure 32 : Projection du peuplement du site Draâ Sfer sur le plan de deux premiers axes de l'analyse en composantes principales d'un tableau stations/espèces. gg: *Giustia gofasi*, han: *Heideella cf. Andrae*, matl: *Monodella atlantomaroccana*, mrsp: *Marocolana* sp.2, typh: *Typhlocirolana haouzensis*, pau : *Metacrangonyx paurosexualis* spn: *Metacrangonyx spinicaudatus*, olg: Oligochètes, pac: *Physa acuta*, cyc: Copépodes cyclopoïdes, harp: Copépodes harpacticoides, acsp: Acariens, coll: Collemboles, culc: s/F. Culicinae, anp: s/F. Anophelinae, tan: s/F. Tanypodinae et chi: Tr. Chironomini.

Figure 33 : Projection des 7 puits du site de Draâ Sfer sur le plan des deux premiers axes factoriels de l'ACP d'un tableau stations / faune.

Figure 34 : Dendrogramme obtenu à partir des résultats de l'ACP du tableau stations / faune, pour les 7 puits étudiés dans le secteur de Draâ Sfer.

Figure 35 : Gradient décroissant de la qualité des eaux souterraines (= gradient de pollution) de la nappe de Marrakech.

Figure 36: Gradient de la qualité des eaux souterraines (= gradient de pollution) aux abords du site de Draâ Sfer.

Figure 37: Gradient décroissant de la qualité des eaux souterraines (= gradient de pollution) dans la vallée de l'Oued Ziz, aux abords de la ville d'Errachidia.

Figure 38 : Bactériologie de l'eau de quelques puits de Marrakech: nombres moyens d'UFC/ 100 mL, pour les 3 catégories de germes. CT: Coliformes totaux; CF: Coliformes fécaux; et ST: Streptocoquestotaux ou fécaux.

Figure 39 : Situation géographique des puits de la ville d'Errachidia dont la qualité bactériologique a été étudiée au cours de cette étude.

Figure 39 bis : Bactériologie de l'eau des puits d'Errachidia. Nombre moyens d'UFC.100mL⁻¹. CT: Coliformes totaux; CF: Coliformes fécaux; et ST: Streptocoquestotaux ou fécaux.

Figure 40 : Voies de colonisation empruntées par les ancêtres des micro-organismes des nappes phréatiques continentales: A, transition par les eaux de surface; B, transition par les milieux interstitiels littoraux (d'après Boutin et Coineau, 1990).

Figure 41 : Photographies des différentes formes de coquilles des Gastéropodes récoltés dans les puits du Tafilalet (Photographiées par M. Ghamizi, au MHNM).

Figure 42 : Morphologie de quelques appendices caractéristiques de l'espèce *Microcharon oubrahimae* n. sp. A: pléopode 2 femelle; B: pléotelson; C: pléopode 1 mâle; D: détail (partie distale de C); E: pléopode 2 du mâle.

Figure 43 : Morphologie de quelques appendices caractéristiques de l'espèce *Microcharon boutini*. A et B pléopode 1 du mâle; C pléopode 2 et D pléopode 3 du mâle.

Figure 44 : Un des arbres phylogénétiques les plus courts illustrant les relations de parentés probables entre 9 espèces du genre *Microcharon*, ainsi que les représentants de trois out-groups.

Figure 45 : Distribution géographique des différentes espèces du genre *Microcharon* du Maroc. Étoile noire: *Microcharon oubrahimae* n.sp.; carrés noirs: *Microcharon boutini*; triangles noirs: *Microcharon ourikensis* plus les espèces du groupe *messoulii*; doubles carrés, *Microcharon alamae*; étoile blanche *Microcharon* sp.1 ; cercle blanc, *Microcharon* sp.2 ; flèche, *Microcharon marinus*.

Figure 46 : *Typhlocirolana haouzensis* en vue dorsale.

Figure 47 : Habitus de *Marocolana delamarei*, A en volvation, B en vue latérale et C en vue dorsale (d'après Boulanouar *et al.*, 1993).

Figure 48 : Répartition géographique des populations de 4 espèces de *Typhlocirolana* au Maroc (Étoile à 5 branches: *Typhlocirolana haouzensis*; étoile à 8 branches: *Typhlocirolana* sp1 de Tagafait; étoile à 4 branches: *Typhlocirolana* sp.2 du Tafilalet; triangles noirs: *Typhlocirolana leptura*)

Figure 49: Emplacement des 4 populations de *Magniezia* actuellement connues au Maroc: Croix à 4 pointes: *Magniezia gardei*; cercle, triangle et losange noirs: 3 autres populations de *Magniezia* sp.

Figure 50: Carte de répartition géographique des Amphipodes dans les eaux souterraines de la région du Tafilalet.

Figure 51: Phylogramme simplifié représentant les relations phylogénétiques probables entre les principaux groupes de Cirolanides stygobies des genres *Typhlocirolana* (T.) et *Marocolana* (M.) d'après Boutin, (1993a) modifié: T. nsp. (Tafil) représente l'espèce nouvelle découverte dans le Tafilalet; 40, 70 et 90 indiquent en million d'années, l'ancienneté de la colonisation des eaux souterraines continentales par les ancêtres littoraux.

Figure 52 : En haut : limites connues des transgressions marines ayant affecté le Maroc pendant la période du Cénomanién-Turonien, et distribution des espèces du genre *Microcharon* dans le Haut-Atlas et dans le bassin d'Errachidia-Boudnib-Erfoud. En bas, les transgressions marines au Maroc pendant la période du Sénonien et distribution de quelques espèces de Crustacés stygobies thalassoïdes actuels, récoltées dans les eaux souterraines continentales.

Figure 53 : Carte de la région des Jbilet, du Haouz et de la région de Marrakech, indiquant la répartition de *Microcharon boutini* et l'extension des golfes marins de l'Éocène, en pointillés d'après Choubert et Faure-Muret (1962), et hachuré horizontalement d'après Salvan (1986)..

Liste des tableaux

Tableau 1 : Emplacement, caractéristiques et utilisation des puits étudiés dans la région de Marrakech. D, diamètre en m; P, profondeur totale; NP, profondeur moyenne du toit de la nappe ("Niveau piézométrique")

Tableau 2 : Emplacement, caractéristiques et utilisation des puits étudiés dans la région minière Draâ Sfer. D, diamètre en m; P, profondeur totale; NP, profondeur moyenne du toit de la nappe ("Niveau piézométrique")

Tableau 3 : Emplacement, caractéristiques et utilisation des points d'eau étudiées dans la ville d'Errachidia et ses environs. D, diamètre en m; P, profondeur totale; NP, profondeur moyenne du toit de la nappe ("Niveau piézométrique")

Tableau 4 : Contributions des facteurs physico-chimiques aux deux premiers axes factoriels (cas des puits de la ville de Marrakech et ses environs). O₂ : oxygène dissous ; CE : conductivité électrique ; NO₃⁻ : nitrates ; NO₂⁻ : nitrites ; NH₄⁺ : ammonium ; PO₄³⁻ : Orthophosphates ; CaCO₃ : dureté ; K⁺ : potassium ; Na⁺ : sodium ; SO₄ : sulfates ; TAC : titre alcalimétrique complet ; Ca²⁺ : calcium ; Mg²⁺ : magnésium et Cl⁻ : chlorures.

Tableau 5 : Contributions des facteurs physico-chimiques aux deux premiers axes factoriels de l'analyse (cas des puits de la zone minière de Draâ Sfer). CE : conductivité électrique ; O₂ : oxygène dissous ; t° : température ; K⁺ : potassium ; Na⁺ : sodium ; SO₄²⁻ : sulfates;

Ca²⁺ : calcium ; Mg ²⁺ : magnésium et Cl⁻ : chlorures; Cd : cadmium ; Fe : fer; Cu : cuivre ; Zn : zinc; Pb : plomb.

Tableau 6 : Contribution des principaux caractères physico-chimiques de l'eau des puits d'Errachidia à la formation des deux premiers axes de l'ACP. O₂ : oxygène dissous ; CE : conductivité électrique ; NO₃⁻ : nitrates ; NO₂⁻ : nitrites ; NH₄⁺ : ammonium ; PO₄³⁻ : Orthophosphates ; CaCO₃ : dureté ; K⁺ : potassium ; Na⁺ : sodium ; SO₄²⁻ : sulfates ; TAC : titre alcalimétrique complet ; Ca²⁺ : calcium ; Mg ²⁺ : magnésium et Cl⁻ : chlorures.

Tableau 7 : Inventaire des taxons épigés et souterrains récoltés dans l'eau des puits du Tafilalet et de Marrakech.

Tableau 8 : Inventaire des taxons stygobies récoltés dans l'eau des puits de la région d'Errachidia.

Tableau 9 : Inventaire des taxons non stygobies récoltés dans l'eau des puits de la ville d'Errachidia et ses environs (Tafilalet).

Tableau 10 : Contribution des taxons à la formation des deux premiers axes de l'ACP (cas des stations étudiées dans le Tafilalet).

Tableau 11 : Liste des taxons stygobies récoltés dans les 11 stations du nord de la ville de Marrakech.

Tableau 12 : Inventaire des taxons épigés capturés dans l'eau des puits de la ville de Marrakech et ses environs. (T), espèces terrestres rencontrées d'une façon accidentelle dans l'eau des puits.

Tableau 13 : Contribution des taxons récoltés dans les puits de Marrakech, à la formation des deux premiers axes de l'ACP du tableau stations / espèces. gg : *Guistia gofasi* ; han : *Heideella cf andreae*; anb : *Heideella andreae boulanouari* ; matl : *Monodella atlantomaroccana* ; typh : *Typhlocirolana haouzensis* ; typl : *Typhlocirolana leptura* ; mrd : *Marocolana delamarei* ; mrsp : *Marocolana sp.2* ; mch1 : *Microcharon. sp.1* ; spn : *Metacrangonyx pinicaudatus* ; pau : *Metacrangonyx paurosexualis* ; mmr : *Magrebidieilla maroccana* ; lim : Limacidae ; afr : *Afrocylops gibsoni* Cyclopoïdes ; ther : *Thermocyclops oblongatus*; culx : *Culex sp.* ; hym : Hymenoptère ind. ; culc : sF Culicinae ; tab : Tabanidae ; psy : Psychodidae.

Tableau 14 : Inventaire faunistique (comportant les stygobies et les formes épigées) des taxons récoltés dans les puits du secteur de Draâ Sfer.

Tableau 15 : Participation des taxons récoltés à la formation des deux premiers axes factoriels (cas des puits de la zone minière de Draâ Sfer). gg : *Giustia gofasi*, han : *Heideella cf. Andrae*, matl : *Monodella atlantomaroccana*, mrsp : *Marocolana sp.2*, typh : *Typhlocirolana haouzensis*, pau : *Metacrangonyx paurosexualis* spn : *Metacrangonyx spinicaudatus*, olg : Oligochètes, par : *Physa acuta*, ther : *Thermocyclops oblongatus*, parp : *Paracyclops chiltoni*, coll : Collemboles, culc: s/F. Culicinae, anp: s/F. Anophelinae, tan: s/F. Tanypodinae et chi: Tr. Chironomini ; ansp: Anophelinae sp.

Tableau 16: Proposition de regroupement des puits établi à partir de la composition faunistique et de la qualité de l'eau des puits au nord de la ville de Marrakech et ses environs.

Tableau 17: Proposition de regroupement des puits établi à partir de la composition faunistique et de la qualité de l'eau des puits situés sur le site minier de Draâ Sfer au nord-ouest de Marrakech.

Tableau 18: Proposition de regroupements de puits résultant de l'analyse de la composition faunistique et de la qualité de l'eau des stations étudiées dans la ville d'Errachidia et ses environs.

Tableau 19 : Principaux caractères morphologiques distinctifs entre les deux espèces de Cirolanidés, *Marocolana delamarei* et *Marocolana sp.*, espèce encore inédite.

Listes des annexes

Annexe 1 : Résultats des analyses bactériologiques de l'eau des puits prospectés dans la ville de Marrakech et ses environs.

Annexe 2 : Résultats des analyses bactériologiques de l'eau des puits prospectés dans la ville d'Errachidia.

Annexe 3 : Valeurs moyennes (et écart-types) des résultats des analyses physicochimiques des eaux de la nappe d'Errachidia et ses environs.

Annexe 4 : Valeurs moyennes des résultats des analyses physicochimiques des eaux de la nappe de Marrakech et ses environs.

Annexe 5 : Caractéristiques physico-chimiques de l'eau des puits étudiés dans la région de Draâ Sfer (valeurs moyennes des paramètres et écarts-types).

Introduction

INTRODUCTION

Les premières études suivies, consacrées à la faune aquatique souterraine du Maroc ont été effectuées dans la région de Marrakech (BOUTIN et BOULANOUAR, 1983 et 1984 ; BOUTIN, 1984 ; MESSOULI, 1984; BOULANOUAR 1986) puis dans les eaux des puits de l'Anti-Atlas dans les régions de Tiznit (BOULAL, 1984), et Guelmim (BOUTIN et IDBENNACER, 1989; IDBENNACER, 1990), et également d'Essaouira (BEN ABBAS TAARJI, 1986). Un très grand nombre de régions du Maroc ont donc été prospectées et, on dénombre aujourd'hui des dizaines d'espèces aquatiques souterraines à caractère endémique.

Dans un premier temps, les recherches stygobiologiques conduites au Maroc avaient comme objet principal la mise au point des techniques d'échantillonnage de la faune les plus appropriées, puis la description morphologique des espèces et leurs relations avec la qualité des eaux (BOUTIN et BOULANOUAR 1983 ; MESSOULI, 1988 ; YACOUBI-KHEBIZA, 1990). Ces recherches ont montré que la richesse de la faune stygobie était très variable d'une région à l'autre, d'un puits à l'autre, et cela même en considérant des puits séparés par des distances de l'ordre du kilomètre ou même parfois de quelques centaines de mètres seulement (BOUTIN *et al.*, 1996). Il est apparu que la richesse spécifique de cette faune dépend en grande partie de la distance entre la station étudiée et les sources superficielles de pollution et aussi de la qualité de la protection des puits. Cela a conduit à la recherche de "tests" simples en vue de caractériser la qualité de l'eau des puits, en considérant à la fois la richesse spécifique globale ainsi que celle des espèces stygobies (BOUTIN, 1994 ; FAKHER EL ABIARI, 1999). Ces tests ont permis par ailleurs la classification de certaines espèces souterraines en fonction de leur sensibilité vis-à-vis des pollutions organiques et minérales. Une telle classification a permis par la suite d'évaluer l'intensité des pollutions sur les écosystèmes aquatiques souterrains. Les résultats de ces études ont montré que la faune stygobie peut être considérée comme un outil relativement efficace en vue de la détection de la pollution organique (BOULANOUAR, 1995) et minérale (EL GHARMALI, 2005 ; EL ADNANI *et al.*, 2005 et 2007).

Par la suite, les études de la faune stygobie se sont orientées vers une recherche des origines de cette faune et vers une tentative d'explication des distributions observées à plus grande échelle (BOUTIN, 1997 ; BOUTIN et COINEAU, 1990). Enfin ces recherches permettent d'aborder certains aspects de la biogéographie historique des groupes stygobies et quelquefois (BOUTIN, 1993b et 1994a) les implications paléogéographiques de la présence de certaines espèces stygobies dans une région particulière. Finalement une approche des relations interspécifiques et de l'évolution

au sein d'un genre ou d'une famille pourra être abordée non seulement à partir de l'étude comparative de la morphologie des espèces, mais aussi à partir de comparaisons génétiques (BOUTIN 1993a et b, BARATTI *et al.*, 1999 et 2004).

Cependant il faut souligner que la connaissance de la biodiversité des espèces stygobies dans chaque région reste à la base de toutes ces recherches, quelles qu'en soient les finalités.

Notre travail vient, compléter les recherches déjà réalisées dans ce domaine, en s'intéressant à la région du Tafilalet (Sud-Est du Maroc) dont la stygofaune était encore grandement inconnue.

Cette étude vise, en conséquence et dans un premier temps, à dresser une liste aussi complète que possible de la faune stygobie de la région. Des centaines de stations (puits, sources et sous-écoulement) ont donc été prospectées à l'occasion de plusieurs missions (en 2004, 2005, 2006 et 2007), dans les bassins versants du Ziz, du Guir et de Rheris, qui sont les trois cours d'eau principaux de la région du Tafilalet.

Un suivi pendant deux années, de la qualité physicochimique et bactériologique ainsi que du peuplement animal a été effectué. Les stations ont été choisies, dans la vallée du Ziz, de l'amont vers l'aval hydraulique de la ville d'Errachidia, ce qui nous a permis de mettre en évidence l'évolution de la qualité des eaux souterraines au voisinage de la ville, ainsi que de déterminer l'impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux des nappes de la vallée.

La plaine du Tafilalet, située au sud-est du Maroc, occupe une superficie relativement importante du pays; elle est drainée par trois oueds à régime temporaire. Il s'agit de l'oued Ziz au centre, l'oued Guir à l'est et de l'Oued Rheris à l'ouest. Le climat de la région est de type saharien, caractérisé par l'aridité et la rareté des précipitations. En effet les précipitations ne dépassent pas 120 mm.an^{-1} , l'évaporation et l'écart thermique journalier et saisonnier sont toujours très élevés dans cette région. Sous ces conditions climatiques, sévères et défavorables, vit une population humaine estimée à 700 000 habitants, sur le territoire de la province d'Errachidia (EL RHAFARI et ZAID, 2005). Cette population est groupée, pour l'essentiel, dans les vallées et les oasis. Sa stabilité est assurée par l'existence des eaux souterraines, qui constituent la seule ressource en eau pendant les périodes d'étiage, aussi bien pour les besoins de l'agriculture que pour l'alimentation en eau potable des populations.

Les études sur la faune aquatique souterraine du Tafilalet, sont très rares, elles sont limitées à quelques rares campagnes de prospection isolées (MAGNIEZ, 1978) et à l'étude faite par BENAOUZ (1983) près de Goulmima mais **aucune donnée sur la faune souterraine n'est**

disponible pour les eaux d'Errachidia. C'est dans ce contexte que nous avons engagé depuis le début de l'année 2004, une étude plus approfondie de la biodiversité et de la qualité des eaux souterraines sur l'ensemble du Tafilalet.

Nous nous sommes intéressés aussi à l'étude de la qualité et de la biodiversité des eaux souterraines actuelles de la nappe de la région de la ville de Marrakech afin d'évaluer comparativement la qualité et la biodiversité de la nappe de cette région et surtout d'actualiser les données déjà anciennes, collectées il y a plus de 10 ans (BOULANOUAR, 1995). Notre travail visait à déceler les variations éventuelles de la qualité de l'eau et éventuellement de la composition de la faune présente dans ces puits, à la suite de la modification d'un des émissaires principaux des eaux usées de la ville de Marrakech, en rapport avec l'urbanisation récente du quartier nord, et de l'élimination du bassin expérimental de lagunage des eaux usées.

Nous avons également mis en évidence l'impact des activités minières sur les eaux de la nappe du Haouz. Un suivi de la qualité et de la biodiversité de la faune aquatique souterraines a été réalisée de l'amont à l'aval hydraulique de la mine Draâ Sfer, au nord-ouest de Marrakech et les résultats de cette étude sont également présentés dans le présent mémoire.

La comparaison des peuplements aquatiques souterrains de part et d'autre du Haut-Atlas, dans le Tafilalet et dans le Haouz, nous a permis de tirer des informations très intéressantes du point de vue de la biogéographie de plusieurs taxons. L'utilisation de la faune stygobie comme indicatrice de la qualité des eaux souterraines nous a permis par ailleurs d'étudier quelques cas, notamment celui où des activités minières ont un impact net sur la qualité de l'eau des nappes phréatiques.

Le présent mémoire est organisé comme suit :

- Après une présentation du contexte scientifique général centré sur l'intérêt de la faune aquatique souterraine dans l'évaluation de la qualité des eaux, nous présentons dans la première partie de ce travail un très bref résumé d'un ensemble de données disponibles sur le milieu souterrain, les eaux et la faune aquatique souterraine en général ainsi que quelques données statistiques concernant le Maroc en particulier.

Ensuite sera présentée la zone d'étude et les matériel et méthodes utilisés pendant ce travail. Un aperçu géographique et géologique des zones étudiées a été détaillé dans le premier volet de cette partie. Le deuxième volet traite les différentes méthodes d'échantillonnage et d'analyses réalisées, soit sur le terrain soit au laboratoire.

- La seconde partie sera consacrée aux caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques des eaux des deux régions et à la diversité de la faune rencontrée dans les eaux souterraines. Un inventaire faunistique global sera exposé, discuté et comparé entre les deux régions et avec d'autres régions déjà étudiées. Les corrélations entre la qualité des eaux et la biodiversité seront examinées. Cela nous a permis d'en tirer des conclusions importantes qui sont exposées à la fin de cette partie.

- La troisième partie, qui est la dernière de ce mémoire est consacrée aux données biogéographiques sur les principaux éléments de la faune stygobie. Des hypothèses sur l'installation, l'évolution et la spéciation des espèces stygobies sont proposées et discutées et cela à la lumière des études déjà réalisées dans ce domaine. Nous avons terminé ce mémoire par des conclusions et des perspectives

1^{ère} partie

**GÉNÉRALITÉS, MILIEU ET
MÉTHODES D'ÉTUDE**

GÉNÉRALITÉS

1°/ Les eaux souterraines en général

Les eaux souterraines représentent au total environ 97% des eaux douces continentales liquides (BOSCA, 2002) et la présence l'Homme ainsi que ses possibilités de survie dépendent dans plusieurs régions du globe de l'existence et de la qualité de cette ressource limitée et fragile: 75 à 90% de la population mondiale utilise une eau d'origine souterraine. C'est dire l'importance de l'étude des nappes souterraines dans toutes leurs composantes en vue d'une meilleure connaissance de ces écosystèmes et d'introduire des concepts scientifiques nouveaux en matière de gestion, d'aménagement, de surveillance, de protection et de conservation (DANIELOPOL *et al.*, 2004).

Composante essentielle du cycle de l'eau (CASTANY, 1998), l'eau souterraine constitue la dimension verticale des hydrosystèmes fluviaux (AMORAS et PETTS, 1993); elles assurent de nombreuses et importantes fonctions hydrologiques (ex. régulation des régimes hydrologiques des cours d'eau) et écologiques (ex. échange de matière, d'énergies et d'organismes) dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques (GIBERT *et al.*, 1994, BRUNKE et GOUSER, 1997, WARD, 1998 ; MALARD *et al.*, 2003), offrant de plus des propriétés de qualité et de protection souvent supérieur à celles des eaux de surface qui sont généralement plus polluées, les eaux souterraines présentent une importante valeur socioéconomique en tant que ressource naturelle inestimable pour les besoins agricoles, industriels et domestiques dans les pays développés ou en voie de développement (DANIELOPOL *et al.*, 2003 ; GIBERT *et al.*, 2004).

2°/ Les eaux souterraines du Maroc

L'eau souterraine constituera pour le Maroc dans les prochaines décennies, un des éléments clé de son développement. L'inquiétude est pour l'essentiel due à l'accroissement démographique, aux contrastes et surtout aux changements climatiques ainsi qu'aux besoins en eau croissants induits par le développement démographique, industriel et agricole. Désormais l'eau devient un enjeu économique, social et donc politique, dont le contrôle et la bonne gestion, à travers des études spécialisées, s'avèrent utiles et même nécessaires.

Au Maroc, les eaux souterraines constituent une part très importante du patrimoine hydraulique. Elles présentent, par rapport aux eaux de surface des avantages certains sur le plan de la couverture des besoins. On dénombre 32 nappes profondes et plus de 46 nappes

superficielles et les ressources en eau souterraines mobilisables sont estimées à 4 milliards de m^3 , réparties inégalement dans les différentes régions du royaume (MARGAT et ZEBIDI, 1991).

À Marrakech, les eaux souterraines jouent un rôle important dans le développement de l'irrigation et l'approvisionnement en eau potable et industrielle, que se soit pour les centres urbains ou ruraux. Le volume total exploité à partir de la nappe du Haouz est estimé à $350 Mm^3.an^{-1}$, dont $30 Mm^3.an^{-1}$ pour l'alimentation en eau potable et $320 Mm^3.an^{-1}$ pour l'irrigation (SAHILI, 1996).

Dans le Tafilalet, les eaux souterraines sont estimées à $200 Mm^3$ dont $120 Mm^3$ sont mobilisées annuellement à partir des nappes moyennement profondes (ANONYME, 2000).

Elles sont exploitées au moyen des stations de pompage, des puits et des khetaras. Du point de vue hydrologique, il existe quatre niveaux aquifères superficiels à moyennement profonds :

Le système des nappes phréatiques des bassins quaternaires qui est en relation étroite avec les sous-écoulements ; les nappes calcaires du Turonien, constituant le niveau aquifère principal ; les nappes intermédiaires du Cénomaniennes composées des eaux des horizons continentaux rouges et gréseux et les nappes profonde de l'Infra-cénomaniennes, de Aïn El Atti.

3°/ Classification du monde aquatique souterrain

Du point de vue écologique, le milieu souterrain aquatique a été divisé en deux grandes catégories fondées sur la nature des terrains dans lesquels les eaux circulent. On peut alors, avec ROUCH (1970), distinguer les terrains perméables en petit et les terrains perméables en grand.

a/ Terrains perméables en petit

Ces terrains poreux sont représentés essentiellement par les sables et les graviers dont les espaces intergranulaires contiennent de l'eau ; ils sont caractérisés par une perméabilité d'interstices. Dans le domaine continental, le milieu interstitiel peut être séparé en trois grands ensembles suivant la nature de l'aquifère : les nappes phréatiques, les milieux hyporhéiques et le psammon. Il convient d'ajouter à ces différents milieux, le milieu hypothelminorhéique (MESTROV, 1962).

◆ Nappe phréatique

En 1987, DAUBRÉE a introduit l'expression de nappe phréatique pour désigner la nappe d'eau la plus proche de la surface du sol, celle qui alimente les puits ordinaires ou tubés. Elle se trouve partout dans les vallées et les plaines alluviales.

Ces nappes sont dites libres, si elles reçoivent directement, par infiltration, des eaux de surface. Elles sont captives, si les aquifères qui les contiennent sont emprisonnées entre des couches imperméables.

◆ Milieu hyporhéique

La notion de biotope hyporhéique crée par ORGHIDAN (1955) désigne le milieu limnique existant dans les interstices des alluvions le long d'un cours d'eau, au voisinage immédiat du cours d'eau superficiel ou dans les alluvions des cours d'eau à sec qui conservent, souvent, un cours d'eau souterrain qui coule plus lentement. On peut dire plus simplement qu'il s'agit du sous-écoulement des cours d'eau.

◆ Milieu hypothelminorhéique

Ce milieu interstitiel correspond aux petites nappes superficielles suspendues, en montagne, sous des sols peu profonds, au contact d'une roche mère imperméable.

b/ Terrains perméables en grand

Caractérisé par une perméabilité des fissures, ils sont représentés principalement par le domaine karstique. Ce milieu est défini comme étant constitué généralement de roches carbonatées compactes et solubles dans lesquels apparaissent des formes d'érosion de surface ou exokarst (grottes, gouffres, rivières souterraines...) et des formes souterraines ou endokarst (fissures et fentes et conduits créés dans les roches calcaires par la circulation de l'eau).

4°/ Diversité biologique des eaux souterraines

Les eaux souterraines ne constituent pas seulement un vaste réservoir d'eau. Elles sont également le réservoir d'une diversité biologique originale composée d'organismes dont la plupart n'ont pas d'équivalent dans les écosystèmes aquatiques de surface et dont certaines lignées sont anciennes de plusieurs millions d'années (ROUCH et DANIELOPOL, 1987, DANIELOPOL *et al.*, 2000 ; HUMPHREYS, 2000), parfois de plusieurs dizaines voire centaines de millions d'années (BOUTIN, 1993). En effet tous les grands phylums du règne animal, depuis les Protozoaires jusqu'aux Vertébrés, en passant par les divers groupes de vers, de Mollusques et surtout d'Arthropodes, ont des représentants inféodés aux eaux souterraines :

c'est **la faune stygobie**. Cette faune peut être échantillonnée par différentes techniques adaptées, au niveau des puits ou des forages, des sources, et des alluvions des cours d'eau et bien sûr des grottes.

Ces écosystèmes abritent une faune aquatique extrêmement diversifiée, et qui renferme de nombreuses espèces à caractère endémique dont l'origine est souvent en relation avec l'histoire géologique de la région et les possibilités énormes de colonisation offertes par le milieu souterrain (JUBERTHIE, 1983). Plusieurs scénarios ont été formulés pour expliquer l'installation de cette faune (BOUTIN et COINEAU, 1990 ; COINEAU et BOUTIN, 1992). Autant dire qu'il s'agit de réels témoins vivant de l'histoire biologique et géologique de la planète qui constituent un patrimoine inestimable (ROUCH et DANIELOPOL, 1987 ; MALARD *et al.*, 1997a).

5°/ Caractéristiques et rôle de la faune aquatique souterraine

Les eaux souterraines hébergent de nombreux animaux aquatiques; ils y vivent, s'y nourrissent, y grandissent et meurent dans un environnement privé de l'abondance des sources d'énergies élémentaires présentes en surface. Bien que ce milieu se distingue par une obscurité permanente et par la rareté des ressources nutritives, les formes animales qui se développent, sont presque aussi diversifiées que celles des eaux de surface (CREUZÉ DES CHÂTELLIERS et DOLE-OLIVIER, 1991). La majorité des embranchements du règne animal sont présents dans ce milieu.

Par leur place dans les aquifères, les animaux souterrains interviennent sur la qualité des eaux. En agissant sur la dégradation de la matière organique véhiculée par l'eau, en respirant et en excréant, ils agissent aussi sur la composition physico-chimique de l'eau. Ce sont des descripteurs de la structure et du fonctionnement des aquifères (CREUZÉ DES CHÂTELLIERS et DOLE-OLIVIER, 1991).

La faune souterraine est capable de métaboliser et transformer certains polluants en produits non toxiques (SINTON, 1984). Ainsi, cet auteur estime que les Crustacés hypogés qui se trouvent dans un puits d'une station d'épuration pourraient recycler jusqu'à 20% de la matière organique provenant des eaux usées via les eaux souterraines.

MILIEU D'ÉTUDE

I – La plaine du Haouz et la région de Marrakech

1°/ - Situation géographique

Dans la plaine du Haouz, qui s'étend entre la chaîne du Haut-Atlas au Sud et celle des Jbilet au Nord, deux secteurs ont été considérés dans le cadre de cette étude, celui de la région de Marrakech et celui de la zone minière d'El Mrabtine encore nommée Drâa Sfer. Le choix des deux secteurs a pour but de connaître d'une part l'impact de drainage des eaux usées de la ville de Marrakech, précisément dans la zone d'El Azouzia, et d'autre part d'évaluer l'impact des activités minières sur les écosystèmes aquatiques souterraines dans la région de Draâ Sfer.

À Marrakech, la zone étudiée se situe dans la partie nord de la ville et dans ses environs, au niveau de la rencontre de la nappe des Jbilet et celle du Haouz. Ce dernier est un bassin de sédimentation modérément subsident, c'est une vaste plaine de 6 000 km² de superficie, située (figure 1 et 45) au centre du Maroc, entre la chaîne du Haut-Atlas au sud, les reliefs primaires des Jbilet au nord, les plateaux d'Essaouira-Chichaoua à l'ouest et les premiers versants du Moyen-Atlas à l'est.

La plaine est traversée du sud vers le nord par plusieurs oueds drainant les reliefs du Haut-Atlas et rejoignent l'oued Tensift (collecteur principal des eaux superficielles du bassin) au Nord, dont l'écoulement se fait de l'est vers l'ouest avant de rejoindre l'océan atlantique.

La zone El Mrabtine (Drâa Sfer) est située à environ 10 km au nord-ouest de la ville de Marrakech, au Nord de la route secondaire Marrakech-Souihla. Elle est bordée par la route N° 9 Marrakech-Safi au Nord-Est et au Nord par l'Oued Tensift. Au nord-ouest de cette zone se trouve la mine de Drâa Sfar, sur la rive gauche de Oued Tensift cette zone fait approximativement 2 km d'Est en Ouest sur 700 m du Sud au Nord, selon HIBTI (2001). Le site minier en question est une exploitation de minerais polymétalliques principalement de Zinc, de Cuivre et de Plomb, dont les résidus sont répandus et abandonnés à l'air libre. Le gisement sulfuré de la mine est encaissé dans la série du Jbel Sarhlef qui constitue à ce niveau la partie centrale des Jbilet dont les terrains sont d'âge viséen-namurien (HIBTI, 2001).

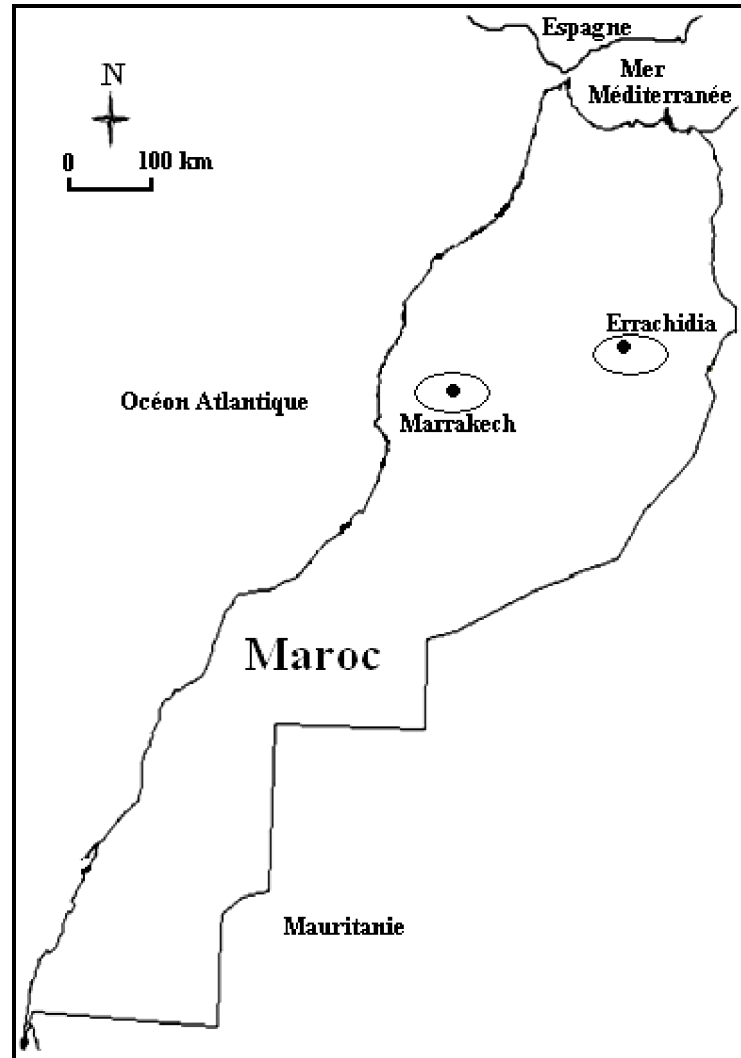


Figure 1 : Carte du Maroc indiquant la localisation géographique des zones d'étude.

2°/ - Données climatiques régionales

Les facteurs climatiques sont intéressants à étudier, dans la mesure où ils déterminent les fluctuations du niveau piézométrique et les variations des concentrations des éléments chimiques dissous dans les eaux de la nappe phréatique.

Le Haouz est soumis à un climat méditerranéen aride et chaud, caractérisé par une pluviosité faible et variable, une température moyenne élevée, accusant de forts écarts mensuels et journaliers, une faible hygrométrie et une forte évaporation (BOUTAYEB, 1988). Il reste soumis aux influences de l'Océan Atlantique et à celle des régions très élevées du Haut-Atlas. La moyenne annuelle des précipitations à Marrakech, calculée sur la période 1970-2002, est de 237 mm (station climatologique des services des eaux et forêts). Leur répartition annuelle oppose une saison pluvieuse d'octobre à avril-mai, avec des maxima en novembre-décembre et mars-avril, à une période de sécheresse quasi absolue, en été, accentuée par des vents desséchants (chergui, sirocco).

L'évaporation moyenne annuelle est d'environ 2 300 mm, les valeurs moyennes mensuelles évoluant d'environ 90 mm de décembre à février à près de 340 mm en juillet-août. Le facteur thermique revêt une importance considérable en raison de l'effet des températures, surtout des températures maximales, sur les phénomènes d'évaporation dont dépendent les remontées des sels et en particulier de chlorure de sodium provenant de la nappe phréatique ou des couches géologiques profondes. Les températures, très élevées en été, peuvent être cependant suffisamment faibles en hiver pour contraindre les cycles végétatifs. La moyenne annuelle est de 19,9°C (allant de 11,58°C de moyenne au mois de janvier, à 28,9°C en juillet); la moyenne des températures minimales mensuelles est de 12,8°C (3,9°C en janvier et 19,6°C en août) et les températures mensuelles maximale sont de 27,8°C en moyenne (19,1°C en janvier et 38°C en juillet).

3°/ - Données géologiques

a- Zone des Jbilet

La zone d'étude est constituée de deux formations géologiques principales :

- *une couverture post-paléozoïque* : Constituée de deux ensembles sédimentaires d'âge quaternaire : Un ensemble basal formé essentiellement de conglomérats et d'une croûte calcaire et d'un ensemble sommital, formé d'alluvions récentes: dépôts limoneux dans les plaines et terrasses de galets dans les Oueds (HAKKOU, 2001).

- un socle paléozoïque, d'âge viséen supérieur ou namurien, dit de Sarhlef, qui occupe la partie centrale du secteur; ce dernier est constitué de schistes. Ces schistes, comportent des bancs lenticulaires de grés et de calcaires, prenant par endroit l'aspect d'un flysch à petit bancs gréseux.

b - Zone de Marrakech

- Généralités

La plaine du Haouz correspond au territoire compris entre le Haut-Atlas au Sud et les Jbilet (chaîne de collines alignées d'Est en Ouest au Nord de Marrakech), la bordure du plateau Tekna à l'Ouest, et la Tessaout à l'Est. Elle est formée sur un substratum paléozoïque essentiellement schisteux et imperméable, elle est recouverte d'un dépôt alluvial graveleux d'âge quaternaire. Ce dépôt est le fruit de l'érosion des roches de l'Atlas, consolidé par une matrice hétérogène et souvent argileuse.

Dans son ensemble, le Haut-Atlas central présente des terrains anciens qui dominent les autres formations (Principalement le Cambro-Ordovicien et le Silurien). Tous les étages de la série géologique, du primaire au quaternaire sont présents.

La tectonique hercynienne est prédominante dans le socle qui est formé de roches métamorphiques éruptives et sédimentaires. La chaîne elle-même s'est formée, par étapes pendant le cycle alpin qui, au Maroc, a commencé à l'Éocène, avec un maximum orogénique récent, à la fin du Tertiaire.

L'histoire géologique des bordures du Haut-Atlas et notamment de la plaine du Haouz est donc liée à l'orogénèse Alpine. Ce bassin a joué au Tertiaire et au Quaternaire le rôle d'une avant fosse d'origine tectonique qui a été progressivement comblée par les matériaux provenant de l'érosion de la chaîne atlasique en formation, alors que sa subsidence était favorisée par le jeu de deux grands accidents dont le premier se situe au contact direct de la plaine et le second est une flexure (la flexure d'Assoufid), d'orientation SW-NE (ROCH, 1939). Dans leur cours supérieur, les oueds coulent d'abord sur des roches éruptives et métamorphiques. Le sens d'écoulement est déterminé par les cassures du socle et la pente de la surface topographique du piémont de l'Atlas.

- Stratigraphie

Les eaux météoriques, au cours de leur infiltration vers la nappe phréatique traversent des couches géologiques très différentes. L'origine et l'évolution des crustacés souterrains sont

liées, nous le verrons, à la paléogéographie de la région. Il est donc intéressant de donner un bref aperçu sur la géologie de la zone d'étude.

Précambrien

Il forme l'axe de l'Atlas de Marrakech (BOUTAYEB, 1988) ; il est constitué de formations éruptives (granites et rhyolites....) et sédimentaires, conglomérats, schistes, quartzites ... (MOUKHCHANE, 1983).

Paléozoïque

Il est essentiellement sédimentaire ou métamorphique, formé de pélites, d'argiles, de schistes, de grès et de calcaires. Tous ces terrains ont été plissés, schistosés et métamorphisés par l'orogénèse hercynienne.

Mésozoïque

Le Trias est souvent en continuité avec le Permien, il constitue un ensemble Permo-Triasique, formé de séries argilo-salifères et des grès rouges avec des coulées basaltiques. Le Permo-Trias est très développé dans la vallée de l'Ourika, et celle de l'Assif El Mal, et dans les dépressions de Ouirgane et de Talat N'Yacoub.

Le Jurassique est très développé à l'est de Aït Ourir ou il comporte un Lias inférieur silto-argileux et un Lias moyen constitué de bancs de calcaire dolomitique (FERRANDINI et LAMAREC, 1982).

Le Crétacé inférieur est représenté dans la région d'Amizmiz et de l'Assif El Mal par une épaisse série rouge de 75 m. Dans le secteur du Zat, il constitue un bon repère morphologique, car il est formé de calcaire à patine noirâtre, très perforés à la base.

Le Cénomano-Turonien forme des falaises de calcaire dolomitique épaisses reposant sur une série d'argiles et de grès. Il s'est déposé pendant une période de transgression très importante de la mer qui a joué ensuite un rôle important dans la colonisation des nappes phréatiques par les crustacés marins pendant la régression terminale (BOUTIN et COINEAU, 1990 ; COINEAU et BOUTIN, 1992 ; BOUTIN, 1993 ; MESSOULI 1994 ; YACOUBI-KHEBIZA, 1996).

Le Sénonien qui est formé principalement de marnes grises contenant des intercalations de calcaires dolomitiques, est discordant et transgressif sur le Cénomano-Turonien. Le Cénozoïque est représenté par des faciès qui varient peu de l'Ouest à l'Est ; il s'agit généralement de formations calcaires phosphatées avec des intercalations gréseuses ou marneuses.

Le Quaternaire est constitué par des cailloutis, graviers et limons qui constituent notamment des terrasses le long des cours d'eau.

4°/ - Ressources en eau

a) Les eaux de surface

Les ressources en eau de surface sont limitées et caractérisées par une irrégularité spatiale et temporelle. Les précipitations annuelles varient de 800 mm en montagne à 190 mm dans la plaine. Le réseau hydrographique de la plaine du Haouz est constitué par un ensemble d'oueds dont les principaux sont, d'Est en Ouest, le Rdat, l'Oued Zat, l'Oued Ourika, l'Oued Issil, la Reraya, l'Oued N'Fis et l'Oued Amizmiz, enfin l'Assif El Mal, qui descendent du Haut-Atlas au sud et se jettent dans le Tensift au Nord. La salinité de ces Oueds est élevée ; elle est en rapport avec la nature des bassins versants salifères permo-triasiques ; elle est également fonction de la saison, avec un maximum à l'étiage d'été, puis un autre en automne, lorsque les premières pluies lessivent, sur le sol, les encroûtements salins. Elle décroît enfin en hiver, du fait des crues (MOUKHCHANE, 1983).

Les apports moyens annuels drainés sont évalués à près de $877,5 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$. En outre, le bassin du Tensift bénéficie maintenant d'un transfert de 300 Mm^3 à partir du bassin de l'Oum-Er-Rbia à travers le canal de Rocate dont 40 Mm^3 sont utilisés pour l'alimentation en eau potable de la ville de Marrakech et 260 Mm^3 pour l'irrigation du périmètre du Haouz central.

b) Les eaux souterraines

Le principal réservoir d'eau souterraine du bassin du Haouz est l'aquifère constitué par les dépôts alluvionnaires du Plio-quaternaire. L'ensemble repose sur un substratum imperméable constitué essentiellement par des argiles et marnes du Miocène. Il n'existe pas de nappes profondes dans le Haouz; seules les formations néogènes et quaternaires renferment une nappe phréatique importante et généralisée. La tranche utile de la nappe, dépassant rarement une quarantaine de mètres, est hétérogène. La profondeur du toit de la nappe a tendance à être d'autant plus grande que l'altitude du terrain naturel est plus élevée : de plus de 60 m en certains points de la lisière sud, elle décroît jusqu'à moins de 10 m sur la lisière nord voir beaucoup moins. A proximité de l'Oued Tensift cette nappe affleure. Les eaux provenant de cette nappe servent en partie pour l'alimentation en eau potable de la ville de Marrakech et des autres centres avoisinants (environ $400 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$), pour l'irrigation traditionnelle et pour l'irrigation de quelques périmètres agricoles. Les prélèvements de la nappe sont estimés à environ 400 millions de $\text{Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ (SINAN *et al.*, 2003).

L'écoulement général de la nappe se fait du sud (bordure atlasique) vers le Nord-Nord ouest (l'Oued Tensift), avec un fort gradient hydraulique (1,5 à 2%) au niveau de la limite sud de la nappe. La recharge de la nappe se fait essentiellement à partir de l'infiltration des eaux superficielles (au niveau du lit des cours d'eau atlasiques) et à partir du retour des eaux d'irrigation au niveau des périmètres irrigués (63% du volume total de l'alimentation). L'infiltration directe des précipitations représente un apport négligeable à la nappe phréatique (BERNERT et PROST, 1975 ; LYAKHLOUFI, 2001).

La productivité de la nappe varie entre moins de $0,5 \text{ L.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$ et plus de $5 \text{ L.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$. Les secteurs les plus productifs de la nappe ($Q/s > 5 \text{ L.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$) sont situés notamment le long de l'axe central de la nappe et les moins productifs ($Q/s < 0,5 \text{ L.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$) sont situés principalement le long de ses bordures nord et sud. Les secteurs à productivité moyenne (Q/s compris entre $0,5$ et $5 \text{ L.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$) sont situés généralement entre ces deux secteurs. Les vitesses des écoulements souterrains sont faibles, généralement inférieures à 10^{-4} m.s^{-1} (soit des déplacements inférieurs à $3,2 \text{ km.an}^{-1}$). Les plus grandes vitesses ($5 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, soit plus de 15 km.an^{-1}) sont rares dans la nappe et sont localisées notamment le long de la bordure sud du Haouz oriental (SINAN *et al.*, 2003).

Le faciès chimique des eaux est généralement de type bicarbonaté calcique ou magnésien et peut être localement chloruré sodique en raison des argiles permo-triasique salifères. Ce faciès est en rapport étroit avec la nature lithologique des terrains, qui sont de type sédimentaire d'origine tectonique, dans lequel se sont accumulées au Tertiaire et au Quaternaire d'importantes formations détritiques, issues du démantèlement de la chaîne atlasique soulevée lors de l'orogénèse atlasique (FERRANDINI et LE MARREC, 1982).

Dans la région des Jbilet et sur le plan hydrologique, les schistes de Sarhlef et le granite de Bamega constituent les deux formations aquifères importantes. Elles sont affectées d'une très forte fracturation engendrant une continuité hydraulique entre elles. La nappe d'eau est donc fissurale. La zone d'alimentation de cette nappe est constituée au nord par la partie la plus élevée des Jbilet. L'Oued Tensift, situé au sud, constitue l'exutoire naturel de la nappe qui montre un écoulement du nord-est vers le sud-ouest en direction de l'Oued Tensift (HAKKOU, 2001).

Généralement, les ressources en eau connaissent une raréfaction de plus en plus grande en raison d'une gestion rationnelle et d'une surexploitation du potentiel hydrique. Elles subissent par ailleurs une dégradation de leur qualité due à différentes formes de pollution. Le

déversement des rejets industriels et domestiques sans traitement à la surface du sol ou directement dans les cours d'eau nuit à la qualité des eaux. Les deux nappes d'eau souterraines ont connu durant les dernières années une baisse importante de leurs niveaux piézométriques et une dégradation accrue de leur qualité.

II - La plaine du Tafilalet et la région d'Errachidia

1°/ Situation géographique

La région du Tafilalet se situe au sud-est du Maroc atlasique (figure 1) entre les latitudes sud-atlasiques 29°30' et 32°30'. Elle occupe approximativement 8,44% de la surface du Maroc (environ 60 000 km²) et fait partie depuis peu du Réseau des Réserves de la Biosphère (EL RHAFFARI et ZAID, 2005). La population au Tafilalet est actuellement d'environ 700 000 habitants et elle est en majorité rurale (70%).

2°/ Données climatiques

La présence de la barrière atlasique culminant au Nord à des altitudes supérieures à 3 200 m et l'arrivée des vents chauds d'origine saharienne sont à l'origine de la rigueur du climat. Les moyennes inter-annuelles des précipitations apparaissent fonction de l'altitude, dans chaque unité et bassin, les postes les plus élevés recevant les précipitations les plus abondantes ; cependant les moyennes demeurent faibles.

Le régime annuel des pluies est caractérisé par deux saisons humides d'automne et de printemps séparées par une brève saison d'hiver à minimum relatif faible et par une longue saison d'été très marquée par la sécheresse. Les rapports des extrêmes dépassent souvent 10 et sont toujours compris entre 5 et 15. Ces indices dénotent un climat pré-saharien qui s'atténue dans les zones de piémont avec la continentalité (CHAMAYOU et RUHARD, 1977). Durant les trente dernières années, la moyenne annuelle des précipitations a été marquée par une forte irrégularité spatio-temporelle, passant de 250 mm sur les reliefs du Haut-Atlas à 130 mm dans la zone d'Errachidia et à moins de 75 mm dans la plaine du Tafilalet. Cette faible pluviométrie au Sud est due d'une part au fait que la chaîne atlasique empêche toute influence océanique et d'autre part à la présence des masses d'air chaude provenant du Sahara.

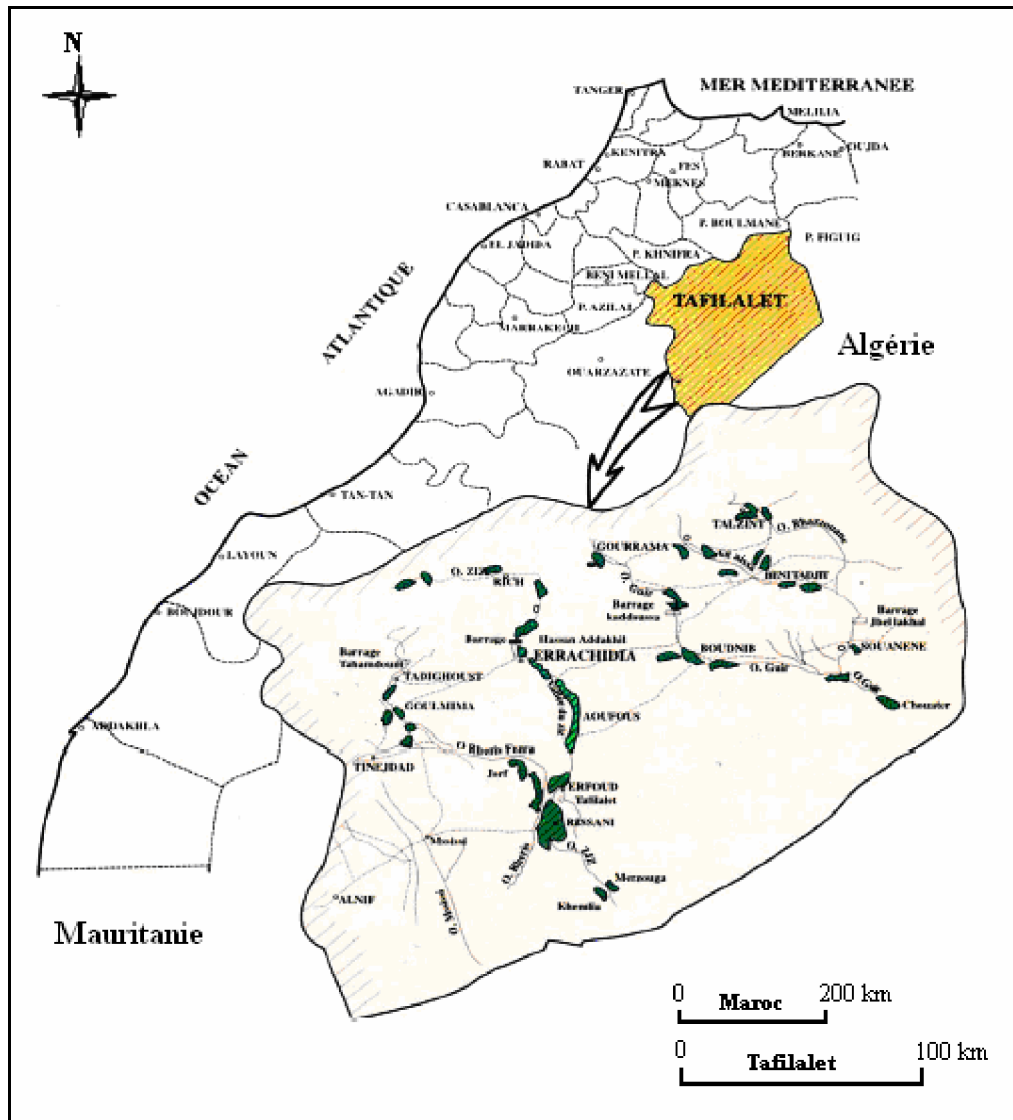


Figure 2 : Situation géographique du Tafilalet

Les températures moyennes annuelles sont relativement élevées et participent à l'aridité du climat. Elles augmentent de Foug Zaâbel au Nord à Taouz plus au Sud où elles sont respectivement de l'ordre de 18,2°C et 22,5°C. Les températures présentent de très importantes variations saisonnières avec un été très chaud et un hiver très froid. Ce dernier présente des températures diurnes peu élevées tandis que les températures nocturnes dépassent rarement 0°C. Il apparaît que le mois de juillet est le plus chaud et celui de janvier le plus froid.

L'évaporation a une grande influence sur les eaux de surface ainsi que sur les eaux souterraines, car elle contribue à l'augmentation de la concentration de ces eaux en certains ions dissous. La valeur moyenne annuelle calculée sur 20 ans varie de 2 962 mm au barrage Hassan Addakhil, à 5 342 mm dans la station de Taouz. On doit noter que la quantité de pluie qui tombe sur la ville d'Errachidia est très inférieure à la quantité d'eau évaporée.

3°/ Données géologiques

La zone d'étude s'étend depuis le Haut-Atlas au Nord jusqu'à l'Anti-Atlas au Sud. Sa partie centrale contient le sillon pré-africain, avant-fosse située entre le Haut-Atlas et l'Anti-Atlas et renferme le bassin crétacé d'Errachidia-Boudnib. Les formations qui affleurent largement sont d'âge crétacé, elles surmontent par endroit les terrains jurassiques où sont discordantes sur le socle paléozoïque. Un aperçu stratigraphique est présenté ci-après, il permettra de mieux comprendre les caractéristiques principales de l'hydrogéologie dans la zone d'étude. Les informations stratigraphiques s'échelonnent du Précambrien au Quaternaire.

a)- Le Précambrien

Dans l'Anti-Atlas ou plus précisément dans les chaînes des Jbel Sahro et Ougnate qui constituent son prolongement oriental, prédominent les formations précambriennes, qui ont été couvertes postérieurement de couches sédimentaires légèrement plissées au cours des phases hercyniennes. Le bouclier précambrien a joué le rôle de massif rigide sur lequel se sont déposés successivement les couches infracambriennes et primaires.

Le Précambrien apparaît aussi en quelques petits pointements autour du seuil d'Aïn Chair au sud de la plaine de Tamelalet. Il s'agit de séricito-schistes attribués au Précambrien II et de rhyolites associées à des conglomérats et grès attribués au Précambrien III. Des conglomérats, grès et calcaires attribués au Géorgien (calcaire à *Collenia*) recouvrent le Précambrien III au Sud-Est d'Aïn Chair.

b)- Paléozoïque

Le Primaire, à base de schistes, quartzites et roches intrusives, apparaît localement en zones réduites à la faveur d'anticlinaux faillés ou en quelques boutonnières (Haut Guir). Il affleure aussi plus au sud à Erfoud, dans le bassin du Tafilalet et dans la région de Zagora. Ces formations, qui représentent toute la série du Cambrien au Carbonifère, sont essentiellement détritiques et correspondent à des grès quartzitiques, des conglomérats très consolidés et des schistes.

Géorgien

Il est caractérisé par des dépôts calcaires en discordance sur le dernier épisode du Précambrien. La lithologie de ce niveau est schisto-calcaire et gréseuses.

Acadien

Il est constitué d'alternance de schistes et de grès et se poursuit par une puissante série de grès et de quartzites dont l'épaisseur peut atteindre 500 m. On notera que ces formations sont tendres et constituent des zones déprimées où les oueds élargissent leurs vallées.

Ordovicien

Il est constitué essentiellement de schistes, avec quelques passages gréseux pouvant atteindre des épaisseurs allant de 200 à 400 m, les quartzites du premier Bani et de la série gréseuse du second Bani d'une épaisseur moyenne de 300 à 350 m. Les dépôts sédimentaires de l'Ordovicien sont aussi représentés par les schistes de Ktaoua (province de Zagora) dans lesquels se développe la Feïja externe qui supporte la palmeraie du Ktaoua.

Silurien

Affleurant au sud de la province de Zagora et au Nord-Est au niveau de la plaine de Tazarine, cet étage vient couvrir les grès quartzitiques du second Bani. Le faciès prédominant est constitué d'argiles pélitiques, d'argilites à concrétions calcaires et d'argiles fines avec des passages de grès blancs en plaquettes (5 à 10 m). La série du Silurien s'est étalée sur des épaisseurs allant de quelques mètres à 700 m.

Dévonien

Ce sont des calcaires, à Goniatites et Clyménies. Ces terrains sont affectés par la tectonique hercynienne sous forme de plis larges et d'accidents transversaux dont les rejets peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres (MICHARD, 1976).

Carbonifère

Cet étage contient des calcaires, des calcaires récifaux, des grès parfois conglomératiques, des schistes gréseux. L'épaisseur des dépôts du Viséen peut atteindre 2 000 m environ au nord de l'Ougnate et du Tafilalet.

Un exemple de succession lithostratigraphique relative au Primaire de la région du Tafilalet est résumé sur la figure 4.

C)- Mésozoïque

Trias

Dans le Haut-Atlas calcaire, le Trias, comprenant des basaltes doléritiques et des marnes et argiles à niveaux salifères, joue un rôle important comme substratum imperméable de la série jurassique et est à l'origine de la plupart des eaux saumâtres de la région.

Il affleure à Foum Zaâbel, au nord du barrage Hassan Addakhil, injecté le long d'un accident atlasique. Il s'amenuise en biseau vers le Sud et n'existe plus au-delà d'Aoufous.

Il est représenté par :

- Une série lagunaire inférieure renfermant des marnes rouges d'épaisseur maximum de 150 m ;
- Des basaltes doléritiques d'épaisseurs maximum de 169 m ;
- Une série lagunaire supérieure constituée par des marnes rouges ou brunes salifères d'épaisseur maximum de 150 m.

Dans l'unité de Guir-Bouanane (figure 2), le Trias n'apparaît qu'en minuscules pointements sans importance particulière.

Jurassique

Il constitue la plus grande partie du Haut-Atlas en général et affleure sur la bordure nord du bassin d'Errachidia-Boudnib

o Lias inférieur et moyen

Le lias inférieur calcaréodolomitique est perméable en grand et constitue le niveau présentant la plus grande continuité ; il donne à la chaîne atlasique (Haut-Atlas), l'originalité de ses formes structurales en redressées de calcaires dolomitiques massifs.

Vers le sud, il y'a apparition progressive des évaporites et des sédiments détritiques rouges (MICHARD, 1976). Sur le site du barrage Hassan Addakhil, au niveau de l'anticlinal du Jbel Hamdoun, le Lias est formé par des bancs de calcaires dolomitiques massifs à Mégalodontes et Opisoma avec rares intercalations de marnes.

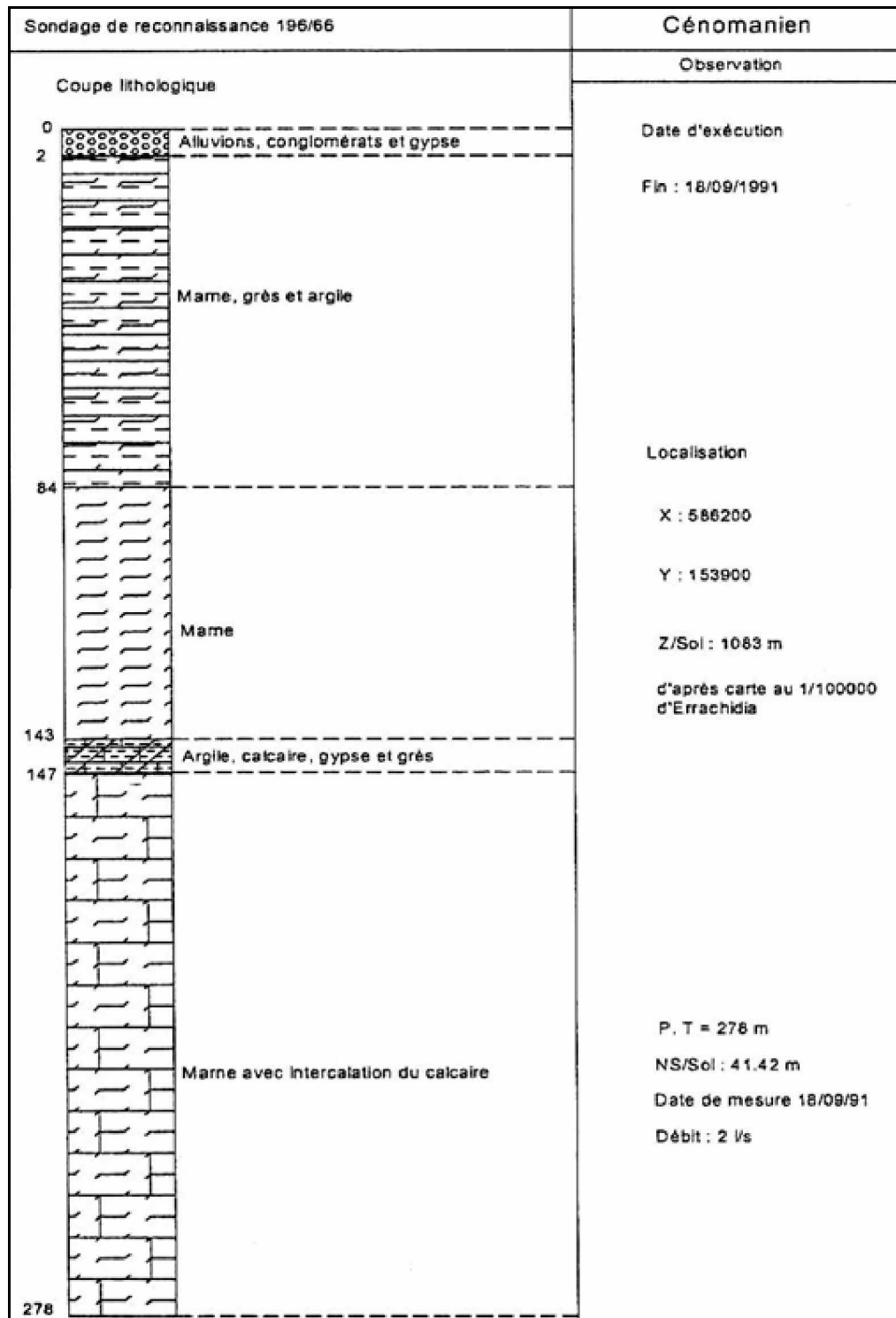


Figure 4 : Coupe du forage type traversant le Cénomaniens dans la région d'Errachidia, (ANONYME, 2000).

Dans certains forages effectués à Fom Rhiour au nord de la ville d'Errachidia (ANONYME, 2000) le Domérien est représenté par des alternances de calcaires très fissurés et de marnes. Le Lias inférieur est formé de dolomies litées à intercalations fréquentes d'anhydrite et d'argile.

Dans la région d'Aoufous, le Lias lagunaire comprend des anhydrites alternant avec des marnes et des grès. Cette série est attribuée au Lias inférieur (CHOUBERT et CLARIOND, 1950) et au Lias moyen.

- **Lias supérieur**

Au début du Lias supérieur, une régression affecte le domaine anti-atlasique déterminant ainsi une lacune de sédimentation dans les régions à faible profondeur (MICHARD, 1976). Cette régression est produite par un léger mouvement tectonique, ainsi le Toarcien inférieur se trouve exclusivement dans les sillons atlasiques. Au Toarcien moyen une transgression survient. La sédimentation est à dominante marneuse avec des alternances calcaires.

Dans la région de Fom Rhiour, l'affleurement du Toarcien est formé principalement de marnes vertes avec des inter-lits marno-calcaires.

- **Dogger**

Le Dogger débute par la transgression Aalénienne et au sud les rivages de la mer dépasse légèrement l'accident sud atlasique (CHOUBERT et FAURE-MURET, 1962). Dans la zone saharienne, les faciès deviennent clairement néritiques et les calcaires dominant tout l'étage (DUBAR, 1952).

L'Aalénien calco-dolomitique à la base, devient de plus en plus marneux vers le haut. Au site du barrage Hassan Addakhil, l'Aalénien supérieur, principalement marneux, forme la couche imperméable inférieure de l'ouvrage. Vers le sud, quelques forages (ANONYME, 2000) détectent l'Aalénien calcaro-dolomitique très fracturé, puissant de 80 m. Sur la rive droite de l'Oued Ziz il affleure largement sous forme d'un anticlinal appelé "l'anticlinal du déversoir".

Le Bajocien, principalement marneux et argileux avec des intercalations calcaires, forme la couche supérieure des fondations du barrage Hassan Addakhil.

Le Bathonien commence par de gros bancs de calcaire dolomitique appelé "calcaire corniche" (Bajocien-Bathonien). Au cours du Bathonien moyen et supérieur, une grande régression a lieu et se traduit par le passage à une sédimentation détritrique rouge (CHOUBERT et FAURE-MURET, 1962).

- **Jurassique supérieur**

Pendant de la phase tectonique intra-bathonienne, la sédimentation marine passe à une sédimentation continentale détritique à prédominance gréseuse, appelée tantôt "Jurassique continental" (CHOURBERT et FAURE-MURET, 1962) et tantôt "couches rouges".

Au nord de la ville d'Errachidia, les grès rouges affleurent dans la cuvette du barrage Hassan Addakhil et à l'ouest de la route nationale RP21 (vers Meknès), ils débutent par des conglomérats hétérogènes et des grès grossiers.

d) Crétacé

Au cours du Crétacé, une transgression de grande ampleur envahit le Sud marocain, recouvre l'actuel sillon sud-atlasique et atteint le Tafilalet. La sédimentation s'effectue en régime épicontinental et présente des variations importantes d'épaisseur et de faciès. Dans le Haut-Atlas, le Crétacé est représenté par les marnes rouges du Crétacé inférieur, les marnes bariolées du Cénomaniens et les calcaires du Turonien et s'achève par des formations continentales rouges du crétacé supérieur. Il faut mentionner enfin qu'au Sud du "Golfe Atlasique", situé pour l'essentiel au Nord de l'Anti-Atlas, un bras de la mer Cénomano-Turonienne descendant vers le Sud en direction du Sahara atteint et occupe le Bassin de Taouz (CHOURBERT et FAURE-MURET, 1962).

4°/ - Ressources en eau

Le Haut-Atlas oriental, au sud de Midelt, est drainé par le Haut Ziz, le Haut Rheris et le Haut Guir qui descendent tous les trois vers le sud saharien. Seule, une partie du versant nord, et notamment la vallée de Taarart, entre Ayachi et Maoutfoud, dépend de la Moulouya à l'ouest, le plateau des lacs est un centre de dispersion des eaux d'où divergent les Oueds vers le Rheris et le Ziz. A l'Est, le Haut-Atlas, par l'Oued Guir et ses affluents qui alimentent le bassin de l'Oued Saoura. Le Ziz et le Rheris sont bien pourvus en eau, dans leurs cours supérieur, par les pluies venant de l'Atlantique, par les orages d'été et par la fonte des neiges. La plus grande partie des précipitations tombe sur les crêtes septentrionales, entre le plateau des lacs et le Tizi n'Talrhemt, en particulier sur le Maoutfoud (500 à 700 mm). Les rides les plus méridionales sont plus protégées ; il est difficile d'apprécier à quel point, mais Rich ne reçoit même pas 150 mm.

Les eaux absorbées par les calcaires du Lias et du Dogger sont restituées par des sources nombreuses et souvent abondantes, de type karstique, surtout dans le Lias inférieur et le Domérien. Celles qui ruissellent, à la fonte des neiges et après les orages, sur les glacis marno-calcaire, vont directement aux rivières. Ainsi peuvent se maintenir, dans les plus grands talwegs, des écoulements permanents.

La plaine du Tafilalet a été très bien étudiée de point de vue hydrogéologique (JOLY et MARGAT, 1955 ; MARGAT, 1962 ; RUHARD, 1977 ; EL OUALI, 1999). Ces études ont permis de faire apparaître les relations complexes qui existent Les facteurs climatiques, géographiques, géologiques et les caractéristiques hydrogéologiques de la région.

Le climat pré-saharien et les conditions locales d'aridité limitent les capacités d'alimentation des nappes souterraines, tandis que ces dernières sont soumises à une intense évaporation potentielle. Par contre, la situation de la plaine au Sud, là où aboutissent plusieurs cours d'eau qui ont drainé un vaste bassin comportant plus au Nord, des régions mieux arrosées, est assez différente : Ce réseau lui assure des ressources en eau superficielle abondantes et relativement régulières (par comparaison avec d'autres cours d'eau pré-sahariens), mais cependant discontinues. Enfin, la structure géologique de la région, qui fait obstacle à l'existence de nappes profondes, a facilité la constitution d'une nappe phréatique étendue dans la couverture alluviale quaternaire. Cette dernière constitue la principale unité hydrogéologique à côté des sous-écoulements des Oueds Ziz et Rheris.

La plaine du Tafilalet se caractérise, plus que la plupart des bassins quaternaires situés plus en amont, par la rareté de ses exutoires. On peut la considérer comme un bassin pratiquement fermé qui est le lieu de convergence de toutes les eaux superficielles ou souterraines du bassin du Ziz-Rheris (MARGAT, 1962).

Les ressources en eau rencontrées dans le Tafilalet sont les suivantes :

Sources

Les sources de la plaine du Tafilalet sont peu nombreuses, elles ont été classées par MARGAT (1962) en deux grands groupes.

a- émergences de la nappe des grès infra-cénomaniens et des calcaires lacustres du quaternaire ancien. Elles ont des débits très faibles dans la plaine de Tafilalet alors que celles de la partie amont ont des débits plus importants. Plusieurs de ces sources sont gazeuses et toutes sont très minéralisées (source Hammat Moulay Hachem, Moulay Ali Chirif).

b- émergence de la nappe phréatique principale de la plaine, localisées dans le lit des principaux Oueds (Ziz, Gheris, Amerbouh). Elles ont des débits très variables et sont très sujettes aux fluctuations du niveau de la nappe phréatique.

Toutes sont des sources d'émergence et sont en rapport direct avec l'affleurement du substratum imperméable. Elles sont pour la plupart déterminées par le drainage de la nappe

par certains Oueds. Mais quelques unes situées à proximité des arêtes du substratum possèdent partiellement le caractère de sources de trop-plein. Aussi le débit de ces sources accuse d'importantes fluctuations saisonnières et inters-annuelles (ANONYME, 2000).

La majorité de ces sources ont été étudiées, un intérêt tout particulier a été porté à deux sources chaudes, Hammat Moulay Ali Cherif et Moulay Hachem situées à environs 40 km au nord de la ville d'Errachidia, ainsi qu'aux sources de Meski (La "Source Bleue", située à 20 km au sud d'Errachidia), et à celles de Tazougaret et Tifounasine, qui se trouvent à quelques km au nord de la ville de Goulmima et enfin à des résurgences comme l'Aïn El Atti dans le Radier de l'Oued Ziz, tout près d'Erfoud.

Cours d'eau pérennes

L'Oued Ziz présente un régime à caractéristiques sahariennes avec écoulement permanent dans la partie amont avec des crues d'automne et de printemps. Les précipitations sont très irrégulières mais la neige d'altitude joue un rôle régulateur important. Les crues sont soudaines et violentes, la plus fortes observée en 1965 ayant atteint un débit de pointe de autour de $10\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Le barrage Hassan Addakhel, situé au débouché de l'Atlas, a été mis en eau en 1971, et garantit à l'aval un débit annuel minimum régularisé de 140 millions m^3 .

Le Guir coule vers le Sahara parallèlement à l'Oued Ziz et Gheris. Dans son cours atlasique, le Guir est presque partout pérenne en raison des apports de nombreuses sources qui compensent les prélèvement pour l'irrigation et atteignent plusieurs centaines de litres/seconde.

Les seuls cours d'eau pérennes notables dans la région du Tafilalet sont les suivants :

- a- Le Ziz en amont du barrage Hassan Eddakhil ;
- b- Le Gheris en amont du de Megta-sfa ;
- c- Le Guir au nord de Tazgart.

Les cours d'eau pérennes sont donc très peu présents dans la plaine-même du Tafilalet dont le coefficient de drainage moyen (Quantité d'eau extraite d'un sol par unité de surface horizontale et par unité de hauteur de rabattement) est très faible : 0,02 à 0,03 (MARGAT, 1962).

Points d'eau

Si les khéttaras et les gueltas (lac d'eau naturel très peu profonds) sont devenus très rares et encore les hafari (lac d'eau artificiel) ont presque disparu, le nombre des puits servant à l'irrigation est en augmentation constante. On dénombre environ 570 khettaras dont à peine 250 environ sont actuellement fonctionnelles et 6 500 à 7 000 points de pompage de l'eau souterraine.

La mobilisation des eaux souterraines constitue donc un créneau essentiel pour l'irrigation, particulièrement en période de sécheresse. En effet, un volume de 206 millions de m³ était exploité annuellement il y'a quelques années pour l'irrigation contre 14 millions m³.an⁻¹ pour l'alimentation en eau potable, soit un total mobilisé de l'ordre de 220 millions m³.an⁻¹, selon un document de la DRH (ANONYME, 2000).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les eaux souterraines que nous avons prospectées sont essentiellement des eaux phréatiques interstitielles, accessibles au niveau des sources, des puits et des forages ainsi que l'eau des milieux hyporhéiques dans les alluvions des rivières. Chaque écosystème est échantillonné par la technique la mieux adaptée.

1°/ Échantillonnage du peuplement au niveau des puits

Pour récolter la faune des puits, plusieurs procédés peuvent être utilisés; chacun présente des avantages et des limites (BOUTIN et BOULANOUAR, 1983 ; PASCALIS, 2006).

1- Filet phréatobiologique

Le filet phréatobiologique que nous avons utilisé a été conçu à partir du modèle mis au point d'abord par CVETKOV (1968) puis modifié. Il s'agit d'un cône en toile et nylon fin monté sur un cercle métallique lesté, de 40 cm de diamètre (figure 5). A la base de ce cône est attachée une valve (Aluminium et clapet en caoutchouc) qui permet l'entrée de la faune nageuse lors de la remontée du filet et empêche sa perte pendant la redescente (BOUTIN et BOULANOUAR, 1983). L'efficacité du filet phréatobiologique a été signalée par plusieurs auteurs (BOULANOUAR, 1986 ; BOULAL, 1988 ; IDBENNACER, 1990 ; YACOUBI-KHÉBIZA 1990 ; FAKHER EL ABIARI, 1999).

L'expérience a montré que dix coups de filet sont généralement suffisants, pour obtenir un échantillon représentatif et semi-quantitatif du peuplement d'un puits (IDBENNACER, 1990).

2- Pièges appâtés

Les pièges sont souvent plus efficaces pour la capture de la faune rampante. Parmi plusieurs pièges testés, la nasse est la plus efficace. Elle est constituée par une bouteille en plastique de 1,5 litre (bouteille à eau minérale), dont le fond a été découpé et remplacé par un entonnoir constituant un goulet qui permet à la faune de pénétrer dans le piège. Le bouchon de la bouteille principale est remplacé par un morceau de soie à bluter qui permet à l'air de sortir de la nasse lors de l'immersion (figure 6). Le remplissage de la bouteille et sa descente sont facilités par des lests de Plomb. Le piège est appâté par un morceau de viande rouge (BOUTIN et BOULANOUAR, 1983).

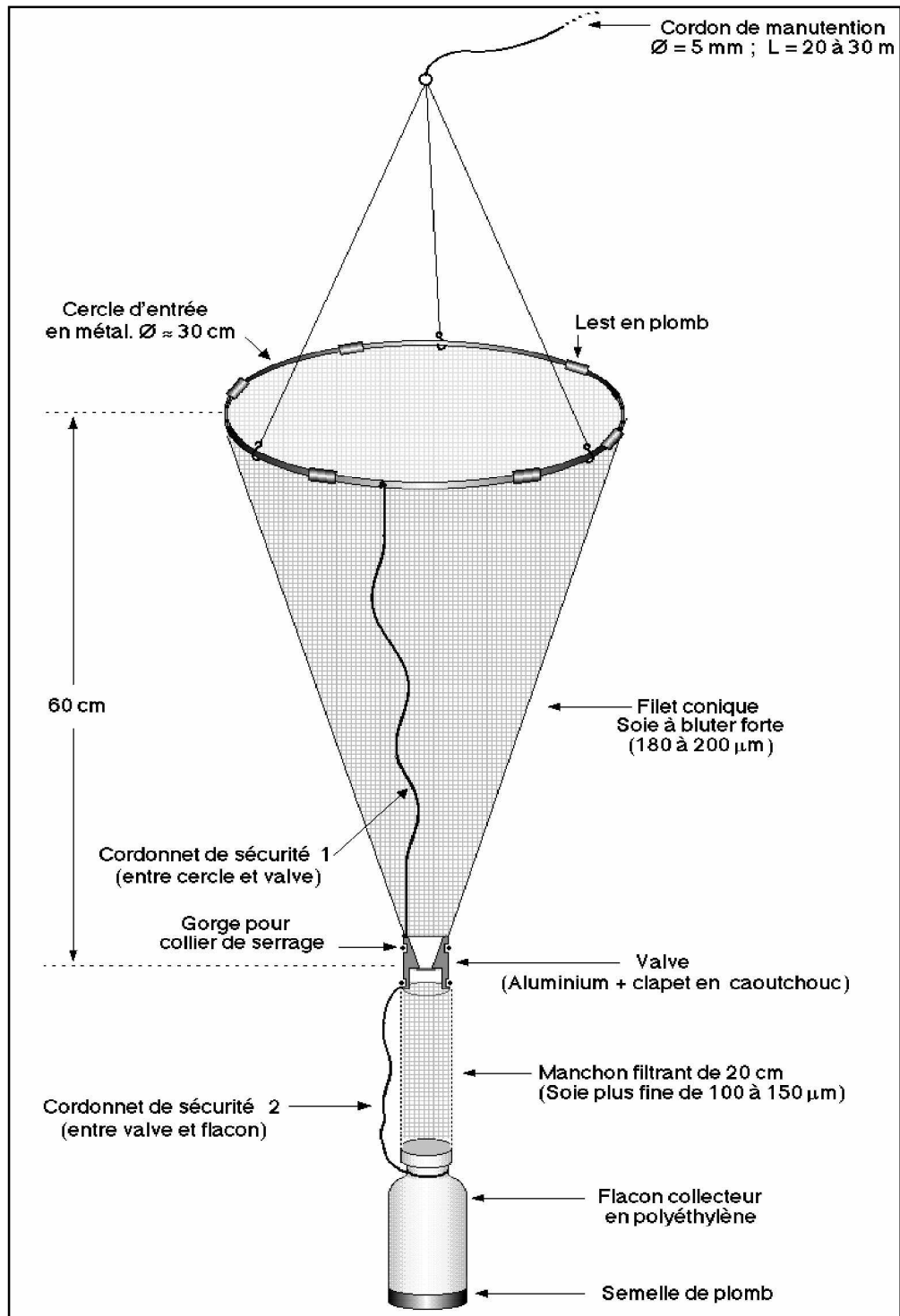


Figure 5 : Schéma du filet phréatobiologique utilisé.

3- Filtration de l'eau pompée

C'est une méthode efficace mais elle ne peut être utilisée que dans les puits équipés de motopompes. Elle consiste à placer un filet en soie à bluter à la sortie de la canalisation conduisant l'eau pompée. La durée de la filtration est au minimum de 30 min et peut atteindre trois heures dans certains puits (BOUTIN et BOULANOUAR, 1984).

Cette méthode permet parfois la récolte des espèces planctoniques rares, car elle permet de filtrer un volume d'eau important en peu de temps. L'inconvénient est que la faune aspirée par la pompe est parfois endommagée ou broyée (BOULANOUAR, 1986).

2°/ Au niveau du sous écoulement des cours d'eau

1- Sondage Karaman-Chappuis

La méthode Karaman-Chappuis (figure 8) convient bien, même dans les cours d'eau étroits avec peu de sédiment tout près du cours superficiel. Le principe consiste à creuser un trou dans le sédiment tout près du cours superficiel. L'eau interstitielle monte dans le trou jusqu'à l'équilibre avec la surface de la nappe d'eau. Un courant d'eau centripète est maintenu dans le trou en prélevant l'eau qui est ensuite filtrée pour retenir les invertébrés. C'est une méthode qualitative assez rapide qui ne nécessite pas d'appareillage spécifique (seulement une pelle ou une pioche, une épuisette en soie à bluter et une boîte métallique) et qui permet de récolter toute sorte d'organismes interstitiels (PASCALIS, 2006).

2- Pompage Bou-Rouch

La méthode de pompage Bou-Rouch (figure 7) est facile à mettre en oeuvre aussi bien dans le lit d'une rivière que sur ses berges. Cette méthode n'est pas quantitative car la densité faunistique et la diversité ne peuvent pas être exprimées par volume de sédiments aquifères.

Le principe de la méthode est de créer une perturbation et de maintenir un flux d'eau interstitielle suffisant autour d'une sonde pour attirer les organismes hyporhéiques. Le volume échantillonné peut être limité entre 10 à 40 litres (YACOUBI-KHEBIZA, 1990). Le mélange de sédiments et d'eau obtenu par pompage est versé dans un seau de 10 litres et élué au moins 4 fois successives pour séparer les animaux des sédiments. Pendant cette élutriation, l'eau est filtrée à travers un filet de maille d'au moins 150 μ m.

3°/ Au niveau des sources

La faune des sources a été récoltée par filtration directe après une agitation manuelle des sédiments à l'amont du filet, cette technique permet la capture des Amphipodes en très bonne

état, ou par pompage Bou-Rouch, lorsque la nature du substrat le permette. Cette technique a permis la récolte des Isopodes.

4°/ Localisation et description des stations

À Marrakech, une vingtaine de puits situés dans le périmètre urbain et au voisinage de la ville ont été étudiés et suivis. La majorité des puits se situe dans les deux zones, celle du Marrakech et celle des Jbilet. Le choix des puits a été fait de manière à cerner les différentes sources de pollution, qui sont principalement la décharge publique, l'épandage des eaux usées et les activités minières. Nous avons aussi pensé à mettre en évidence l'évolution de la qualité des eaux de la nappe d'El Azouzia, connue comme déjà très dégradée il y'a 10 ans, sous l'effet des eaux usées (BOULANOUAR, 1986 et 1995). Pour tous ces objectifs, une première analyse a été réalisée sur tout un ensemble de puits situés dans la zone d'épandage des eaux usées de la ville et dans l'ancienne usine de traitement des ordures ménagères ainsi que les puits à coté de la mine Draâ Sfer.

Dans les environs de la ville de Marrakech, nous n'avons conservé que les résultats de 11 puits (notés M, figure 9) en raison de l'intérêt qu'ils présentent du point de vue physico-chimique et biologique. Alors que 7 puits (notés P, figure 10) situés de part et d'autre du site minier Draâ Sfer ont été conservés. Les principaux paramètres morphologiques de ces puits sont donnés sur le Tableau 1 et 2.

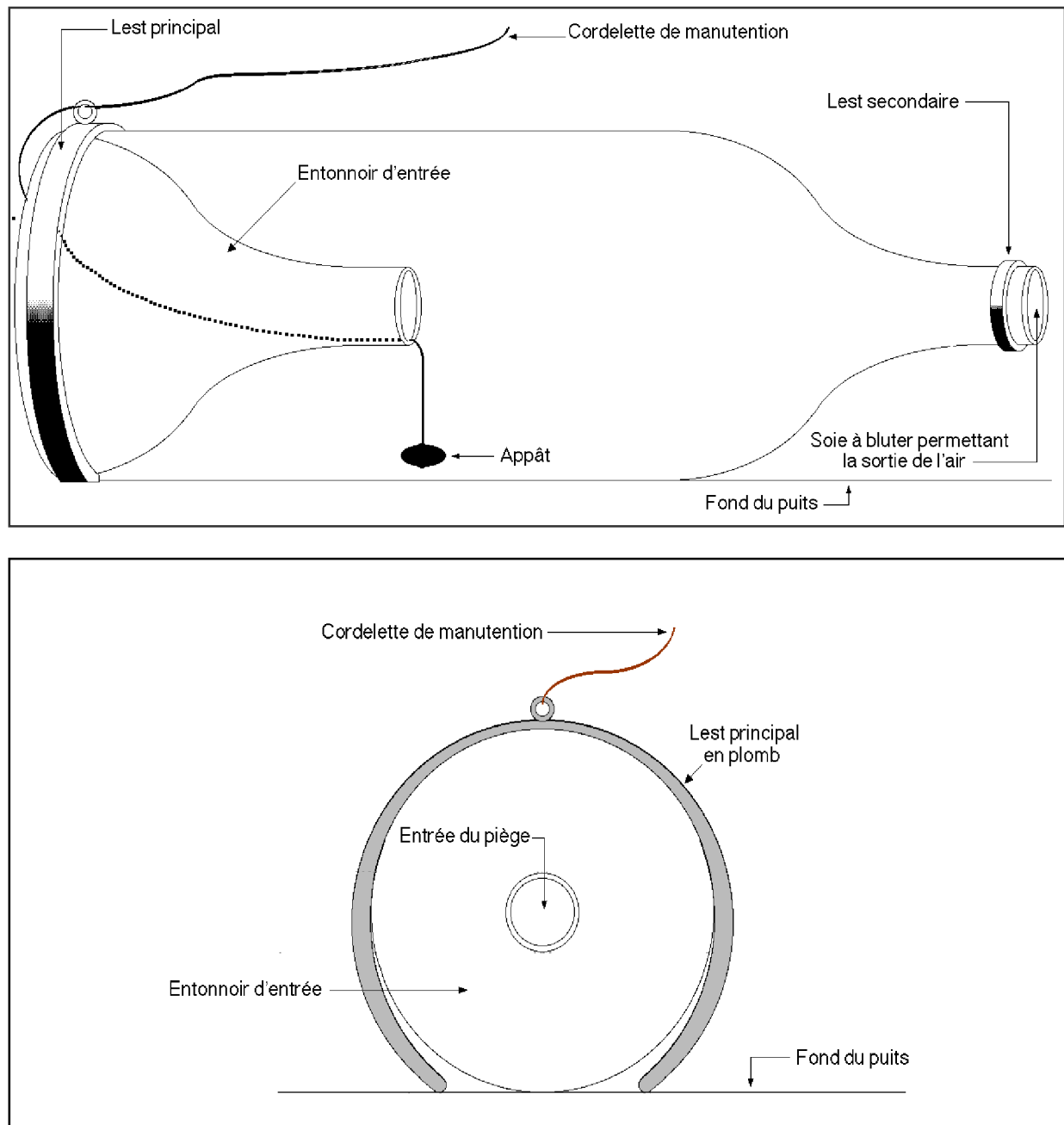


Figure 6 : Schéma de la nasse utilisée au cours de ce travail. En haut, vue latérale sur le fond du puits et en bas vue arrière de l'entonnoir d'entrée.

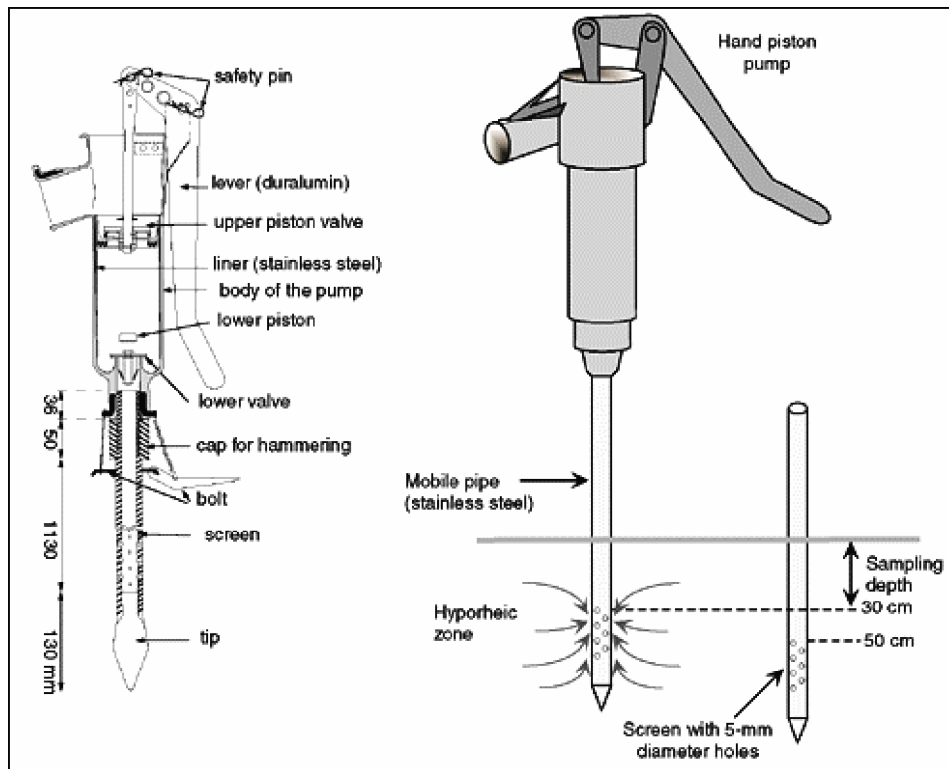


Figure 7 : Schéma de la Pompe Bou-Rouch (PASCALIS, 2006).

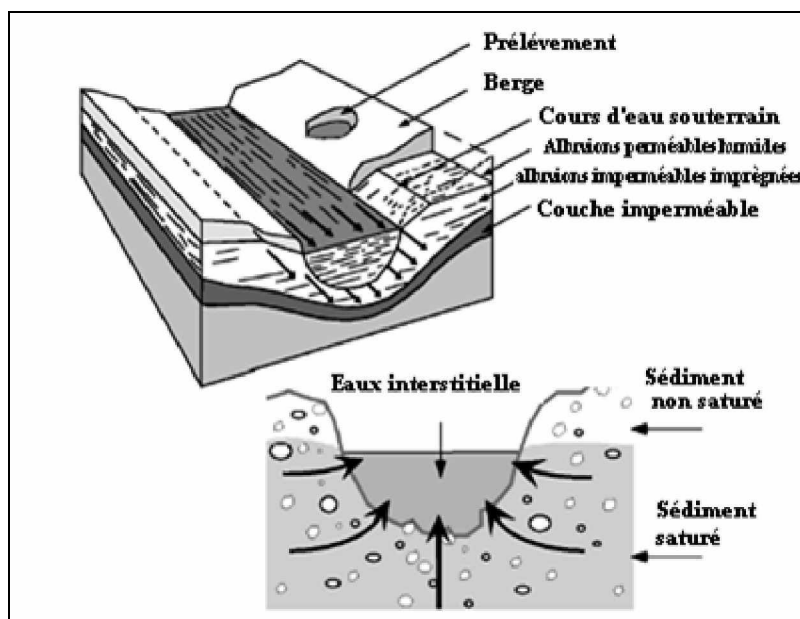


Figure 8 : Sondage Karaman-Chappuis (d'après DELAMARE DEBOUTTEVILLE, 1960 modifié).

Dans la région du Tafilalet, une étude faunistique préliminaire a été réalisée sur une centaine de puits, et ce à l'occasion de plusieurs campagnes d'échantillonnage que nous avons réalisées au sein de l'équipe d'hydrobiologie souterraine de la Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech. L'objectif principal de cette étude est d'établir tout d'abord la biodiversité aquatique souterraine de cette région et par la suite de rechercher les facteurs environnementaux et historiques responsables de la distribution actuelle de ce peuplement. Les puits étudiés sont situés tout au long des vallées du Ziz, du Guir et du Rheris, là où la population locale est installée.

Nous avons aussi réalisé un suivi de la qualité des eaux de la nappe d'Errachidia et ces environs. 14 stations dont 11 puits (notés R), deux sources et une station représentant le sous-écoulement de l'oued Ziz (notées S) ont été suivies pendant deux ans. Des analyses biologiques et physico-chimiques ont été réalisées sur ces stations du début de l'année 2004 jusqu'à la fin de l'année 2005. Une étude bactériologique particulière a été réalisée sur les puits des établissements de bains de la ville, et cela en collaboration avec les services de la santé publique de la ville d'Errachidia. Les caractéristiques morphologiques et les particularités de ces stations sont résumées sur le tableau 3 et la figure 11.

5°/ Analyses physico-chimique de l'eau

Pour caractériser les eaux des stations selon la qualité physicochimique et écologique, plusieurs facteurs ont été étudiés : quelques uns ont été mesurés sur place alors que d'autres ont été analysés au Laboratoire d'Hydrobiologie, d'Écotoxicologie et d'Assainissement du Département de Biologie à la Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech.

1- Facteurs mesurés sur le terrain

La température, la conductivité, le pH et le taux de saturation en oxygène ont été mesurés sur le terrain à l'aide des appareils portables de type conductivimètre WTW LF 92, Oxygène WTW LF 92 et pH-mètre CG 818.

2- Facteurs analysés au laboratoire

L'eau prélevée, est stockée dans des bouteilles en plastique, après l'ajout de quelques gouttes de formol à 5% pour bloquer les activités bactériennes. Les bouteilles sont complètement remplies sans bulles d'air et sont fermées hermétiquement et transportées à Marrakech où les analyses ont été effectuées dans les 48 heures qui suivent les prélèvements

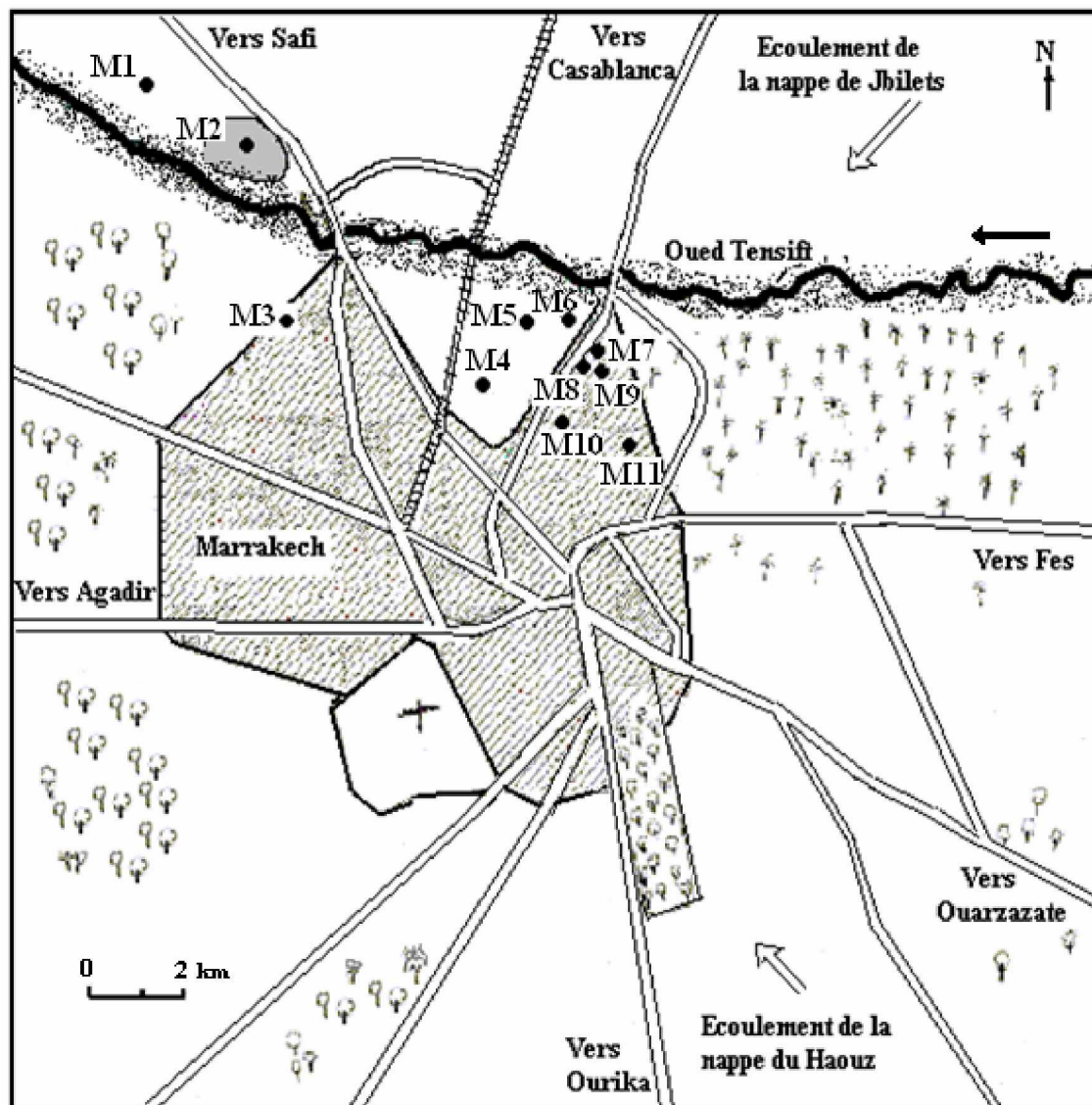


Figure 9 : Situation géographique des puits étudiés dans les environs de la ville de Marrakech.

Tableau 1 : Caractéristiques morphologiques des puits étudiés dans la région de Marrakech. **D** : diamètre (m); **P** : profondeur (m); **N.P** : niveau piézométrique (m).

Puits	Coordonnées	D	P	N P	Protection des puits	Utilisation des puits	Environnement
M1	31°45'21 N 008°07'02 O	1,20	6,7	5,25	Non protégé	Eau de boisson	Décharge publique
M2	31°43'03 N 008°05'04 O	2	12,3	6,7	Non protégé	Non utilisé	Creusé au voisinage d'une maison non logée
M3	31°39'01 N 008°03'04 O	1,9	8,30	8	Non protégé	Usage domestique	Creusé dans la casse, au voisinage des garages de réparation des automobiles
M4	31°39'01 N 008°01'00 O	2	11,75	4,20	Non protégé	Irrigation et usage domestique	Creusé dans l'ancienne usine de traitement des ordures ménagères
M5	31°38'02 N 07°59'04 O	0,90	9	4	Bien protégé	Usage domestique	Creusé dans la Mosquée
M6	31°38'03 N 07°60'04 O	1,20	6	3	Puits fermé hermétiquement	Usage domestique	Creusé dans une maison
M7	31°38'15 N 07°59'14 O	1,80	11	6	Très bien protégé, margelles cimentées.	Irrigation du jardin	Creusé dans une villa
M8	31°37'00 N 07°59'00 O	1,80	10	6	Très bien protégé, margelles cimentées.	Irrigation du jardin	Creusé dans une villa
M9	31°37'02 N 07°59'154 O	1,40	17	15	Très bien protégé, margelles cimentées.	Irrigation du jardin	Creusé dans une villa
M10	31°37'02 N 07°59'01 O	2	25	Instable (pompage continue)	Protégé, margelles cimentées, construction en ciment jusqu'à niveau piézométrique	Irrigation du jardin de l'école des Mines	Creusé dans le jardin de l'école des Mines

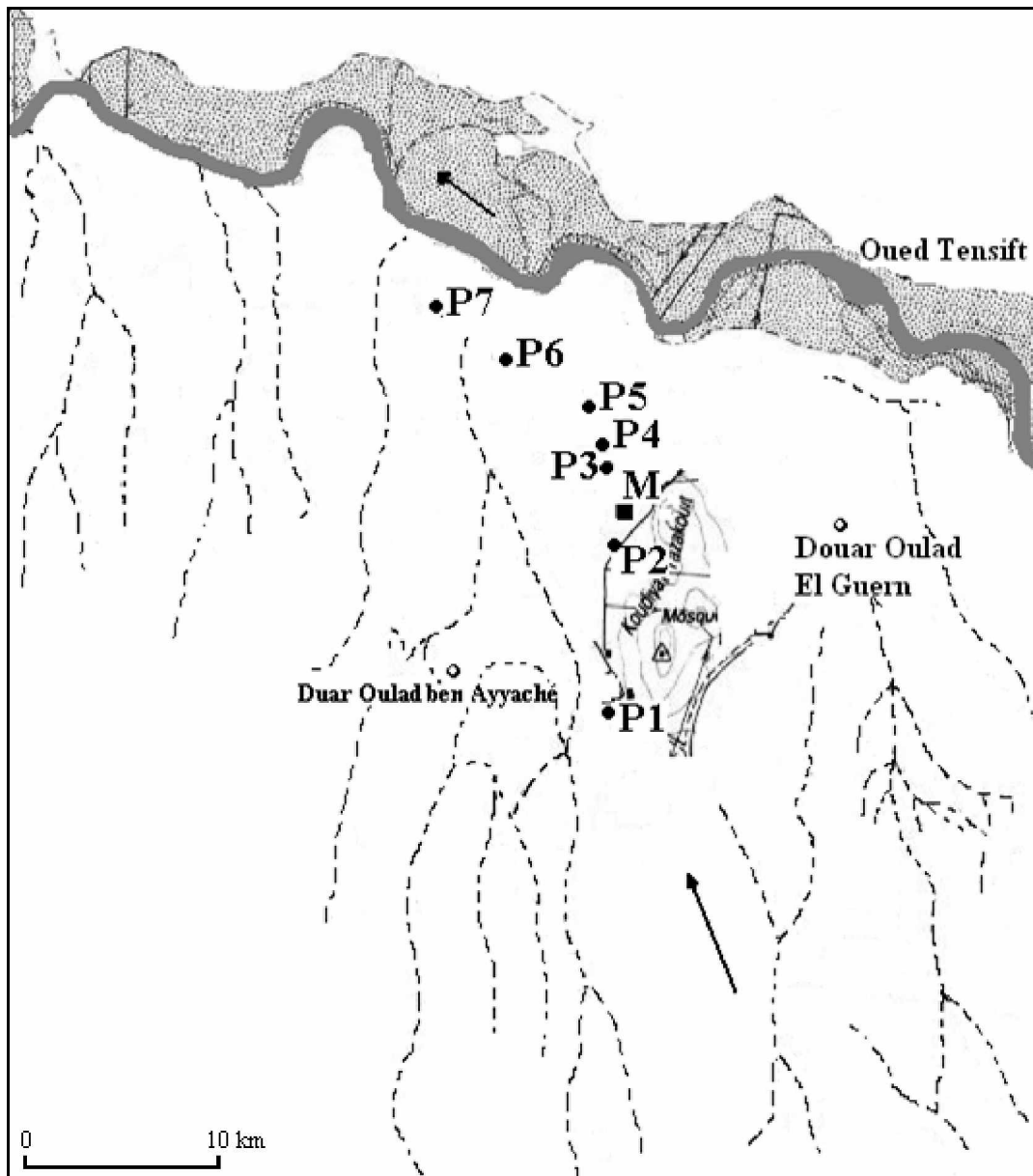


Figure 10 : Situation géographique des puits étudiés dans la zone minière de Draâ Sfer.

M: Emplacement de la mine de Drâa Sfer; la flèche indique le sens de l'écoulement de la nappe.

Tableau 2 : Caractéristiques morphologiques des puits étudiés dans la région minière Draâ Sfer. **D** : diamètre en m; **P** : profondeur en m ; **N.P** : Profondeur de la nappe (= niveau piézométrique) en m.

Stations	Coordonnées	D	P	N. P	Localité	Protection	Utilisation des puits	Environnement
P1	31°41'02 N et 008°08'01 O	2	36	15	Site minier Draâ Sfer en amont	Protégé	Eau de boisson et irrigation	ferme
P2	31°41'01 N et 008°09'02 O	1,8	22	18	Site minier Draâ Sfer, juste à coté de lamie	Protégé	Eau de boisson et irrigation	Douar
P3	31°42'14 N et 008°09'00 O	2,5	29	20	Site minier Draâ Sfer, puits le plus proche de la mine	Protégé	Eau de boisson et irrigation	ferme
P4	31°42'10 N et 008°09'09 O	2	26	19	Site minier Draâ Sfer, juste en avale immédiat de la mine	Moyennement protégé	Eau de boisson et irrigation	ferme
P5	31°42'02 N et 008°10'09 O	1,8	20	18	Site minier Draâ en aval du puits P4	Protégé	Eau de boisson et irrigation	ferme
P6	31°42'11 N et 008°10'13 O	2	19	17	Site minier Draâ en aval du puits P5	Protégé	Eau de boisson et irrigation	Maison
P7	31°43'00 N et 008°12'01 O	2	18	15	Site minier Draâ en aval du puits P6. puits le plus loin en aval de la mine	Sommairement protégé	Eau de boisson et irrigation	Maison

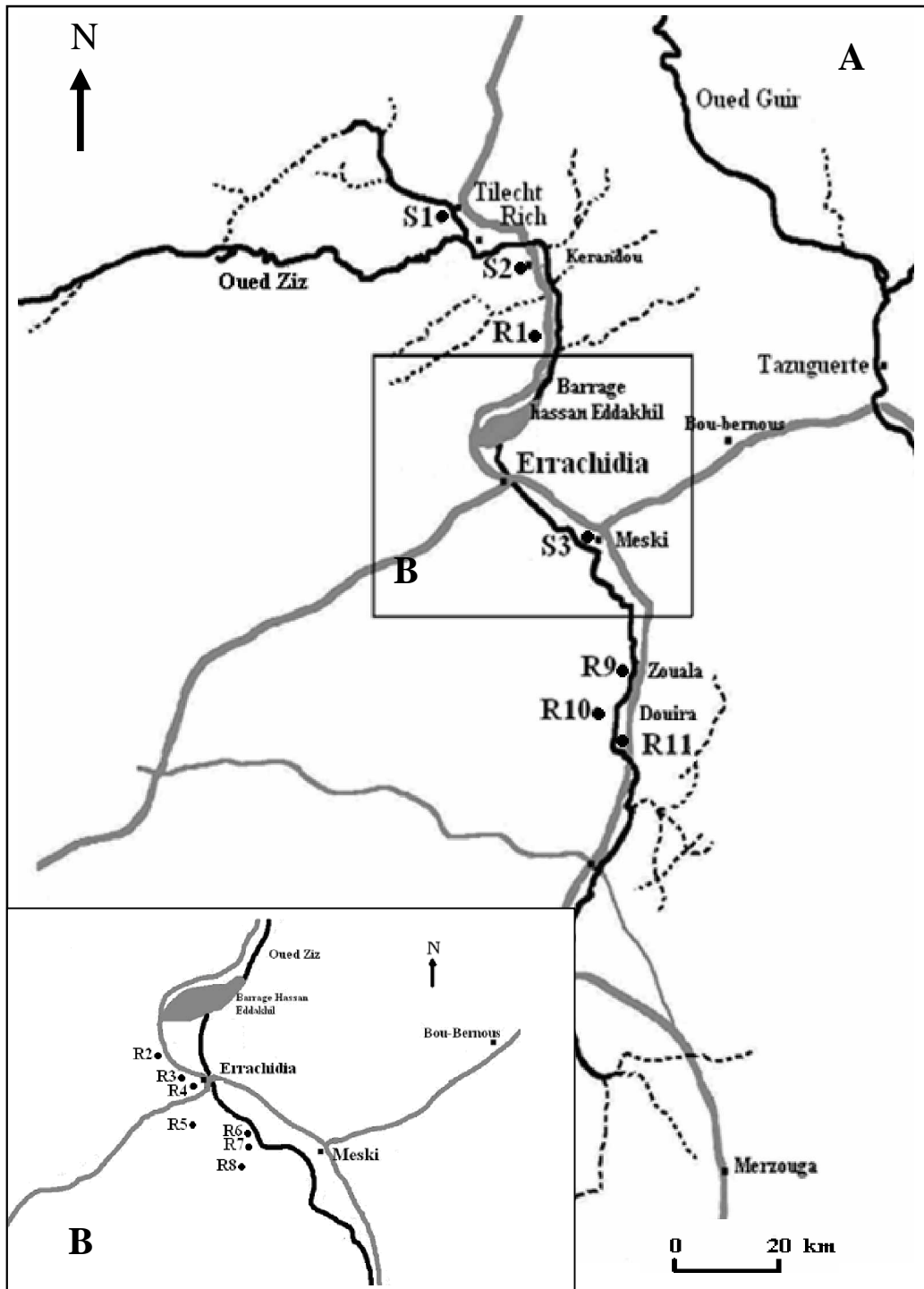


Figure 11 : Situation géographique des stations étudiées dans le Tafilalet. **A** : Vallée de l'Oued Ziz (cours moyen) et environs; **B** : environs d'Errachidia et stations les plus proches de la ville.

a) Les Chlorures

Ils sont dosés selon la méthode de Mohr (RODIER, 1984).

b) La dureté totale

Le dosage de la dureté totale est effectué par la méthode complexométrique avec une solution d'E.D.T.A à pH = 10 en présence d'ériochrone comme indicateur coloré (RODIER, 1984).

c) Le calcium

Les ions calcium sont également dosés par complexométrie avec une solution d'E.D.T.A mais à un pH compris entre 12 et 13, avec la murexide comme indicateur coloré. Le magnésium est précipité sous forme d'hydroxyde et n'interfère pas lors du dosage (RODIER, 1984).

d) Le magnésium

La concentration des ions magnésium est obtenue par différence entre la dureté totale et la dureté calcique.

e) Le titre alcalimétrique complet (TAC)

Le dosage de ce paramètre se fait par acidimétrie au moyen d'une solution HCl 0,04 N avec l'hélianthine comme indicateur coloré.

f) Les Sulfates

Ils sont déterminés par la méthode néphélométrique (RODIER, 1984).

g) Les Orthophosphates

Ils sont déterminés par la formation, en milieu acide (à pH compris entre 2 et 7) d'un complexe phosphomolybdique avec le molybdate d'ammonium et le tartrate double d'antimoine et de potassium. Ce complexe réduit par l'acide ascorbique développe une coloration bleue susceptible d'un dosage colorimétrique à 700 nm, selon la norme AFNOR T 90-023.

h) Les composés azotés

- L'Azote ammoniacal

Il est dosé par la méthode colorimétrique au bleu d'indophénol. La procédure est celle de la norme AFNOR T 90-015.

Tableau 3 : Caractéristiques morphologiques des stations étudiées dans la ville d'Errachidia et ses environs. **D :** diamètre (m); **P :** profondeur (m); **N.P :** niveau piézométrique (m).

Stations	Coordonnées	D	P	N. P	Localité	Protection	Utilisation des puits	Environnement
S1	32°19'00 N et 004°32'00 O	--	--	--	Meski	Non protégée	Irrigation et usage domestique	Oued Ziz
S2	32°16'11 N et 004°24'01 O	--	--	--	Hammat Moulay Hachem	Non protégée	Usage domestique ; utilisé comme bain	Oued Ziz
S3	31°53'11 N et 004°19'01O	--	--	--	Tilecht	Non protégée	Usage domestique	Oued Ziz
R1	32°08'01 N et 004°22'41 O	1,20	10	7	Douar Ait Boughrous	Protégé	Non utilisé	Maison
R2	31°56'02 N et 004°26'31 O	1,40	40	24	Taghga Kdima	protégé	Usage domestique	Jardin
R3	31°56'00 N et 004°26'13 O	0,80	22	6	Bain de la mosquée centre ville Errachidia	Fermé	Non utilisé	Bain
R4	31°55'12 N et 004°26'08 O	1	12	10	Puits l'abattoir Errachidia	ouvert	Usage domestique	Abattoir
R5	31°55'21 N et 004°25'05 O	1,80	18	14	Puits Bni'mhelli	Moyennent protégé	Irrigation du jardin	Jardin
R6	31°55'44 N et 004°25'30 O	1,20	17	15	Puits Bni'mhelli	Maison	Irrigation du jardin	Ferme
R7	31°54'08 N et 004°22'21 O	0,90	17	16	Puits Aït Messoud	Maison	Irrigation des cultures	Ferme
R8	31°52'01 N et 004°18'00 O	2	15	13	Puits Ksiba	Maison	Irrigation et alimentation des cheptels	Ferme
R9	31°48'11 N et 004°14'12 O	0,6	8,5	10,4	Mosquée Zouala	Maison	Boisson et usage domestique	mosquée
R10	31°47'11 N et 004°10'11 O	--	140	--	Puits Douira	Maison	Irrigation des palmiers dattier	Ferme
R11	31°45'11 N et 004°09'25 O	--	--	--	Forage Ain El atti	Protégé	Non utilisé	Oued Ziz

– L'Azote nitreux

Il est dosé par la méthode colorimétrique en réalisant la diazotation des nitrites par la sulfanilamide et sa complexation avec le N-naphtyl-éthylène-diamine qui donne un complexe coloré susceptible d'un dosage colorimétrique à 540 nm. La méthode utilisée est celle de la norme AFNOR T 90-013.

– L'Azote nitrique

Pour doser les nitrates, on les transforme en nitrites par le passage sur colonne réductrice cadmium-cuivre, puis on dose les nitrites formés comme précédemment. (RODIER, 1984)

i) Les ions Sodium et Potassium

Ces ions ont été dosés à l'aide d'un spectrophotomètre de flamme. Cette méthode est basée sur le fait qu'un sel métallique passé dans une flamme s'ionise et émet une lumière de longueur d'onde caractéristique. Connaissant la longueur d'onde du sodium et du potassium, on peut, avec un appareil correctement étalonné, déterminer leurs concentrations.

6°/ Analyses bactériologiques de l'eau

L'eau des puits a été prélevée dans des flacons stériles, puis conservée et transportée dans une glacière au laboratoire. Les analyses ont été faites pendant les quatre heures qui suivent. A Marrakech les analyses ont été effectuées au Laboratoire de Microbiologie du Département de Biologie de la Faculté des Sciences Semlalia, alors que les eaux des puits d'Errachidia ont été analysées au Laboratoire du Centre Hospitalier d'Errachidia en collaboration avec les services de la Délégation à la Santé publique.

1- Coliformes

Le milieu de culture utilisé est la gélose lactosée au Tergitol 7 et au chlorure de Triphényl Tétrazolium (T.T.C.). Les boîtesensemencées sont incubées à 37°C pour les Coliformes totaux et 44°C pour les Coliformes fécaux. Après 24 heures d'incubation, seules les colonies jaune-orange sont considérées comme des colonies de coliformes et sont dénombrées.

2- Streptocoques fécaux

La filtration sur membrane est la méthode utilisée. Le milieu de culture utilisé est le milieu gélosé D. Cocosel, l'incubation a été faite à 37 °C pendant 24 heures. Les colonies de petite taille, translucides et de coloration noire très nette sont dénombrées.

7°/ Traitements statistiques des données

Deux analyses statistiques ont été réalisées au moyen du logiciel SPSS, 1994. SPSS: SPSS 6.1 for Windows Update. SPSS Inc., Chigago, Il, aussi bien pour la classification des stations en fonction de leur faune que lors de la classification des stations en fonction de leurs caractéristiques abiotiques. La première est une analyse en composante principale (ACP) et la seconde est une classification hiérarchique.

1- Analyses en composantes principales

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) consiste à chercher la structure sous jacente à un grand tableau de données empiriques croisant variables et individus (chaque variable est mesurée sur chaque individu), ces structures étant le plus souvent occultées par la complexité et la taille du tableau. Il ne s'agit plus de tester des hypothèses, mais bien de découvrir des structures existantes avant de chercher des hypothèses explicatives (FRONTIER *et al.*, 2001). Dans notre cas, les individus sont les stations, et les variables sont les taxons ou les valeurs moyennes des descripteurs physico-chimiques de l'eau.

2- Analyses hiérarchiques

Une classification hiérarchique est réalisée à partir des coordonnées des individus et des variables (transcrites par l'ordinateur) sur les 4 principaux axes de l'analyse en composantes principales ; elle permet d'établir une typologie des stations à partir des au résultats de l'ACP des stations.

2^{ème} partie

**Qualité des eaux souterraines
et relation avec la
biodiversité**

QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES DES DEUX RÉGIONS D'ÉTUDE

Introduction

Par leur circulation souterraine, les eaux phréatiques se chargent, au contact des différents terrains traversés, d'un certain nombre d'éléments chimiques solubles, chlorures, carbonates, sulfates et autres. Ces éléments peuvent être d'origine géologique ou anthropique. Elles sont capables de changer la qualité des eaux de la nappe et par la suite les caractéristiques de l'écosystème.

Selon la définition de la Directive Cadre Européenne DCE (ROCHE *et al.*, 2005), l'état écologique se réfère « à la structure et au fonctionnement des écosystèmes aquatiques ; l'évaluation en repose donc principalement sur la bio-indication : les peuplements aquatiques, invertébrés et poissons, en sont les juges de paix. Le « bon état » se comprend dès lors comme « bon fonctionnement ». Les seuils concernant les divers paramètres physicochimiques généraux qui contribueront à caractériser chaque masse d'eau doivent donc pouvoir être reliés à l'altération des peuplements.

Pour les polluants toxiques, des normes sont définies sur la base de tests écotoxicologiques. L'évaluation des altérations physiques (ou hydromorphologiques) est requise pour identifier les situations de référence, mais n'intervient pas pour définir le bon état.

Par ailleurs la présence d'une pollution locale au voisinage d'un point d'eau (puits ou source) peut être l'origine de la contamination de la nappe, par infiltration ou par déversement direct. Cette contamination est beaucoup plus accentuée lorsque le puits n'est pas protégé (absence de margelle). Ainsi, l'apport à la nappe d'éléments exogènes, matières organiques, ions azotés, métaux lourds et autres constitue un danger pour la faune aquatique souterraine.

Dans cette partie qui est la 2^{ème} partie de notre travail, nous allons essentiellement présenter les résultats de notre étude physicochimique menée dans la ville d'Errachidia et ses environs. Une telle étude présente un objectif double, d'abord permettre de formuler un diagnostic de la qualité des eaux souterraines dans cette région et par la suite détecter l'impact possible de l'infiltration des eaux usées sur le peuplement souterrain.

Parallèlement à cette étude, nous allons présenter également les résultats des analyses physicochimiques et bactériologiques effectués sur une vingtaine de puits de la ville de Marrakech et de la région minière de Draâ Sfer. Ce travail a pour but de connaître l'état actuel de la nappe de la région après les travaux d'aménagement effectués dans la zone. L'élimination des lagunes de traitement des eaux usées de la ville et l'amélioration de l'état du réseau d'assainissement des eaux usées étant très certainement à l'origine des modifications de la qualité de la nappe. La présence d'une bibliographie assez riche (BOUTIN et DIAS, 1987 ; BOULANOUAR, 1996 ; LYAKHLOUFI, 2001) traitant l'état de la qualité des eaux de cette nappe dans les dernières années, constitue pour nous une base solide permettant le suivi de l'évolution de la qualité des eaux de cette nappe durant les 20 dernières années.

En effet, l'analyse globale des résultats dans les deux régions, nous a permis de comparer l'intensité de l'impact des eaux usées urbaines sur la qualité des eaux de la nappe en relation avec la profondeur de cette dernière et aussi en relation avec l'état de protection des puits.

A/ Cas de la nappe du Haouz et de la région de Marrakech

1°/ Caractéristiques générales de la nappe

a) Facteurs physiques

- La température

La température est un facteur physique fondamental dans les milieux aquatiques superficiels et terrestres. Elle conditionne grandement la répartition des organismes végétaux et animaux et influence l'activité physique des êtres vivants. Elle contrôle aussi l'évolution et la transformation dans le milieu aquatique, de nombreux facteurs chimiques dont l'oxygène dissous, facteur indispensable aux organismes aquatiques.

Dans les eaux souterraines, les variations thermiques sont très atténuées, le sol ne transmettant pas les variations saisonnières de température auxquelles il est soumis à la surface. D'après MORETTE (1964), à partir de 12 à 15 m de profondeur la température de celui-ci est indépendante de sa couche superficielle et à fortiori de la température extérieure. Ainsi à -7,50 m l'amplitude thermique annuelle n'excède pas 2°C. D'autres auteurs (PICARD, 1962; DOLE, 1983) estiment qu'à partir de -50 cm dans le substrats, les écarts journaliers ne se font plus ressentir, alors que les variations saisonnières peuvent encore s'observer.

Finalement il est clair que les variations thermiques du sol sont moins influencées par celles du climat local lorsque la profondeur du point de mesure est plus grande.

À Marrakech, les eaux souterraines se caractérisent par une relative stabilité thermique : les écarts saisonniers dépassent rarement 4°C. Ainsi la température de l'eau des puits étudiés est relativement stable, elle dépend principalement de la situation géographique et du climat général. Les relevés thermiques effectués au niveau des puits étudiés ont montré une légère variation thermique stationnelle : 12°C dans le puits M7 en mars 2004 et 25°C en M6 en juillet 2004; les valeurs moyennes varient entre 19°C dans les stations M1, M7 et M8 et 24°C dans les eaux du puits M2 (annexe). Les températures les plus basses sont enregistrées en mois de mars, elles sont dues à l'alimentation de la nappe en eaux provenant de la fonte des neiges dans le Haut-Atlas. La température de l'eau est un très bon descripteur du fonctionnement des écosystèmes souterrains, elle renseigne sur l'origine de l'eau et l'importance des apports superficiels (CREUZÉ DES CHÂTELLIERS et POINSART, 1991 ; YACOUBI-KHÉBIZA, 1996).

- Le pH

Le potentiel d'hydrogène dépend de plusieurs facteurs tel que l'oxygène dissous, le gaz carbonique et le taux de la matière organique. Ainsi une chute de pH marque l'augmentation de la teneur en CO₂, la diminution de la teneur en O₂ et l'accroissement de la teneur en matières organiques.

Le pH indique le caractère acide ou basique de l'eau. Dans les eaux souterraines, il est déterminé, en partie, par la nature géologique du bassin de drainage. Le pH est également influencé par les précipitations acides, l'activité biologique et certains rejets industriels. Les valeurs du critère de qualité pour l'eau brute d'approvisionnement se situent entre 6,5 et 8,5 et entre 6,5 et 9,0 pour la protection de la vie aquatique (PAINCHAUD, 1997). D'une manière générale, le pH ne constituerait jamais un facteur limitant en hydrobiologie (DELAMARE de BOUTTEVILLE, 1960) sauf dans des situations exceptionnelles, bien entendu.

Les variations du pH dans les eaux souterraines suivent celles des eaux de surface, avec des valeurs qui sont toujours moins élevées (RUFFO, 1961 ; ANGELIER, 1962). Tous les puits prospectés ont des pH proches de la neutralité (figure 12), les valeurs observées sont comprises entre 7,3 dans le puits P6 et 7,97 dans le puits P4. C'est le cas aussi des puits situés dans le sud du Maroc, dans la région de Guelmim (BOUTIN et IDBENNACER, 1989) et dans la région d'Agadir (BOULAL, 2002).

Qualité des eaux souterraines des deux régions d'étude-----

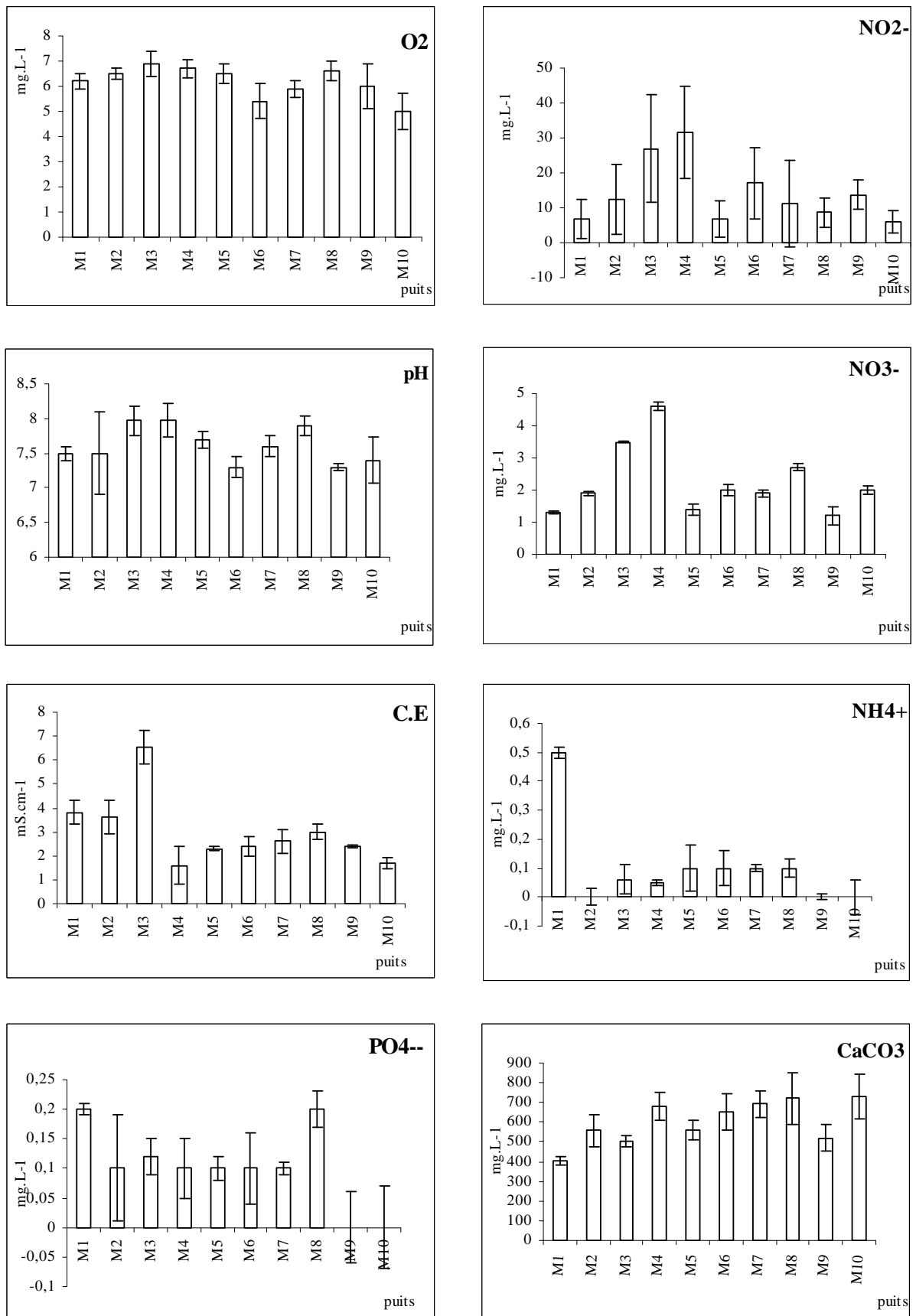


figure 12 : Valeurs moyennes (et écarts-types) des principales variables physico-chimiques de l'eau des puits des 10 puits étudiés dans la ville de Marrakech et ses environs.

La comparaison des valeurs obtenues lors de notre étude avec celles relevées par BOULANOUAR (1986, 1995), montre un léger changement, depuis les travaux d'aménagement de la zone d'épandage.

La stabilité de la neutralité de eau des puits (figure 12) pourrait résulter d'un équilibre entre les fortes teneurs en dioxyde de carbone et les bicarbonates de calcium dissous, stabilisées par l'effet tampon résultant de la forte minéralisation des eaux.

- Conductivité électrique

La conductivité électrique des eaux exprime la minéralisation globale, elle traduit la charge ionique de cette eau. Les pollutions domestiques et industrielles modifient souvent les teneurs naturelles de différents éléments, une modification de la conductivité permet ainsi de mettre en évidence ces pollutions. Elle est proportionnelle à la concentration des sels ionisables qui dépend elle-même, pour une part, de la température de l'eau. C'est un indice de l'abondance des ions dans l'eau. Les acides et les bases inorganiques ainsi que les sels contribuent fortement à la conductivité de l'eau.

NISBET et VERNEAUX (1970), estiment que la conductivité électrique permet d'apprécier le degré de minéralisation de l'eau, mais ne doit pas être considérée seule lors de l'étude d'aquifères inconnus. Parfois en effet, les fluctuations des valeurs de la conductivité sont, en grande partie, expliquées par les changements de régime hydrologique.

Les eaux souterraines analysées présentent des valeurs de conductivité généralement élevées (figure 12), dépassant largement la valeur guide fixée par les normes européennes ($100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Elles sont, généralement, comprises entre $1\ 638,50 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ dans le puits M4 situé dans l'ancienne usine de traitement des ordures ménagères, et $6\ 538,3 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ dans le puits M3 situé près du périmètre de 'la casse' ou plus précisément juste à l'aval hydraulique de ce périmètre (figure12). Ce dernier constitue un cas exceptionnel, puisqu'il est situé juste à 400 m d'un autre puits (qui n'est pas considéré dans cette étude), qui présente une conductivité relativement plus faible, soit $4\ 708,2 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. La forte minéralisation de l'eau de ce puits pourrait être due soit à l'existence d'une formation géologique saline locale limitée à l'endroit dans lequel le puits M3 est creusé soit à un impact particulièrement marqué des rejets de 'la casse'.

b) Facteurs chimiques

- Oxygène dissous

Dans les eaux souterraines, les teneurs en oxygène dissous sont relativement faibles par rapport à celles des eaux de surface, à cause de l'absence des végétaux photosynthétiques, du faible contact eau-atmosphère, et de l'absence de la turbulence de l'eau. Néanmoins, une circulation rapide, entraînant un renouvellement perpétuel d'eau, assure parfois une bonne oxygénation de l'eau, en milieu hypogé dans les biotopes hyporhéiques (ANGELIER, 1962 ; HAHN, 2006).

À Marrakech, les teneurs en oxygène dissous sont très variables d'une station à l'autre (figure 12). Les eaux du puits M2, situé dans la nappe des Jbilet, sont les plus oxygénées avec un pourcentage de 73,1% de saturation, alors que l'eau du puits M6, situé dans la zone d'épandage, est la moins oxygénée avec 0,1 mg.L⁻¹ (pendant une mission du mois de juin 2005) d'oxygène dissous soit 1,1% de saturation. Donc là aussi il y a des corrections à apporter

La concentration en oxygène de l'eau des autres puits est assez variable; elle dépasse à peine 6 mg .L⁻¹ dans les puits M3, M4, M5 et M8 situés dans la zone d'épandage et dans M1 situé dans la décharge publique. Dans les puits M6 et M10 , les teneurs en oxygène sont relativement plus faibles, elles sont inférieures à 6 mg.L⁻¹.

Cette variation d'oxygénation de l'eau des puits a été déjà signalée par plusieurs auteurs. A Marrakech, BOULANOUAR, (1986) a remarqué que les teneurs en oxygène passent de 30% à 65% de la saturation d'un puits à l'autre. À Guelmim (où la température est plus élevée...) , IDBENNACER, (1990) a signalé que les puits prospectés dépassent rarement 50% de saturation. Dans les puits des vallées du Haut-Atlas, les teneurs en oxygène sont beaucoup plus élevées (YACOUBI-KHEBIZA, 1990), en relation avec l'alimentation directe de ces puits à partir des eaux des oueds et des nappes alluviales bien oxygénées.

L'ensemble des résultats obtenus et en comparaison avec les études antérieures réalisées dans différentes régions du Maroc (BOULAL, 1988 et 2002 ; YACOUBI-KHEBIZA, 1990 et 1996 ; FAKHER EL ABIARI, 1999) montrent que l'oxygénation de l'eau dans les puits prospectés est relativement normale sauf dans le puits M6 où la teneur en oxygène est très faible (1,1% de saturation).

L'anoxie de ce puits est due, entre autres, à une contamination organique. En effet, ce puits est creusé dans un secteur de l'ancienne zone d'épandage où il y'a des fosses septiques en abondance.

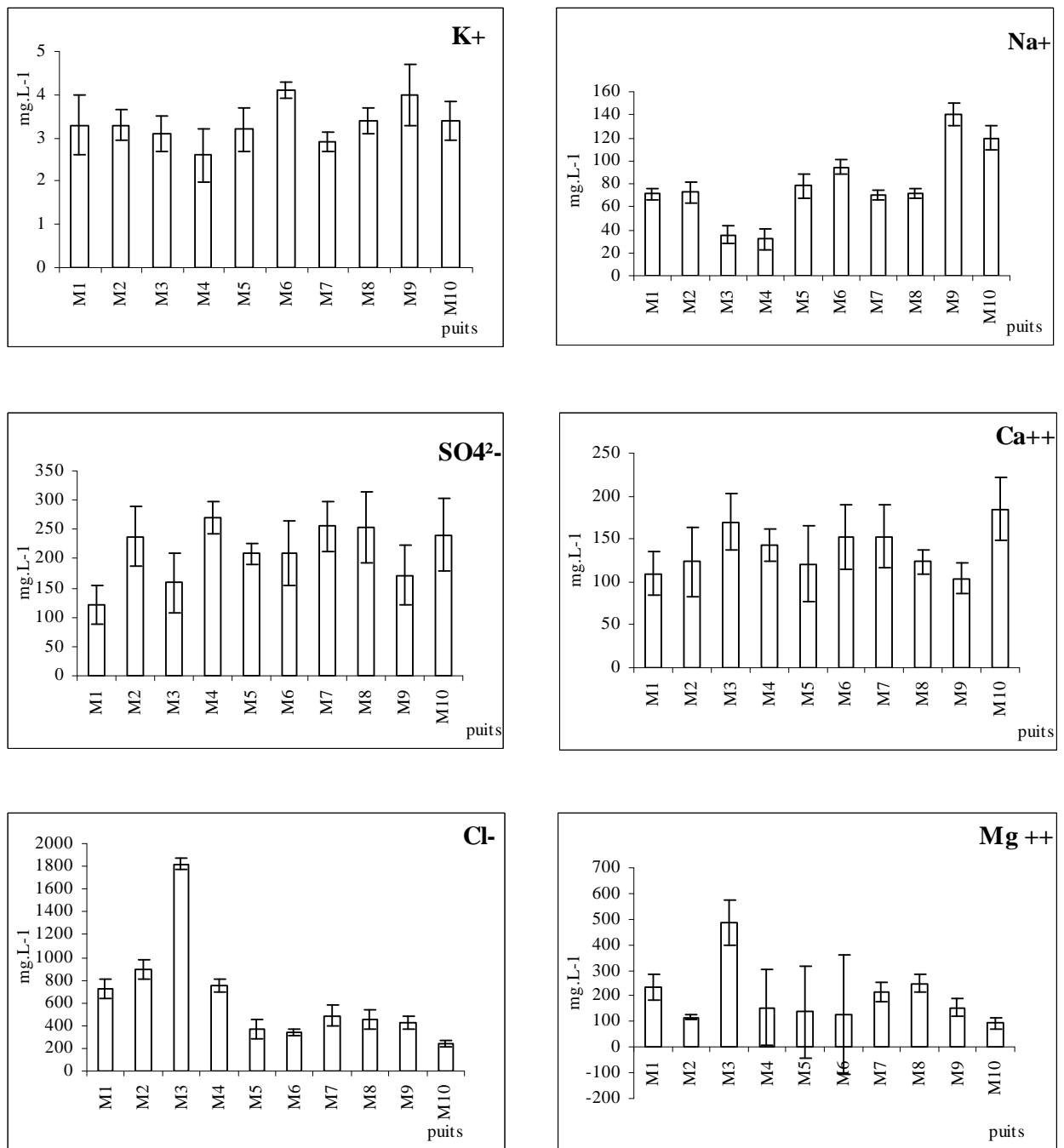


Figure 12 bis : Valeurs moyennes (et écarts-types) des principales variables physico-chimiques de l'eau des puits des 10 puits étudiés dans la ville de Marrakech et ses environs (suite).

En se référant à la grille du projet des normes marocaines de la qualité des eaux destinées à la production de l'eau potable, il s'avère que les puits étudiés appartiennent à deux groupes ; le premier est constitué des puits M1, M3, M5 et M6 appartenant à la classe A3 (qui demande un traitement physique et chimique poussé et désinfection); le deuxième est constitué des puits M2, M4, M7, M8, M10 et M11 qui appartiennent à la classe A2 (classe qui demande un traitement physique et chimique normal et une désinfection).

- Dureté totale

La dureté totale où titre hydrotimétrique d'une eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques à l'exception des métaux alcalins et des ions hydrogènes. Dans la plupart des cas, la dureté est due aux ions calcium et magnésium (RODIER, 1984).

La dureté totale de l'eau des puits prospectés est forte, cela est dû à la nature calcaire des terrains géologiques traversés par l'eau ; elle est très variable d'une station à l'autre (figure 12). L'eau du puits M10 présente la dureté totale la plus élevée: 732 mg.L^{-1} (CaCO_3) en juillet. L'eau du puits M9 situé à l'École des Mines de Marrakech, se distingue par une dureté assez faible et ne dépassant pas 504 mg.L^{-1} (CaCO_3).

- Dureté calcique

La concentration en Ca^{2+} est liée directement à la nature géologique des terrains traversés par les eaux. Les ions calcium résultent de l'attaque par l'eau chargée de dioxyde de carbone des roches calcaires ou de la simple dissolution des sulfates comme le gypse.

Le calcium joue un rôle essentiel dans la constitution des squelettes et des coquilles, et dans les phénomènes de perméabilité cellulaire, il est concentré par les organismes à partir de l'eau ou des aliments. Il ne peut en aucun cas poser des problèmes de potabilité, le seul inconvénient domestique lié à une dureté élevée est l'entartrage. Par contre, les eaux très douces peuvent entraîner des problèmes de corrosion des canalisations (GAUJOUS, 1995).

Dans l'ensemble des puits étudiés à Marrakech, les teneurs en ions calcium suivent de très près celles de la dureté totale (figure 12 bis). Elles sont très variables d'un puits à l'autre. Dans le puits M3 les teneurs en Ca^{2+} sont les plus élevées ($169,9 \text{ mg.L}^{-1}$). Alors que, les teneurs les plus faibles ont été enregistrées dans le puits M9 ($104,2 \text{ mg.L}^{-1}$). Dans les autres puits et à l'exception de M1 et M3 les duretés sont légèrement supérieures à 100 mg.L^{-1} , correspondant à la valeur guide fixée par les normes de l'OMS. Les valeurs mesurées dans les différents puits sont relativement faibles par rapport aux valeurs signalées dans d'autres régions du Maroc (TOUYER, 1996 ; BOULAL, 2002).

- Dureté magnésienne

Les teneurs moyennes en Mg^{2+} sont très élevées dans la majorité des eaux des puits (figure 12 bis). Elles sont comprises entre $94,25 \text{ mg.L}^{-1}$ (M10) et $485,1 \text{ mg.L}^{-1}$ (M3). Ces fortes teneurs sont en relation avec la nature dolomitique du substrat traversé par l'eau. Les ions Mg^{2+} contribuent considérablement à la dureté de l'eau. En effet, le poids du magnésium, exprimé en mg.L^{-1} , représente selon les stations, entre 1/2 et 1/3 du poids du calcium. Ce qui correspond pour le magnésium à des concentrations en milliéquivalents par litre qui atteignent 42 à 89% de la concentration du calcium.

- Sulfates

La présence des sulfates dans l'eau peut être liée à la dissolution de gypse, au lessivage des terrains pyrifères ; ou à l'oxydation des sulfures (BAKALOWICZ, 1974) ou encore d'origine anthropique en relation avec une pollution industrielle ou urbaine (MISEREZ, 1973).

Les eaux des puits étudiés sont séléniteuses, les teneurs en SO_4^{2-} sont largement variables d'une station à l'autre, allant de $120,9 \text{ mg.L}^{-1}$ dans le puits M1, situé dans la nappe de Jbilet à $269,9 \text{ mg.L}^{-1}$ dans les eaux du puits M2, situé à la décharge publique au niveau de la nappe des Jbilet (figure 12 bis).

Les puits prospectés par BOUTIN et DIAS (1987) dans la zone d'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech présentaient des teneurs en sulfates allant de 100 à 200 mg.L^{-1} . Alors que les eaux des puits de la région de Tiznit étudiés par BOULAL (1988) sont moins séléniteuses avec des concentrations comprises entre 20 et 120 mg.L^{-1} .

Selon le projet des normes marocaines de la qualité des eaux destinées à la production d'eau potable qui exigent une 'valeur limite' de 200 mg.L^{-1} de sulfates, la majorité des puits prospectés répondent à cette valeur ; sauf le puits M1 qui présente une teneur très élevée en sulfates liée à la contamination de ces eaux à partir de la décharge publique.

- Chlorures

Les chlorures peuvent avoir une triple origine dans les milieux aquatiques : naturelle, lorsqu'ils proviennent des intrusions marines ou dans les terrains salés (EL ACHHEB *et al.*, 2001 ; TRABELSI *et al.*, 2005), humaine (10 à 15 g de NaCl sont rejetés dans les urines par jour et par personne) ou encore industrielle (potasse, industrie pétrolière et agro-alimentaire) (GAUJOUS, 1995). En France, des études récentes (BARBIER, 2005) ont montré que les eaux des sources présentent souvent des concentrations en chlorures négativement corrélées avec

l'altitude. Cela a été expliqué par le ratio évapo-transpiration/pluies, plus faible en altitude, ou d'une variation de la composition des pluies et par une solubilisation croissante, tout au long du cours d'eau, des roches solubles.

Les teneurs en ions Cl^- varient d'une station à l'autre (figure 12 bis). Elles sont situées entre 1 820 mg.L^{-1} dans le puits M3 et 244,9 mg.L^{-1} dans M6. Selon les normes marocaines des eaux destinées à la production de l'eau potable, qui exigent un maximum de 300 mg.L^{-1} et 750 mg.L^{-1} (valeur impérative), les eaux des puits sont dans les normes sauf le puits M10, dont la teneur en Cl^- des eaux est inférieure à la valeur guide avec 244,95 mg.L^{-1} , et les puits M1 (724,1 mg.L^{-1}), M2 (894,6 mg.L^{-1}) et M3 (1 820,5 mg.L^{-1}) dans lequel la salinité de l'eau dépasse la valeur impérative.

- Composés azotés:

L'azote est l'un des composants importants de la matière vivante. Dans les eaux, cet élément peut être présent soit sous forme combinée dans les composés organiques, soit sous forme minérale plus simple : ions ammonium, nitrites et nitrates, en provenance de la dégradation de la matière organique (eaux usées et lixiviats des décharges), ou des engrais chimiques.

- Nitrates (NO_3^-)

Vu le danger que peuvent présenter les nitrates dans l'eau de boisson, risque de méthémoglobinémie (cyanose) et formation de nitrosamines (carcinogènes), la valeur maximale admissible en cet élément a été fixée à 50 mg.L^{-1} par la totalité des normes internationales sauf les normes américaines qui fixent 45 mg.L^{-1} comme valeur maximale admissible.

À l'exception du puits M9, les teneurs sont inférieures à celles citées par SAHILI (1996), qui observe dans la zone d'étude des valeurs comprises entre 50 mg.L^{-1} et 70 mg.L^{-1} ou encore à celles signalées par LYAKHLOUFI *et al.*, (1997) qui à son tour dans sa zone d'étude note de 55 mg.L^{-1} à 135 mg.L^{-1} . Cela révèle certainement une amélioration de la qualité des eaux de la nappe dans la région d'El Azouzia. En effet, les champs irrigués par les eaux usées pendant les années 80, ont été lotis et sont actuellement des couverts de bâtiments et les eaux usées ont été canalisées et conduites plus en aval, vers le Nord.

- Nitrites (NO_2^-)

Les nitrites constituent le plus souvent un stade intermédiaire, peu stable, entre les ions ammonium (NH_4^+) et les nitrates (NO_3^-). On ne les rencontre que lorsqu'il existe un déséquilibre au niveau de l'oxygénation et l'activité de la flore bactérienne de l'écosystème.

En dehors de tout apport externe (industriel, chimie, ...), les nitrites proviennent soit d'une oxydation incomplète de l'ammoniaque, soit, dans les situations exceptionnelles, d'une réduction des nitrates sous l'influence d'une action dénitrifiante (RODIER, 1984).

À l'exception des puits M3 (3,5 mg.L⁻¹) et M4 (4,6 mg.L⁻¹) qui présentent les teneurs les plus élevées en nitrites, et dépassent la valeur maximale admissible par les normes de l'OMS, les autres puits présentent des eaux ayant des teneurs faibles en nitrites. Elles varient de 1,2 mg.L⁻¹ dans le puits M9 à 2,7 mg.L⁻¹ dans le puits M8 (figure 12).

Les teneurs relativement élevées dans le premier groupe peuvent être expliquées par l'effet de l'ancienne usine de traitement des ordures ménagères (cas du puits M4) ou encore par l'effet de l'ancienne zone d'épandage des eaux usées pour les deux puits M3 et M7. Ces constatations confirment celles de BOUTIN et DIAS (1987) qui ont signalé des teneurs en nitrites variant de 0,14 à 0,59 mg.L⁻¹.

L'évolution temporelle des teneurs en nitrates montre que c'est lorsque les teneurs en oxygène sont faibles, que les teneurs en nitrates sont faibles et les teneurs en nitrites sont plus élevées.

- Ions ammonium (NH₄⁺)

La présence des ions ammonium dans les eaux, est souvent le signe d'une dégradation incomplète de la matière organique en relation avec le manque d'oxygène disponible. Il est l'indice d'une contamination par des rejets d'origine humaine ou industrielle (RODIER, 1984 et BOULANOUAR, 1986).

L'ammonium est présent dans les puits prospectés avec des teneurs qui varient de 0,01 mg.L⁻¹ (M2, M9 et M10) à 0,5 mg.L⁻¹ dans M1 (figure 12 et Tableau donné à l'annexe n° 4). D'après les normes marocaines, les eaux des puits prospectés sont classées dans la classe A1 (qui nécessite un traitement physique et chimique simple). Nos résultats concordent avec les travaux de MAZLANI (1995) faits dans la région de Marrakech, où l'auteur a signalé une pollution organique locale de la même nappe.

- Orthophosphates (PO₄³⁻)

Les Orthophosphates ont le plus souvent une origine urbaine (composants des détergents) ou agricole (lessivage d'engrais) ; ils sont comme les nitrates, un nutriment majeur des végétaux, qui peuvent, dans les milieux aquatiques, entraîner leur prolifération à partir de 0,2 mg.L⁻¹. On considère généralement que les variations des concentrations des phosphates constituent l'élément limitant des phénomènes d'eutrophisation (RÉFEA, 2003).

Tous les puits prospectés présentent des teneurs très faibles (et non détectables) ou faibles en Orthophosphates (figure 12), comprises entre 0 mg.L⁻¹ (M9 et M10) et 0,2 mg.L⁻¹ (M1 et M8). Ces valeurs sont négligeables par comparaison avec celles observées par BOULANOUAR (1995) dans la zone d'épandage à l'époque de ses investigations (2,55 mg.L⁻¹). L'amélioration de la qualité de l'eau durant une période d'une quinzaine d'années, est certainement due à la réhabilitation du réseau d'assainissement et à la suppression des canaux d'eaux usées dans la région.

c) Typologie des stations (Spectres physicochimiques de l'eau)

À fin de comparer les stations entre elles, nous avons réalisé des spectres physicochimiques de la qualité de l'eau. L'efficacité de cette méthode a été reconnue par plusieurs auteurs (BOULANOUAR, 1985 ; YACOUBI-KHEBIZA, 1990 ; BOULAL *et al.*, 1997). Le spectre comporte les valeurs moyennes des principaux facteurs physicochimiques analysés pour chaque station ; aussi pour rendre la comparaison significative, nous avons utilisé la même échelle pour toutes les stations. Les facteurs composants le spectre sont comme suit :

- dureté totale, magnésienne et calcique, les sulfates et les chlorures. Ces facteurs contribuent fortement à la minéralisation naturelle de l'eau, elles sont liées à son origine géologique et à la nature des aquifères traversés.
- Les nitrates, nitrites, ammonium et les orthophosphates (exprimées en mg.L⁻¹) qu'on considère comme des ions indicateurs de pollution organique.
- La conductivité (en mS.cm⁻¹) qui résulte de la minéralisation totale de l'eau, et qui dépend de l'ensemble des ions dissous.

La lecture des spectres obtenus montre une grande influence de la dureté totale et des chlorures sur la qualité de la majorité des puits. Ainsi trois groupes de puits sont à signalés, chacun étant caractérisé par un certain type de forme (figure 13):

Groupe 1 : composé des puits M1 et M2 situés dans la nappe de Jbilet à proximité de l'Oued Tensift. Le spectre relatif à la qualité de leurs eaux est beaucoup plus attiré par les ions chlorures, traduisant des eaux relativement salées (ou fortement minéralisées).

Groupe 2 : puits M3, M4 et M6 situés au nord de la ville de Marrakech. L'eau de la nappe phréatique est très polluée ; elle présente des teneurs élevées en ions chlorures et nitrates.

Groupe 3 : composé du puits M5, M7, M8, M9 et M10. Les teneurs en chlorures dans l'eau de ces puits sont faibles en comparaison avec les autres groupes. La dureté calcique et magnésienne restent relativement élevées.

Afin de vérifier les résultats qui précèdent et afin d'établir une typologie des stations en prenant en considération tous les facteurs étudiés, nous avons procédé à une analyse des résultats au moyen d'une Analyse en Composantes Principales.

2°/ Classification des stations sur la base de la physico-chimie de l'eau au moyen d'une ACP

Pour réaliser une typologie des stations en fonction de la qualité de l'eau, nous avons donc procédé à une analyse en composantes principales. La matrice de données est composée de 10 lignes correspondant aux puits étudiés dans les environs de la ville de Marrakech et 16 colonnes correspondants aux facteurs physicochimiques mesurés ou analysés (Tableau Annexe n° 4).

1- Signification des axes

L'examen des résultats numériques de l'analyse en composantes principales de la matrice de données permet de connaître les contributions des différentes composantes aux principaux axes. Ces résultats sont présentés sur le Tableau 4. Ainsi, les deux premiers axes 1 et 2 expriment respectivement 34,4 et 19,9% de la variance totale, soit ensemble 54,4%.

Du point de vue qualité de l'eau, l'axe 1 oppose du côté positif, les facteurs pH, CE (conductivité), nitrates, nitrites, ammonium et orthophosphates ayant les plus fortes contributions à la formation de cet axe, aux facteurs CaCO_3 , Mg^{2+} et SO_4^{2-} qui contribuent à la formation du même axe mais du côté négatif. Cet axe est un axe de qualité, il oppose les facteurs indicateurs de la minéralisation de l'eau à ceux indicateurs de la pollution organique. La dureté calcique et magnésienne ainsi que le sodium, le potassium et les sulfates contribuent fortement à la formation du 2^{me} axe (Tableau 4). Il apparaît donc que cet axe traduit aussi la minéralisation des eaux.

L'application d'une classification hiérarchique aux résultats de l'analyse en composantes principales a permis de classer les stations étudiées, à Marrakech, en trois groupes, selon la qualité physicochimique de leurs eaux (figure 14 B et 15).

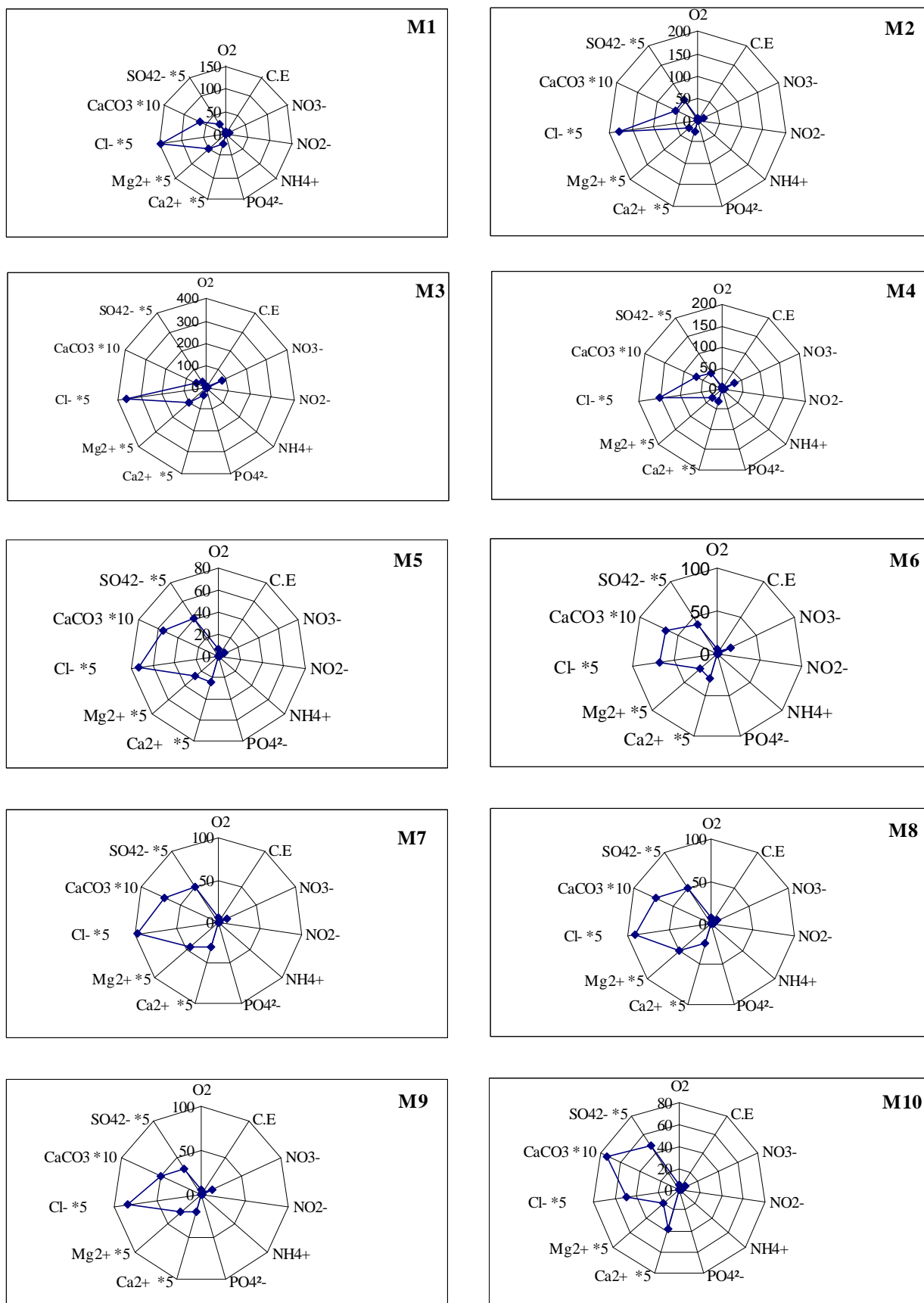


Figure 13 : Spectres de qualité des eaux des puits étudiés situés dans la ville de Marrakech et ses environs. Les concentrations les éléments chimiques sont exprimées en mg.L^{-1} sauf pour C.E en mS.cm^{-1} . (* les concentrations des ions Ca^{2+} , Mg^{2+} et Cl^- sont réduites 5 fois et celle du CaCO_3 est réduite 10 fois, est ce la pour rendre les spectres plus lisibles).

Groupe I : formé des stations M3 et M4. L'eau de ces puits est relativement bien oxygénée (avec les taux d'oxygène les plus élevées: 6,7 et 6,9 mg.L⁻¹), mais aussi avec des teneurs en ions azotés très élevées: les plus fortes teneurs en nitrates et nitrites observées dans la région. Le puits M3 situé dans la zone industrielle reçoit les infiltrations des eaux usées provenant de la décharge publique. Les eaux de ce puits sont caractérisées par une forte minéralisation et une conductivité assez élevée, de l'ordre de 6,53 mS.cm⁻¹; le puits M4 est situé au contraire dans l'ancienne zone d'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech, sa conductivité est actuellement faible mais les sols sont certainement encore imprégnés par les composés organiques qui se sont accumulés pendant des dizaines d'années d'où les teneurs encore élevées en ions azotés.

Groupe II : regroupe les stations M1 et M9, situées loin de toute source de pollution, les eaux sont plutôt de bonne qualité physico-chimique avec une minéralisation relativement élevée, liée à la nature schisteuse des terrains. Les valeurs de la conductivité électrique sont respectivement de 3,8 mS.cm⁻¹ dans M1 et 2,4 mS.cm⁻¹ dans M9. Les eaux de ces puits sont normalement oxygénées, avec des teneurs qui dépassent généralement 6 mg.L⁻¹ pendant toute la période de l'étude. Les teneurs en nitrates sont parmi les plus faibles et les teneurs en nitrites sont les plus faibles de celles observées dans la région. On peut donc considérer que l'eau de ces puits est de qualité relativement bonne.

Groupe III : regroupe l'ensemble des stations, situées à l'extérieur de la zone d'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech (M2, M5, M6, M7, M8, M10). Elles se caractérisent par des teneurs en ions organiques assez faibles (Voir Annexe N° 4). Ces puits sont bien protégés et sont situés loin de toute sources de pollution. Leur minéralisation globale exprimée par la conductivité électrique varie entre 1,7 mS.cm⁻¹ dans M10 et 3,6 mS.cm⁻¹ dans M2. Les teneurs en ions azotés sont généralement faibles: la valeur la plus élevée dans ce groupe de stations est enregistrée dans les eaux du puits M6 (17,1 mg.L⁻¹ de nitrates). On peut estimer que l'eau de ces stations est de qualité moyenne et variable.

	Axe 1	Axe 2
O₂	0,4189	0,5148
pH	0,8956	0,2566
CE	0,8340	0,0061
NO₃	0,8891	0,2592
NO₂	0,6911	0,3864
NH₄⁺	0,8999	0,0122
PO₄	0,8450	0,0878
CaCO₃	-0,4277	0,7343
K⁺	-0,0360	0,6103
Na⁺	-0,2188	0,7094
SO₄	-0,3763	0,7627
Tac	0,1615	-0,2312
Ca²⁺	0,3094	0,0595
Mg²⁺	-0,4582	0,5430
Cl⁻	0,0437	0,2908

Tableau 4 : Contributions des facteurs physico-chimiques aux deux premiers axes factoriels de l'ACP (cas des puits de la ville de Marrakech et ses environs). **O₂** : oxygène dissous ; **CE** : conductivité électrique ; **NO₃⁻** : nitrates ; **NO₂⁻** : nitrites ; **NH₄⁺** : ammonium ; **PO₄³⁻** : orthophosphates ; **CaCO₃** : dureté ; **K⁺** : potassium ; **Na⁺** : sodium ; **SO₄** : sulfates ; **TAC** : titre alcalimétrique complet ; **Ca²⁺** : calcium ; **Mg²⁺** : magnésium et **Cl⁻** : chlorures.

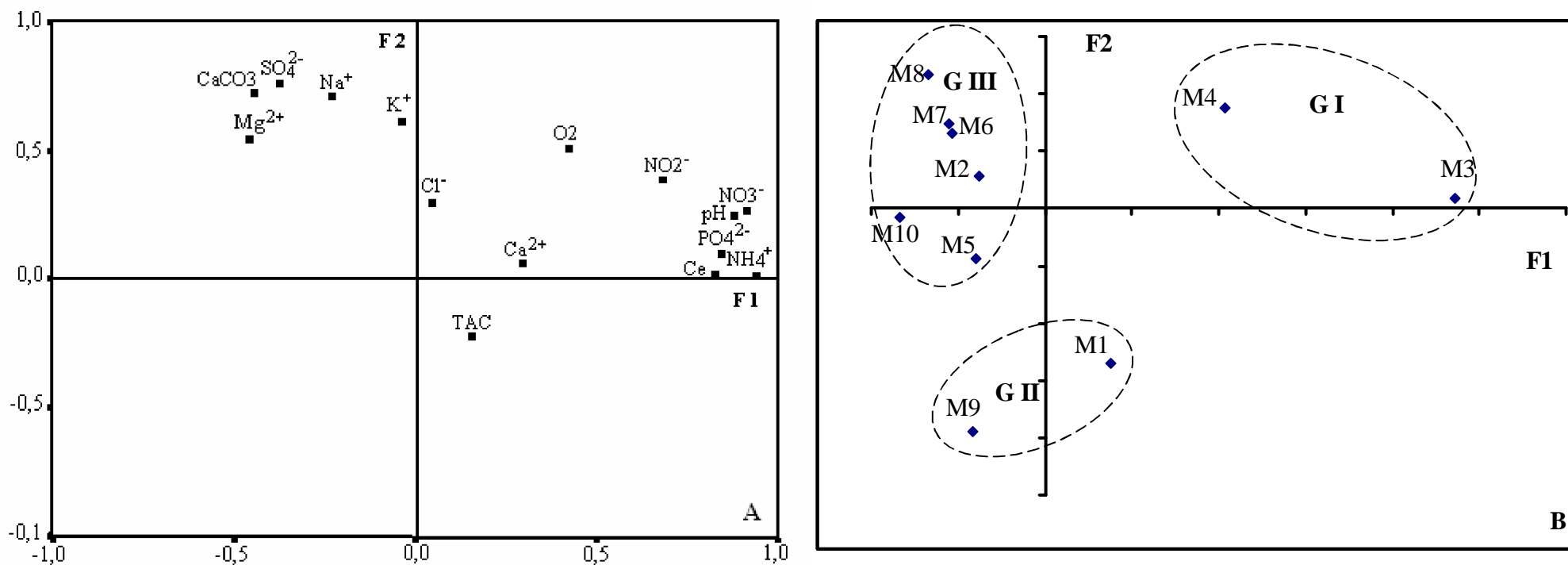


Figure 14 : Projection des facteurs physicochimiques de l'eau (A) et des stations (B) sur le plan des deux premiers axes de l'analyse en composantes principales (cas des puits situés dans la ville de Marrakech et ses environs). **Ce**: conductivité électrique ; **O₂** : oxygène dissous, **NO₃⁻** : nitrates ; **NO₂⁻** : nitrites ; **NH₄⁺** : ammonium ; **PO₄²⁻** : Orthophosphates ; **k⁺** : potassium ; **Na⁺** : sodium ; **SO₄⁻** : sulfates ; **TAC** : titre alcalimétrique complait, **Ca²⁺** : calcium ; **Mg²⁺** : magnésium, **Cl⁻** : chlorure, **CaCO₃** : dureté totale.

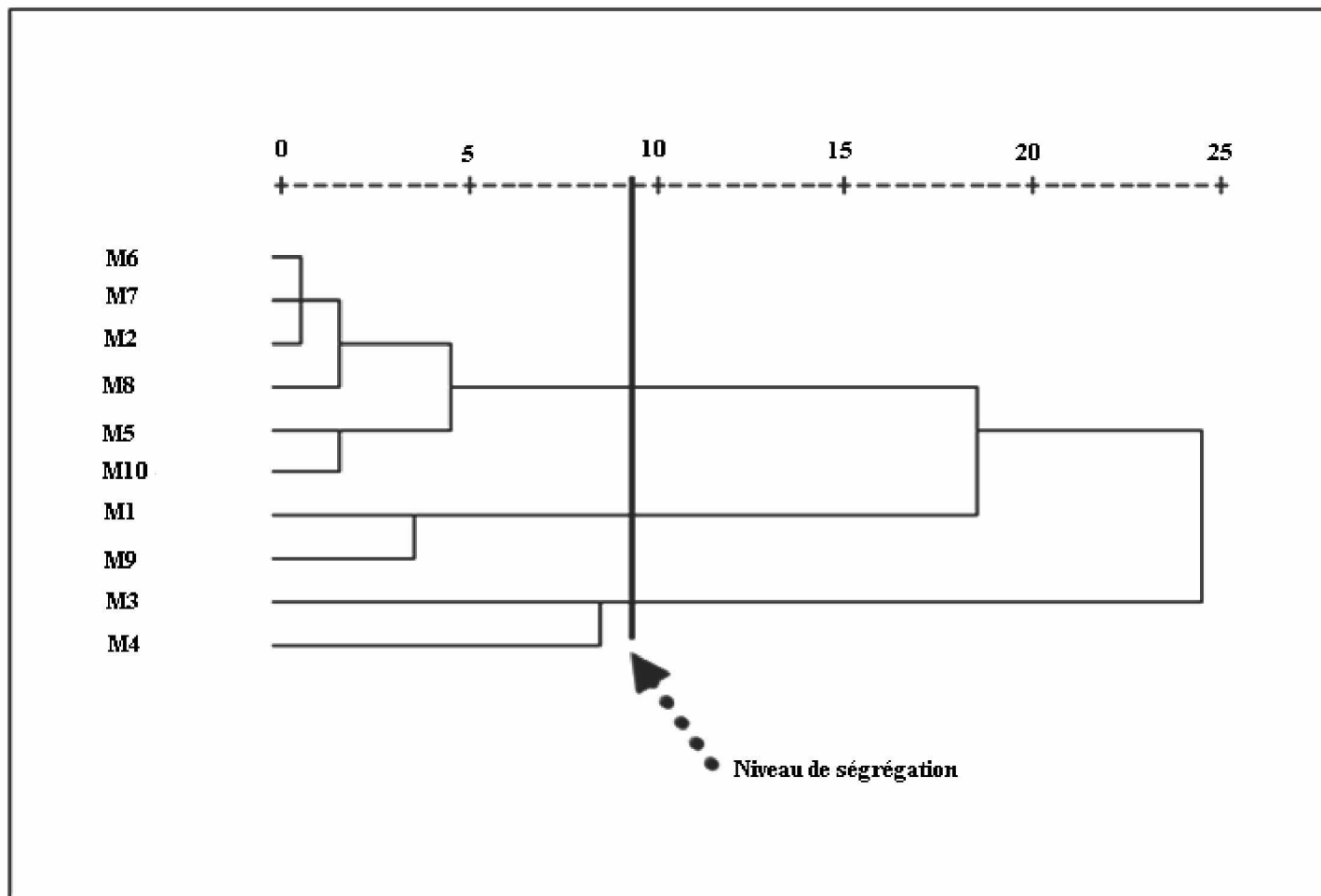


Figure 15 : Dendrogramme résultant d'une analyse hiérarchique effectuée sur les résultats de l'analyse en composantes principales des stations étudiées dans la région de Marrakech, décrites par les caractéristiques physico-chimiques de leur eau.

2- Conclusion

Il ressort des analyses physicochimiques effectuées sur l'eau des puits étudiés dans la région de Marrakech que :

- Les eaux de la nappe des Jbilet sont relativement minéralisées, comparées à celles de la nappe du Haouz. Cette minéralisation est liée sans doute à la fois à la nature géologique de la zone de Jbilet et à l'impact de la nouvelle décharge publique sur la qualité de la nappe de la région. Cet effet est très remarquable au niveau du puits M2.

- Les puits creusés dans l'ancienne zone d'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech présentent des eaux qui sont encore contaminées par les apports des eaux usées infiltrées vers la nappe et ayant pollué les sols. Les analyses physicochimiques ont montré que les eaux de ces puits sont peu oxygénées, elles présentent des teneurs élevées en ions azotés et en orthophosphates. La comparaison des résultats des analyses des paramètres physico-chimiques actuels avec ceux de BOULANOUAR (1995) montre cependant une légère amélioration de la qualité des eaux de ces puits. Cette amélioration est due à la réhabilitation du réseau d'assainissement effectuée dans cette zone et à l'assèchement de la lagune qui n'est plus fonctionnelle. Le puits M3 situé dans le périmètre de 'la casse' présente un cas exceptionnel. Les eaux de ce puits présentent un degré de minéralisation assez élevé.

- Les puits situés à l'extérieur de l'ancienne zone d'épandage présentent une eau de bonne qualité. Tous ces puits sont généralement bien protégés, ils sont situés loin de toute source de pollution.

3°/ Impact de l'activité minière sur la qualité de la nappe du Haouz

1- Introduction

L'exploitation minière de métaux de base (Cu, Pb et Zn) est comptée parmi les activités industrielles génératrices de sérieux problèmes de pollution métallique des ressources en eau (BRAKE *et al.*, 2001 ; MAQUÉS *et al.*, 2001 ; DENIMAL *et al.*, 2002 ; MILU *et al.*, 2002). En plus de leur charge en métaux lourds, les résidus qui en résultent sont enrichis en minéraux sulfurés et particulièrement en sulfures de fer (pyrite et pyrrhotite) qui sont économiquement non exploitables par ces industries (HOLMSTROM *et al.*, 2001). L'oxydation de ces minéraux sous l'action de l'eau et de l'oxygène atmosphérique permet aux résidus de produire, en absence des calcaires, des effluents dont les eaux sont généralement acides et chargées en micropolluants minéraux et en ions majeurs, notamment les sulfates (NORDSTROM *et al.*, 2000). Ces lixiviats appelés drainage minier acide (DMA) ou neutre (DMN), dont les processus chimiques et biologiques de formation sont largement décrits dans la littérature (STROMBERG et BANWART, 1999), constituent une source de nuisance pour l'environnement en général. En effet, ils ont été responsables de l'apparition de cas de forte contamination métallique du milieu récepteur qui peut être un écosystème terrestre et/ou un écosystème aquatique (EL GHARMALI, 2005).

Dans la région de Marrakech, il existe plusieurs gisements de minerais métallifères qui ont été exploités à certaines époques; d'autres sont encore en activité comme ceux des mines de Guemassa et de Drâa Sfar. Cette dernière est localisée dans le périmètre de Mrabatine qui est une excellente zone agricole du Haouz de Marrakech. Depuis qu'elle a repris son activité en l'an 2000, un effluent est déchargé directement dans le cours d'eau de oued Tensift, situé à 500 m environ au nord de la mine. De plus, des quantités importantes de résidus miniers solides sont déchargées à l'air libre près du cours d'eau. Ces résidus sont exposés directement aux agents de transport naturels, notamment aux eaux de ruissellement et d'infiltration.

Les études d'impact des mines sur l'environnement sont rares (TAHLIL, 1998 ; EL GHERMALI *et al.*, 2004 ; EL GHERMALI 2005). C'est pour cette raison que parallèlement aux études sur l'impact des pollutions organiques, déjà réalisées ou celles en cours, nous avons consacré une partie de notre travail à l'impact des rejets miniers sur les ressources en eaux de cette région, qui servent à l'irrigation et à l'alimentation en eau potable des populations riveraines.

2- Qualité des eaux

2-1 Paramètres physico-chimiques

Les résultats des analyses physico-chimiques des échantillons d'eau des puits sont présentés dans l'annexe N° 5. Ils montrent que le pH moyen de l'eau de ces puits varie en moyenne entre 6,64 dans P5 à 7,36 dans P2. Les concentrations en oxygène dissous varient (toujours en valeurs moyennes) entre 4,48 mg.L⁻¹ dans P3 et 6 mg.L⁻¹ dans P1.

La conductivité électrique montre une augmentation importante de l'amont à l'aval hydraulique de la mine. Elle passe d'une valeur moyenne de 1,8 mS.cm⁻¹ et 2 mS.cm⁻¹ respectivement dans P1 et P2 à 15 mS.cm⁻¹ dans P4 et 18 mS.cm⁻¹ dans P3. Ces valeurs diminuent légèrement dans P5 (10 mS.cm⁻¹) et P6 (6 mS.cm⁻¹). Au niveau du P7, la station la plus à l'aval, la conductivité électrique est redevenue comparable à celle du puits P1 situé en amont de la mine (figure 8).

2-2 Paramètres indicateurs de la pollution minérale

Les concentrations moyennes des sulfates varient entre 118 mg.L⁻¹ dans P1 et 617 mg.L⁻¹ dans P4. Pour l'ensemble des puits, ces teneurs présentent la même évolution que la conductivité électrique. Dans le cas du magnésium, les concentrations moyennes oscillent entre 21,97 mg.L⁻¹ dans P1 et 333,70 mg.L⁻¹ dans P5. Le calcium présente la même évolution avec des concentrations moyennes de 285,77 mg.L⁻¹ dans P1 et 1 711,80 mg.L⁻¹ dans P4. Les teneurs moyennes des chlorures sont également élevées, elles passent de 359 mg.L⁻¹ dans P1 à 7 674 mg.L⁻¹ dans P3. Ces teneurs diminuent régulièrement en allant vers l'aval, pour atteindre 674,5 mg.L⁻¹ dans P7.

Le sodium montre une grande variation entre les puits situés en 'amont' et ceux situés en 'aval' de la mine. Ses concentrations moyennes oscillent entre 135,83 mg.L⁻¹ dans les eaux du puits P1 et 2 774 mg.L⁻¹ dans P3, valeur vraiment très élevée. Ces teneurs diminuent progressivement dans P5, P6 et P7.

2-3 Éléments métalliques

Curieusement les teneurs en éléments métalliques ne présentent pas de grandes variations entre les eaux des puits situés en 'amont' et ceux de l'aval. Les teneurs métalliques dans l'ensemble des puits ne sont pas alarmantes selon les normes de potabilité ou d'irrigation.

La teneur moyenne en zinc oscille entre 124,17 µg.L⁻¹ (P5) et 1259,17 µg.L⁻¹ (P3). Pour le cuivre, la concentration la plus élevée est relevée dans le puits P1 (113,33 µg.L⁻¹) puis ces teneurs diminuent à partir de P4 et la valeur la plus faible étant enregistrée dans les puits P4 et P5 (25µg.L⁻¹).

La moyenne des teneurs en cadmium dans l'ensemble des eaux des puits demeure faible. Cependant dans le puits P3 ($2,05 \mu\text{g.L}^{-1}$) et le puits P2 ($2,01 \mu\text{g.L}^{-1}$) nous remarquons une légère augmentation de la teneur en Cadmium, qui s'approche du seuil admet pour les eaux potables.

Le fer est l'élément le plus abondant. Les teneurs moyennes s'intercalent entre $3,09 \text{mg.L}^{-1}$ (P5) et $25,05 \text{mg.L}^{-1}$ (P2). Les puits situés en amont présentent en revanche des concentrations en fer relativement élevées (14 à $25 \mu\text{g.L}^{-1}$), comparées à celles des puits de l'aval (3 à $8 \mu\text{g.L}^{-1}$).

Les teneurs en plomb sont assez variables d'un puits à l'autre. Les valeurs les plus élevées se rencontrent dans les eaux des puits situés dans les environs immédiat de la mine; c'est le cas du puits P4 ($308 \mu\text{g.L}^{-1}$) et surtout P3 ($340 \mu\text{g.L}^{-1}$) qui est le plus proche de la mine. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées dans les eaux des puits P6 ($146 \mu\text{g.L}^{-1}$) situé relativement loin en aval de la mine.

3/ Analyse en composante principale

Une analyse en composante principale (ACP) a été réalisée sur la matrice des données, qui contient 7 variables et 15 éléments (Annexe N°). Seuls les deux premiers axes principaux ont été retenus puisqu'ils expliquent plus de 79% de la variance totale. L'axe 1 qui exprime à lui seul 50% de la variance totale est fortement corrélé avec la C.E. et les ions majeurs (valeur de la corrélation). L'axe 2 est corrélé avec les éléments métalliques en trace (Tableau 5). Cette analyse ainsi que la classification hiérarchique ont permis de distinguer parmi les puits échantillonnés trois groupes distincts selon l'homogénéité du faciès chimique de leurs eaux (figure 16 et 17) :

Groupe 1: corrélé positivement avec l'axe 1. Il est constitué par le seul puits P3 situé en amont des résidus miniers. Ce puits relativement bien oxygéné est caractérisé par une absence presque totale des signes de pollution minérale, ce qui le distingue de l'ensemble des autres.

Groupe 2: ce "groupe" est constitué par le puits P2, qui est fortement corrélé à l'axe 2; il contient de l'eau qui présente des teneurs relativement importantes en éléments métalliques surtout le Fer. En général, les paramètres physico-chimiques de l'eau de ce puits sont caractéristiques des conditions naturelles des eaux de la plaine, liés à la nature géologique du substrat et aux facteurs climatologiques de la région.

Groupe 3: situé en position médiane par rapport à l'axe 2, il est constitué des puits P1, P6 et P7. Ces stations, situées soit en amont soit loin en aval des rejets miniers, se caractérisent par des teneurs relativement faibles en éléments métalliques, il illustre ainsi la diminution progressive de la concentration des polluants ou de la diminution de la charge polluante dans les

eaux de la nappe en aval de la mine, avec la dilution et son absence d'impact à l'amont hydraulique.

Groupe 4: corrélé positivement avec l'axe 1. Il est constitué par les stations situées directement en aval des rejets miniers (P4 et P5), mais un peu plus éloignées que le puits P3 ; il se distingue par une pollution minérale intense et des pH légèrement inférieurs aux pH enregistrés dans toutes les autres stations.

	F 1	F 2
pH	-0,10	0,13
CE	0,13	-0,01
t°	-0,01	-0,03
O₂	-0,07	-0,07
SO₄²⁻	0,13	-0,01
Cl⁻	0,13	0,01
Na⁺	0,13	0,06
Ca²⁺	0,13	-0,06
Mg²⁺	0,12	-0,09
K⁺	0,09	0,15
Zn	0,04	0,20
Cu	-0,02	0,19
Fe	-0,08	0,16
Cd	0,03	0,20
Pb	0,06	0,15

Tableau 5 : Contributions des facteurs physico-chimiques aux les deux premiers axes factoriels (cas des puits de la zone minière de Draâ Sfer). **CE:** conductivité électrique ; **O₂:** oxygène dissous ; **t :** température ; **K⁺ :** potassium ; **Na⁺ :** sodium ; **SO₄ :** sulfates ; **Ca²⁺ :** calcium ; **Mg²⁺ :** magnésium et **Cl⁻ :** chlorures; **Cd :** cadmium ; **Fe :** Fer ; **Cu :** cuivre ; **Zn :** Zinc ; **Pb :** plomb.

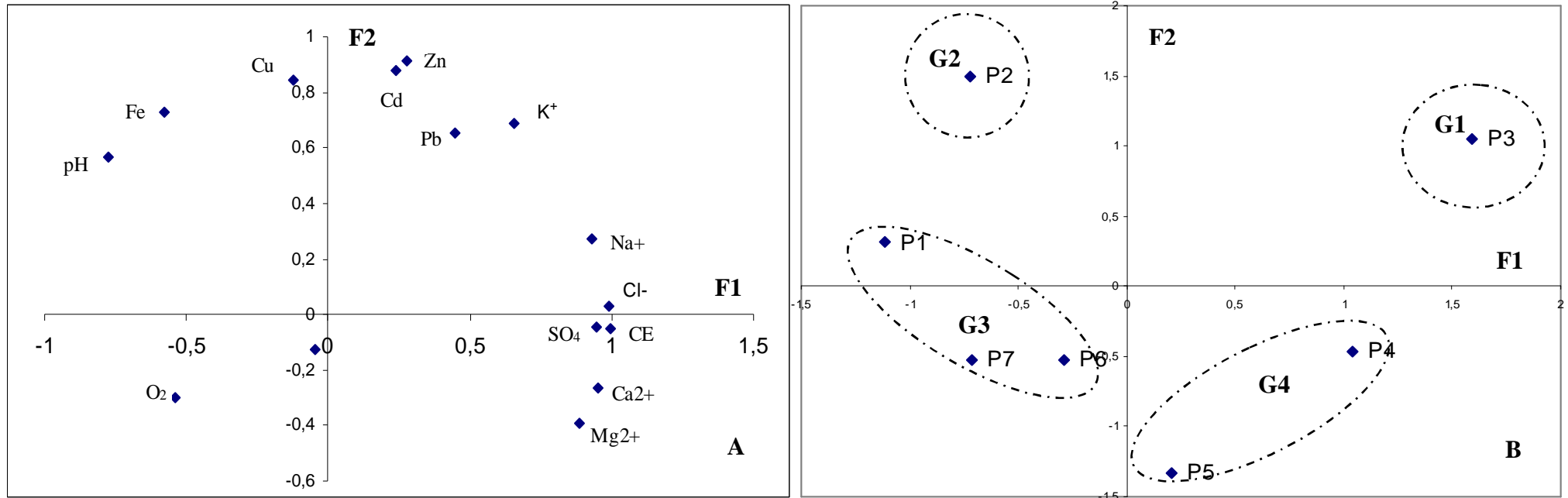


Figure 16 : Projection des composantes physico-chimiques de l'eau (A) et des stations du secteur minier (B) sur le plan factoriel des deux premiers axes (F1 et F2) de l'ACP. **Ce:** Conductivité électrique ; **O₂:** Oxygène dissous ; **K⁺:** Potassium ; **Na⁺:** Sodium ; **SO₄⁻:** Sulfates ; **Ca²⁺:** Calcium ; **Mg²⁺:** Magnésium, **Cl⁻:** Chlorure, **Cu :** Cuivre ; **Cd :** Cadmium ; **Zn :** Zinc ; **Fe :** Fer ; **Pb :** Plomb.

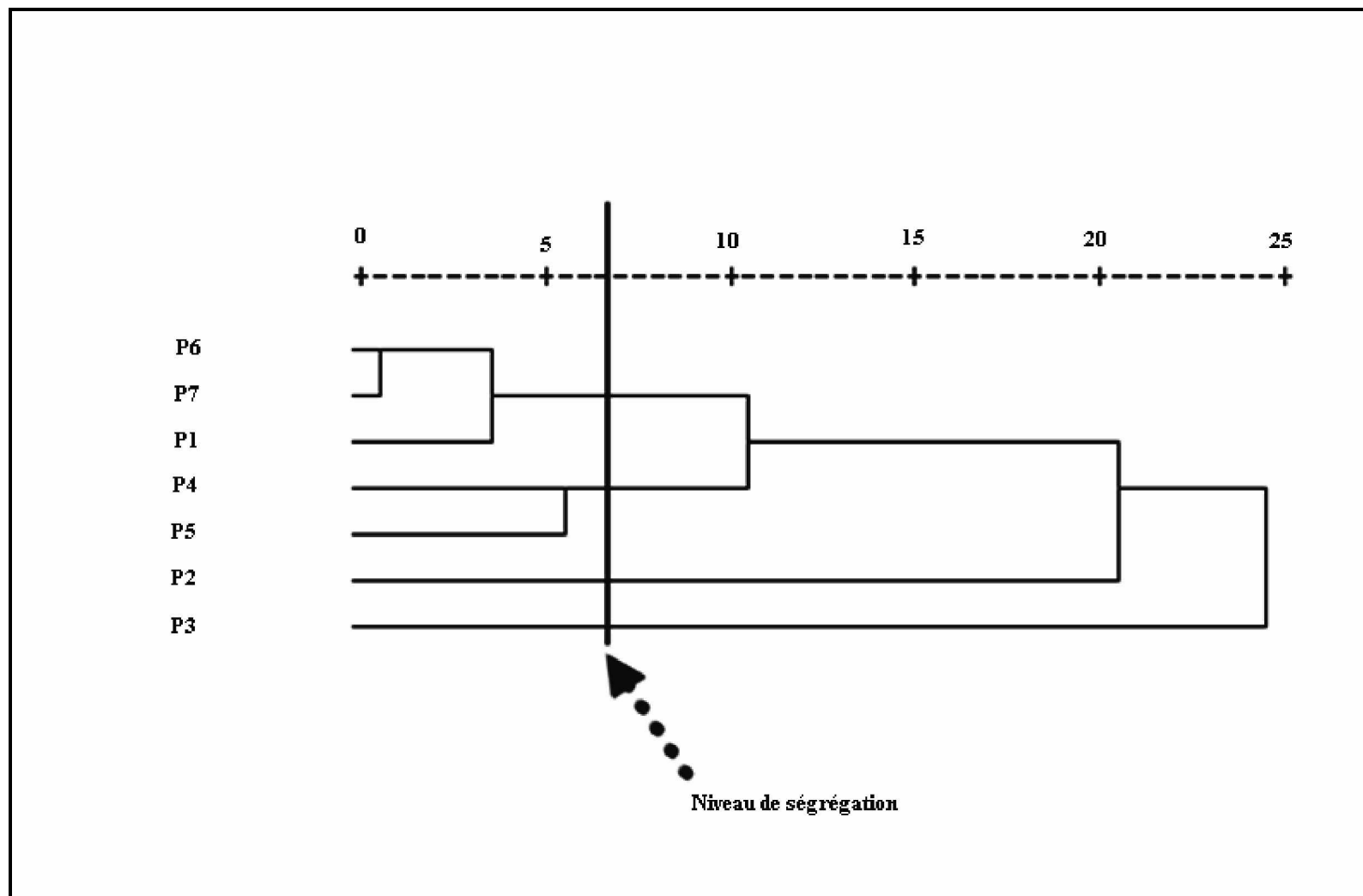


Figure 17 : Dendrogramme obtenu à partir d'une analyse hiérarchique effectuée sur les résultats des analyses en composantes principales des stations étudiées dans la région de Draâ Sfer.

4- Discussion

L'exploitation minière de la zone de Draâ Sfer a entraîné une nette modification physico-chimique des eaux de la nappe. Ceci peut être dû à une contamination probable suite à la lixiviation des rejets miniers déposés à proximité. En effet, l'analyse minéralogique des résidus de la mine a montré que ces résidus sont composés de minéraux primaires (blende, pyrrhotite et pyrite) et de minéraux secondaires (Jarosite, clinochlore, quartz, soufre et sulfate de fer). Ces derniers témoignent de l'oxydation des sulfures métalliques contenus dans les rejets miniers. L'analyse des lixiviats naturels, percolant de ces résidus au moment des pluies, a montré le relargage de quantités importantes d'ions majeurs et d'éléments-trace métalliques (EL GHARMALI *et al.*, 2004), ce qui confirme leur contribution à la contamination des écosystèmes avoisinants. Ces lixiviats peuvent, en effet, s'infiltrer vers les eaux souterraines.

La diminution de cet impact plus en aval de la mine peut être expliquée par l'éloignement de la source de pollution ainsi que par l'effet de la dilution. Plusieurs études sur des eaux superficielles ont montré l'effet de la dilution des contaminants après mélange des eaux polluées avec des eaux douces (BRAKE *et al.*, 2001 ; LEE *et al.*, 2001 ; YU et HEO, 2001 ; EL GHARMALI, 2005).

D'une manière générale, nous avons pu noter que les valeurs des ions majeurs en aval des rejets miniers sont bien supérieures à celles relevées dans les puits situés en amont de la mine. Plusieurs autres puits analysés dans la région de Marrakech présentant les mêmes caractéristiques que celles de cette zone (BOULANOUAR, 1995 ; YACOUBI-KHEBIZA, 1996).

Par ailleurs, en ce qui concerne l'acidité et les éléments métalliques-trace, l'impact n'a pas été nettement détecté au niveau des puits prospectés alors que des études antérieures ont montré que les lixiviats provenant des résidus sont acides et riches en métaux lourds (EL GHARMALI *et al.*, 2004). L'acidité a pu être partiellement neutralisée du fait de la dissolution des minéraux riches en carbonates, la calcite et la dolomite éventuellement, ce qui expliquerait les teneurs importantes en Ca^{2+} et en Mg^{2+} (LEE et LEE, 2001). La faible teneur des éléments métalliques-trace dans les eaux de puits peut être liée aux phénomènes de fixation, de précipitation et de chélation entre les divers agents chimiques (HAKKOU *et al.*, 2001). Ces auteurs ont constaté que les éléments-traces métalliques présents dans les lixiviats d'une décharge publique sont en quantités négligeables ou pratiquement absents à l'entrée de la nappe. Plusieurs autres études ont montré que les teneurs en métaux lourds dans les eaux, d'une manière générale, peuvent être réduites à cause de leur adsorption par les hydroxydes de fer, de manganèse et/ou d'aluminium

ainsi que par co-précipitation (BRAKE *et al.*, 2001 ; LEE *et al.*, 2001 ; HEIKKINEN *et al.*, 2002). Les pH élevés de l'eau peuvent favoriser la précipitation de ces hydroxydes (LEE et LEE, 2001).

5- Conclusion

Suite à cette étude menée sur les eaux de la nappe phréatique de Draâ Sfer situé aux environs de Marrakech, il apparaît (une fois de plus) que le chimisme de l'eau souterraine subit une évolution de l'amont vers l'aval hydraulique de cette nappe. Les eaux souterraines en aval immédiat de la mine sont de mauvaise qualité. Leur pollution est due essentiellement aux sulfates, au calcium, au sodium, au magnésium et aux chlorures. Ces ions proviennent en partie, des lixiviats des résidus miniers déposés à l'air libre et à proximité de la mine (EL ADNANI *et al.*, 2007).

B/ Cas de la nappe du Tafilalet et des environs d'Errachidia

1° Caractéristiques générales des nappes

Thermalisme des nappes

La température de l'eau est variable dans les stations étudiées du Tafilalet. Ainsi, les eaux souterraines sont chaudes dans les sources Hammat Moulay Hachem (au nord de la ville d'Errachidia à 40 km sur la route nationale vers Rich) leur température peut augmenter jusqu'à 54°C, elles sont tièdes dans la source située à 8 Km environs dans les Hammat Moulay Hachem. La température des eaux de ces sources est légèrement variable selon la saison, la valeur moyenne est de l'ordre de 36°C pendant le mois d'octobre 2004. Les eaux tièdes se rencontrent aussi dans la source du Radier d'Erfoud, à quelques centaines de mètres du forage Aïn El Atti, les températures sont de l'ordre de 28°C.

En dehors des sources citées, la température moyenne des eaux des stations prospectées varie de 18 à 22°C (Annexe 3). Elle atteint 25°C pendant les mois les plus chauds de l'année.

Les puits creusés dans le lit des oueds tel que le puits de Tamrrakecht (R2) situés dans les berges de l'oued Ziz présentent des fluctuations assez importantes de la température, qui sont de l'ordre de 10°C Ces grandes variations sont liées à l'origine superficielle de l'eau. Elles illustrent ainsi les échanges qui s'effectuent entre les eaux de surface et les eaux souterraines, au niveau des nappes alluviales.

Minéralisation des nappes

Les eaux des nappes d'Errachidia sont moyennement minéralisées. Dans la majorité des points d'eau échantillonnés, la salinité se situe dans la classe moyenne à mauvaise ; les valeurs de la conductivité augmentent vers le sud pour atteindre les valeurs les plus élevées dans la région, au niveau de Douira puis dans les eaux de la nappe artésienne de Aïn El Atti. Ainsi, les valeurs mesurées varient de 0,39 mS.cm⁻¹ dans les eaux du sous écoulement du Ziz (S1) dans la région de Tilecht et 10,83 mS.cm⁻¹ à Aïn El Atti (figure 18). Ces valeurs traduisent la richesse des eaux en éléments minéraux.

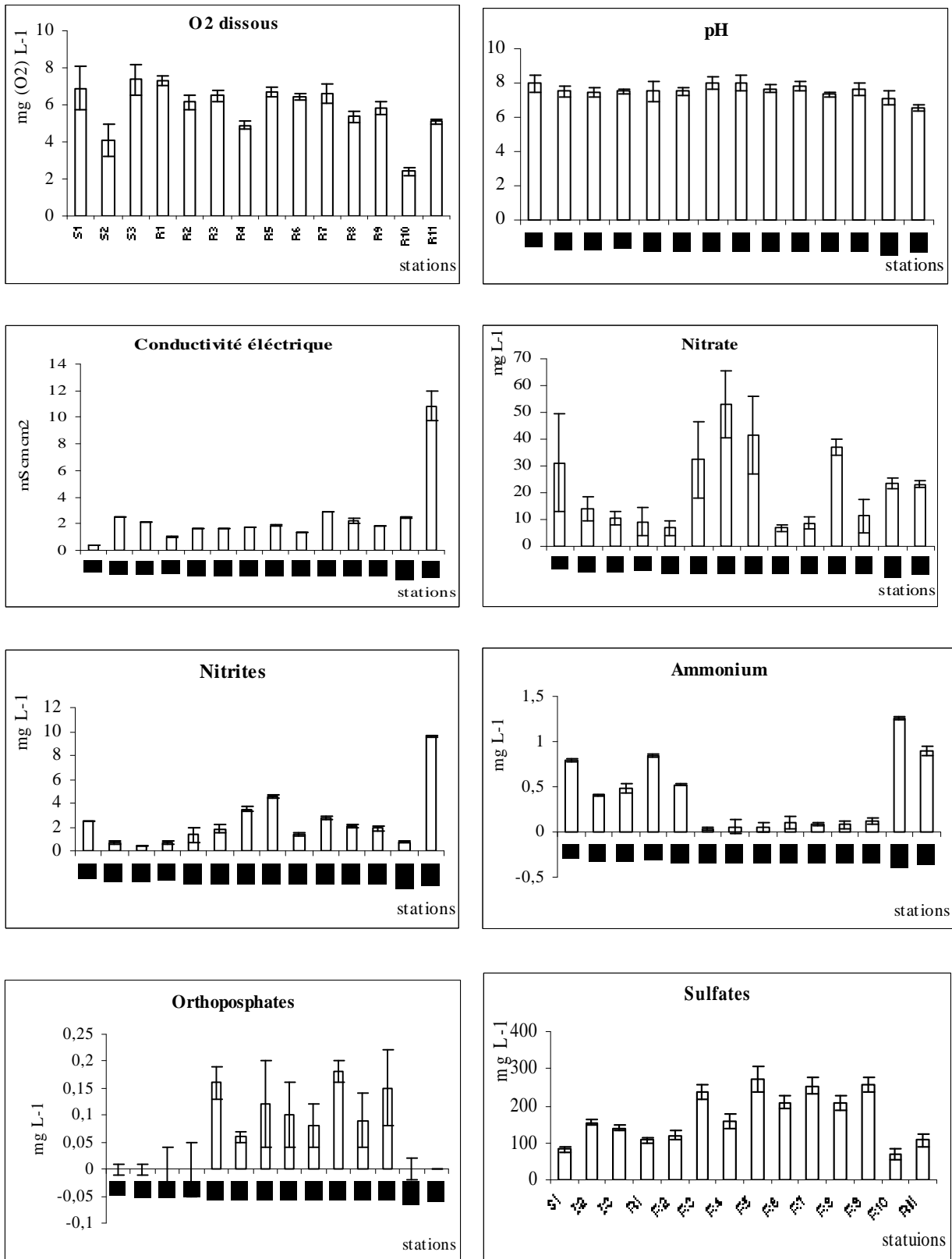


Figure 18 : Valeurs moyennes (et écart-types) des principales variables physico-chimiques de l'eau des 14 stations étudiées dans le Tafilalet.

Chlorures

Dans l'ensemble des stations, la chlorosité est élevée (figure 18 bis) ; ses valeurs moyennes varient de 128 à 1 267 mg.L⁻¹ d'ions Cl⁻. L'eau des puits situés au sud de la ville d'Errachidia ainsi que l'eau des sources chaudes et le sous-écoulement de l'oued Ziz au nord de la ville sont particulièrement riches en chlorures (1 267 mg.L⁻¹ à R10 et 794 mg.L⁻¹ en S1). Les teneurs les plus faibles sont signalées dans l'eau des puits situés au nord de la ville d'Errachidia (227 mg.L⁻¹ au puits R3).

Comme MARGAT (1962) l'a souligné, la chlorosité des eaux de la région pourrait bien être liée à la nature des terrains salifères traversés. Mais l'évaporation, l'aridité du climat et l'activité humaine accentuent le degré de la salinité des eaux de la nappe phréatique

Dureté totale

La dureté des eaux souterraines est liée généralement à la nature des roches sédimentaires traversées et elle est essentiellement due à la présence du Calcium et du Magnésium, constituants solubles des roches carbonatées en particulier des calcaires.

Les eaux des nappes phréatiques de la région de Tafilalet sont généralement dures. Les valeurs moyennes de la dureté totale, exprimées en mg.L⁻¹ de CaCO₃ sont généralement élevées. Elles sont comprises entre 360 mg.L⁻¹ à Tilichte (S1) et 6 200 mg.L⁻¹ à la source El Atti. Ces valeurs très élevées (figure 18 bis) qui s'ajoutent à la salinité très élevée dans la plaine, limitent les possibilités d'utilisation des eaux souterraines de cette région. Par ailleurs un inconvénient majeur que présentent les fortes teneurs en calcium est l'entartrage des canalisations et des appareils. Les fortes teneurs de la dureté ne présentent toutefois aucun effet sur le peuplement aquatique souterrain, les eaux karstiques étant le plus souvent richement peuplées (DELAMARE DEBOUTEVILLE, 1960).

Dureté magnésienne

À l'opposé de ce qui s'observe de la nappe de Marrakech, le Magnésium contribue plus que le Calcium à la dureté totale de l'eau. Ainsi, les teneurs en Mg²⁺ sont très variables de l'amont à l'aval hydraulique. Elles sont, dans tous les cas, supérieures à 300 mg.L⁻¹ (figure 18 bis). Elle est de l'ordre de 1 751 mg.L⁻¹ en R10 et 6 193 mg.L⁻¹ dans le R11. Dans l'ensemble des stations étudiées, c'est l'évolution de la dureté magnésienne qui commande les valeurs de la dureté totale. On note aussi que les puits R10 et R11 situés dans la partie aval de la ville d'Errachidia sont les plus riches en ions Magnésium.

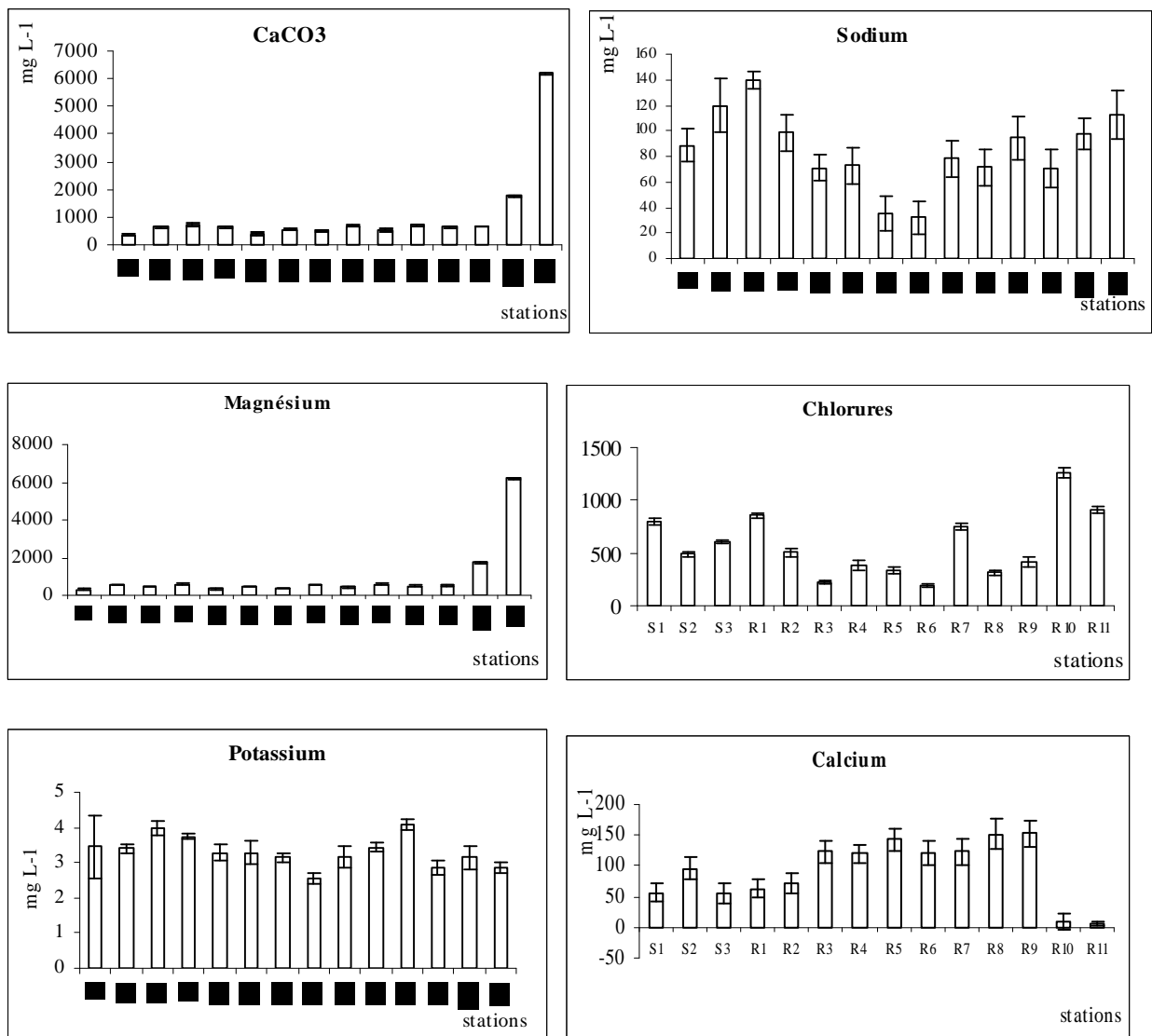


Figure 18 bis : Valeurs moyennes (et écart-types) des principales variables physico-chimiques de l'eau des 14 stations étudiées dans le Tafilalet (suite).

Oxygène dissous

Les eaux souterraines de la région de Tafilalet sont généralement assez bien oxygénées (figure 18). La teneur en Oxygène dissous est le plus souvent de l'ordre de 5 à 7 mg.L⁻¹. Toutefois les valeurs moyennes varient entre 2,40 mg.L⁻¹ dans le puits R11 situées dans la région de Douira 16 km au nord d'Erfoud et 7,35 mg.L⁻¹ dans les eaux de la station S3 correspondant à la sources de Meski située à 20 km au sud de la ville, sur la route nationale vers Erfoud. La faible teneur en oxygène dissous enregistrée dans le puits R11 est due à la nature et à la profondeur de la nappe artésienne (milieu confiné).

Sulfates

Les concentrations en sulfates dans les eaux de la majorité des stations sont faibles et sont inférieures à 200 mg.L⁻¹ qui est la valeur guide des eaux destinées à la production de eau potable. Les teneurs les plus élevées distinguent les eaux des puits R5 à R9 situées à l'aval de l'agglomération d'Errachidia, elles pourraient révéler une contamination de la nappe phréatique par les eaux usées de la ville. Car elles peuvent atteindre et dépasser, en moyenne des teneurs égales à 200 mg.L⁻¹ alors qu'elles sont plus faibles en amont (excepté R3 tout proche de la ville) et plus loin en aval (figure 18).

Composés azotés

Nitrates (NO₃⁻)

À l'exception du puits R4 (53 mg.L⁻¹), les teneurs moyennes en nitrates dans les eaux des puits prospectés à Tafilalet sont au dessous de 50 mg.L⁻¹, valeur maximale admissible pour les eaux destinées à la production de l'eau potable (figure 18). Les teneurs dans l'ensemble des autres puits varient entre 6,79 et 41,55 mg.L⁻¹. Les teneurs les plus élevées (R4 et R5) s'observent aussi à l'aval de l'agglomération d'Errachidia, elles pourraient révéler une contamination de la nappe phréatique par les fosses septiques. D'ailleurs le puits R4 est un puits creusé dans un établissement de bains maures se trouvant dans un quartier ancien, au centre de la ville d'Errachidia.

Nitrites (NO₂⁻)

D'après les normes européenne, une eau est considérée potable seulement si la teneur en nitrites est inférieures à 0,1 mg.L⁻¹. Dans la région d'Errachidia, la totalité des stations prospectées présentent des teneurs supérieures à ces normes. Elles varient de 1,2 mg.L⁻¹ (R9) jusqu'à 4,6 mg.L⁻¹ à R4. Les eaux de ces deux puits sont de mauvaise qualité physico-chimique, elles sont

chargées à la fois de nitrates et de nitrites (figure 18). Cela peut être dû à une contamination par les eaux usées de la ville. Ainsi, durant notre étude, nous avons remarqué que les eaux du puits R4 ne sont plus utilisables, d'autant que le Services d'Hygiène de la ville a détecté en plus une forte contamination bactérienne.

Ions ammonium (NH_4^+)

Les concentrations en ions ammoniums sont variables d'une station à une autre mais généralement inférieures à ($0,5 \text{ mg.L}^{-1}$). Une valeur maximale et exceptionnelle ($1,26 \text{ mg.L}^{-1}$ en moyenne) a été enregistrée dans les eaux du puits R10, en relation probablement avec la très faible concentration de l'oxygène dissous dans les eaux de ce puits ($2,4 \text{ mg.L}^{-1}$ seulement), ce qui rend le milieu peu oxydant, voire relativement réducteur et par la suite favorise la transformation des ions azotés sous forme ammonium. La valeur également élevée ($0,9 \text{ mg.L}^{-1}$ en moyenne) dans l'eau du forage R11 est plus difficile à expliquer.

Orthophosphates (PO_4^{3-})

Les teneurs en orthophosphates sont très faibles, voire nulles dans l'ensemble des stations prospectées. Les valeurs sont faibles à nulles (inférieures aux limites de détection) dans les eaux des sources et le sous-écoulement au nord de la villes d'Errachidia. Elles ne dépassent en aucun cas la valeur guide ($0,4 \text{ mg.L}^{-1}$) fixée par le projet de normes marocaines des eaux destinées à la production de l'eau potable, dans les autres stations.

2°/ Typologie des stations et impact des activités humaines

Une première classification des stations étudiées dans la région du Tafilalet a été faite sur la base des spectres de la qualité physicochimiques de leurs eaux. Nous remarquons que pour la majorité des stations, le spectre de la qualité est composé par les trois facteurs essentiels, la dureté (CaCO_3), les ions chlorures et la dureté magnésienne. Il est donc très clair que les eaux souterraines du Tafilalet sont dures et salines. Une remarque semblable a été déjà formulée concernant les eaux de la ville de Marrakech.

Cette première représentation du profil physico-chimique de l'eau des stations nous permet de distinguer quatre classes de stations représentées comme suit :

Groupe 1 : composé des stations S1, S2, S3 et des puits R1, R2. Ce sont les stations dont l'eau est dure, saumâtre et assez riche en sulfates.

Groupe 2 : composé des puits R4, R5 ; en plus de la dureté et la salinité de leurs eaux, ces stations sont relativement riches en nitrates.

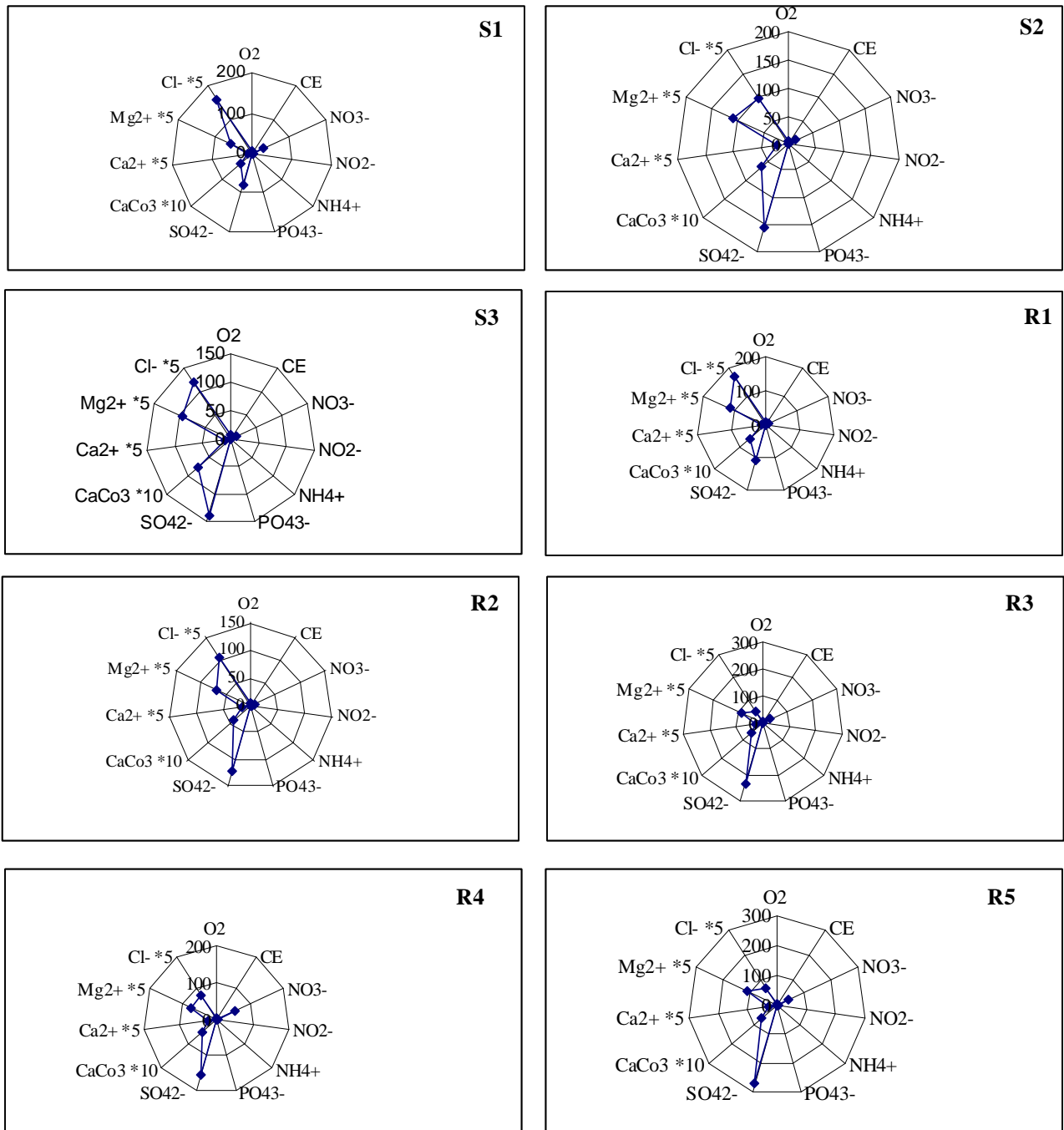


Figure 19 : Spectres de qualité des eaux des puits étudiés situés dans la région d’Errachidia et ses environs. Les concentrations des éléments chimiques sont exprimées en mg.L⁻¹ sauf pour C.E en mS.cm⁻¹. (* les concentrations des ions Ca²⁺, Mg²⁺ et Cl⁻ sont réduit 5 fois et celle du CaCO₃ est réduites 10 fois, et ce la pour faciliter la lisibilité des spectres).

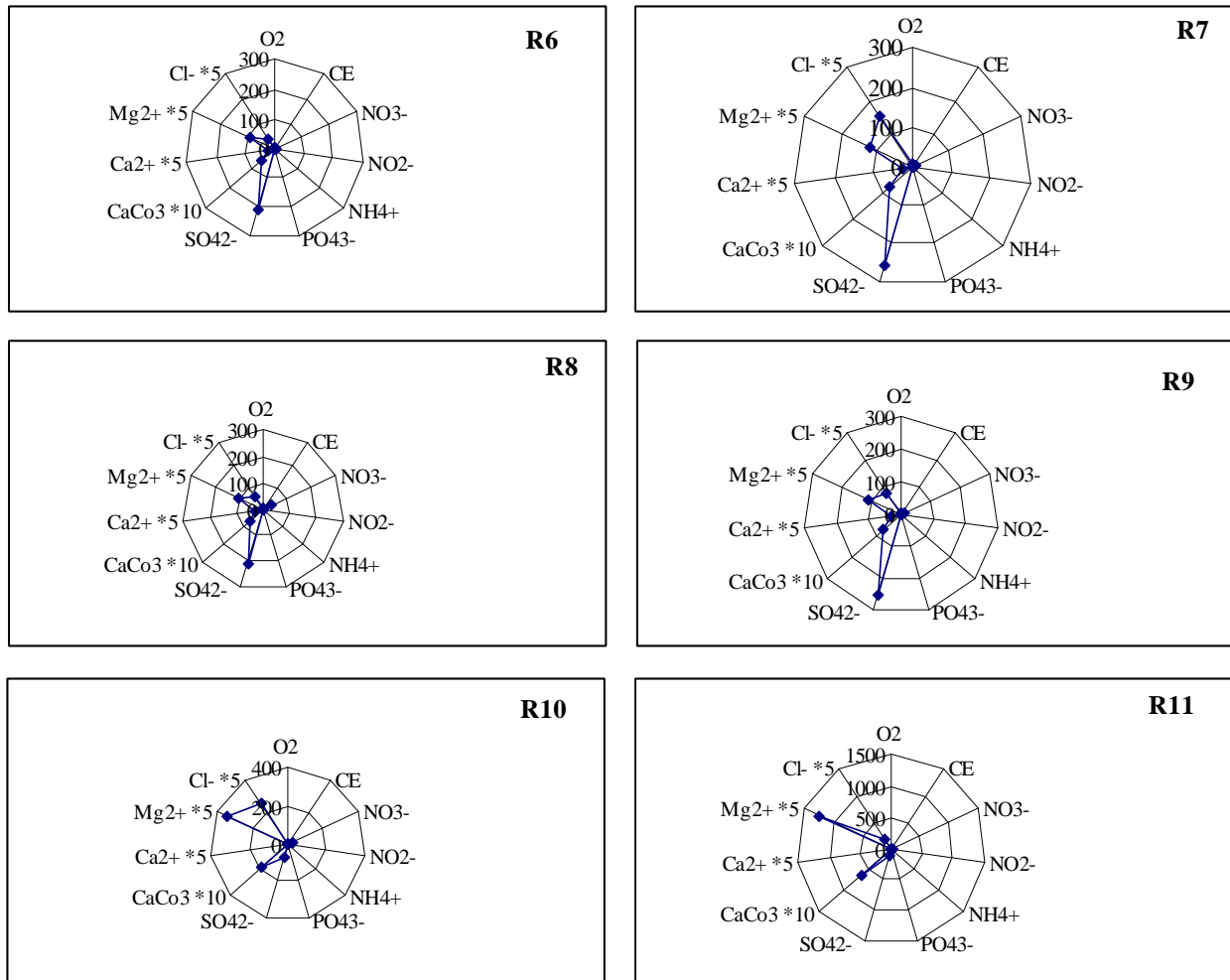


Figure 19 bis : Suite des spectres de qualité des eaux des puits étudiés situés dans la région d'Errachidia et ses environs. Les concentrations des éléments chimiques sont exprimées en mg.L^{-1} sauf pour C.E en mS.cm^{-1} . (* les concentrations des ions Ca^{2+} , Mg^{2+} et Cl^{-} sont réduit 5 fois et celle du CaCO_3 est réduites 10 fois, et cela pour faciliter la lisibilité des spectres).

Groupe 3 : composé des puits R3, R6, R7, R8 et R9 qui se situent à l'aval hydraulique de la ville d'Errachidia. Les eaux de ces puits se caractérisent par une dureté relativement élevée, et par des teneurs élevées en sulfates.

Ce qui précède serait donc à revoir.

Groupe 4 : correspond aux puits, R10 et R11, l'eau est exceptionnellement riche en calcium et en magnésium qui déterminent l'aspect général du spectre. Les chlorures ne contribuent que légèrement dans sa composition. Cela est dû à la nature des eaux de la nappe artésienne profonde qui affleure dans le forage nommé Ain El Atti, sur la rive gauche de l'oued Ziz près du radier d'Erfoud (figure 11).

3°/Analyse en composante principale

Afin de vérifier la validité de la classification précédente d'une manière moins subjective qu'en réunissant des spectres semblables entre eux, une Analyse en Composantes Principales associée à une classification hiérarchique, a été réalisée sur le tableau des stations décrites par les caractéristiques de l'eau.. La matrice de données regroupe donc les 14 stations, dont 11 puits situés dans les environs de la ville d'Errachidia, deux sources et une station représentant le sous écoulement de l'oued Sidi Hamza, affluent de l'oued Ziz 16 colonnes correspondant aux facteurs physicochimiques mesurés ou analysés (Annexe).

L'examen des résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) montre que les deux premiers axes cumulent 50% de la variance totale (31,8% pour le premier axe et 18,6% pour le deuxième axe). L'axe 1 qui explique à lui seul 31,8% de la variance totale est fortement corrélé du côté négatif avec la conductivité électrique et la dureté, il exprime donc la pollution minérale. A l'inverse, l'axe 2 est plutôt corrélé avec les ions azotés (nitrates et ammonium), il exprime par la suite la pollution organique.

	F 1	F 2
O₂	0,32	-0,43
pH	0,20	0,15
CE	-0,79	0,06
NO₃⁻	0,16	0,62
NO₂⁻	0,55	0,53
NH₄⁺	0,21	0,68
PO₄³⁻	0,61	-0,13
CaCO₃	-0,84	0,09
K⁺	0,28	-0,37
Na⁺	0,34	-0,79
SO₄²⁻	0,66	0,19
TAC	0,44	-0,68
Ca²⁺	0,60	0,36
Mg²⁺	-0,81	-0,19
Cl⁻	-0,86	0,06

Tableau 6 : Contribution des principaux caractères physico-chimiques de l'eau des puits d'Errachidia à la formation des deux premiers axes de l'ACP. **O₂** : oxygène dissous ; **CE** : conductivité électrique ; **NO₃⁻** : nitrates ; **NO₂⁻** : nitrites ; **NH₄⁺** : ammonium ; **PO₄³⁻** : Orthophosphates ; **CaCO₃** : dureté ; **K⁺** : potassium ; **Na⁺** : sodium ; **SO₄²⁻** : sulfates ; **TAC** : titre alcalimétrique complet ; **Ca²⁺** : calcium ; **Mg²⁺** : magnésium et **Cl⁻** : chlorures.

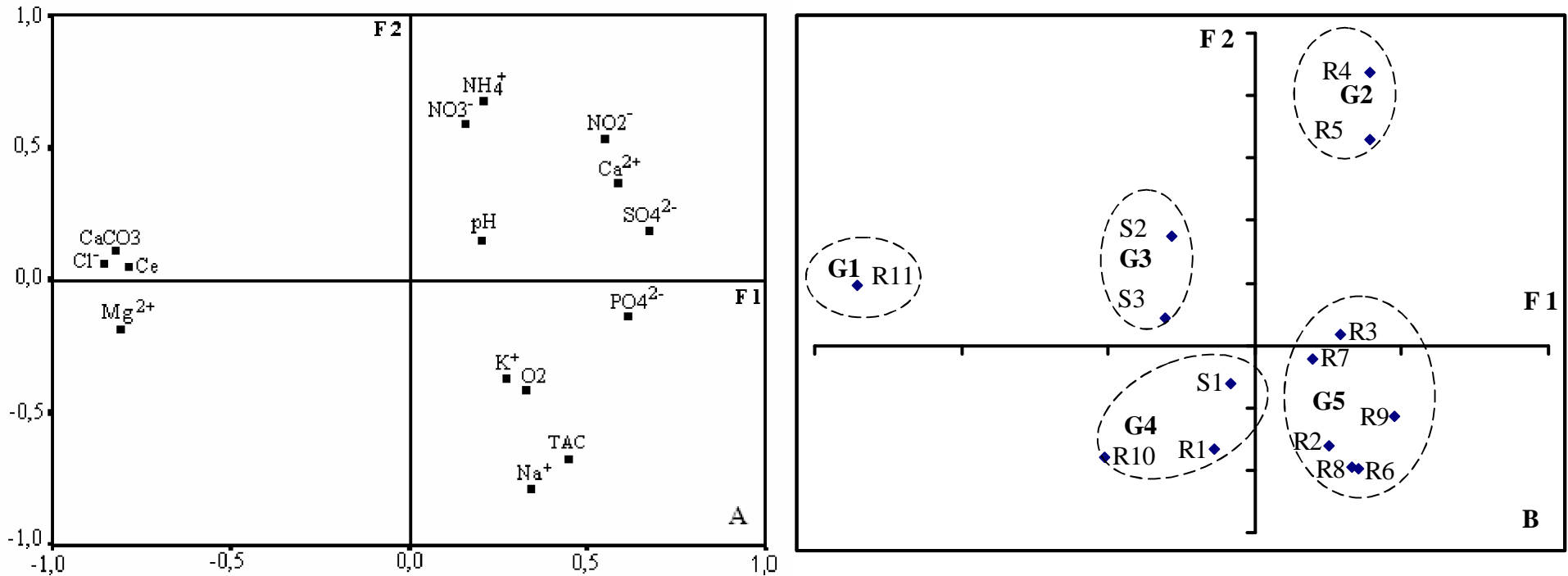


Figure 20 : Projection, sur les deux premiers axes factoriels de l'ACP, des principaux descripteurs physico-chimiques de l'eau (A) et des stations (B), avec l'individualisation des groupes de stations de la région d'Errachidia, résultant de la classification hiérarchique de la figure 21.
Ce : conductivité électrique ; **O₂ :** oxygène dissous, **NO₃⁻ :** nitrates ; **NO₂⁻ :** nitrites ; **NH₄⁺ :** ammonium ; **PO₄⁻ :** Orthophosphates ; **k⁺ :** potassium ; **Na⁺ :** sodium ; **SO₄⁻ :** sulfates ; **Tac :** titre alcalimétrique complot, **Ca²⁺ :** calcium, **Cl⁻ :** chlorures, **Mg²⁺ :** magnésium et **CaCO₃ :** dureté totale.

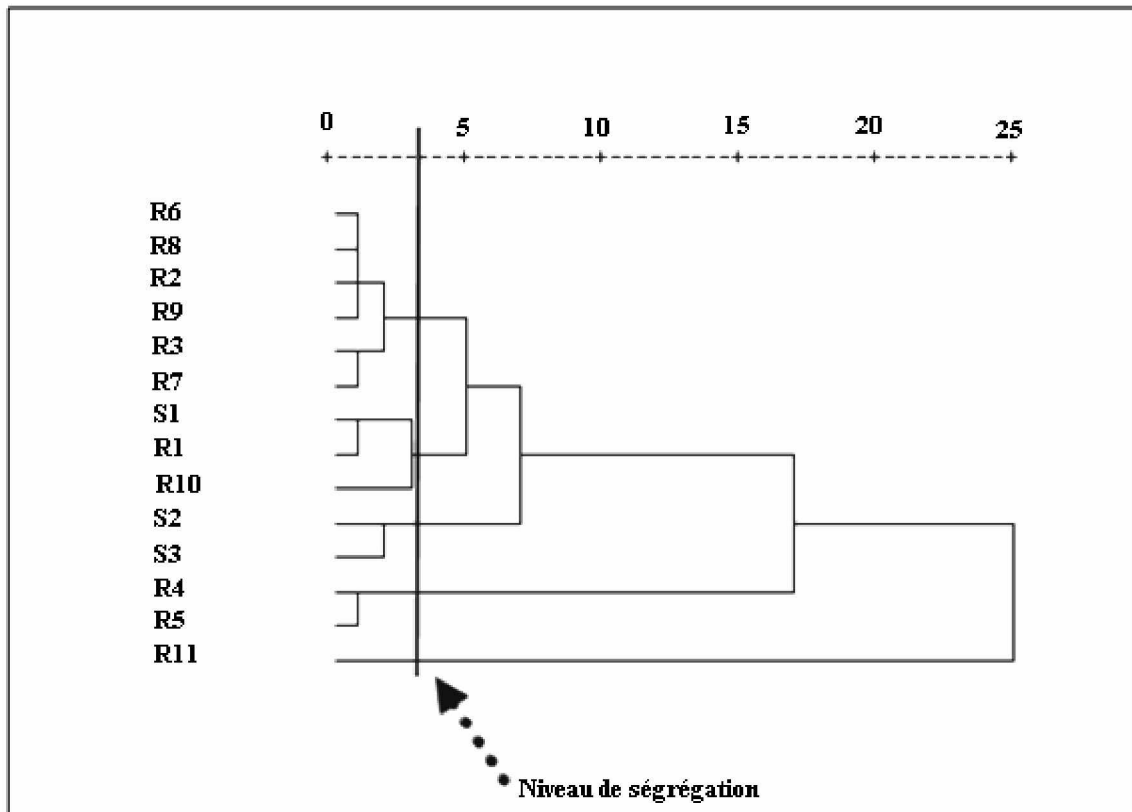


Figure 21 : Dendrogramme obtenu à partir d’une classification hiérarchique effectuée sur les résultats des analyses en composantes principales des stations étudiées dans la région de Tafilalet (et représentée figure 20).

D'après cette Analyse en Composantes Principales combinée avec la classification hiérarchique des stations de la ville d'Errachidia, on peut reconnaître cinq groupes de stations, qui sont présentés sur la figure 3 :

Groupe G1 : composé du seul forage R11, situé à environs 40 Km au sud de la ville d'Errachidia. L'eau est caractérisée par des teneurs fortement élevées en MgCO_3 et en ions chlorures, qui atteignent $907,75 \text{ mg.L}^{-1}$; ainsi qu'une conductivité électrique très élevée ($10,83 \text{ mS.cm}^{-1}$). La mauvaise qualité des eaux de ce forage est liée à la nature de la nappe, qui est de type artésienne et à la nature géologique des terrains dolomitiques avec laquelle elle est en contact. L'ACP a bien individualisé cette station qui diffèrait fondamentalement des autres car elle ne concernait pas la nappe phréatique.

Groupe G2 : composé des deux puits R4 et R5, situés respectivement dans un établissement de bains publics de la ville d'Errachidia et dans l'abattoir de la ville. Les eaux de ces deux stations se caractérisent par des teneurs assez élevées en éléments azotés, surtout en ions nitrates, qui varient entre $41,55 \text{ mg.L}^{-1}$ dans P5 et $52,96 \text{ mg.L}^{-1}$ dans P4, dépassant ainsi le seuil de potabilité fixé par l'OMS (50 mg.L^{-1}). La mauvaise qualité des eaux de ce groupe est due non seulement à la mauvaise protection des puits, mais à aussi une contamination probable de l'eau par les usagers des puits et probablement aussi par les infiltrations possibles des eaux usées de la ville.

Groupe G3 : regroupe les eux sources : la source Moulay Hachem (S2) et la source bleue de Meski (S3) qui sont relativement éloignées l'une de l'autre, et situées de part et d'autre de la ville d'Errachidia, mais qui se caractérisent l'une et l'autre par des eaux moyennement dures et peu chargées en ions azoté et phosphorés. Les teneurs en calcium et en magnésium sont très élevées et très comparables (entre $95,1$ et $540,9 \text{ mg.L}^{-1}$ dans S2 et entre $55,34$ et $480,76 \text{ mg.L}^{-1}$ dans S3). Ces eaux sont donc bien minéralisées mais peu polluées.

Groupe G4 : composé de S1, R1 et R10, projetés pas très loin de l'origine des deux premier axes. Ces trois stations sont situées loin de la ville d'Errachidia, à l'égard de toute source de pollution; elles présentent des eaux de relativement bonne qualité.

Groupe G5 : composé des stations R2, R3, R6, R7 R8 et R9, situées dans la ville d'Errachidia et dans la zone 'aval' du bassin hydraulique. Ce groupe est corrélé négativement à l'axe 2. Les eaux de ce groupe sont caractérisées par une alcalinité élevée et par des teneurs assez élevées on sodium et en potassium. Les infiltrations des eaux usées de la ville et la nature des terrains géologiques pourraient expliquer cette qualité moyenne de l'eau dans ces stations. L'ancienneté du réseau des eaux usées ainsi que sa capacité très limitée au regard de l'accroissement de la population favorise la contamination de la nappe phréatique. Le puits

R9 constitue un cas particulier où, en dépit de sa situation en aval de la ville, l'eau est d'assez bonne qualité générale mais son eau contient souvent moins d'oxygène et plus de phosphates et est plus dure que celle de beaucoup d'autres stations. Ce puits est situé loin de toute source de pollution connue.

Qualité comparée des eaux Errachidia – Marrakech

À l'image des eaux souterraines des régions calcaires à climat aride, la conductivité est relativement élevée dans la zone d'Errachidia. Elle est de $0,39 \text{ mS.cm}^{-1}$ dans le sous-écoulement de l'oued Ziz à Tilecht (S1) tandis que dans la plaine la minéralisation est forte à très forte avec une conductivité atteignant $10,8 \text{ mS.cm}^{-1}$ au niveau du forage Ain El Atti (R11). Dans la région de Marrakech, la conductivité semble plus faible, puisqu'elle varie entre $1,6 \text{ mS.cm}^{-1}$ dans la station M4 située dans le Nord de la ville de Marrakech et $6,5 \text{ mS.cm}^{-1}$ dans la station M3, située dans la zone industrielle nord de la ville de Marrakech.

La conductivité dépend de tout un ensemble de facteurs dont la nature des terrains traversés par l'eau, le climat général qui détermine l'évaporation et les apports météoriques, le niveau piézométrique, et l'impact des pollutions (ANONYME, 2000). Ici, l'augmentation générale du degré de la minéralisation est liée d'une part, à la nature des terrains salifères et ce, aussi bien dans près de Marrakech que dans le Tafilalet en amont d'Errachidia, et d'autre part à une augmentation du taux de pollution à proximité des villes d'Errachidia et de Marrakech.

Dans la région d'Errachidia, les teneurs en CaCO_3 sont celles d'une eau très dure ; elles varient entre 360 mg.L^{-1} dans S1 et $6\ 200$ dans R11 (annexe 3). Toutefois dans les puits d'Errachidia elle varie entre 500 et $1\ 800 \text{ mg.L}^{-1}$. Les concentrations magnésiennes étant souvent très dominantes par rapport aux concentrations calciques en raison de la nature dolomitique des terrains, elles impriment à la dureté totale son caractère général. Les valeurs de la dureté calcique varient entre 153 mg.L^{-1} d'ions Ca^{2+} dans R9 et $6,4 \text{ mg.L}^{-1}$ dans R11, celles de la dureté magnésienne sont croissantes de l'amont vers l'aval hydraulique, et fluctuent entre 304 mg.L^{-1} dans S1 et $6\ 194 \text{ mg.L}^{-1}$ dans l'eau du forage Ain El Atti (R11). Dans la plaine de Marrakech, les teneurs en CaCO_3 varient entre 504 mg.L^{-1} dans M9 et 732 mg.L^{-1} dans M10, plus en aval (Tableau). Ces teneurs relativement faibles traduisent une eau moins dure que celle d'Errachidia où la dureté totale atteint certes $1\ 760 \text{ mg.L}^{-1}$ dans un puits, bien qu'elle soit toujours inférieure à 700 mg.L^{-1} dans l'ensemble des autres puits.

Les différences de dureté totale ou calcique entre les régions de Marrakech et d'Errachidia sont donc moins importantes qu'il ne semble au 1er examen si l'on considère l'eau des puits dans les deux régions, et en laissant de côté une station tout à fait exceptionnelle, unique en son genre, telle que le forage profond de la station R11 du Tafilalet.

Les pH relevés dans la plaine d'Errachidia varient entre 6,5 dans le puits R11 et 8 dans la source S1, mais entre 7,12 et 8 dans les puits R1 à R10 (**Annexe n°XXX**). Alors que les valeurs oscillent, dans la région de Marrakech, entre 7,3 (dans M6) et 7,9 (dans M4). Ces valeurs ne sont donc pas différentes et traduisent des eaux proches de la neutralité mais légèrement alcalines dans les deux régions, au Tafilalet comme à Marrakech. Cette relative constance du pH de l'eau dans les divers puits pourrait résulter d'un équilibre entre les fortes teneurs en dioxyde de carbone et les bicarbonates de calcium ou de magnésium dissous, stabilisées par l'effet tampon de la forte minéralisation des eaux, au moins tant que l'on considère les puits (car la seule station où l'eau est légèrement acide en général est toujours le forage R11 qui se distingue là encore des puits ordinaires).

Dans la plaine d'Errachidia, les teneurs en chlorures sont très élevées et varient entre 199 mg.L⁻¹ dans R6 et 1 267 mg.L⁻¹ dans R10 (Tableau), ce qui est généralement le cas des zones sub-sahariennes du Maroc (MARGAT, 1962). Les valeurs les plus basses ont été signalées dans les eaux des puits R3, R4 et R5, cependant, à partir du puits R9 la chlorosité augmente régulièrement pour atteindre des valeurs très élevées. Dans la région de Marrakech, les valeurs sont largement aussi élevées puisqu'elles fluctuent entre 245 mg.L⁻¹ dans M10 et 1 820 mg.L⁻¹ dans M3 et que dans le Tafilalet, si un puits exceptionnel, R10 contient généralement une eau très chlorurée, tous les autres puits, de R1 à R9 contiennent moins de 900 mg.L⁻¹ d'ions Cl⁻ (443 en moyenne, alors qu'à Marrakech la moyenne des teneurs moyennes en Cl⁻ dans l'eau des 10 puits est de 650 mg.L⁻¹ même en comptant le puits exceptionnellement minéralisé M3 où la teneur en chlorures est de 1 820 mg.L⁻¹) (Voir Tableau 4 en annexes).

L'eau des nappes de la plaine du Tafilalet est relativement bien oxygénée avec des concentrations en oxygène dissous variantes entre 4,1 mg.L⁻¹ dans S2 et 7,35 mg.L⁻¹ dans S3 (Tableau), sauf dans le puits R10 où la concentration en oxygène chute à 2,4 mg.L⁻¹ alors que dans tous les autres puits du Tafilalet elle varie de 5,4 à 7,3 mg.L⁻¹ . Dans la région de Marrakech, les valeurs moyennes sont proches de celles d'Errachidia puisqu'elles vont de 5 mg.L⁻¹ dans M10 à 6,9 mg.L⁻¹ dans M3 (Tableau), alors que les puits M4, M5 et M6 situés dans la zone d'épandage présentent des teneurs faibles en oxygène dissous surtout en période d'été.

Les valeurs moyennes des concentrations des nitrates dans l'eau du Tafilalet oscillent entre 6,8 mg.L⁻¹ dans R2 et 53 mg.L⁻¹ dans R4. À Marrakech, les teneurs en nitrates varient en moyenne entre 6,2 mg.L⁻¹ dans M10 et 74,3 dans M3, située dans une zonela zone

d'épandage des eaux usées de la ville (figure 9), de même que M4, ou la teneur en nitrates est également parmi les plus élevées, et qui se trouve à la limite de l'agglomération et d'une zone agricole, à l'aval hydraulique de la zone d'épandage. Là encore les valeurs des taux de nitrates observés dans les deux régions ne semblent pas significativement différents.

Les nitrites proviennent généralement des transformations intermédiaires de l'ammoniaque en nitrates, leur présence constitue le plus souvent l'indice d'une pollution organique en évolution ou d'une oxygénation insuffisante. Dans la région d'Errachidia les valeurs observées sont de l'ordre de 0,4 mg.L⁻¹ à S3, source de Meski ou Sud de la ville d'Errachidia, à 9,6 mg.L⁻¹ dans le forage R11 (Tableau). Cette valeur nous semble très étonnante pour ce forage, ainsi l'échantillonnage n'a été possible que dans un petit bassin qui entoure le forage. Il se peut qu'une pollution particulière des eaux du bassin explique cette valeur anormale et exceptionnelle. L'eau des puits d'Errachidia (R1 à R10) contient de 0,7 à 3,5 mg.L⁻¹ de nitrites (la moyenne étant proche de 2,1 mg.L⁻¹). Dans la zone de Marrakech les concentrations moyennes dans les 10 puits varient de 1,2 à 4,6 mg.L⁻¹ avec une valeur moyenne de 2,25 mg.L⁻¹ (Voir Tableau 3 en annexe). On peut donc considérer que globalement il n'y a pas de différences.

L'ammonium est toujours le témoin d'une pollution organique. Il est décelable lorsque les teneurs en oxygène sont insuffisantes pour assurer l'oxydation maximum des molécules organiques. Le phénomène ne s'observe généralement pas dans les stations d'Errachidia. Les concentrations mesurées se situent entre 0,03 mg.L⁻¹ dans R3 et 1,26 mg.L⁻¹ dans R10, puits particulier puisque la valeur moyenne dans les puits est de 0,3 mg.L⁻¹. L'ion ammonium a essentiellement pour origine les déversements domestiques, il constitue donc un excellent indicateur de ce type de pollution. Dans les puits de Marrakech, les valeurs de l'ammonium sont un peu plus faibles, car elles sont soit indécélables (en M9 et M10), soit proches, en moyenne de 0,1 mg.L⁻¹ dans les stations M5, M6, M7 et M8 de même que, (en moyenne) dans l'ensemble des 10 puits.

Concernant les orthophosphates qui constituent la forme du phosphore assimilable par les algues, lorsque les concentrations dans les eaux naturelles sont supérieures à 0,2 mg.L⁻¹, ils traduisent très généralement une pollution par les eaux domestiques contenant des phosphates organiques et des détergents synthétiques, et (ou) par des eaux de ruissellement. Les concentrations en phosphates n'atteignent cette valeur que dans les stations M1 et M8 dans la région de Marrakech et sans doute aussi, parfois, dans la station M2. Dans le Tafilalet les teneurs en orthophosphates sont également très faibles ou inférieures en général à la valeur

minimale détectable (le seuil de $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$ peut être atteint occasionnellement dans les stations R2 et R7).

Les teneurs moyennes des Sulfates sont très variables d'une station à l'autre. Elles sont de l'ordre de 69 mg.L^{-1} dans le puits R10, de $82,32 \text{ mg.L}^{-1}$ dans le sous écoulement de l'oued Ziz à Tilecht (S1) et de 270 mg.L^{-1} dans le puits R5 situé un peu à l'aval de la ville d'Errachidia, mais elles sont généralement de l'ordre de 100 à 200 mg.L^{-1} dans les puits (189 mg.L^{-1} en moyenne). Dans la région de Marrakech la teneur de l'eau des puits contient le plus souvent plus que 200 mg.L^{-1} (213 en moyenne) d'ions sulfate. Cependant, dans un cas comme dans l'autre on n'est pas en présence d'eaux séléniteuses et ces teneurs qui sont normales là où existent des roches contenant du gypse, sont sans effet important aussi bien chez l'Homme que sur la faune stygobie.

Les teneurs en ions potassium sont faibles dans les stations des deux régions, elles sont généralement comprises entre 3 et 4 mg.L^{-1} dans les deux régions d'étude. Les teneurs en ions sodium sont beaucoup plus élevées, elles varient entre 71 mg.L^{-1} dans R2 et 140 mg.L^{-1} dans S3 dans la région d'Errachidia et entre 32 mg.L^{-1} (M4) et 140 (M9) dans la région de Marrakech. Mais comme il a été mentionné plus haut ces teneurs, lorsqu'elles sont élevées ne sont généralement pas indicatrice de pollution mais seulement de la présence des terrains salifères.

1- Discussion

Les résultats des analyses physico-chimiques de l'eau provenant des différentes zones étudiées (région de Tafilalet, Ville de Marrakech et sa région, région de Jbilet et zone minières de Drâa Sfar) ont montré que la qualité de l'eau peut présenter quelques différences d'une région à l'autre et cela surtout en fonction des caractéristiques hydrogéologiques de chaque région et en fonction aussi de l'impact de diverses pollutions minérales ou organiques.

Ainsi dans le Tafilalet, les analyses des paramètres physico-chimiques, nous permettent de signaler que les eaux souterraines de la région d'Errachidia et ses environs sont généralement d'une qualité moyenne à mauvaise. Elles sont riches en ions Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- et en SO_4^{2-} , avec un gradient de minéralisation croissant de l'amont vers l'aval hydraulique de la plaine. Ainsi, dans la partie 'amont', l'eau est relativement peu minéralisée, les teneurs en éléments chimiques analysés sont inférieures aux valeurs limites acceptables pour l'eau potable, fixées

par les normes marocaines. Alors qu'elles dépassent souvent les valeurs guides, même pour des eaux d'irrigation, dans la partie aval de la plaine.

La différence de la qualité des eaux entre l'amont et l'aval peut être expliquée par l'existence de deux nappes différentes, l'une superficielle ayant une qualité bonne à moyenne avec quelques sites localement pollués, elle couvre la totalité de la ville d'Errachidia et son amont. L'autre nappe est profonde et de type artésien, elle est très dure, minéralisée et seulement accessible par des forages puissants. Elles se rencontrent dans la zone de Douira et Ain El Ati. De plus on ne peut exclure dans le Tafilalet comme ailleurs un phénomène simple et général qui contribue presque toujours à créer un gradient décroissant de la qualité de l'eau souterraine dans une vallée : la concentration croissante des substances polluantes, et plus généralement solubles, de l'amont vers l'aval, due à l'évacuation continue de ces substances par les nappes et les sous-écoulements, qui provoque nécessairement, et surtout lorsque le climat aride favorise l'évaporation de l'eau, une concentration des solutés vers l'aval.

Une nappe thermale en amont de la ville d'Errachidia, présente des eaux tièdes à chaudes constituant par la suite des écosystèmes très particuliers.

L'étude physico-chimique que nous avons effectuée dans la plaine du Haouz a permis une nouvelle évaluation de la qualité des eaux souterraines des nappes de cette région. Selon l'analyse des résultats de cette étude on peut distinguer trois sources de pollution permettant de distinguer entre les zones suivantes :

* **La nappe de Jbilet**, au nord de la ville de Marrakech et sur la rive droite de l'Oued Tensift, présente des eaux naturellement dures et minérales. Elles sont chargées en éléments métalliques. La pollution organique est moins accentuée par comparaison avec celle qui s'observe dans les eaux de la nappe de Marrakech, elle est limitée à la zone utilisée pour la décharge publique.

* Dans **la région nord de Marrakech**, les eaux sont de bonne qualité dans la partie sud, alors que la qualité devient dégradée dans la partie nord à cause des teneurs en nitrates, nitrites, ammonium et orthophosphates qui sont relativement élevées. Cela est dû à l'infiltration des eaux usées de l'ancienne zone d'épandage des eaux usées de cette ville. Un gradient décroissant de la qualité de l'eau s'observe donc depuis l'amont vers l'aval hydraulique. En outre la comparaison des résultats de notre présente étude avec ceux des études plus anciennes effectuées dans cette zone montre malgré tout une amélioration de la qualité physicochimique de cette nappe.

* Dans *la région de Drâa Sfer*, l'activité minière a causé une détérioration importante de la qualité des eaux souterraines. L'extraction des minerais métalliques de base et surtout les rejets des déchets en surface a augmenté la minéralisation des eaux de la nappe. La conductivité électrique a été de l'ordre de $1,8 \text{ mS.cm}^{-1}$ dans les puits situés à l'amont de la mine, alors qu'elle dépasse 18 mS.cm^{-1} dans les puits creusés tout près de la mine. Cette pollution a des effets très remarquables sur la stabilité de la population rurale de la région. Ainsi les eaux souterraines devenues très polluées, ont limité son utilisation humaine et même agricole. Ceci contribue à augmenter le taux de pauvreté de la population locale, dans une zone connue jadis par la qualité de ses produits agricoles et la fertilité de ses terres.

Du point de vue microbiologique, les études faites sur les eaux des puits de la ville d'Errachidia et à l'aval immédiat, montrent que ces dernières sont, souvent contaminées par les fosses septiques et par les eaux usées de la ville. En effet, la présence à une concentration importante des germes pathogènes a été détectée dans l'ensemble des stations prospectées. À Marrakech, les puits étudiés présentent également des teneurs assez élevées en germes pathogènes, indiquant de ce fait un risque potentiel pour la santé humaine.

2- Conclusion

L'ensemble de ces données montre que les eaux souterraines de la région d'Errachidia et de la région de Marrakech sont généralement très minéralisées, dures et légèrement alcalines. Ainsi, les teneurs élevées en nitrites, nitrates et ammonium dans les stations situées près de la ville d'Errachidia ou dans la zone d'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech, traduisent un apport de matières organiques assez élevé.

La comparaison des eaux des régions du Tafilalet et de Marrakech, montre que :

- Les eaux de la région de Tafilalet sont généralement dures et salines, la dureté des eaux est généralement magnésienne plus que celle des eaux de la nappe de Marrakech où les eaux sont moins dures et la dureté surtout calcique.

- Du point de vue température, à l'exception des sources chaudes, aucune différence significative n'a été notée entre les eaux souterraines des deux régions.

- La mauvaise qualité des eaux notée à Marrakech, dans la zone de El Azouzia est due à une contamination de la nappe par la matière organique provenant des eaux usées de la ville alors qu'à Errachidia, la contamination de l'eau est surtout liée à la nature géologique

des terrains traversés qui détermine la nature de l'eau phréatique. L'impact des eaux usées sur la nappe d'Errachidia reste très localisé aux environs immédiats de la ville.

- Par comparaison, Errachidia est une petite ville, les volumes d'eaux usées produites sont négligeables et leurs réutilisations à l'état brut n'est possible que dans le Douar de Ait Messoud, à 8 km de la ville d'Errachidia. À l'inverse, la ville de Marrakech produit des volumes importants en eaux usées menaçant la qualité des eaux souterraines au nord de la ville.

3^{ème} partie

Biogéographique de la Faune

Stygobie et Corrélations

Transatlasiques

PEUPELEMENT DES STATIONS

Introduction

Partout dans le monde, les nappes phréatiques représentent une part importante des ressources en eau douce utilisables par l'Homme. Elles constituent donc pour les populations une richesse naturelle vitale, mais limitée et surtout vulnérable. Cet écosystème abrite une faune aquatique extrêmement diversifiée, et qui renferme de nombreuses espèces endémiques. En effet tous les grands phylums du règne animal, depuis les protozoaires jusqu'aux vertébrés, en passant par les divers groupes de vers, de mollusques et surtout d'Arthropodes, ont des représentants inféodés aux eaux souterraines : c'est la faune stygobie. Cette faune peut être échantillonnée par différentes techniques adaptées, au niveau des puits, des sources, et des alluvions des cours d'eau, ainsi que dans les grottes dans les régions calcaires notamment.

La communauté stygobie renferme des espèces plus au moins sensibles aux pollutions. Il en résulte que dans une même région géographique, la richesse spécifique de la faune aquatique présente dans les puits, les sources, les alluvions des cours d'eau, plus généralement dans les nappes phréatiques, varie avec la qualité de l'eau. L'observation de ces variations locales de la richesse spécifique des eaux souterraines, de même que la présence d'espèces sensibles, indicatrices de la qualité de l'eau, constitue donc un outil utilisable pour l'évaluation de la qualité globale de l'eau et assurer le suivi de cette qualité (BOULANOUAR, 1995). Cet outil est généralement beaucoup moins onéreux que les méthodes classiques d'analyses physico-chimiques et bactériologiques.

Des organismes épigés sont souvent rencontrés dans les biotopes souterrains. Leur présence peut être accidentelle, due aux pluies, au vent ou aux crues qui apportent au milieu souterrain des matières exogènes sous forme de substances organiques ou d'organismes vivants ; mais cette présence peut également être active et résulter d'un déplacement volontaire d'animaux épigés vers le milieu souterrain (CREUZÉ des CHATELLIERS et POINSART, 1991).

Au Maroc, la distribution des peuplements aquatiques des eaux de surface a fait l'objet de nombreux travaux dont ceux de MOHATI, 1985; DAKKI, 1986; BOUZIDI, 1989 ; BADRI, 1993. Celle de la faune aquatique souterraine, en dépit de son importance, reste nettement moins connue bien que depuis quelques années on puisse citer au Maroc une série de travaux dont ceux de BOULANOUAR, 1986; BOULAL, 1988 et 2002; IDBENNACER, 1990; BOUTIN, 1993a; MESSOULI, 1994; YACOUBI-KHEBIZA, 1990, 1996. Le présent travail a pour but de compléter

ces travaux; il nous permet de dresser l'inventaire du peuplement aquatique souterrain de la région d'Errachidia, située au sud-est du Maroc, région méconnue sur le plan stygobiologique et de vérifier le devenir de la biodiversité aquatique souterraine dans la région de Marrakech après les aménagements du réseau d'assainissement réalisés dans la zone d'épandage des eaux usées de la ville. Cette étude nous permet aussi de mettre en évidence l'impact des activités anthropiques sur les biotopes et sur la faune stygobie dans les deux régions.

1°/ Inventaire faunistique

La liste présentée ci-dessous mentionne les principales unités systématiques hypogées et épigées qui peuplent les stations étudiées dans les deux régions prospectées (Tableau 7).

À la suite des prospections effectuées dans les eaux souterraines du Tafilalet et des environs de Marrakech, nous avons récolté plus de 79 taxons appartenant essentiellement à quatre embranchements : les Némathélminthes, les Annélides, les Mollusques et les Arthropodes. Ces résultats figurent dans l'inventaire faunistique au Tableau 7.

Comme VANDEL (1964) l'a fait remarquer, et comme BOULANOUAR (1986 et 1995), BOULAL (1988 et 2002) et FAKHER EL ABIARI (1999) l'ont constaté, la faune de la majorité des stations est composite : elle comporte deux communautés, l'une épigée et l'autre hypogée. Plusieurs auteurs ont déjà signalé le caractère d'écotone que représentent les puits (DALMAS, 1972 ; GINET et DECOU 1977).

D'autres travaux ont montré que les aquifères de types différents sont interconnectés, à la fois entre eux et avec le milieu superficiel, et que des échanges de faune sont réguliers (CREUZÉ des CHATELLIERS *et al.*, 1991).

Il convient de signaler que la liste faunistique que nous avons dressée n'est pas complète. Si les taxons stygobies ont été identifiés et déterminés au niveau spécifique, ce n'est pas le cas des taxons d'origine épigée, qui n'ont été déterminés qu'au niveau du genre ou même de la famille. Le peuplement épigé est formé généralement des larves, ou de formes immatures et dont l'identification est difficile et ne présente pas le même intérêt dans un travail orienté vers les caractéristiques des eaux souterraines.

L'analyse de l'inventaire global des taxons récoltés montre que la classe des Crustacés présente le nombre le plus élevé de taxons (43), suivie par celle des Insectes (18). Les Némathelminthes sont les moins représentés (figure 22). Cette pauvreté taxonomique des Némathelminthes est très certainement, plus qu'une réalité, une apparence due à leur petite

taille et aux techniques d'échantillonnage que nous avons utilisées qui sont plus efficaces pour les autres organismes de taille supérieure.

Cette richesse des eaux souterraines marocaines en Crustacées péracarides corrobore les résultats des études antérieures réalisées au Maroc (BOULANOUAR, 1986 et 1995 ; BOUTIN, 1994 ; MESSOULI, 1984 et 1988 ; YACOUBI-KHEBIZA, 1990 et 1996 ; FAKHER EL ABIARI, 1999 ; BOULAL, 1988 et 2002).

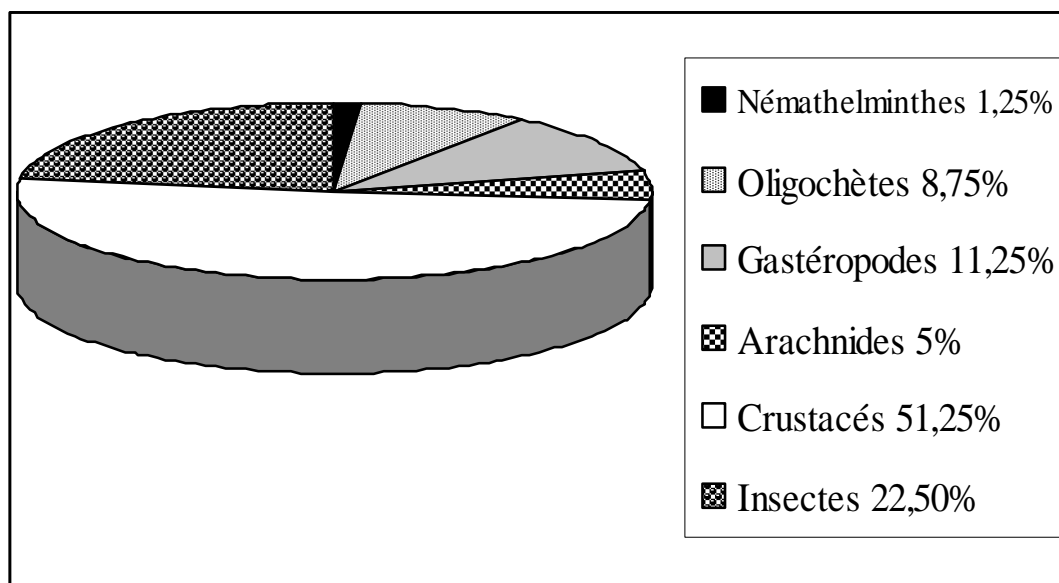


Figure 22: Importance relative, en pourcentages, du nombre de taxons, présents dans les principaux groupes d'organismes récoltés.

Tableau 7 : Inventaire des taxons récoltés dans les régions du Tafilalet et de Marrakech.

Taxon	Marrakech	Tafilalet
Némathelminthes		
Nématodes	♦	♦
Annélides		
Oligochètes		
<i>Trichodrilus</i> sp.	♦	
<i>Aulophorus furcatus</i>	♦	♦
<i>Dero</i> sp.	♦	
Lumbricidae sp.		♦
<i>Trichodrilus icenorum</i>	♦	
<i>Tricodrilus</i> sp. Groupe 2	♦	
<i>Enchytraeus cf. buchhalzi</i>		♦
Gastéropodes		
<i>Guistia meskiensis</i> *		♦
<i>Guistia aff. meskiensis</i> *		♦
<i>Guistia</i> n.sp.*		♦
<i>Guistia gofasi</i> *	♦	
<i>Heideella. cf. andreae</i> *	♦	
<i>Heideella andreae boulanouari</i> *	♦	
<i>Heideella cf. Valai</i> *		♦
<i>Physa acuta</i>	♦	♦
Limacidae	♦	♦
Arachnides		
Acariens ind.	♦	♦
Arrhenuridae		♦
Crustacés		
Ostracodes		
<i>Pseudocandona cf. albicans</i>		♦
<i>Heterocypris cf. reptans</i>	♦	♦
<i>Cypridopsis vidua</i>		♦
<i>Cypridopsis</i> sp.*		♦
Cypridinae indet (épigés)		♦
<i>Herpetocypris</i> sp.		♦
Eucypridinae Genre inconnu (épigés)		♦
Copépodes		
<i>Eucyclops serrulatus</i>	♦	♦
<i>Eucyclops</i> n.sp.		♦
<i>Afrocyclops gibsoni</i>		♦
<i>Paracyclops fimbriatus</i>	♦	
<i>Paracyclops chiltoni</i>	♦	
<i>Tropocyclops prasinus</i>	♦	♦
<i>Megacyclops viridis</i>		♦
<i>Diacyclops bicuspidatus odessanus</i>	♦	
<i>Thermocyclops oblongatus</i>	♦	
<i>Mesocyclops</i> n.sp.	♦	
<i>Nitocrellopsis</i> sp.		♦

Taxon	Marrakech	Tafilalet
Thermosbaenacés		
<i>Monodella atlantomaroccana</i> *	♦	
<i>Monodella cf. atlantomaroccana</i> *		♦
Isopodes		
<i>Typhlocirolana haouzensis</i> *	♦	
<i>Typhlocirolana</i> n.sp.*		♦
<i>Typhlocirolana leptura</i> *	♦	
<i>Marocolana delamarei</i> *	♦	
<i>Marocolana</i> sp.2*(<i>culpitelsonia</i>)	♦	
<i>Microcharon</i> . sp.*	♦	
<i>Microcharon oubrahimae</i> n.sp.		♦
<i>Microcharon boutini</i> *	♦	
<i>Microcerberus haouzensis</i>	♦	
<i>Microcerberus remyi</i> *		♦
<i>Magniezia gardei</i> *		♦
Amphipodes		
<i>Metacrangonyx spinicaudatus</i> *	♦	
<i>Metacrangonyx paurosexualis</i> *	♦	
<i>Metacrangonyx longicaudus</i> *		♦
<i>Metacrangonyx</i> sp.*		♦
<i>Metacrangonyx goulmimensis</i> *		♦
<i>Metacrangonyx panousei</i> *		♦
<i>Metacrangonyx notemboomi</i>		♦
<i>Longipodacrangonyx</i> sp.		♦
<i>Maghrebidiella maroccana</i> *		♦
<i>Maghrebidiella</i> sp1.*		♦
<i>Maghrebidiella</i> sp2.*		♦
<i>Salentinella</i> sp.		♦
Insectes		
Psocoptères ind.		♦
Hyménoptère ind.		♦
sF Culicinae	♦	♦
<i>Machlonyx</i> sp.	♦	
<i>Choroterpes</i> sp.	♦	
Diamesinae	♦	
<i>Ephemerella ignita</i>	♦	
sF. Tanyponidae	♦	
Tabanidae		♦
Psychodidae		♦
sF. Chironominae	♦	♦
Limoniidae	♦	
Ceratopogonidae	♦	
Coléoptères sp.	♦	
Datiscidae	♦	
<i>Caenis</i> sp.	♦	
Potamonthidae	♦	
Psychodidae		♦

2°/ Nappes du Tafilalet

a- Inventaire

Du point de vue biologique la région de Tafilalet présente une richesse faunistique assez grande, puisque 40 taxons au total y ont été récoltés, parmi lesquels 15 espèces stygobies et 25 taxons épigés. Plusieurs espèces aquatiques souterraines ont été capturées; il s'agit des Crustacés Isopodes *Typhlocirolana* sp., *Microcerberus remyi* et *Magniezia gardei* et de plusieurs espèces d'Amphipodes appartenant au groupe *Metacrangonyx* : *Metacrangonyx goulmimensis*, *Metacrangonyx longicaudus*, *Metacrangonyx notenboomi* et *Metacrangonyx panousei* et *Metacrangonyx* sp. dont l'étude est en cours, et au genre *Magrebidiella* : *Magrebidiella* sp.1 et *Magrebidiella* sp.2, ainsi que plusieurs autres espèces des *Saletinella* (Messouli, comm. Pers.), leur étude est en cours.

Les Thermosbaenacea qui sont moins étudiés par comparaison avec d'autres classes, semblent être représentés, au moins par une espèce. Une première observation, des formes récoltées dans la plaine du Tafilalet (Boulanouar, comm. Pers.) montre que ces dernières présentent des caractères très proches de ceux de *Monodella atlantomaroccana* du Haouz de Marrakech.

Les Crustacés Copépodes sont très abondants dans les eaux souterraines de la région du Tafilalet. Six espèces ont été récoltées dont deux espèces nouvelles pour la science, il s'agit de *Eucyclops* n.sp. et *Nitocrellopsis* sp. Leur étude est en cours grâce à la collaboration de Franck FIERS, spécialiste des Copépodes à l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique.

D'autres espèces stygobies ont été capturées, telles que les Gastéropodes : *Guistia meskiensis* ssp.1. (forme dont la coquille possède une carène) et *Guistia meskiensis* ssp.2 (forme dont la coquille n'en possède pas) ainsi qu'une espèce nouvelle *Guistia* sp., (GHAMIZI comm. pers.), et les Oligochètes *Trichodrilus* sp., *Lumbricidae* sp., *Trichodrilus icenorum*, *Aulophorus furcatus* et *Enchytraeus* cf. *buchhalzi*.

La faune épigée est aussi largement présente dans l'eau des puits de la région. L'abondance et le nombre d'espèces de cette communauté sont variables d'une station à l'autre en relation à l'état de protection de la station. Ainsi, pendant cette étude, nous avons récolté une la faune épigée abondante et ce sont les larves d'insectes qui sont les plus fréquentes (Tableau 7).

La source de Meski, dans le lit de l'oued Ziz, héberge une population abondante de l'Isopode *Microcerberus remyi* : il s'agit d'une espèce très fragile et dont la présence traduit une grande

stabilité physique du milieu. Le puits de Tazougaret, situé sur la rive gauche de l'Oued Guir, et celui de Zouala (P9) hébergent une faune stygobie particulièrement riche et diversifiée. Ainsi, nous avons signalé deux espèces nouvelles pour la science. Il s'agit de *Microcharon oubrahima* n.sp (AÏT BOUGHROUS *et al.*, 2007) et de *Heideella* n.sp. qui se distingue de *Hiedeella boualali* par l'absence du bourgeonnement, et qui est moins cylindrique que *Heidiella valai* (photos : figure 38). La petite pointe sur sa coquille et l'absence de stries sont les principaux caractères de cette espèce.

Les Isopodes Stenasellides sont représentés dans nos échantillons (R2 et R9) par *Magnezia gardei*, espèce qui n'avait pas été capturée dans la station type, la grotte Kef Aziza proche de Boudnib, depuis sa description il y a plus d'un quart de siècle (MAGNIEZ, 1978).

La comparaison de la composition de la faune des eaux des stations étudiées montre que la station S1, et les deux sources (S2 et S3) ainsi que les puits (R1, R2 et R9) situés loin des centres urbains sont les plus peuplés; ces stations hébergent une faune riche et diversifiée. Cette faune redevient beaucoup moins abondante dans les autres puits, et on note son absence totale dans les deux puits R4 et R11. (Rien d'étonnant dans le cas de R11, forage délivrant de l'eau profonde, acide et hyperminéralisée, mais plus significatif dans le cas du puits R4 qui est un puits normal mais localisé au plus près de l'agglomération d'Errachidia.

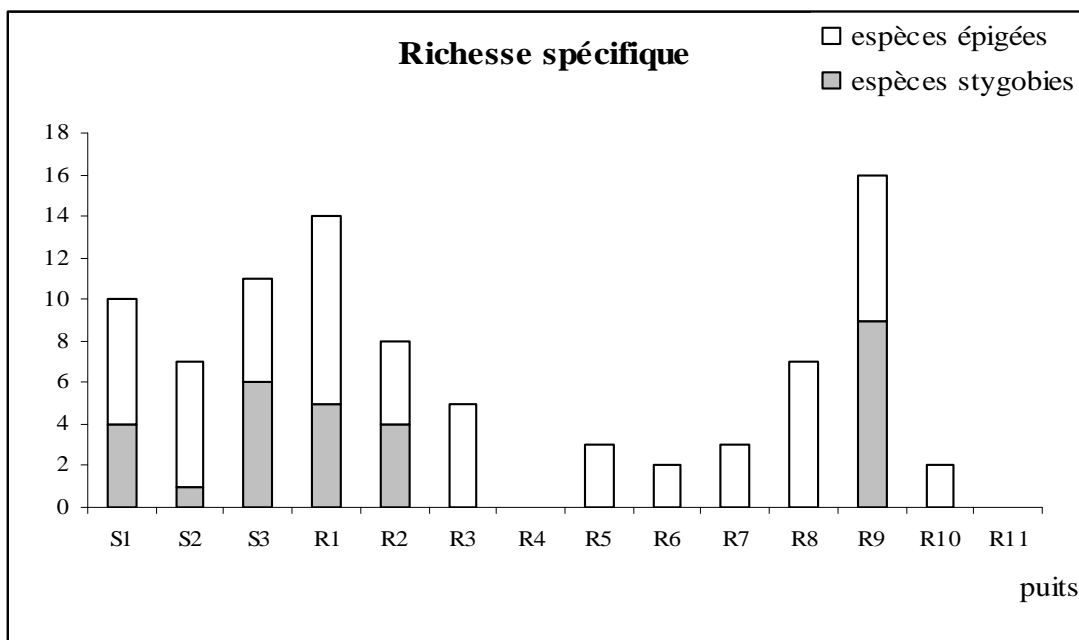


Figure 23 : Nombre total de taxons récoltés (épigés et hypogés) dans chacune des 14 stations du Tafilalet.

Tableau 8: Inventaire des taxons stygobies récoltés dans les 14 puits et sources de la région d'Errachidia. Le signes (+) indiquent 2 espèces d'Amphipodes stygobies récoltées dans la région d'Errachidia, mais dans d'autres stations qui n'ont pas été retenues parmi les 14 stations suivies régulièrement au cours de cette étude.

	Plaine du Tafilalet et région d'Errachidia													
	S1	S2	S3	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11
Classe des Gastéropodes														
<i>Guistia meskiensis</i>			*	*										
<i>Guistia aff. meskiensis</i>			*	*	*									
<i>Guistia</i> sp.	*			*								*		
Classe des Crustacés														
<i>Cypridopsis</i> sp.	*													
Thermosbaenacés														
<i>Monodella cf. atlantomaroccana</i>			*	*								*		
Isopodes														
<i>Typhlocirolana cf. haouzensis</i>	*		*	*	*							*		
<i>Microcharon oubrahimae n.sp</i>												*		
<i>Microcerberus remyi</i>			*											
<i>Magiezia gardei</i>					*							*		
Amphipodes														
<i>Metacrangonyx longicaudus</i>	*				*							*		
<i>Metacrangonyx</i> sp.												*		
<i>Metacrangonyx goulmimensis</i> +														
<i>Metacrangonyx panousei</i>												*		
<i>Maghrebidiella</i> sp.+														
<i>Salentinella</i> sp.			*									*		
Total: 15 espèces stygobies	4	1	6	5	4	0	0	0	0	0	0	9	0	0

Tableau 9 : Inventaire des taxons non stygobies récoltés dans les sources et les puits de la villed'Errachidia et ses environs (Tafilalet).

Stations de la région d'Errachidia et de la Plaine du Tafilalet															
	S1	S2	S3	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	
Classe des Oligochètes															
<i>Trichodrilus</i> sp.	*	*	*	*	*					*		*			
Classe des Gastéropodes															
<i>Physa acuta</i>	*		*	*		*					*				
Limacidae (T)		*													
Classe des Crustacés															
<i>Eucyclops</i> n.sp.	*	*	*	*	*										
<i>Tropocyclops prasinus</i>		*		*		*									
Ostracodes				*									*		
Oniscidae sp. (T)								*		*					
Classe des Arachnides															
Acariens (Gamasida) (T)				*							*	*	*		
Arrhenuridae					*				*						
Classe des Insectes															
Collemboles (T)				*		*			*		*				
Psocoptères ind.										*	*				
sF Culicinae	*														
<i>Machlonyx</i> sp.	*														
<i>Machlonyx</i> sp.	*														
Choroterpes sp.			*												
Diamesinae					*										
<i>Caenis</i> sp.		*	*					*							
<i>Ephemerilla ignita</i>		*													
sF. Tanyponidae														*	
sF. chironominae	*							*				*			
Limoniidae											*	*			
Ceratopogonidae						*									
Coléoptères sp.											*				
Ditiscidae				*								*			
<i>Caenis</i> sp.				*								*			
Potamonthidae sp.						*					*				
Total: 25 taxons	6	6	5	9	4	5	0	3	2	3	7	7	2	0	

b- Biotypologie des stations

Afin d'établir une biotypologie des stations, nous avons fait appel à l'analyse en composantes principales (ACP) dont l'intérêt, dans une telle situation, a été souligné par de nombreux auteurs (YACOUBI-KHEBIZA, 1996 ; BOULAL, 2002). Elle a été appliquée à une matrice de données représentée par 29 colonnes correspondant aux principaux taxons (stygoxies et épigés) et 14 lignes représentant les stations étudiées (puits, sources et sous écoulement).

L'examen des résultats numériques de l'analyse en composantes principales permet de connaître les contributions à la variance totale de chacun des principaux axes factoriels qui sont données ci-dessous pour les 2 premiers axes.

	F 1	F 2
Taux d'inertie	22,8	18,9
Inertie cumulée	22,8	41,7

L'analyse montre clairement sur le plan de ces 2 premiers axes l'existence de quatre ensembles distincts et inégaux de stations (figure 25) :

Groupe1 : Il contient le seul puits R9. Ce puits présente la richesse taxonomique la plus élevée de toute la région du Tafilalet. Il se situe dans la région de Zouala à 30 km au Sud d'Errachidia, non loin de la route nationale qui mène vers Erfoud.

Groupe 2 : Il regroupe les deux sources S2 (Hammat Moulay Hachem) et S3 (source Bleue de Meski). Ces deux stations se caractérisent par l'abondance en espèces épigées telle que les Copépodes Cyclopoïdes et Harpacticoïdes et aussi des larves d'insectes. Les Gastéropodes sont également présents dans l'eau de ces stations. Les espèces stygoxies (Crustacées Amphipodes et Isopodes) sont présentes aussi dans les eaux de ces sources mais avec des abondances plus faibles. Cela est dû surtout à la nature de ces écotones ouverts et plus favorables à l'installation de la faune épigée.

Groupe 3 : il est composé du puits R8. Ce puits largement ouvert, est caractérisé par l'absence totale de la faune stygobie et par une richesse en taxons épigés très élevée. Le manque de protection et probablement aussi les eaux usées utilisées pour l'irrigation des champs voisins sont sans doute responsables de l'absence de la faune stygobie.

Groupe 4 : Ce groupe réunit la majorité des stations (10) et comporte 2 sous-groupes. Le premier (sg 4-1) est composé de la station S1 et des deux puits R1 et R2; il est situé près de l'intersection des deux premiers axes, avec des coordonnées positives (figure 25). Les eaux des ces stations hébergent sensiblement autant d'espèces stygobies que d'espèces épigées.

Le deuxième sous-groupe (sg 4-2), est constitué par les puits R3, R4, R5, R6, R7 et R10, qui se projettent également près de l'origine des deux premiers axes, mais du coté négatif des deux axes. Ce sont les puits situés dans la ville d'Errachidia et dans la région localisée en aval. Leurs eaux hébergent une faune moyennement diversifiée mais seulement de type épigé.

C- Discussion

La richesse spécifique de la faune des puits creusés dans la ville d'Errachidia et ses environs montre une grande variabilité d'un puits à l'autre. L'analyse de ces résultats montre que la richesse faunistique de l'eau des puits semble être liée à la qualité des eaux de la nappe et/ ou à l'état de protection du puits.

Ainsi les puits creusés dans la ville et à l'aval immédiat, qui reçoivent les eaux usées de la ville, présentent des teneurs élevées en éléments indicateurs de la pollution organique (nitrates, nitrites, orthophosphates). La richesse faunistique dans ces stations est faible à nulle. Alors que les puits situés en amont de la ville d'Errachidia présentent des eaux de bonne qualité physicochimique et hébergent un peuplement riche. La composition de la faune dépend donc grandement de la qualité de la protection du puits.

La composition de la faune des puits dont la qualité des eaux est bonne dépend en effet de l'état de protection de ces puits et par ailleurs de l'histoire géologique de la région.

La pollution entraîne donc une diminution de la richesse spécifique des puits mais surtout de celle de la faune phréatobie, puisque les puits les plus pollués ne contiennent aucun taxon phréatobie : ils ne renferment que les espèces épigées c'est le cas des puits R3 à R8. Enfin l'ensemble des résultats montre que d'une façon générale la richesse spécifique totale diminue fortement en cas de pollution élevée.

Il est remarquable enfin que l'ACP permette assez bien de distinguer les deux communautés, stygobie et épigée: Les taxons de la première ont tous des coordonnées positives sur l'Axe F1 et en particulier un groupe de 6 taxons stygobies, bien isolé (Fig. 24) vers les fortes coordonnées (supérieures à 7,5) sur ce premier axe, et négatives sur F2. Au contraire tous les taxons qui ont sur F1 des coordonnées négatives (8 taxons dont un "point caché") appartiennent à la seconde communauté (celle des espèces épigées). Entre les deux, et projeté

dans le quadrant des valeurs positives sur les deux axes, une quinzaine de taxons renferment des espèces appartenant aux deux communautés avec cependant encore vers les plus fortes coordonnées sur F1 des taxons stygobies. Ce résultat inédit suggère que la répartition des espèces des deux communautés n'obéit pas en général, à la même logique et cette différence de comportement des deux ensembles pourrait bien être en rapport avec leurs exigences en matière de qualité de l'eau (ou de sensibilité aux pollutions, ce qui revient au même).

Tableau 10: Contributions des taxons à la formation des deux premiers axes de l'ACP
(tableau des stations du Tafilalet décrites par leur faune)

Taxons	Axe F1	Axe F2
gdsp	0,186	0,738
gms	0,180	0,227
gfm	0,285	0,464
gsp	0,862	-0,421
ost	0,08	0,09
mcat	0,863	-0,427
typh	0,536	0,256
mchr	0,848	-0,446
mcr	0,260	0,471
mgd	0,205	-0,02
lon	0,758	-0,324
msh	0,848	-0,446
pan	0,848	-0,446
sal	0,527	0,313
olg	0,717	0,581
pac	-0,272	-0,02
lima	0,06	0,680
ecyc	0,158	0,800
trop	-0,110	0,456
dia	0,006	0,004
cae	0,476	0,723
eph	0,06	0,680
tan	-0,148	-0,103
chi	-0,332	-0,317
limo	-0,143	-0,457
cer	-0,264	-0,08
dat	0,418	-0,09
pot	-0,441	-0,351

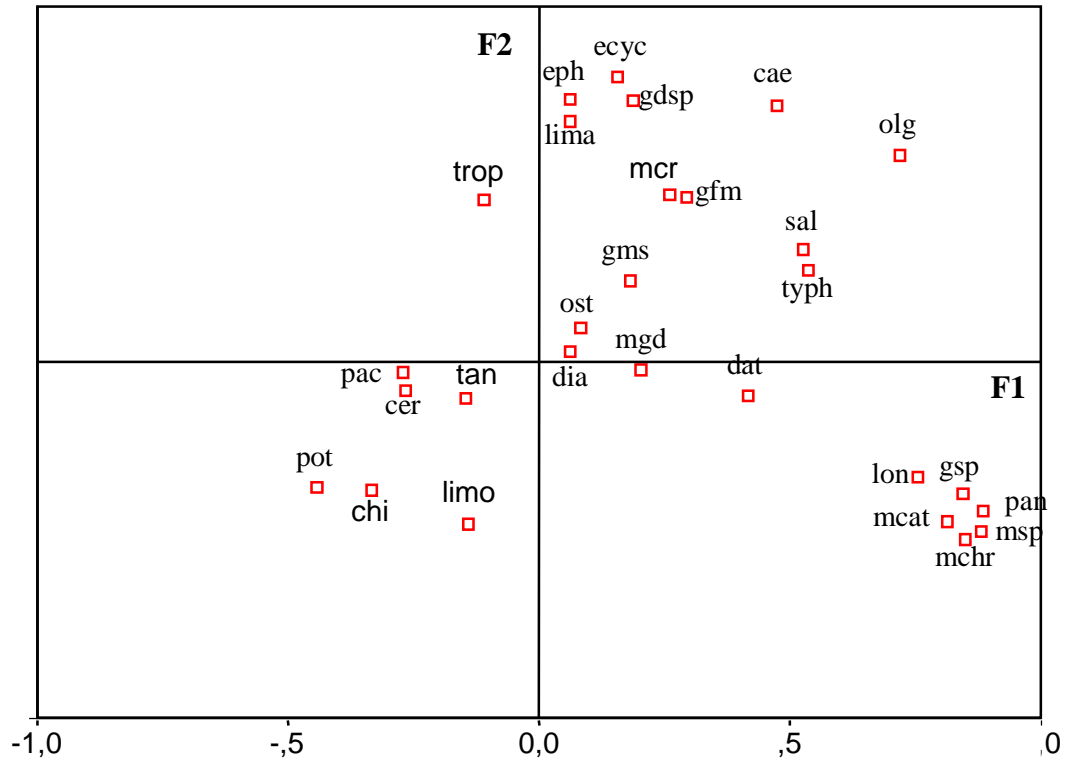


Figure 24 : Projection sur le plan des deux premiers axes factoriels (F1 et F2) de l'ACP, des divers taxons stygobies et épigés récoltés dans les puits et sources de la région du Tafilalet: **gdsp** : Gastéropode sp.; **gfm** : *Guistia aff. meskiensis*; **gms** : *Guistia meskiensis* ; **gsp** : *Guistia sp.* ; **ost** : Ostracode sp. ; **mcat** : *Monodella cf. atlantomaroccana* ; **typh** : *Typhlocirolana nsp.* ; **mchr** : *Microcharon oubrahimae* ; **mcr** : *Microcerberus remyi* ; **mgd** : *Magniezia aff. Gardei* ; **lon** : *Metacrangonyx longicaudatus* ; **mhr** : *Metacrangonyx sp.* ; **pan** : *Metacrangonyx panousei* ; **sal** : *Salentinella sp.* ; **olg** : Oligochètes ind. ; **pac** : *Physa acuta* ; **lima**: Limacidae ; **ecyc** : *Eucyclops n.sp.* ; **trop**: *Tropocyclops prasinus*; ind. ; **dia** : Diamesinae ; **cae** : *Caenis sp.* ; **eph** : *Ephemerella ignita* ; **tan** : sF. Tanyponidae ; **chi** : sF. Chironominae ; **limo**: Limoniidae ; **cer** : Ceratopogonidae ; **dat** : Daticidae ; **Pot** : Potamonthidae.

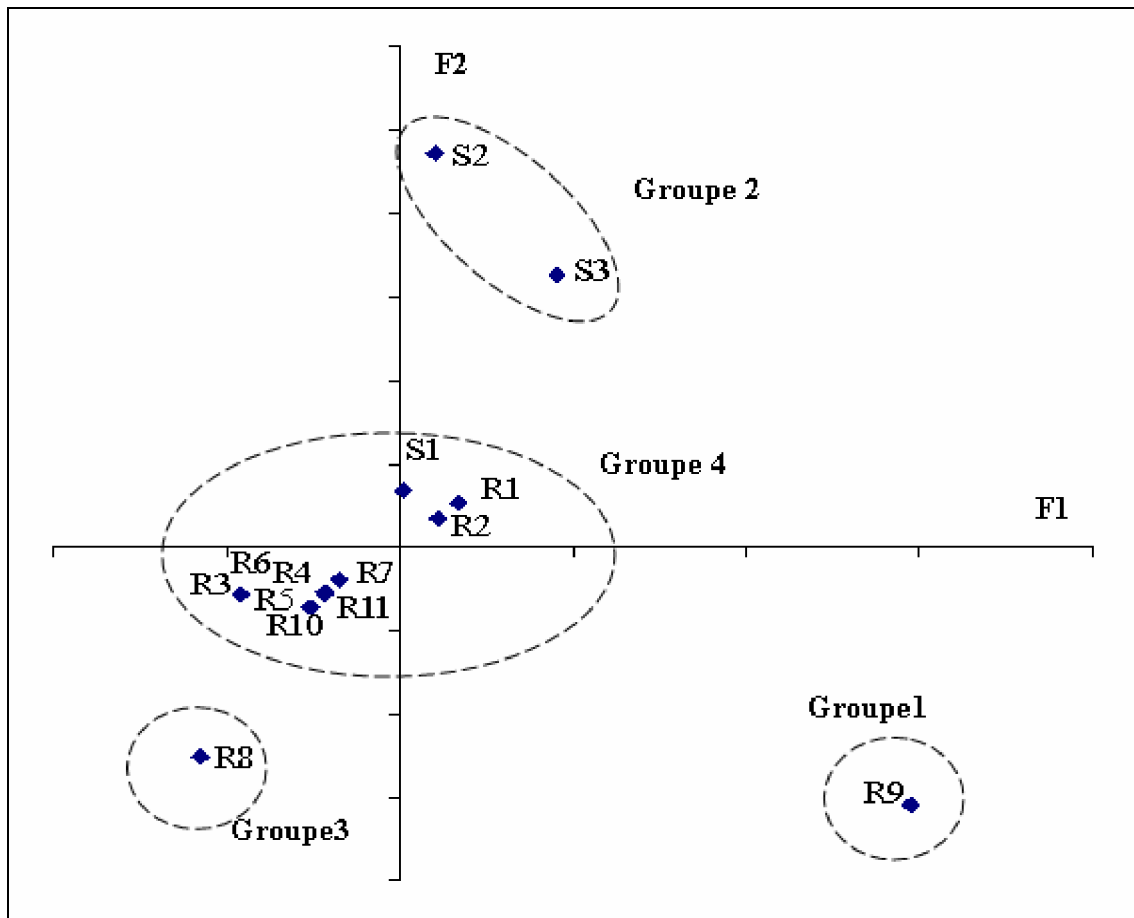


Figure 25 : Projection des 4 groupes de stations du Tafilalet, tels qu'ils résultent d'une ACP stations/faune (et de la classification automatique représentée à la Fig. 26).

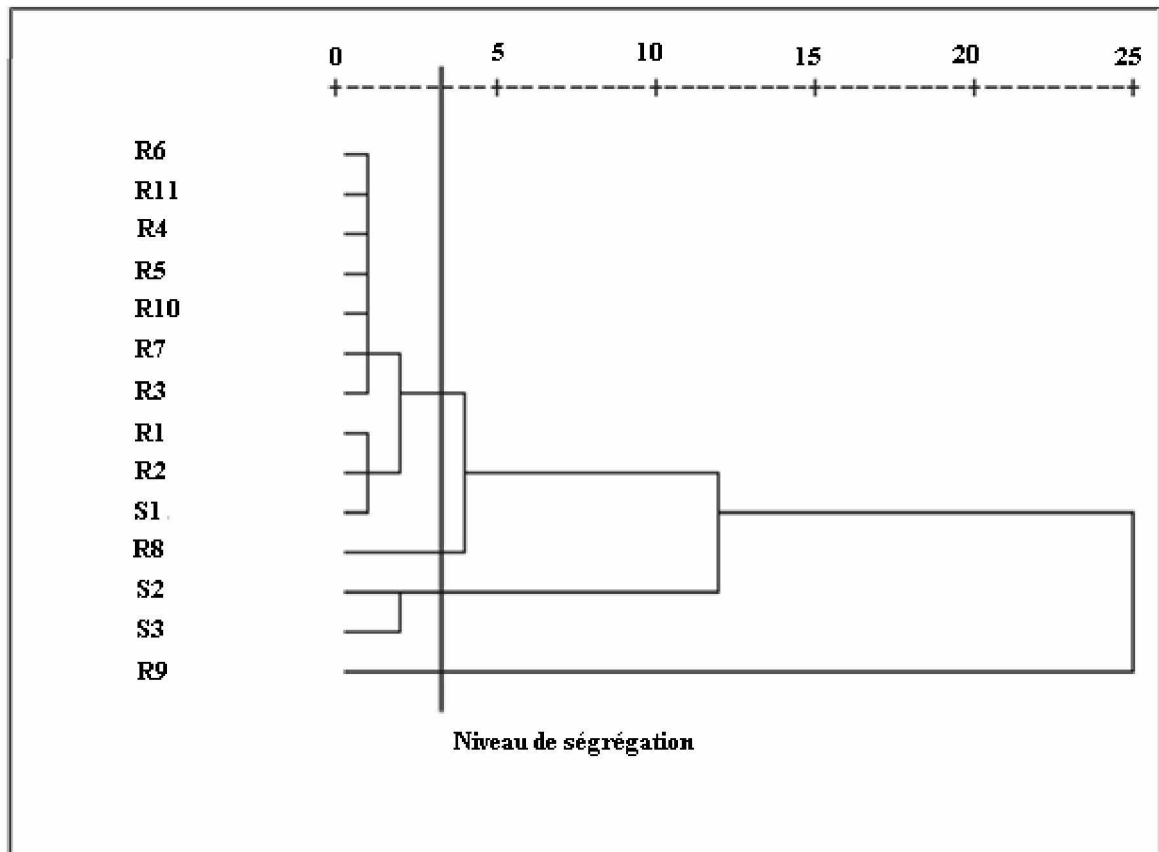


Figure 26 : Dendrogramme obtenu à partir d'une classification hiérarchique réalisée sur les résultats d'une Analyses en Composantes Principales de la composition de la faune totale des stations étudiées dans la région du Tafilalet.

3°/ Nappes du Haouz

3-1 Ville de Marrakech et ses environs

a/ Inventaire faunistique

Les premières études effectuées sur les puits de la région de Marrakech sont relativement anciennes, puisqu'elles remontent aux années 80 (BOULANOUAR, 1986 ; BOUTIN et DIAS, 1987 ; BOUTIN et BOULANOUAR, 1983 et 1994). En conséquence, elles devaient être d'abord revues et actualisées, afin de voir si des modifications sont apparues, et de connaître la biodiversité aquatique souterraine actuelle et ses relations avec la qualité des eaux.

La faune récoltée lors de cette étude dans l'ensemble des stations étudiées dans la région de Marrakech est relativement diversifiée. Elle est constituée évidemment d'espèces d'origine souterraine et d'autres espèces d'origine épigée. Les groupes taxonomiques les plus représentés sont les Crustacés Péracarides, et d'abord les Isopodes : *Typhlocirolana haouzensis*, *Typhlocirolana leptura*, *Marocolana delamarei*, *Marocolana* sp.2 et *Microcharon* sp. Les Amphipodes *Metacrangonyx spinicaudatus*, *Metacrangonyx paurosexualis* et *Maghrebidiella maroccana* et les Thermosbaenacés *Monodella atlantomaroccana* et six espèces de Copépodes (*Nitocrellopsis* sp.; *Megacyclops viridis* ; *Tropocyclops prasinus* ; *Afrocyclus gibsoni* ; *Eucyclops n.sp.* et *Eucyclops serrulatus*). Les Gastéropodes aquatiques souterrains sont aussi présents avec 3 espèces (*Giustia gofasi* ; *Heideella andreae boulanouari* et *Heideella cf. andrea*), les Oligochètes *Enchytraeus cf. buchhalzi* ; *Lumbricidae* sp. et *Aulophorus furcatus* et les larves d'Insectes (Tableau 11).

De point de vue richesse spécifique, le puits M9 présente la richesse la plus élevée en espèces, puisqu'il héberge 12 espèces dont 5 stygobies. Alors que la richesse la plus faible se rencontre dans les puits M2, M3 et M5. Le puits M1, situé dans la nappe de Jbilet loin de toute source de contamination, représente la richesse la plus élevée en espèces stygobies, avec 6 espèces (Tableau 11 et figure 27) et sans comptabiliser d'éventuels Oligochètes stygobies.

L'analyse de la richesse spécifique en relation avec l'emplacement des stations montre que les puits creusés dans la zone d'épandage des eaux usées présentent une richesse spécifique très faible; ce sont essentiellement les formes d'origine épigée qui y dominent, alors que les puits creusés en amont de la ville et ceux qui sont loin des sources de pollution présentent la diversité la plus élevée.

Puits de la ville de Marrakech et des environs											
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
Classe des Gastéropodes											
<i>Guistia gofasi</i>				◆		◆	◆	◆	◆		
<i>Heideella. cf andreae</i>		◆	◆				◆				◆
<i>Heideella andreae boulanouari</i>								◆			
Classe des Crustacés											
Ostracode sp.											
Thermosbaenacés:											
<i>Monodella atlantomaroccana</i>		◆									
Isopodes:											
<i>Typhlocirolana haouzensis</i>	◆								◆		◆
<i>Typhlocirolana leptura</i>	◆										
<i>Marocolana delamarei</i>									◆		◆
<i>Marocolana sp.2 (cuspitelsonia)</i>	◆										
<i>Microcharon. sp.</i>	◆										
Amphipodes											
<i>Metacrangonyx spinicaudatus</i>							◆	◆	◆		◆
<i>Metacrangonyx paurosexualis</i>							◆	◆	◆		
<i>Maghrebidiella maroccana</i>	◆										
13 espèces stygobies	6	1	1	1	0	1	4	4	5	4	0

Tableau 11 : Liste des taxons stygobies récoltés dans les 11 stations du nord de la ville de Marrakech.

Tableau 12 : Inventaire des taxons épigés capturés dans les eaux des 11 puits de la ville de Marrakech et ses environs. (T) espèces édaphiques rencontrées d'une manière accidentelle dans les eaux des puits.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
Classe des Oligochètes											
Enchytraeus cf. buchhalzi											
Oligochètes ind.											
Classe des Gastéropodes											
<i>Physa acuta</i>		♦									
Limacidae (T)				♦							
Classe des Crustacés											
Copépodes Cyclopoïdes	♦	♦		♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	
Copépodes Harpacticoïdes	♦		♦		♦	♦	♦	♦	♦	♦	
Ostracodes											
Oniscidae sp. (T)	♦								*		
Classe des Arachnides											
Acarie (Gamasida) (T)						♦		♦			
Acarie Oribate (T)						♦	♦				
Pseudoscorpion (T)							♦				
Classe des Insectes											
Collemboles (T)											♦
<i>Culex</i> sp.	♦	♦	♦	♦		♦	♦	♦	♦		
Hyménoptère ind.								♦		♦	
sF Culicinae							♦				
Anophelinae											
Tr. Chironomini											
Psocoptère (T)				♦							
Tabanidae				♦	♦						
sF Tanypodinae											
Psychodidae sp.									♦		
34 taxons	4	3	2	5	3	5	6	5	6	3	1

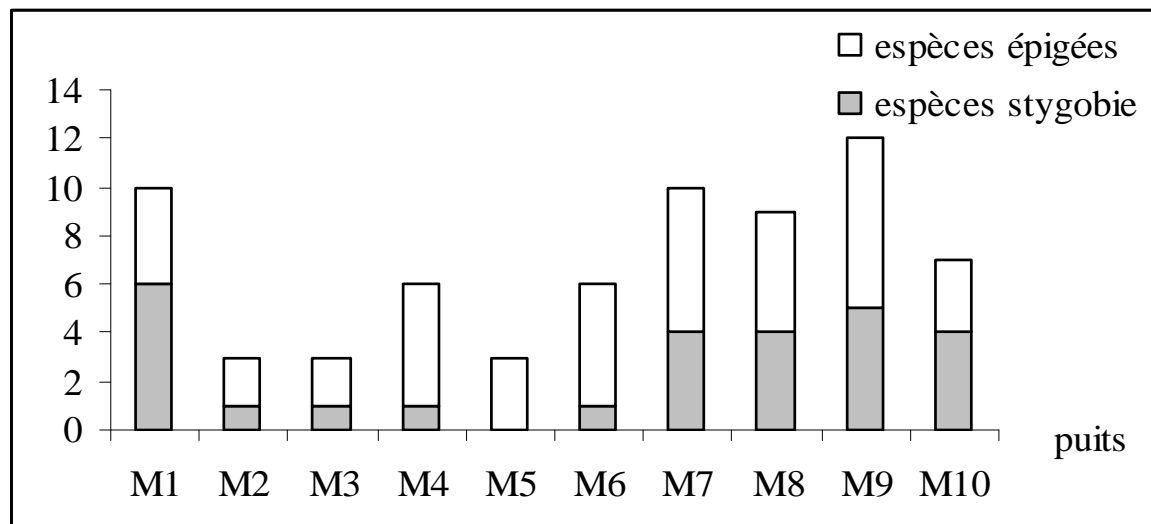


Figure 27: Nombre total de taxons récoltés (épigés et hypogés) dans chacune des stations M1 à M9 de la ville de Marrakech et de ses environs.

b) Typologie des stations

Une Analyse en Composantes Principales a été effectuée sur une matrice de données comportant 25 colonnes représentant les principaux taxons récoltés (stygobies et épigés) et 11 lignes représentant les 11 puits étudiés à Marrakech et aux environs.

Les deux premiers axes cumulent près de 52% de la variance totale (31,5% pour l'axe F1 et 20,5% l'axe F2). L'analyse des données du tableau de contribution des taxons dans la formation des deux premiers axes factoriels montre que les espèces stygobies contribuent le plus dans la formation du premier axe, il semble que ce dernier reflète la richesse en espèces stygobies. Alors que les taxons épigés contribuent de plus dans la formation du deuxième axe. Il apparut donc que le deuxième axe factoriel reflète la richesse en taxons épigés. La classification hiérarchique effectuée sur les résultats de l'analyse en composantes principales permet de distinguer quatre groupes de puits:

Groupe G1 : constitué du puits M1, qui est projeté du côté positif du premier axe factoriel; ce puits se situe dans la nappe de Jbilet. Il héberge le peuplement le plus diversifié avec 10 espèces, espèces épigées (4) et espèces stygobies (6). L'axe 1 oppose donc cette station, la plus riche, à l'ensemble des autres qui sont moins riches, au moins en espèces stygobies (figure 28).

Groupe G2 : ce "groupe" est constitué du puits M8 situé dans la ville de Marrakech. Ce puits est projeté du côté positif du deuxième axe factoriel F2. Il héberge 4 espèces stygobies et 5 espèces épigées et s'oppose, sur le second axe factoriel, à l'ensemble des stations.

Groupe G3 : il rassemble les deux puits M6 et M7. Le puits M6 est situé dans l'ancienne zone d'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech, alors que le puits M7 est situé dans le quartier nord de la ville. Ce groupe est projeté vers les valeurs négatives de l'axe 1 et faiblement positives de l'axe 2, il héberge nettement plus de taxons épigés que d'espèces stygobies.

Groupe G4 : constitué des puits M2, M3, M4, M5, M9, M10 et M11. Ce sont les puits creusés dans l'ancienne zone d'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech et le quartier nord de la ville. Ce sont des puits relativement pauvre en espèces stygobies, à l'exception de M9, comportant souvent les mêmes espèces stygobies (Metacrangonyctidae ou Gastéropodes) et donc peu caractérisés (d'où le "râteau" de la figure 29 qui indique un ensemble peu structuré).

	Axe F1	Axe F2
gg	-0,318	0,345
han	-0,242	-0,129
anb	-0,204	0,896
matl	0,983	0,138
typh	0,895	0,01
typl	0,983	0,138
mrd	-0,120	-0,271
mrsp	0,983	0,138
mch1	0,983	0,138
spn	-0,320	0,124
pau	-0,339	0,593
mmr	0,983	0,138
lim	-0,09	-0,226
cyc	-0,136	0,885
harp	0,05	0,510
culx	0,06	0,862
hym	-0,217	0,820
culc	-0,216	0,127
tab	-0,102	-0,312
psy	-0,127	-0,117

Tableau 13 : Contribution des 20 taxons récoltés à Marrakech à la formation des deux premiers axes de l'ACP (Voir figure 30): **gg** : *Guistia gofasi* ; **han** : *Heideella. cf andreae*; **anb** : *Heideella andreae boulanouari* ; **matl** : *Monodella atlantomaroccana* ; **typh** : *Typhlocirolana haouzensis* ; **typl** : *Typhlocirolana leptura* ; **mrd** : *Marocolana delamarei* ; **mrsp** : *Marocolana sp.2* ; **mch1** : *Microcharon. sp.1* ; **spn** : *Metacrangonyx spinicaudatus* ; **pau** : *Metacrangonyx paurosexualis* ; **mmr** : *Maghrebidiella maroccana* ; **lim** : Limacidae ; **cyc** : Copépodes Cyclopoïdes ; **harp** : Copépodes Harpacticoïdes ; **culx** : *Culex sp.* ; **hym** : Hymenoptère ind. ; **culc** : sF Culicinae ; **tab** : Tabanidae ; **psy** : Psychodidae.

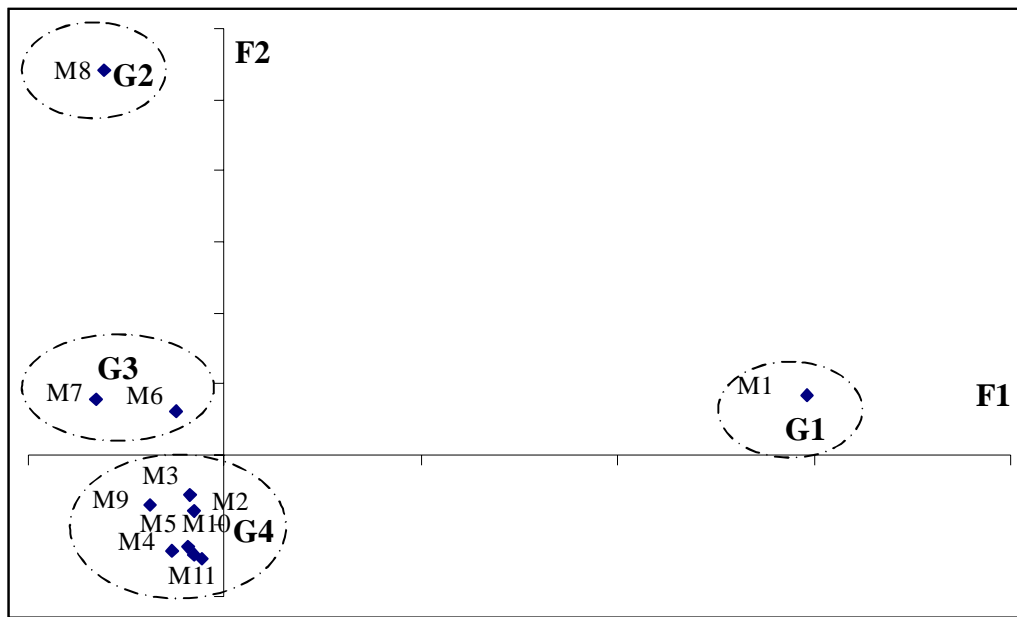


Figure 28 : Projection des puits étudiés dans la ville de Marrakech et ses environs sur le plan des deux premiers axes de l'Analyse en Composantes Principales. Les groupements des puits sont déduits de la classification hiérarchique effectuée sur les résultats de l'ACP.

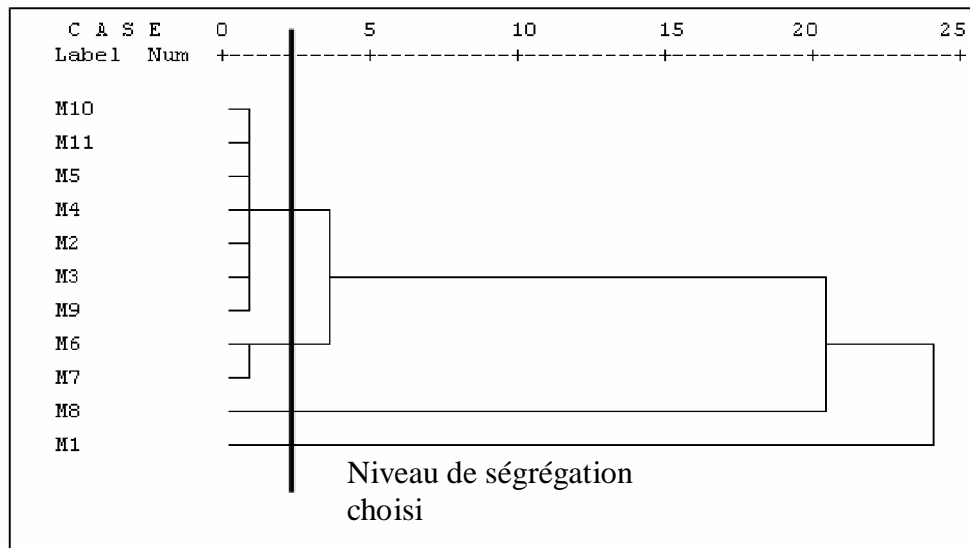


Figure 29 : Dendrogramme obtenu à partir des valeurs numériques fournies par l'Analyse en Composantes Principales pour les puits de la ville de Marrakech et ses environs décrits par leur faune aquatique.

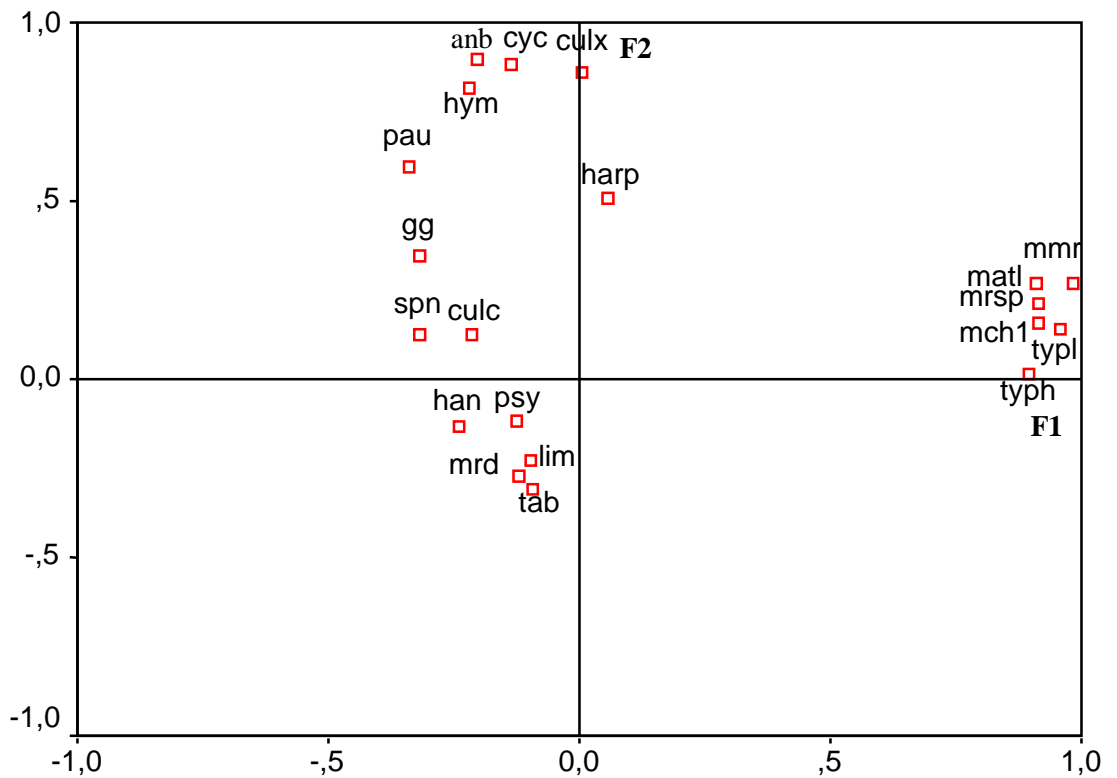


Figure 30 : Projection des principaux taxons stygobies et épigées rencontrés dans les eaux de la nappe de Marrakech sur le plan des deux premiers axes de l'ACP.

gg : *Guistia gofasi* ; **han :** *Heideella. cf andreae*; **anb :** *Heideella andreae boulanouari* ; **matl :** *Monodella atlantomaroccana* ; **typh :** *Typhlocirolana haouzensis* ; **typl :** *Typhlocirolana leptura* ; **mrd :** *Marocolana delamarei* ; **mrsp :** *Marocolana sp.2* ; **mch1 :** *Microcharon. sp.1* ; **spn :** *Metacrangonyx pinicaudatus* ; **pau :** *Metacrangonyx paurosexualis* ; **mmr :** *Maghrebidiella maroccana* ; **lim :** Limacidae ; **cyc :** Copépodes Cyclopoïdes ; **harp :** Copépodes Harpacticoïdes ; **culx :** *Culex sp.* ; **hym :** Hyménoptère ind. ; **culc :** sF Culicinae ; **tab :** Tabanidae ; **psy :** Psychodidae.

C/ Discussion

L'analyse de la biodiversité aquatique des eaux souterraines de la région de Marrakech, montre que la faune stygobie est, dans cette région, relativement riche et diversifiée. Des espèces stygobies différentes sont capturées dans les deux nappes des Jbilet et de Marrakech. Ce sont deux nappes, qui malgré leur proximité, sont caractérisées par des différences importantes de point de vue qualité de l'eau et de leur peuplement. Ainsi l'étude de la qualité (chapitre qualité des eaux) pages 43 à 88), montre que les eaux de la nappe de Jbilet sont beaucoup plus minéralisées que celles de Marrakech.

La nappe de Jbilet se distingue par la présence de l'Isopode Asellides *Proasellus coxalis africanus*. Les stations prospectées dans cette région constituent la limite sud de la répartition de cette espèce. Aucune station dans la plaine du Haouz ou encore dans tout le sud du Maroc n'a livré des représentants de ce groupe. La présence exclusive de cette espèce dans la zone des Jbilet serait liée à la qualité de l'eau et à l'histoire géologique de la région.

Dans la nappe de Jbilet, les deux puits M1 et M2 sont éloignés l'un de l'autre de 500 m. Le puits M1 qui est situé plus au nord, est le plus riche en espèce, alors que le deuxième M2, qui est situé dans la décharge publique est le plus pauvre. La pauvreté du puits M2 est due certainement à la contamination de ses eaux par une pollution organique due à l'infiltration des polluants en provenance de la décharge.

Les mêmes remarques sont valables pour la nappe de Marrakech, où les puits M3 à M6 creusés dans l'ancienne zone d'épandage des eaux usées de la ville sont les plus pauvres en espèces stygobies.

Enfin on remarquera que pour la seconde fois l'ACP isole très nettement (sur la figure 30) un petit groupe d'une demi douzaine de taxons, tous stygobies, de l'ensemble des autres espèces récoltées, à une extrémité du premier axe factoriel, et cela encore plus nettement que sur la figure 24. L'ensemble des autres taxons, épigés pour le plus grand nombre, mais parfois également stygobies, se répartissent au contraire le long de l'axe 2, avec des coordonnées positives ou négatives, alors que les coordonnées de leurs projections sur l'axe 1 sont toutes (à 2 exceptions près) faiblement négatives. Ce regroupement des taxons stygobies isolés loin des autres taxons, alors que la masse des autres taxons comporte les espèces épigées plus quelques espèces stygobies, et ce dans les deux régions d'étude pourtant fort éloignées doit bien avoir un sens (Les 6 taxons isolés sur F1 sont certes présents dans le puits M1 du groupe 1 mais d'autres espèces présentes dans ce même puits M1 se trouvent dans le nuage général...). Peut-

être ce regroupement de 6 stygobiontes correspond-il à la distinction entre les stygobiontes les plus exigeants, strictement inféodés aux habitats souterrains alors que d'autres stygobiontes seraient un peu plus tolérants et récoltés souvent en même temps que les membres de la communauté épigée. Dans cette hypothèse de la présence de ces stygobiontes plus particulièrement significatifs serait à prendre en compte plus particulièrement dans les prospections faunistiques effectuées dans la perspective de l'évaluation de la qualité globale de l'eau. Cette question méritera certainement de retenir l'attention dans le futur.

3-2 Nappe de la zone de Draâ Sfer

a- Inventaire faunistique

La faune récoltée dans l'ensemble des 7 puits (Tableau 14) est constituée comme d'habitude d'espèces d'origine souterraine et d'autres d'origine épigée. Elle est relativement diversifiée puisqu'elle comporte au total 20 taxons. Les groupes taxonomiques les plus représentés sont les Oligochètes *Trichodrilus* sp. 2 ; *Trichodrilus* cf. *icenorum* ; *Trichodrilus* sp. et *Dero* sp., les Gastéropodes avec deux espèces stygobies (*Giustia gofasi* et *Heideella* cf. *andrea*) et une espèce épigée *Physa acuta*, les Crustacés Péracraïdes avec 5 espèces (*Monodella atlantomaroccana*, *Marocolana* sp.2, *Typhlocirolana haouzensis*, *Metacrangonyx spinicaudatus* et *Metacrangonyx paurosexualis*) et des larves d'insectes. Ce sont les espèces déjà rencontrées dans les eaux souterraines de la nappe de Marrakech. La part des espèces stygobies n'est pas négligeable dans ce peuplement puisqu'elle cumule 7 espèces, soit 35% du peuplement. Plusieurs taxons n'ont pu être déterminés avec précision, car sont principalement des larves d'insectes immatures pour lesquelles le puits constitue, en zone aride, un milieu refuge.

L'analyse de la liste faunistique permet d'observer des modifications du peuplement au voisinage de la mine et dans son secteur aval, c'est le cas notamment des crustacés souterrains Amphipodes et Isopodes qui disparaissent complètement de ce secteur (figure 10). Sur les six espèces stygobies présentes dans le puits amont (P1), aucune ne se retrouve à l'aval immédiat des rejets miniers, dans les stations P3 à P5. Elles réapparaissent plus en aval (P6 et P7). De même, la richesse en espèces épigées qui est de 5 taxons dans P1 et P2 tombe à 2 taxons seulement dans P3 et P4 puis devient nulle dans P5; enfin elle remonte progressivement jusqu'à 3 taxons dans P6 puis à 4 en P7.

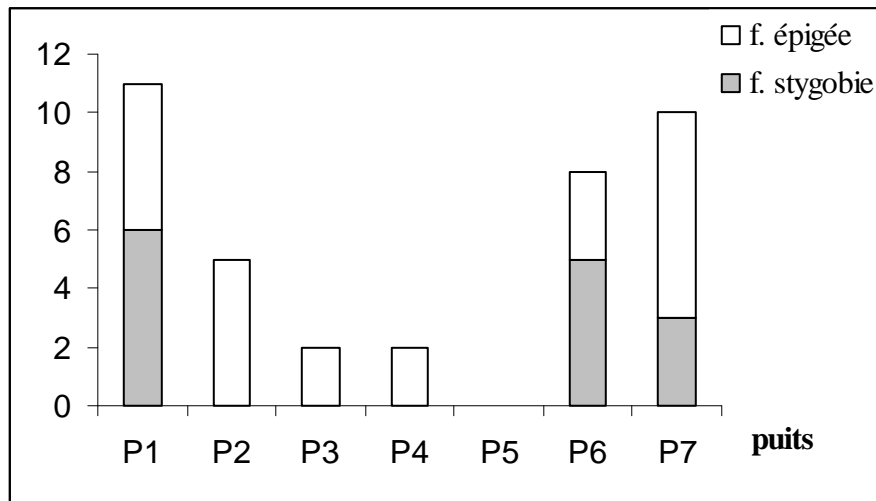


Figure 31 : Nombre total de taxons aquatiques récoltés (épigés et hypogés) dans chacune des 7 stations de la zone minière de Draâ Sfer (P1 et P2 se trouvant à l'amont hydraulique de la mine et P3 à P7 à l'aval, à des distances croissantes).

b- Biotypologie des stations

Après l'analyse en composante principale (ACP réalisée sur la matrice des espèces récoltées sur le site de Draâ Sfer), deux axes principaux ont été retenus, qui expriment ensemble plus de 67% de la variance totale. L'axe F1 auquel correspond 41% de cette variance est fortement corrélé du côté positif avec la totalité des espèces stygobies recensées dans les puits, et à un moindre degré aux larves de Diptères du côté négatif (Tableau 15 et figure 32). Alors que l'axe F2, qui traduit 26% de la variance totale, est corrélé principalement aux espèces épigées (Culicinae et Anophelinae et aux Collemboles) du côté positif, et par ailleurs mais assez faiblement aux Tanypodinae et au *Typhlocirolana* du côté négatif. La projection des individus sur le plan factoriel F1- F2 (figures 33 et 34) montre l'individualisation de 3 groupes principaux:

Groupe 1: situé du côté positif de l'axe F2, constitué par le P6. Il est caractérisé par une richesse spécifique assez importante où dominent les espèces stygobies.

Groupe 2: situé du côté positif de l'axe F1, et constitué par les puits P1 et P7. Ce groupe est caractérisé par les richesses spécifiques les plus élevées, comportant les deux composantes, stygobie et épigée, qui sont l'une et l'autre bien représentées (Fig. 31).

Groupe 3 : corrélé négativement à l'axe factoriel F1, il est constitué par les puits P2, proche de la mine mais à l'amont, et les puits P3, P4 et P5 situés juste à l'aval. Ce groupe de 4 puits est caractérisé par l'absence totale de la faune stygobie et la rareté ou l'absence des espèces épigées (Fig. 31).

Puits	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Faune							
Faune stygobie							
<i>Giustia gofasi</i>	+					+	
<i>Heideella cf. andrae</i>	+					+	
<i>Monodella atlantomaroccana</i>	+					+	+
<i>Marocolana</i> sp.2	+						
<i>Typhlocirolana haouzensis</i>	+						
<i>Metacrangonyx paurosexualis</i>	+					+	+
<i>Metacrangonyx spinicaudatus</i>						+	+
Nombre d'espèces stygobies	6	0	0	0	0	5	3
Faune épigée							
<i>Dero</i> sp.		+					
<i>Trichodrilus</i> sp.1		+					
<i>Trichodrilus cf. icenorum</i>		+					
<i>Trichodrilus</i> sp. 2	+						+
<i>Physa acuta</i>	+						+
Copépodes cyclopoïdes	+						+
Copépodes harpacticoides	+						+
s/F. Culicinae	+		+	+		+	
s/F. Anophelinae						+	
s/F. Tanypodinae		+					
Tr. Chironomini		+	+			+	
Nombre de taxons épigés	5	5	2	2	0	3	4
Richesse taxonomique totale	11	5	2	2	0	8	7

Tableau 14 : Inventaire faunistique (communautés stygobie et épigée) des 7 puits du secteur minier de Draâ Sfer.

	F1	F2
gg	0,639	0,498
han	0,333	0,479
matl	0,909	0,368
mrsp	0,723	-0,304
typh	0,268	-0,530
pau	0,909	0,368
spn	0,435	0,639
olg	0,917	-0,330
pac	0,917	-0,330
cyc	0,917	-0,330
harp	0,917	-0,330
acsp	0,346	-0,279
coll	0,102	0,947
culc	-0,374	0,654
anp	0,102	0,947
tan	-0,378	-0,380
chi	-0,567	-0,267

Tableau 15 : Participation des taxons récoltés à la formation des deux premiers axes factoriels de l'ACP (cas des puits de la zone minière de Draâ Sfer): **gg:** *Giustia gofasi*, **ha:** *Heideella cf. Andrae*, **matl:** *Monodella atlantomaroccana*, **mrsp:** *Marocolana* sp.2, **typh:** *Typhlocirolana haouzensis*, **pau :** *Metacrangonyx paurosexualis* **spn:** *Metacrangonyx spinicaudatus*, **olg:** Oligochètes, **pac:** *Physa acuta*, **cyc:** Copépodes cyclopoides, **harp:** Copépodes harpacticoides, **acsp:** Acariens, **coll:** Collemboles, **culc:** s/F. Culicinae, **anp:** s/F. Anophelinae, **tan:** s/F. Tanypodinae et **chi:** Tr. Chironomini.

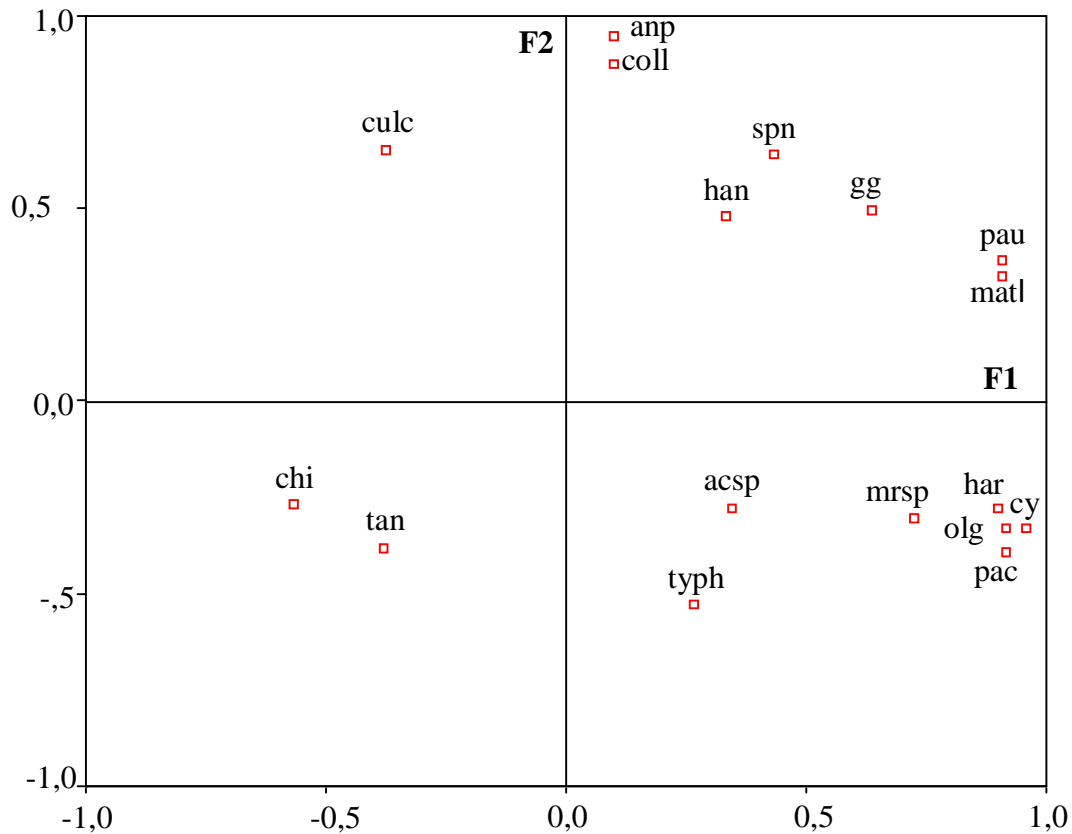


Figure 32 : Projection du peuplement du site Draâ Sfer sur le plan de deux premiers axes de l'analyse en composantes principales. : **gg:** *Giustia gofasi*, **ha:** *Heideella cf. Andrae*, **matl:** *Monodella atlantomaroccana*, **mrsp:** *Marocolana sp.2*, **typh:** *Typhlocirolana haouzensis*, **pau :** *Metacrangonyx paurosexualis* **spn:** *Metacrangonyx spinicaudatus*, **olg:** Oligochètes, **pac:** *Physa acuta*, **cy:** Copépodes cyclopoïdes, **harp:** Copépodes harpacticoides, **acsp:** Acariens, **coll:** Collemboles, **culc:** s/F. Culicinae, **anp:** s/F. Anophelinae, **tan:** s/F. Tanypodinae et **chi:** Tr. Chironomini.

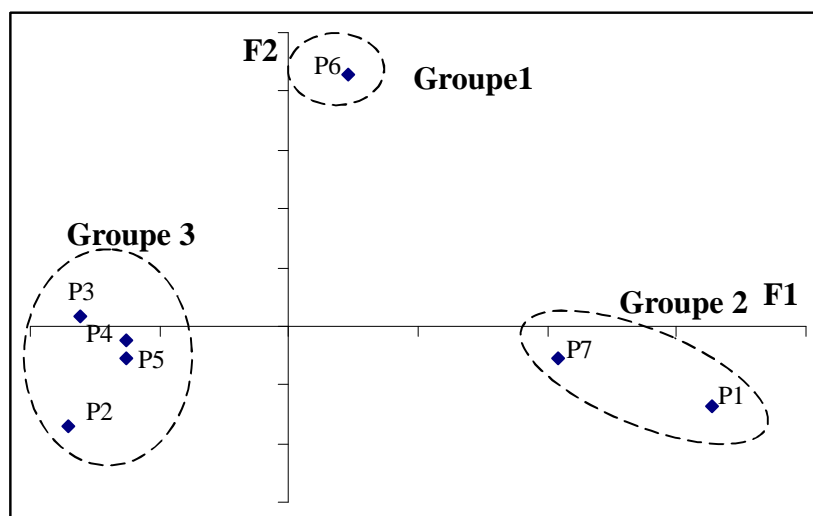


Figure 33 : Projection des 7 puits du site Draâ Sfer sur les deux premiers axes de l'analyse en composantes principales du tableau stations/faune.

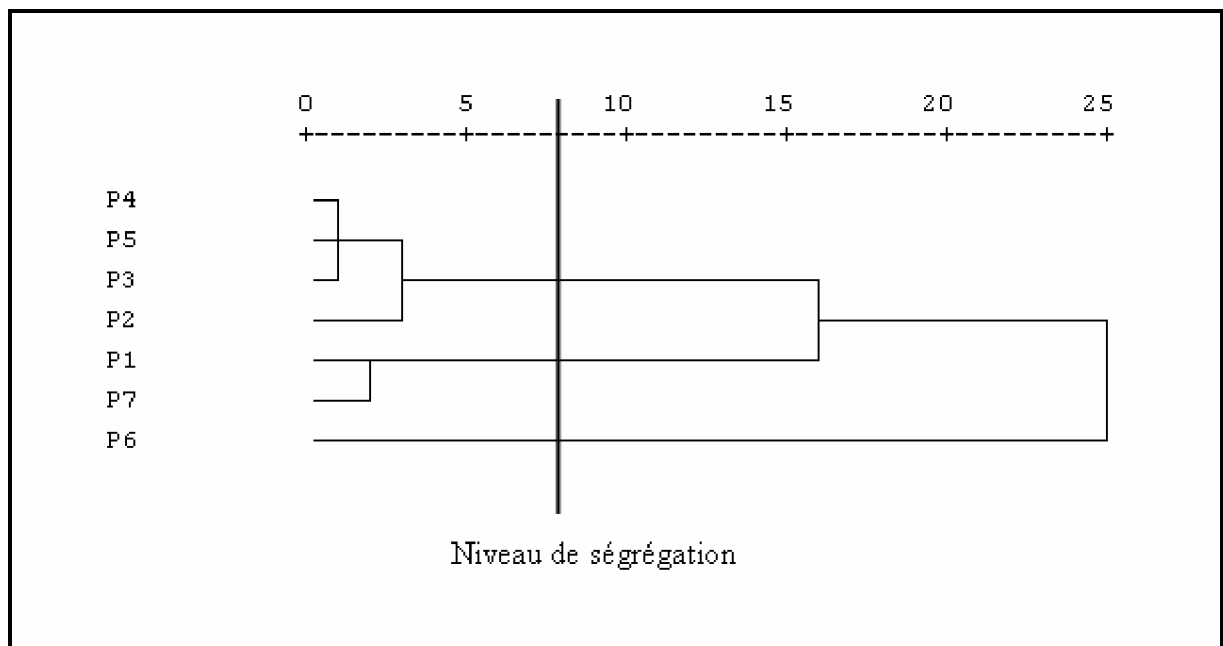


Figure 34 : Dendrogramme obtenu à partir des résultats de l'Analyse en Composantes Principales pour les puits étudiés dans le secteur de Draâ Sfer, caractérisés par leur faune.

C- Discussion

L'analyse comparative de la composition des peuplements d'invertébrés souterrains en amont et en aval des rejets miniers nous a permis de mettre en évidence une modification de la richesse biologique correspondant à la détérioration relative de la qualité physico-chimique de l'eau. Plusieurs groupes de taxons caractéristiques d'une eau de bonne qualité disparaissent à proximité de la mine. Ces modifications sont accompagnées par des variations quantitatives du peuplement, principalement au niveau des stations P3, P4 et P5. Ces modifications, induites par les lixiviats des rejets miniers qui affectent certainement l'eau de la nappe sous-jacente, traduisent une certaine sensibilité de la faune souterraine à la dégradation de la qualité de l'eau, et plus particulièrement des crustacés souterrains Amphipodes et Isopodes. Ces résultats viennent donc confirmer ceux qui avaient été déjà obtenus au Maroc, aussi bien sur les puits que dans les milieux interstitiels des oueds du Haut-Atlas (BOULANOUAR, 1995 ; YACOUBI-KHEBIZA, 1996), ainsi que ceux de divers travaux réalisés sur des cours d'eau européens et nord-américains (JACQUES *et al.*, 1986 ; JUBERTHIE et DECU, 1994 ; WISSMAR *et al.*, 1997 ; MALARD *et al.*, 1997).

L'analyse en composante principale permet donc de confirmer l'existence d'une corrélation négative entre les teneurs en polluants (ions majeurs dans ce cas) et le développement des peuplements aquatiques, souterrains ou non. Elle a permis aussi de différencier de façon claire les puits situés en aval de la mine, caractérisés par une forte charge minérale qui comme nous l'avons indiqué au chapitre consacré à la qualité des eaux, se traduit par des conductivités qui varient entre 1,77 et 18,42 mS.cm⁻¹ et par la réduction voire la disparition totale de la faune (P3, P4 et P5), alors que dans la même région les puits situés soit en amont (P1) soit très en aval mais loin de la source de pollution (P7), où l'eau est de meilleure qualité, le peuplement est présent y compris avec sa composante stygobie.

Ce peuplement subit donc une évolution longitudinale depuis l'amont vers l'aval hydrauliques. Plusieurs espèces sensibles disparaissant du secteur aval comme les Crustacés Péracarides stygobies, qui pour cette raison, semblent être de bons indicateurs de pollution minérale. Il ressort de cette étude que les résidus miniers, tel qu'ils sont stockés, représentent bien un risque potentiel sérieux pour l'environnement et que l'examen des variations régionales des peuplements stygobies permet de reconnaître les zones dont l'eau est fortement affectée par les rejets. Au Maroc, la totalité des parcs à résidus sont abandonnés sans aucune mesure de sécurité environnementale. Un minimum de gestion de ces déchets, s'avère donc urgent, ainsi que des recommandations de prudence en direction des usagers des puits dans les régions concernées.

3-3 Conclusion

La comparaison de la biodiversité de la faune aquatique des puits dans la plaine de Tafilalet avec celles d'autres régions du Maroc, telle que la plaine de Marrakech, montre de légères différences biocénétiques entre les peuplements des deux régions. Ainsi, nous avons noté la présence des espèces sœurs : les Amphipodes sont représentés, par *Metacrangonyx longicaudus* dans la plaine du Tafilalet alors qu'ils sont représentés par *Metacrangonyx spinicaudatus* dans la plaine de Marrakech. Pour les Crustacés Isopodes Stenasellides, nous avons remarqué également de légères différences morphologiques entre les populations nord-atlasiques et celles (sud-atlasiques) de la plaine de Tafilalet (et il en est probablement de même avec les Thermosbaenacea), ce qui nous conduit à envisager l'existence possible de deux espèces sœurs très proches, et à entamer une étude génétique comparée de ces populations. Cette étude est en cours de réalisation en collaboration avec l'Instituto per lo

Studio degli Ecosistemi CNR-ISE, de Florence (Italie), dans le cadre de la convention d'échange entre le CNR italien et le CNRST marocain.

Par ailleurs aussi bien dans le Tafilalet que dans la région de Marrakech, ou dans la zone minière de Drâa Sfer on remarque une diminution de la richesse spécifique ou l'absence totale de certains espèces en particulier des espèces stygobies en cas de pollution. Dans la zone de Draâ Sfer c'est l'effet de la contamination métallique de la nappe, alors qu'à Errachidia ou dans la zone d'El Azouzia (qui représente l'ancienne zone d'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech) c'est la pollution organique qui serait la responsable de la distribution actuelle des espèces et en particulier de la disparition de certaines espèces. Il apparaît donc que cette sensibilité des espèces stygobies vis-à-vis à la pollution présente un caractère général.

La différence de la composition faunistique des deux régions Tafilalet et Marrakech peut être liée à l'histoire géologique des deux régions, cet aspect sera plus largement développé à la dernière partie de ce mémoire. Ainsi des espèces soeurs sont à signaler. Quant à la faune épigée, qui est présente d'une manière, tantôt régulière tantôt accidentelle dans les eaux des nappes, elle est surtout liée à l'état de protection des stations étudiées et se prête moins à une analyse typologique en rapport avec la qualité de l'eau.

CORRÉLATION ENTRE LA BIODIVERSITÉ ET LA QUALITÉ DES EAUX

1- Introduction

L'ensemble des données physico-chimiques montre que les eaux souterraines de la région d'Errachidia et celles de la région de Marrakech, ainsi que celle de Draâ Sfar sont d'une façon assez générale très minéralisées, dures et légèrement alcalines. Les teneurs assez élevées en nitrites, nitrates et en ammonium caractérisent les stations situées près de la ville d'Errachidia comme celles la zone d'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech, traduisant ainsi un apport en matières organiques polluantes assez élevé. Les eaux de certains des puits étudiés sur le site de Draâ Sfer sont plus fortement minéralisées et présentent en particulier des teneurs en éléments métalliques très élevées.

La qualité de l'eau dans ces régions dépend de la nature de la roche mère, qui communique à la nappe phréatique une minéralisation assez élevée et croissante depuis l'amont vers l'aval hydraulique (lessivage des terrains géologiques). Les activités anthropiques telle que le déversement des eaux usées à ciel ouvert et la présence des fosses septiques ont un impact local sur la qualité de la nappe dans la ville d'Errachidia et à l'aval de cette ville.

L'analyse de la diversité du peuplement aquatique souterrain du Haouz (ville de Marrakech et zone de Draâ Sfer) et de celui d'Errachidia montre que ces peuplements semblent plus diversifiés en comparaison avec ceux des eaux souterraines des autres pays du Maghreb (PESCE, 1981). Ces peuplements sont aussi diversifiés que le peuplement de la France (FERREIRA, 2005), de l'Italie (PESCE, 1985) ou de l'Allemagne (JUBERTHIE et DECOU, 1994), pays d'Europe qui ont fait l'objet d'efforts de prospection importants. Au contraire la diversité relativement faible de la stygofaune connue des autres pays du Maghreb et du bassin méditerranéen résulte certainement pour une grande part du manque d'intérêt dont la stygofaune a bénéficié dans ces pays jusqu'à ce jour.

2- Haouz : le nord de ville de Marrakech et site minier de Draâ sfer

La comparaison des résultats des analyses récentes de l'eau provenant de la nappe de la ville de Marrakech avec ceux obtenus il y a une douzaine d'années par BOULANOUAR, (1995) puis par FAKHER EL ABIARI (1999) montre une légère amélioration de la qualité de l'eau, due probablement à la suppression de l'une des arrivées des eaux usées qui se répandaient dans cette zone, et peut-être aussi à l'assèchement de la lagune expérimentale d'eaux usées qui avait été installée dans le périmètre irrigué et qui n'est plus fonctionnelle. Concernant le peuplement animal, ce travail complète les travaux déjà réalisés sur les eaux souterraines du Maroc (BOUTIN, 1993 ; MESSOULI, 1994 ; YACOUBI-KHEBIZA, 1990). L'objectif étant, entre autre, de vérifier le devenir de la biodiversité aquatique souterraine dans la région de Marrakech après les aménagements réalisés dans la zone d'épandage des eaux usées de la ville. Cette étude a permis aussi de mettre en évidence l'impact des activités minières sur les biotopes aquatiques souterrains et sur la faune stygobie des deux régions.

L'analyse détaillée de la composition des peuplements d'invertébrés souterrains à l'intérieur et à l'extérieur des zones polluées, aussi bien au nord de Marrakech qu'au site de Draâ Sfer, a permis de mettre en évidence une modification de la biodiversité aquatique souterraine en relation avec la détérioration relative de la qualité physico-chimique de l'eau. Plusieurs groupes de taxons caractéristiques d'une eau de bonne qualité, notamment les Crustacés stygobies, disparaissent dans les stations dans les puis P2, P3, P4 et P5 dans le site de Draâ Sfer et les puits M2, M3, M4, M5 et M6 de Marrakech (Tableau 17), alors que ces taxons sont présents un peu plus loin dans les zones correspondantes et se rencontrent dans la même région, lorsque la pollution de l'eau n'est pas trop élevée. Ces modifications sont accompagnées par des variations des effectifs du peuplement, principalement dans les stations M2, M3, M4 et M6 de Marrakech et à la station P3 du Draâ Sfer.

La disparition d'un certain nombre d'espèces plus sensibles à la pollution dans les stations M2, M3, M4, M5 et M6 de la région de Marrakech est une modification qui semble être liée à l'impact direct des eaux usées riches en éléments solubles, organiques. Alors que la disparition de ces espèces au voisinage de la mine de Draâ Sfer résulte d'une pollution métallique. C'est le cas principalement, des Crustacés Amphipodes *Metacrangonyx spinicaudatus*, *Metacrangonyx paurosexualis* et *Maghrebidiella maroccana* qui présentent une distribution régionale plus large (BOUTIN, 1993) et qui sont sensibles aux teneurs élevées en ions ammonium, nitrates, nitrites et orthophosphates ainsi qu'aux pollutions minérales.

Tableau 16: Proposition de regroupement des puits, établi à partir de la composition faunistique et de la qualité de l'eau de ces puits, au nord de la ville de Marrakech.

Région d'étude	Groupe de stations	stations	Richesse		Espèces caractéristiques du groupe		Qualité de l'eau
			Stygobiologique	Totale	Faune stygobie	Faune stygoxène et stygphile	
Marrakech	GI	M3	1	3	<i>Heideilla andreae boulanouari</i> ;	Copépodes; Ephemereilla ignita	Mauvaise
		M4	1	6	<i>Guistia gofasi</i>	Tanyponidae	
	GII	M1	6	10	<i>Maghrebidiella maroccana</i> ;	Naididae sp.; Copépodes;	Bonne
		M9	5	13	<i>Marocolana delamarei</i> ; <i>Typhlocirolana haouzensis</i> ; <i>Typhlocirolana leptura</i> ; <i>Microcharon</i> sp.; <i>Monodella</i> <i>Monodella atlantomaroccana</i>	<i>Culex</i> sp. ; Tabanidae	
	GIII	M2	1	3	<i>Guistia gofasi</i> ;	Copépodes	Très bonne
		M5	0	3	<i>Heideilla andreae boulanouari</i> ;	Tanyponidae (larves)	
		M6	1	6	<i>Metacrangonyx spinicaudatus</i> ;	Culicidae (larves)	
		M7	4	10	<i>Metacrangonyx paurosexualis</i> ; <i>Maghrebidiella maroccana</i>	Naididae sp.	
		M8	4	9	<i>Marocolana delamarei</i> ;		
		M10	4	7	<i>Typhlocirolana haouzensis</i>		

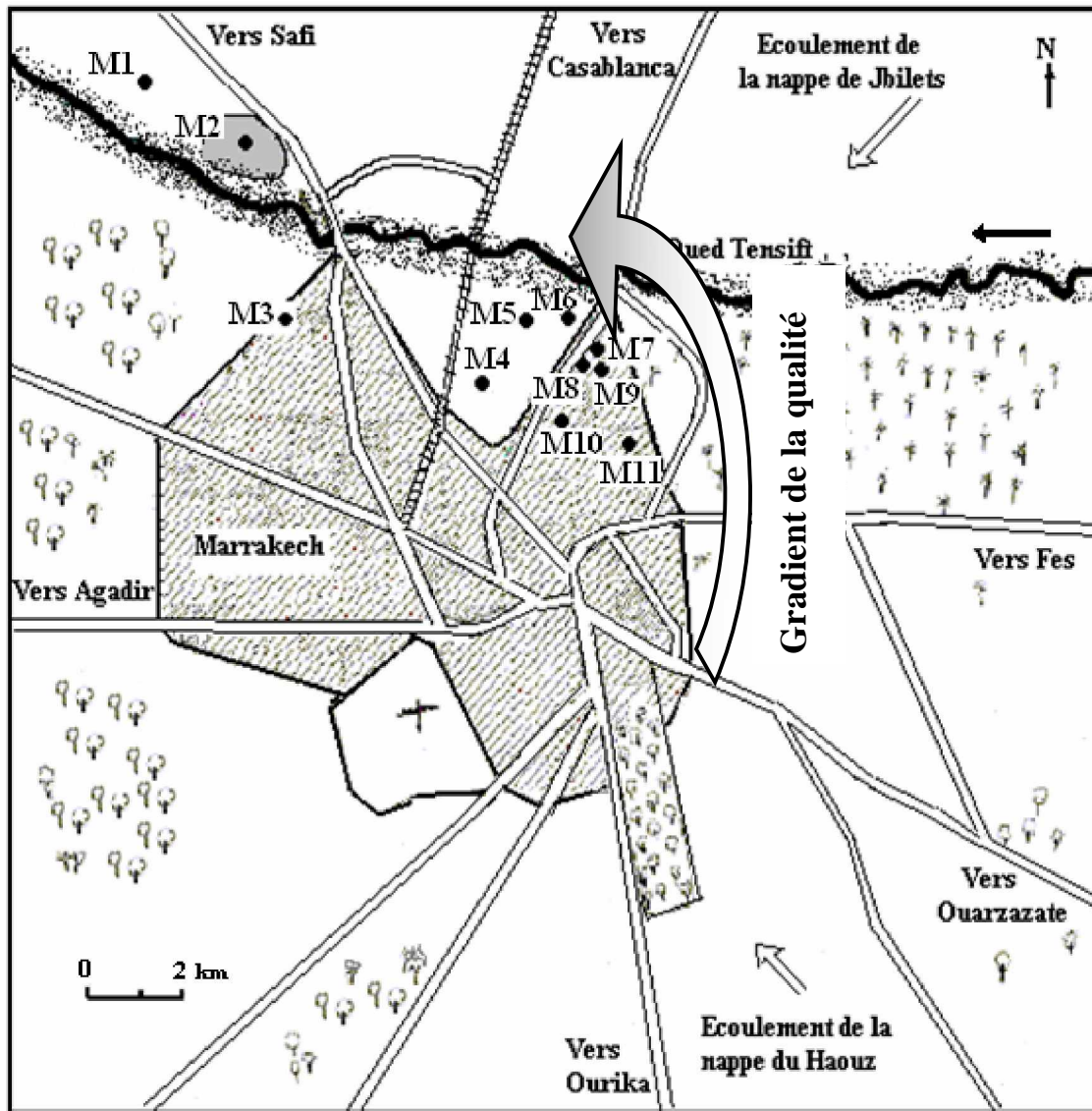


Figure 35 : Représentation schématique du gradient de pollution des eaux souterraines de la nappe de Marrakech, révélé tant par l'examen de la faune des puits que par les analyses physico-chimiques de l'eau.

Leur absence dans les stations situées dans la zone d'épandage, où la qualité de l'eau est dégradée n'a probablement pas d'autre cause. Les teneurs élevées en ions ammonium et en nitrates expliquent probablement aussi l'absence dans ce secteur des Crustacés Isopodes *Typhlocirolana*. Ces observations sont confirmées par l'analyse de la distribution des Crustacés à l'échelle du Maroc, où ce genre est représenté par de nombreuses espèces, depuis le domaine rifain jusqu'aux régions sahariennes, en passant par la Meseta côtière et l'Atlas.

L'examen comparatif des listes faunistiques nous permet de mettre en évidence les modifications de la composition faunistique correspondant à la détérioration relative de la qualité physico-chimique de l'eau. Plusieurs groupes de taxons caractéristiques d'une eau de bonne qualité disparaissent. Ces modifications induites par les lixiviats des rejets miniers traduisent une certaine sensibilité de la faune souterraine, principalement les crustacés souterrains Amphipodes et Isopodes et confirment les observations déjà faites, au Maroc (JUBERTHIE et DECU, 1994 ; BOULANOUAR, 1995), sur le milieu interstitiel des oueds du Haut-Atlas et sur les puits, ainsi que celles réalisées sur des cours d'eau européens ou nord américains (JACQUES *et al.*, 1986 ; MALARD *et al.*, 1997 ; WISSMAR *et al.*, 1997).

Enfin l'espèce nouvelle *Microcharon* sp. (Isopode, Microparasellidae) n'a été récoltée que dans la station M1 située dans la nappe des Jbilet, dont l'eau est de bonne qualité. Le fait que cette espèce ait été récoltée pour la première fois à l'occasion de cette étude, alors que des prospections nombreuses avaient été faites depuis 1980 tout autour de Marrakech, tient certainement au fait que, pour l'essentiel, les recherches effectuées près de Marrakech jusque là avaient été faites sur la rive gauche de l'Oued Tensift, c'est-à-dire au sud de cette rivière, donc dans la nappe phréatique du Haouz, alors que la station M1, qui a livré récemment le nouveau *Microcharon*, se trouve sur la rive droite de l'Oued Tensift est en conséquence alimentée par les nappes qui s'écoulent depuis les collines des Jbilet.

À Marrakech, ce sont aussi les puits les mieux protégés par des margelles (M1, M7, M8, M9 et M10) qui présentent la richesse stygobiologique la plus élevée. Ce sont des puits situés à l'extérieur de la zone d'épandage des eaux usées, dont les eaux sont relativement de bonne qualité physico-chimique. Ceci peut peut-être exprimer un gradient de la qualité de l'eau suivi par la disparition progressive de quelques taxons. En revanche les autres puits (M4, M5 et M6) situés dans la zone d'épandage ou dans le périmètre utilisé depuis quelques années pour la décharge publique des ordures ménagères (M2), mal protégés et exposés à diverses sources de pollution de surface, apparaissent particulièrement pauvres en faune stygobie (Tabl.16).

Tableau 17: Proposition de regroupements des puits établis à partir de la composition faunistique et de la qualité des eaux des puits situés sur le site miniers Daâ Sfer au nord-ouest de Marrakech.

Région d'étude	Groupe de stations	stations	Richesse		Espèces caractéristiques du groupe		Qualité de l'eau	
			Stygiobiologique	Totale	Faune stygobie	Faune stygoxène et stygphile		
Draâ Sfer	Groupe 1	P6	5	8	<i>Guistia gofasi</i> <i>Heideilla andreae boulanouari</i> <i>Metacrangonyx spinicaudatus</i> <i>Metacrangonyx paurosexualis</i> <i>Monodella atlantomaroccana</i> ;	Culicinae Tanypodinae	Très bonne	
		Groupe 2	P1	6	11	<i>Metacrangonyx paurosexualis</i>	Copépodes cyclopoïdes ;	Bonne
			P7	3	7	<i>Metacrangonyx spinicaudatus</i> <i>Monodella atlantomaroccana</i>	Copépodes harpacticoides ; <i>Physa acuta</i>	
		Groupe 3	P2	0	5	Absence totale	Chironomini	Très mauvaise
			P3	0	2		Culicinae	
	P4		0	2	Tanypodinae			
	P5		0	0	<i>Trichodrilus</i> sp.2			

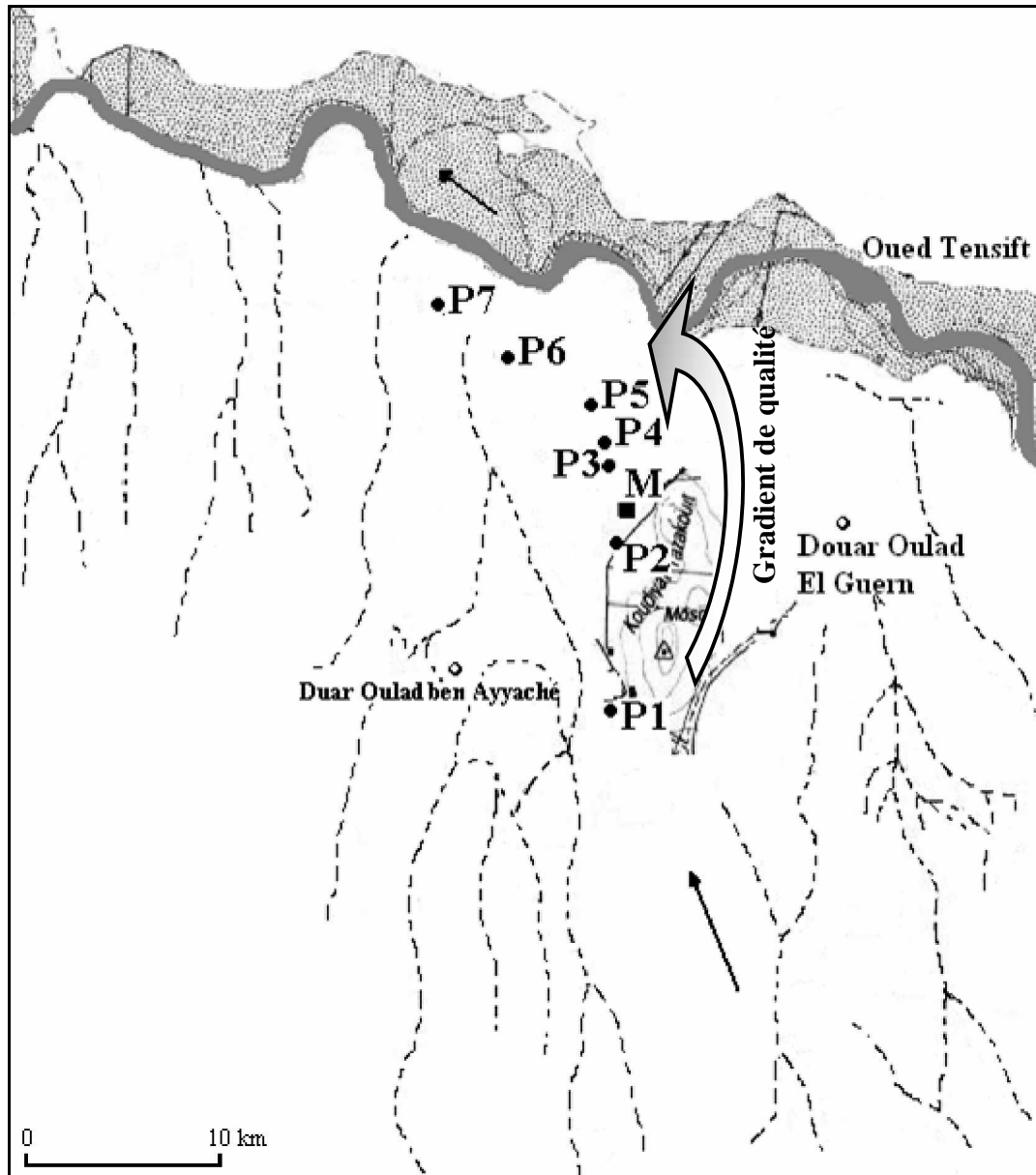


Figure 36: Gradient décroissant de la qualité des eaux souterraines (= gradient de pollution) sur le site de Draâ Sfer. M = Emplacement de la mine.

3- Errachidia

Dans la région d'Errachidia, les rejets domestiques, chargés en matières organiques, entraînent aussi une dégradation de la qualité de l'eau et limitent ainsi l'installation d'un peuplement aquatique souterrain diversifié. La présence des espèces souterraines se limite aux puits dont la qualité de l'eau est relativement bonne. Le puits R9, situés dans le site de Zouala, présente la richesse faunistique la plus élevée. Une espèce inédite, *Microcharon oubrahimae* (AÏT BOUGHROUS *et al.*, 2007), y a d'ailleurs été capturée, de même que plusieurs espèces d'Amphipodes, d'Isopodes et de Gastéropodes (Tableau 8).

Dans les puits R3, R4, R5 et R6 où la richesse stygobiologique est absente, les teneurs en nitrates, nitrites, ammonium et en orthophosphates sont relativement élevées (Voir annexe n°3), en relation avec les infiltrations des eaux usées de la ville d'Errachidia. Ces observations confirment à nouveau la sensibilité de la faune stygobie vis-à-vis des teneurs élevées en éléments organiques. Les Isopodes Stenasellides sont représentés dans nos récoltes par *Magniezia gardei*, qui n'avait jamais été retrouvée depuis sa description il y a bientôt 30 ans (MAGNIEZ, 1978), dans la station type de la grotte Kef Aziza, près de Boudnib. Cette espèce a été capturée récemment dans R2 à quelques kilomètres au nord de la ville d'Errachidia puis dans les eaux du puits R9 à 40 km au sud d'Errachidia, creusés dans les alluvions meubles. Nous avons donc maintenant la preuve que cette espèce, bien que relativement robuste, n'est pas nécessairement inféodée aux habitats cavernicoles karstiques.

Dans la région d'Errachidia nos observations confirment celles faites à Marrakech, à propos de la richesse stygobiologique qui est relativement élevée dans les puits bien protégés et situés en dehors des zones affectées par les activités humaines. Plus on s'éloigne des sources de pollution (eaux usées et fosses septiques essentiellement) plus l'abondance relative et la biodiversité souterraine augmente. Cette corrélation, qui a été déjà observée dans d'autres régions du Maroc (IDBENNACER, 1990 ; FAKHER EL ABIARI, 1999 ; BOULAL, 2002), paraît présenter un caractère général, puisqu'elle conduit aux mêmes conclusions pour les eaux souterraines du Tafilalet.

On peut donc distinguer des espèces très sensibles à la pollution telles que les Amphipodes *Metacrangonyx* ou encore sensibles mais moins pour les Isopodes *Typhlocirolana* (FAKHER EL ABIARI *et al.*, 1998). Cette sensibilité est moins marquée chez certains groupes de Crustacés stygobies tels que les Thermosbaenacés (*Monodella*). À l'inverse, la faune stygophile et stygoxène d'origine épigée qui peuple les eaux souterraines est souvent

indicatrice d'une eau de mauvaise qualité, c'est le cas de nombreux Ostracodes, et Copépodes, et des larves de Diptères Chironomidae et Culicidae, généralement rencontrés dans les eaux riches en matière organique et pauvre en oxygène. Cela s'observe particulièrement dans les puits non protégés de la zone d'épandage des eaux usées de la ville d'Errachidia.

Par comparaison de la qualité des eaux et de la biodiversité aquatique souterraine des stations considérées au cours de notre étude, il apparaît que les puits situés à l'amont hydraulique de la ville d'Errachidia présentent la diversité biologique la plus élevée et des eaux de bonne qualité. Cette qualité se dégrade peu à peu dans les puits creusés dans la ville d'Errachidia ainsi que dans les puits situés dans l'aval immédiat de la ville. Cela peut être exprimé par un gradient décroissant de la minéralisation et globalement de la qualité des eaux aux abords de la ville (tableau 18 et figure 37). Toutefois la qualité de l'eau se rétablit progressivement vers l'aval, dans la nappe alluviale superficielle de la vallée (ce qui exclut le forage de la station R11).

Tableau 18: Groupements de puits extraits à partir de la composition faunistique et de la qualité des eaux des stations étudiées dans la ville d'Errachidia et ses environs.

Région d'étude	Groupe de stations	stations	Richesse		Espèces caractéristiques du groupe		Qualité de l'eau
			Stygobiologique	Totale	Faune stygobie	Faune stygoxène et stygophile	
Errachidia	G1	R11	0	0	Absence totale	Absence totale	Très mauvaise
	G2	R4	0	0	Absence totale	Ephemerella ignita	Très mauvaise
		R5	0	5		Chironomidae (larves)	
	G3	S2	1	7	<i>Salentinella</i> sp. ; <i>Microcerberus remyi</i> ; <i>Typhlocirolana</i> cf. <i>haouzensis</i> ; <i>Guistia meskiensis</i>	Oligochètes ind. ; <i>Physa acuta</i> ; Copépodes ; <i>Caenis</i>	Bonne
		S3	6	11			
	G4	S1	4	10	<i>Typhlocirolana</i> cf. <i>haouzensis</i> ; <i>Metacrnngonyx longicaudatus</i> ; <i>Guistia meskiensis</i> ; <i>Monodella atlantomaroccana</i>	Ostracodes ind. ; Oligochètes ind. ; <i>Physa acuta</i> ; Copépodes ; Chironomidae (larves)	Très bonne
		R1	5	14			
		R10	0	2			
	G5	R2	4	8	<i>T. cf. haouzensis</i> ; <i>Magnezia gardei</i> ; <i>M. longicaudatus</i> ; <i>Guistia</i> sp.; <i>Monodella</i> cf. <i>atlantomaroccana</i> ; <i>Microcharon oubrahimae</i> ; <i>M. Goulmimensis</i> ; <i>Salentinella</i> sp.	Ostracodes ind. Oligochètes ind. Chironomidae Psychodidae (larves)	Moyenne
		R3	0	3			
R6		0	2				
R7		0	3				
R8		0	7				
R9		9	16				

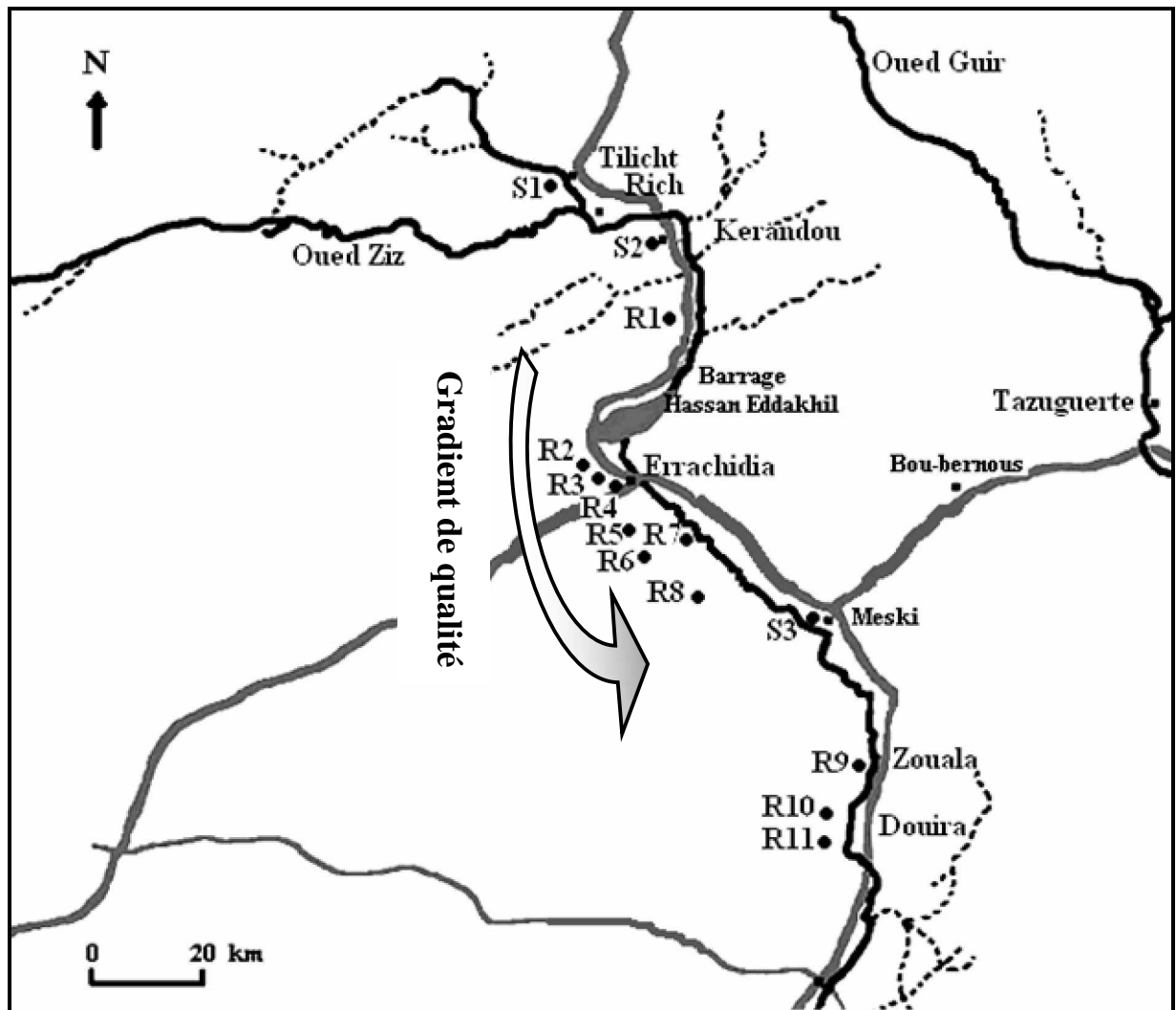


Figure 37: Gradient (décroissant puis croissant) de la qualité des eaux souterraines dans la vallée de l'Oued Ziz, aux environs de la ville d'Errachidia.

4- Discussion et conclusion

À l'échelle du Maroc, le peuplement stygobie des deux régions étudiées est relativement diversifié, au moins dans les secteurs situés en dehors des zones soumises à l'impact de l'activité humaine. Et cette variation de la richesse spécifique est comparable à celle des autres régions du Maroc (IDBENNACER, 1990 ; BOULAL, 2002).

Plusieurs facteurs écologiques expliquent cette richesse, notamment la qualité de l'eau (PESCE *et al.*, 1981 ; AJAKANE, 1988 ; JUBERTHIE et DECU, 1994 ; BOULANOUAR, 1995). L'analyse conjointe de la biodiversité et de la qualité de l'eau montre que plusieurs espèces stygobies de Crustacés Péracarides exigent une eau de bonne qualité, dont les teneurs en nitrites, nitrates, ammonium et orthophosphates sont faibles. Des expérimentations réalisées au laboratoire sur les Crustacés Péracarides stygobies confirment ces constatations (BOULANOUAR, 1995 ; PLENET, 1993). Des teneurs élevées en nitrites paraissent être limitantes pour les Amphipodes *Metacrangonyx spinicaudatus*, *Metacrangonyx paurosexualis* et l'Isopode *Typhlocirolana haouzensis* (FAKHER EL ABIARI *et al.*, 1998).

Il ressort que la qualité de l'eau des puits constitue certainement un facteur déterminant de la répartition des espèces phréatiques, bien que cette caractéristique importante des biotopes ne soit probablement pas la seule qui permette d'expliquer les répartitions observées. Les descripteurs biologiques sont de bons indicateurs de la qualité d'un milieu aquatique souterrain. Leur intégration dans l'évaluation de la qualité de l'eau serait un outil supplémentaire pour apprécier l'état de l'écosystème, afin d'assurer une surveillance et une protection de l'environnement aquatique souterrain.

QUALITÉ BACTÉRIOLOGIQUE DES EAUX SOUTERRAINES

Introduction

Les coliformes fécaux et les streptocoques constituent des indicateurs de pollution d'origine fécale. Leur présence peut signaler des rejets ponctuels d'eaux usées non traitées ou, dans les zones agricoles, des apports d'origine diffuse liés à l'épandage ou au mauvais stockage des fumiers et des lisiers. Ils sont utilisés pour définir des critères de qualité d'ordre sanitaire (ALLEN et GELDREICH, 1975 ; LECLERC *et al.*, 1981).

Les coliformes et les streptocoques fécaux forment le groupe de bactéries le plus fréquemment utilisé pour l'examen bactériologique de l'eau (POOLE et HOBERTSON, 1979). Ils sont recherchés dans l'eau comme témoins de contamination fécale (GAUJOUS, 1995)

Enfin la présence des *vibrios* indique un état critique de la pollution microbienne et caractérise les eaux qui présentent un risque potentiel pour la santé humaine.

A/ À Marrakech

Les résultats des analyses bactériologiques faites sur l'eau de quelques puits de la nappe de Marrakech sont présentés sur la figure 38.

Les valeurs moyennes des concentrations en coliformes et en streptocoques montrent que les eaux de ces puits sont significativement contaminées par des germes pathogènes. Les puits creusés dans la zone d'épandage et celui de la nouvelle décharge publique présentent les eaux les plus contaminées. Le nombre moyen de colonies de coliformes fécaux varie de 107 UFC) 100 ml en M8 à 2 775 UFC)100 ml en M3 pour les CF, de 300 M8 à 3 000 UFC)100 ml en M4. Enfin la concentration des Streptocoques vont de 12 en M8 à 600 UFC)100 mL en M1.

L'examen du rapport CF) SF, qui est généralement considéré comme un bon indicateur de l'origine de la pollution, montre que dans tous les puits prospectés la contamination des eaux est d'origine humaine puisque ce rapport est toujours supérieur à 1.

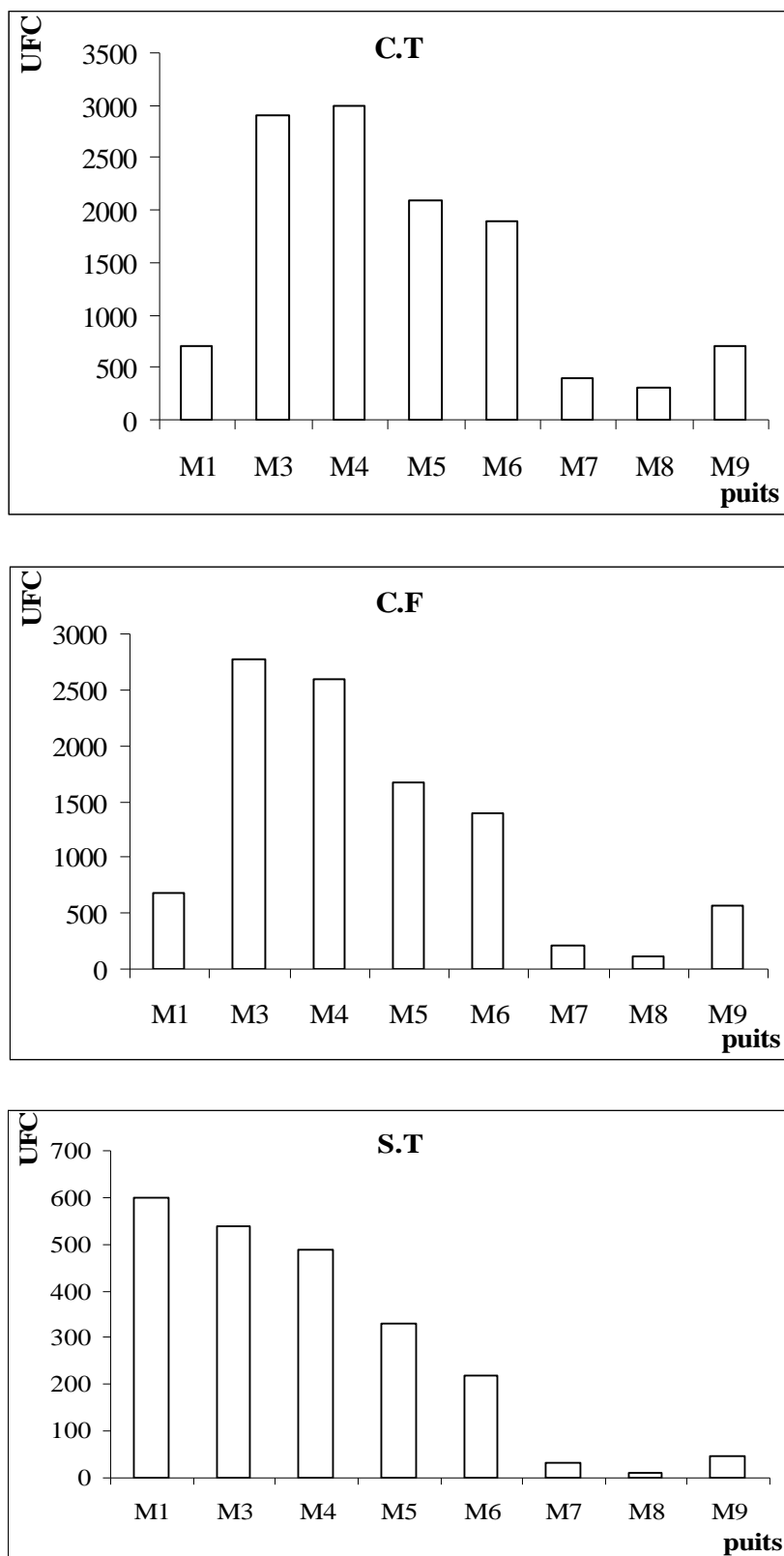


Figure 38 : Bactériologie de l'eau de quelques puits de Marrakech en ordonnées le nombre d'UFC) 100 mL. **C.T.:** Coliformes "totaux"; **C.F.** Coliformes fécaux; **S.T.:** Streptocoques totaux.

L'examen bactériologique des eaux de la nappe de Marrakech, montre l'existence de concentrations très élevées de CT, CF et SF dans les puits M3, M4, M5 et M6 et à un moindre degré dans les puits M1, M7, M8 et M9, ce qui indique une contamination de ces puits à partir des ordures ménagères, des eaux usées de la ville de Marrakech ou encore à partir des infiltrations au niveau de la décharge publique. Cette contamination locale peut se répandre et affecter l'ensemble de la nappe du Haouz qui se trouve à des profondeurs assez faibles dans la région. L'utilisation, sans traitement préalable de cette eau, pour l'irrigation ou pour l'alimentation, présente donc localement un risque sanitaire majeur.

B/ Bactériologie des eaux souterraines d'Errachidia

Pendant notre étude dans la région du Tafilalet, nous avons procédé à l'examen de la qualité microbienne des eaux souterraines dans les puits de la ville d'Errachidia. Pour cela nous avons focalisé notre étude sur les puits des établissements de bains de plusieurs quartiers de la ville (Fig. 39). Le choix des stations a donc été fait en fonction de l'utilisation fréquente de leurs eaux.

Les trois principaux groupes de germes indicateurs de la qualité des eaux ont été cherchés dans l'eau des puits étudiés. Il s'agit d' *Escherichia coli*, Streptocoques fécaux et Coliformes fécaux.

La lecture des résultats de cette étude montre que la majorité des puits présentent des eaux plus ou moins contaminées. Seule les quatre puits, Assafa, Sejelmassa, Tassin et Sidi Ammi présentent des eaux de qualité bactériologique relativement bonne. Les dénombrements bactériens montrent que la concentration en germes est très variable d'un puits à l'autre. La concentration des Coliformes fécaux varie entre 900 UFC)100 mL, dans l'eau du puits du bain El Boustin et 0 UFC)100 mL dans les eaux des puits Aïn El Atti, El Mohit, Safa, Sejelmassa, Sidi Ammi et Tassin.

Les concentrations des *E. Coli* varient entre 0 UFC)100 ml dans les eaux des puits Tassin, Sidi Ammi, Sejelmassa, Safa, El Mohit, la Victoire et Ain El Atti Alors que les concentrations des Streptocoques fécaux sont nulles dans les eaux des puits des bains la liberté, El Mohit, Safa, Sejelmassa, Sidi Ammi, Tassin et Touchka, ainsi que dans l'eau des puits du complexe touristique et celui du Marché, elles sont au contraire dénombrables dans 8 puits (figure 39 bis C) et atteignent même des valeurs élevées: 150 et 200 UFC)100 mL dans les puits Albostan et Elbassatin. Il apparaît donc que les teneurs en germes indicateurs de contamination fécale dépassent largement les normes fixées par l'OMS.

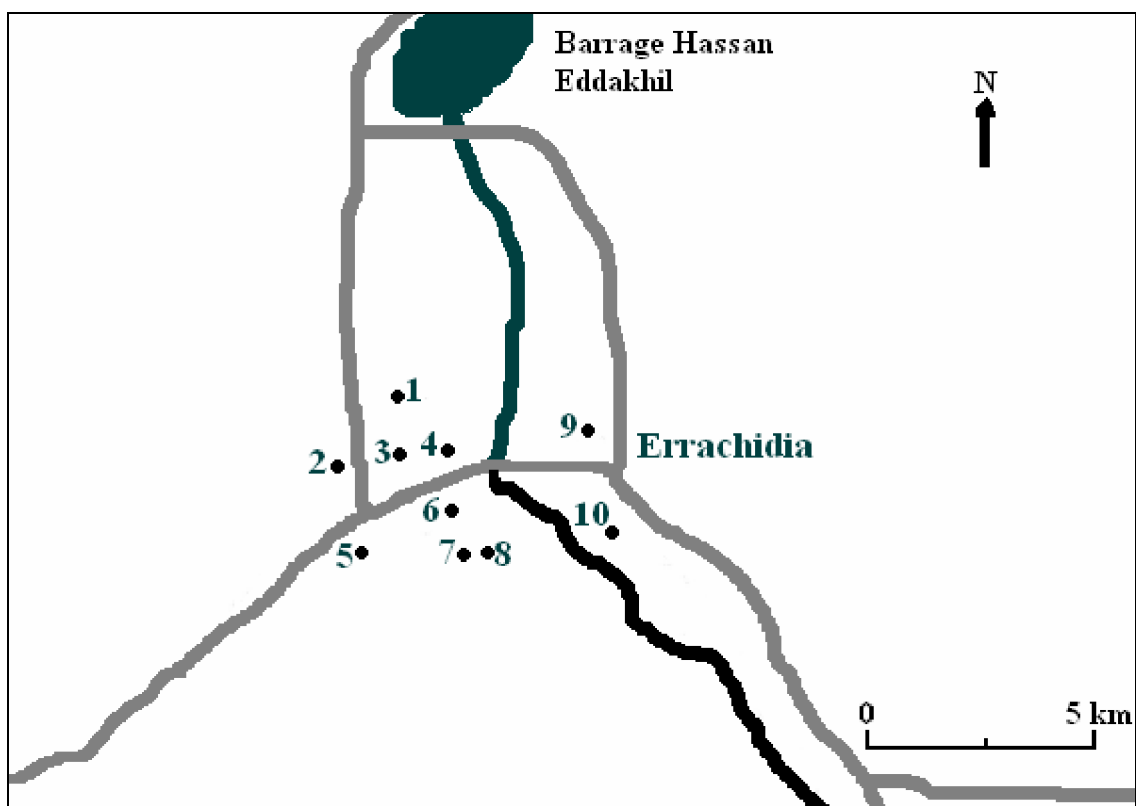


Figure 39 : Situation géographique des puits de la ville d'Errachidia dont la qualité bactériologiques a été étudiée au cours de cette étude.

- 1) puits Ain El Atti
- 2) puits Liberté
- 3) puits Parc
- 4) puits Abattoir
- 5) puits Alboustan

- 6) puits Bassatin
- 7) puits Marché
- 8) puits Safa
- 9) puits Sidi Ammi
- 10) puits Touchka

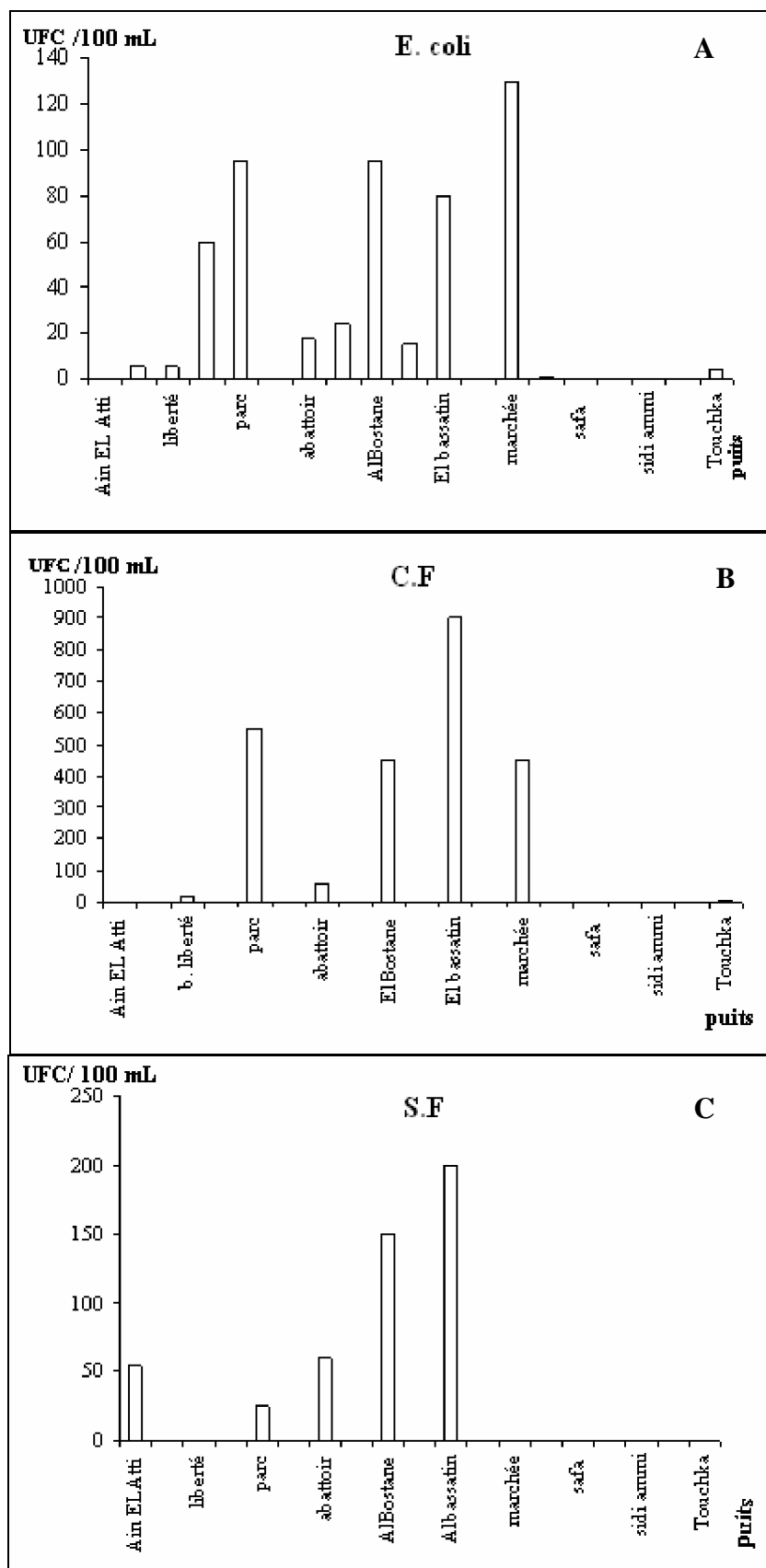


Figure 39 bis : Bactériologie de l'eau prélevée dans 19 puits de la ville d'Errachidia. A, Dénombrement des *Escherichia coli* par 100 mL d'eau; B, Nombre de Coliformes fécaux par 100 mL d'eau et C, nombre de Streptocoques fécaux par 100 mL d'eau.

C) Discussion

Les taux de coliformes fécaux et de streptocoques fécaux rencontrés dépassent largement les normes de potabilités des eaux fixées par l’OMS dans l’eau de la majorité des puits étudiés. Ces points d’eau sont donc l’objet d’une contamination fécale essentiellement d’origine humaine étant donnée que le rapport CF/SF est supérieur à 1 dans la majorité des cas. Les eaux usées brutes utilisées pour l’irrigation pendant des dizaines d’années sont les responsables de la contamination de la nappe dans la zone d’El Azouzia à Marrakech, sur l’emplacement de l’ancienne zone d’épandage des eaux usées de la ville de Marrakech. Alors qu’à Errachidia la contamination de l’eau des puits est surtout due au mauvais état du réseau d’assainissement dans la ville. Ainsi que d’une contamination probable de la nappe à partir des eaux vannes provenant des fosses septiques et des puits perdus qui sont très nombreux dans plusieurs quartiers de la ville tels que Elmouhaite et Taghga El Kdimia.

Dans les deux cas, la contamination des nappes suite à l’infiltration des eaux usées est favorisée principalement par la faible épaisseur de la zone protectrice (sol et zone non saturée) (LYAKHLOUFI *et al.*, 1999), qui est généralement inférieure à 8 m dans la région de Marrakech et à 12 m dans les environs de la ville d’Errachidia.

D’autres facteurs du milieu physique peuvent favoriser la détérioration des eaux des nappes, c’est le cas de la texture grossière des sols, de la nature lithologique de la zone non saturée, de la topographie plate et enfin de la perméabilité des aquifères et de leur recouvrement (LYAKHLOUFI *et al.*, 1997).

Cependant, étant donné le pouvoir adsorbant du sol sur les bactéries, démontrés par plusieurs auteurs (SCHMITT *et al.*, 1991; NOLA *et al.*, 2004), l’abondance exceptionnelle de ces germes dans les eaux des puits étudiés laisse soupçonner qu’une bonne part de la détérioration de la qualité bactériologique de l’eau pourrait être due également à une pollution locale ponctuelle ayant sa source en surface, au niveau même du points d’eau ou à proximité.

Conclusion

Les analyses bactériologiques effectuées sur les eaux souterraines des deux villes, Marrakech et Errachidia, montrent que ces eaux sont généralement contaminées. Les fortes charges bactériennes reflètent la contamination de ces puits à partir des ordures ménagères et de l'infiltration des eaux usées dans la zone nord de la ville de Marrakech. L'infiltration des eaux usées de la ville d'Errachidia à partir du réseau d'assainissement, déjà ancien, ou encore à partir des fosses septiques et des puits perdus constitue certainement la cause principale de la contamination de l'eau des puits dans les deux régions.

Cette contamination locale peut être diffuse pour les nappes étudiées dans les deux régions. Aussi l'utilisation de ces eaux, sans traitement préalable, pour l'irrigation et plus encore pour l'alimentation présente un risque sanitaire majeur.

Il est apparu que la diversité de la faune aquatique des puits reflète surtout la qualité physicochimique des eaux souterraines. Aussi, chaque étude de la qualité des eaux souterraines basée sur la faune peut être complétée utilement par une évaluation d'ordre bactériologique. La présence d'une faune, parfois riche et diversifiée dans l'eau de certains puits qui présentent des charges assez élevées en germes pathogènes confirment ces conclusions.

RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DE LA FAUNE STYGOBIE ET CORRÉLATION TRANSATLASIQUE

Introduction : origine de la faune stygobie

L'origine marine de la totalité des organismes vivants qui peuplent les continents a été reconnue depuis fort longtemps. Par la suite, de nombreux stygobiologistes ont envisagé une colonisation des eaux souterraines continentales par les organismes marins. Ainsi, plusieurs modèles ont été élaborés pour rendre compte des mécanismes relativement complexes des changements du milieu et de l'évolution corrélative des animaux concernés, à savoir : le « Zonation Model » d'ILIFFE (1986), le « Regression Model » de STOCK (1977), le « Modèle de la colonisation active » de ROUCH et DANIELOPL (1987) et le « Modèle Biphase » de BOUTIN et COINEAU (1990), et de NOTEMBOOM (1991) et de COINEAU et BOUTIN (1991).

Le « Modèle Biphase » proposé pour expliquer la répartition géographique actuelle des limnostygobiontes, notamment celle des Crustacés Pércarides du Maroc, a été adopté par plusieurs auteurs. Ainsi, comme le nom du Modèle l'indique, la colonisation du milieu souterrain par la faune peut s'expliquer, selon BOUTIN et COINEAU (1990) par deux voies de colonisation (figure 40), et à chaque fois en deux étapes successives.

* La première voie, par les eaux de surface, les organismes passent par les fleuves, les rivières ou les lacs et parfois par l'eau souterraine des grottes continentales qui ont d'abord été colonisés dans un premier temps. Le passage dans les biotopes interstitiels des nappes phréatiques, ou des eaux souterraines en général, est alors un phénomène secondaire qui s'est produit postérieurement à la dispersion active des animaux dans les eaux douces de surface. Dans cette voie, on peut distinguer une dispersion horizontale puis ensuite une dispersion verticale. Le résultat c'est une catégorie d'organismes qui sont donc des stygobiontes limnicoïdes (qui ont eu, avant de devenir souterrains, des ancêtres ayant vécu dans les eaux douces de surface).

*La seconde voie de colonisation des biotopes diffère assez fondamentalement de la précédente. En effet, les organismes stygobiontes dulçaquicoles d'origine marine ont subi en premier l'évolution adaptative nécessaire à la transition verticale (passage vers la vie interstitielle ou fouisseuse). La transition horizontale s'est réalisée ensuite, dans un second temps, et chaque fois que l'on rencontre des organismes phréatobies d'origine marine à de

grandes distances des rivages marines; ce phénomène peut être actif ou passif (BOUTIN, 1993a). Ce sont des Limnostygobiontes thalassoïdes (espèces vivant également dans les eaux douces souterraines mais dérivés d'ancêtres marins déjà stygobiontes). Au cours de leur histoire évolutive, la dispersion verticale (qui a permis le peuplement des sédiments marins ou des grottes marines) a précédé la dispersion horizontale (le plus souvent passive lorsque la mer s'est retirée) qui a permis le peuplement des eaux souterraines douces des régions continentales. On comprend que ces limnostygobiontes thalassoïdes puissent être utilisés comme des indicateurs des changements paléogéographiques.

Les études les plus récentes montrent que la diversité et même parfois la présence de la faune aquatique souterraine varie en fonction de la qualité des eaux (LAFONT *et al.*, 1992 ; EL ADNANI *et al.*, 2007 ; AÏT BOUGHROUS *et al.*, 2007), les conditions du milieu (GIBERT et DEHARVENG, 2002) ou encore les sources de nourriture disponible. Mais, tous ces facteurs cités, et d'autres (HAHN, 2006) ne peuvent avoir effet sur la faune stygobie que si les conditions géologiques de la région permettent l'installation de cette dernière.

Dans la partie suivante, nous allons présenter un aperçu sur la répartition géographique des espèces stygobies dans les régions de Marrakech et du Tafilalet, et par la suite nous allons tenter d'expliquer cette répartition en se basant sur les données géologiques disponibles pour les deux régions.

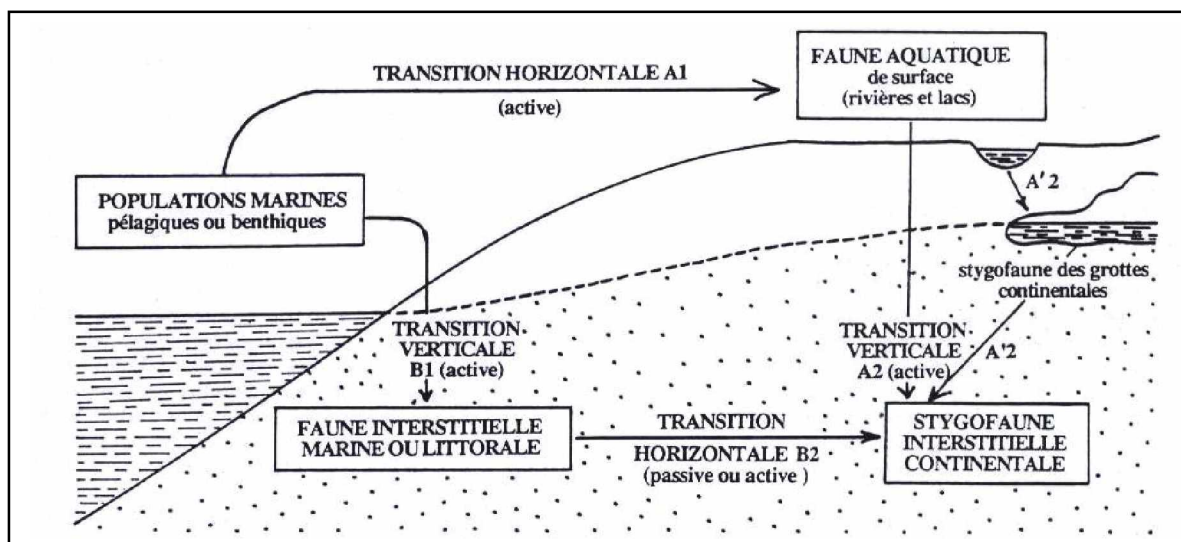


Figure 40 : Les deux voies de colonisation empruntées par les ancêtres des micro-organismes des nappes phréatiques continentales: A, transition par les eaux douces de surface; B, transition par les milieux interstitiels littoraux (d'après BOUTIN et COINEAU, 1990).

I- Répartition géographique de quelques espèces

A- Les Mollusques Gastéropodes

Bien que les Gastéropodes constituent une classe très bien représentée dans les eaux souterraines marocaines, leur biogéographie historique est encore assez peu connue. Les études antérieures ont essentiellement porté sur l'écologie de certain Hydrobiidae (BOULAL, 1988), sur leur systématique et leur distribution géographique dans le Maroc (GHAMIZI, 1998 ; GHAMIZI *et al.*, 1999). Cependant il ne fait aucun doute que l'étude de la biogéographie historique de ce groupe de petits Gastéropodes serait certainement d'un grand intérêt, comparable à celle des Crustacés Péracarides du Maroc. Ainsi actuellement on dispose d'une étude détaillée et synthétique traitant des Gastéropodes du Maroc (GHAMIZI, 1998), elle devrait par la suite être actualisée et complétée.

Les Gastéropodes signalés dans les eaux souterraines marocaines renferment essentiellement des Planorbidae, des Physidae et des Hydrobiidés. Ces deux derniers, constituant les familles les plus dominantes. Toutefois seule la famille des Hydrobiidae renferme des taxons véritablement stygobies.

Au cours de notre étude, toutes les espèces stygobies récoltées sont donc des Hydrobiidae, accompagnées parfois par des espèces épigées.

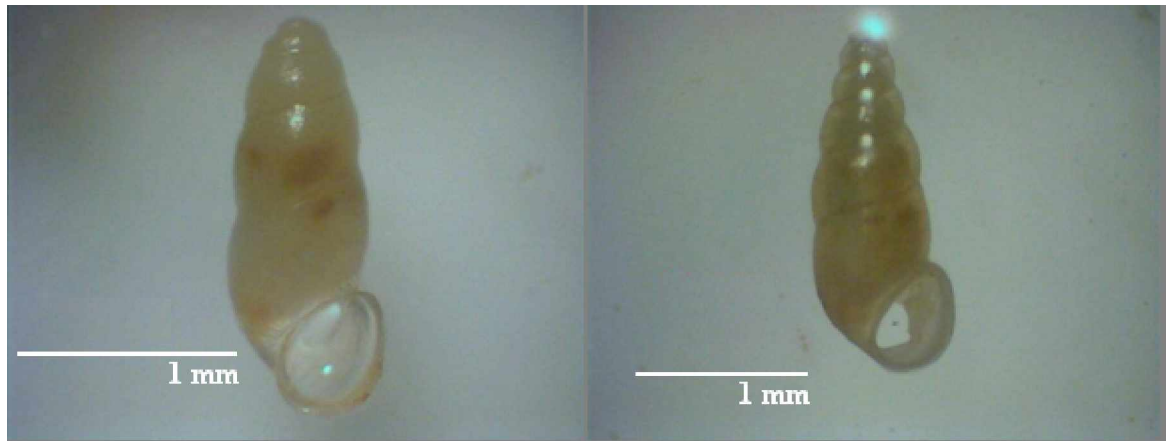
Selon GHAMIZI (1998) les Hydrobiidae ont des représentants qui vivent encore dans les zones littorales, et nous devons retenir l'hypothèse, émise par cet auteur, selon laquelle cette famille aurait une origine marine. En effet, les stygobiologistes considèrent actuellement que de nombreuses espèces dulçaquicoles souterraines, qui se rencontrent sur les continents, parfois à de grandes distances des rivages marins, dérivent cependant d'organismes ancestraux marins. Elles ne font que rappeler un paradigme très ancien selon lequel tous les organismes vivants qui peuplent les continents ont, si on remonte suffisamment dans le passé, une origine marine.

Comme pour les Crustacés stygobies, la plaine de Tafilalet et celle du Haouz présentent deux ensembles d'espèces « sœurs » de Gastéropodes souterrains qui figurent dans nos récoltes. Ainsi, cette classe est représentée par *Guistia gofasi* et *Heideella andreae boulanouari* dans les eaux des puits de Marrakech alors qu'elle est représentée par *Heideella cf. valai*, *Heideella cf. andreae* et *Guistia meskiensis* dans la plaine de Tafilalet. Cette population est accompagnée, dans les deux plaines, par *Physa acuta* et un Limacidae sp. qui sont d'origine épigée et en conséquence plus largement distribués. Nous connaissons aussi la présence

d'autres espèces dans le Haouz et le Haut-Atlas de Marrakech (YACOUBI-KHEBIZA, 1996 ; GHAMIZI, 1998).

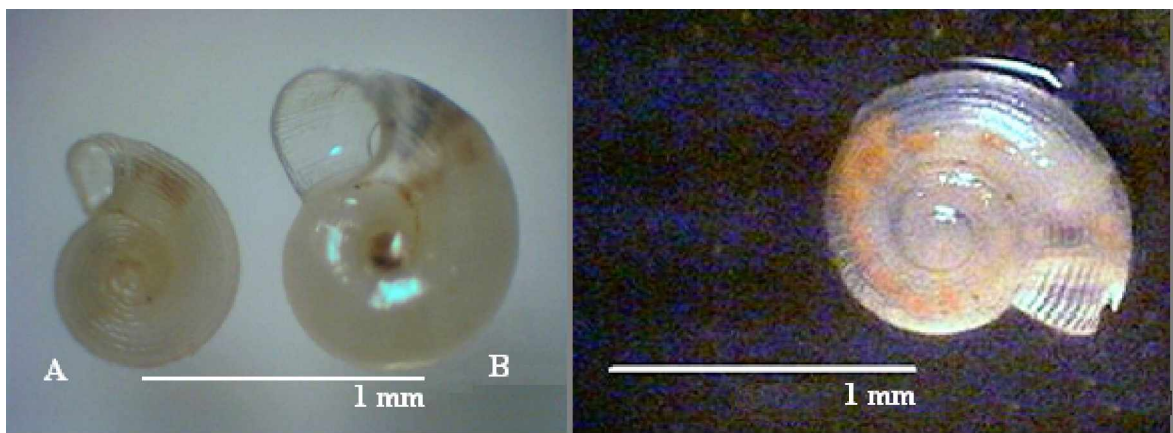
GHAMIZI (comm. pers.) estime que les espèces appartenant au genre *Guistia* provenant de la plaine du Tafilalet sont assez différentes de celle de Marrakech et mériteront par la suite une révision de leur position systématique. Ces espèces présentent des particularités frappantes de la forme des coquilles et la présence d'une carène chez certaines formes et des stries chez d'autres ; elles pourraient contenir, pour ces raisons, au minimum des espèces nouvelles, voire un genre nouveau, pour la science.

La présence d'espèces sœurs de part et d'autre de la chaîne atlasique suggère une spéciation par vicariance suite au soulèvement du Haut Atlas



Heideella cf. valai

Heideella andria



Guistia n. sp. (Zouala) (A)
Guistia meskiensis (B).

Guistia meskiensis sans carène.



Physa acuta

Figure 41 : Photos des différentes formes de Gastéropodes récoltés dans la région du Tafilalet (photos prises par Ghamizi, muséum d'histoire naturelle de Marrakech)

B- La Classe des Crustacés

1°/ Les Isopodes

L'ordre des Isopodes renferme un très grand nombre d'espèces et même de familles entières qui mènent une vie stygobie. Il constitue une composante non négligeable des peuplements interstitiels du Maroc (BOUTIN et BOULANOUAR 1984 ; MESSOULI 1984 ; BOULANOUAR, 1986 ; BOULAL 1988 ; IDBENNACER 1990 ; YACOUBI-KHEBIZA 1990).

Un bon nombre Isopodes stygobies, notamment ceux que nous avons récoltés au cours de cette étude, dérivent directement ou indirectement, d'ancêtre marins épibenthiques, pigmentés et occulés, plus ou moins anciens (COINEAU *et al.*, 1994). La colonisation des eaux souterraines par les ancêtres marins des Isopodes actuellement stygobies et continentaux, a emprunté deux voies différentes selon les groupes. Une voie de surface en remontant les réseaux hydrographiques et une voie interstitielle suivant le 'Regression Model Evolution' (STOCK, 1980) et le modèle biphasé d'évolution (BOUTIN et COINEAU, 1990 ; NOTENBOOM, 1991).

Les Cirolanides paraissent les plus diversifiés et sont distribués dans de nombreuses régions (NOURISSON, 1956, BOTOSANEANU *et al.*, 1985 ; BOULANOUAR, 1986 ; YACOUBI-KHEBIZA, 1990 ; BOUTIN et BOULANOUAR, 1991 ; BOUTIN, 1993a,b) et peuplent les eaux souterraines de nombreuses régions. Les Asellides se rencontrent plus rarement au Maroc alors qu'ils abondent dans d'autres pays, notamment en Europe (BOULANOUAR *et al.*, 1989). Les Mircocerberides ne comportent qu'une ou deux espèces connues au Maroc et offrent une distribution restreinte (BOUTIN, 1984 ; BOULANOUAR, 1986 ; YACOUBI-KHEBIZA, 1990) tandis que les Microparasellides du genre *Microcharon* présentent une large répartition dans l'ensemble du Maroc et sont relativement bien diversifiés.

a- Les Microparasellidae : le Genre *Microcharon*

Ce genre est représenté par plusieurs espèces dans les eaux souterraines marocaines. Ce sont des espèces de petite taille, souvent moins de 1,5 mm. Seule *Microcharon marinus* est une espèce encore littorale, elle a été récoltée dans les l'interstitiel des plages méditerranées de la région rifaine. Elle a aussi été signalée par PESCE *et al.*, (1981) dans les eaux souterraines continentales de Casablanca.

Les autres espèces proviennent des eaux souterraines continentales (puits ou sous écoulements des cours d'eau). Les espèces du genre *Microcharon* présentent un endémisme

remarquable. Ainsi, *Microcharon alamiaie* est la seule espèce connue dans la région rifaine, *Microcharon boutini* dans la nappe de Jbilet, *Microcharon messoulii* dans la région d'Amezmiz et *Microcharon ourikensis* dans la vallée d'Oued Ourika. La répartition géographique de ces espèces (figure 45), a été rappelée dans une étude récente (AÏT BOUGHROUS *et al.*, 2007) dans laquelle nous avons signalé et décrit pour la première fois une espèce appartenant au genre *Microcharon* au sud du Haut-Atlas : *Microcharon oubrahimae*. Elle a été échantillonnée dans les eaux d'un puits à Tazougaret, 70 km à l'Est de la ville d'Errachidia et aussi dans un puits dans le site de Zouala, 40 km au sud d'Errachidia.

L'espèce *Microcharon oubrahimae* n'appartient pas plus au groupe d'espèces *ourikensis* - *karamani* qu'au groupe qui réunit les autres espèces de l'Atlas. En revanche, cette nouvelle espèce souterraine marocaine semble curieusement être apparentée à un autre groupe phylogénétique de Méditerranée orientale. Ce groupe est composé de *Microcharon bureschi*, *Microcharon orghidani* et *Microcharon phlegetonis*.

Il apparaît même que *Microcharon orghidani* constitue l'espèce soeur de *Microcharon oubrahimae*. Toutes les deux sont caractérisées par une marge intérieure oblique ou concave du lobe interne du pléopode 1 masculin et par une armature chétotaxique en position subdistale.

Les Microparasellidae du genre *Microcharon* sont certes présents de part et d'autre du Haut-Atlas, mais la population de la plaine du Tafilalet (*Microcharon oubrahimae*) présente plus d'affinités avec les populations du groupe de l'est méditerranéen (groupe *Microcharon orghidani* *Microcharon bureschi*- *Microcharon phlegetonis* de la Roumanie et de la Bulgarie), qu'avec les espèces du Haut-Atlas marocain.

b) Les Microcerberidae: Le Genre *Microcerberus*

L'espèce *Microcerberus remyi* a été capturée pour la première fois dans les eaux souterraines du Todgha (un peu au nord de Tineghrir) sur le versant sud du Haut-Atlas par CHAPUIS en 1953; cette même espèce a ensuite été signalée dans les eaux souterraines au nord du Haut-Atlas (BOUTIN, 1984 ; BOULANOUAR 1986, YACOUBI-KHEBIZA, 1990 ; COINEAU *et al.*, 1999).

Durant notre étude, cette espèce est présente en abondance dans le sous écoulement de l'oued Ziz près de Meski et aussi plus loin au sud des les eaux des puits de la zone de Zouala.

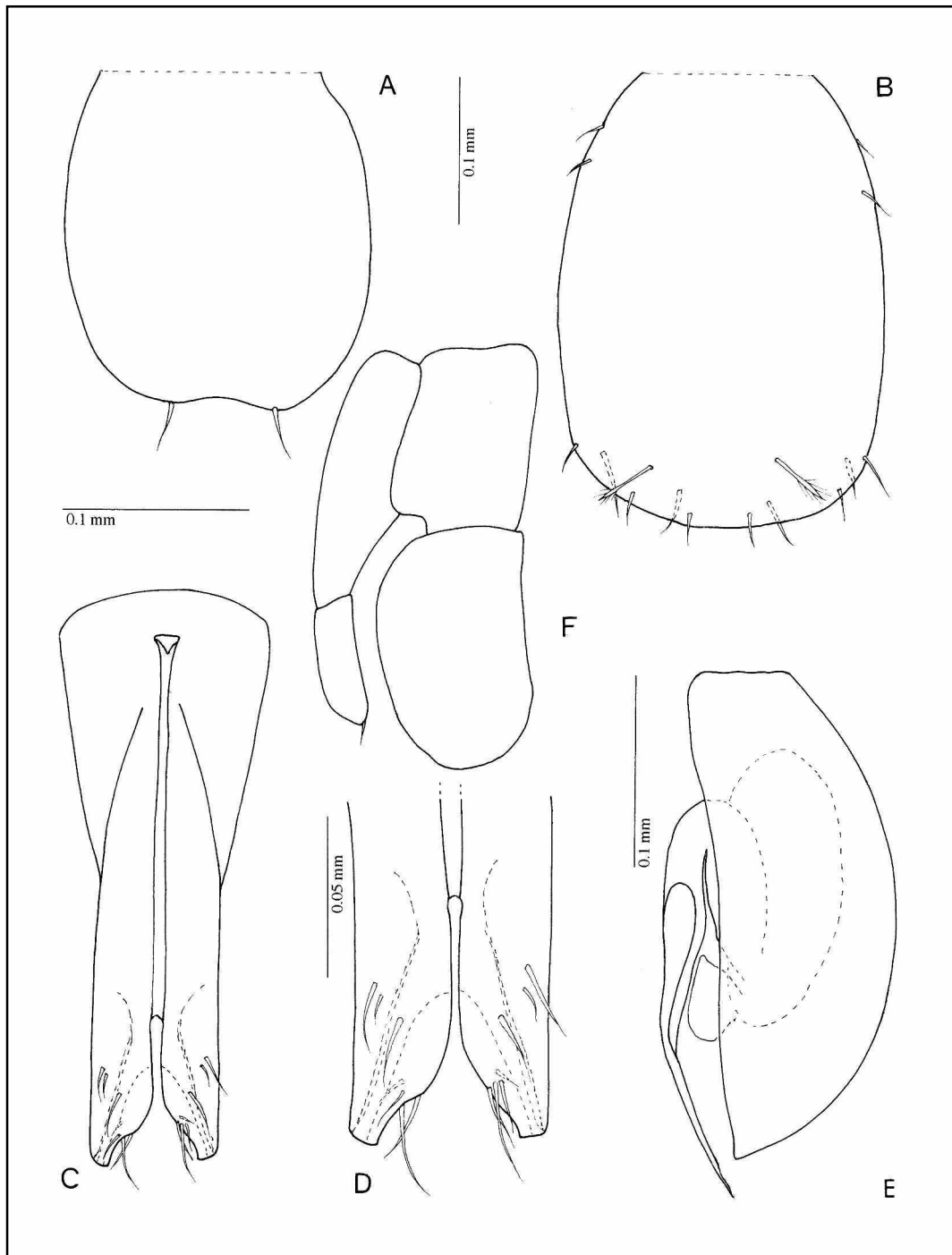


Figure 42 : *Microcharon oubrahimae* n. sp. A, pléopode 2 femelle ; B, pléotelson ; C, pléopode 1 mâle ; D : partie distale du pléopode 1 mâle; E, pléopode 2 mâle ; F, pléopode 3.

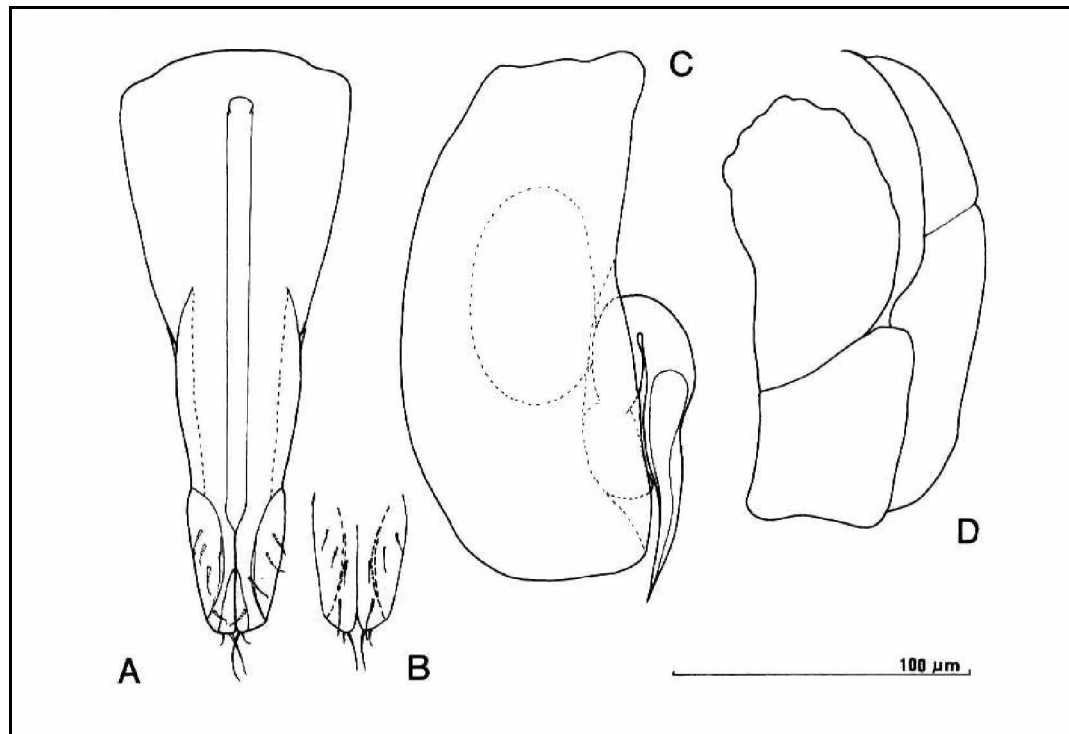


Figure 43 : *Microcharon boutini* ; A : pléopode 1 du mâle. B, extrémité du pléopode 1 du mâle ; C, pléopode 2 du mâle et D, pléopode 3.

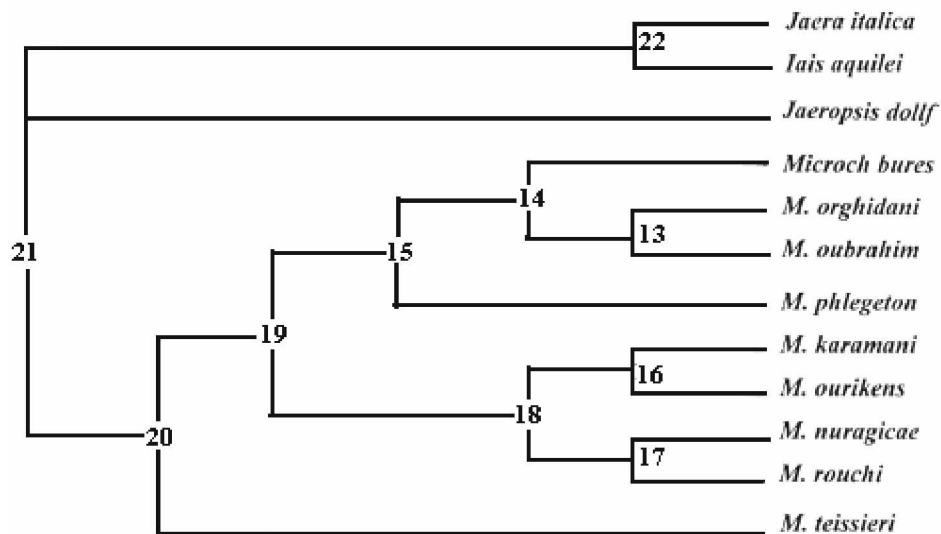


Figure 44 : Un des arbres les plus courts représentant les relations phylogénétiques entre une dizaine d'espèces du genre *Microcharon* y compris les trois out-groups de la famille des Janiridae : *Jaera italica*, *Iais aquilei* et *Jaeropsis dollfusi*.

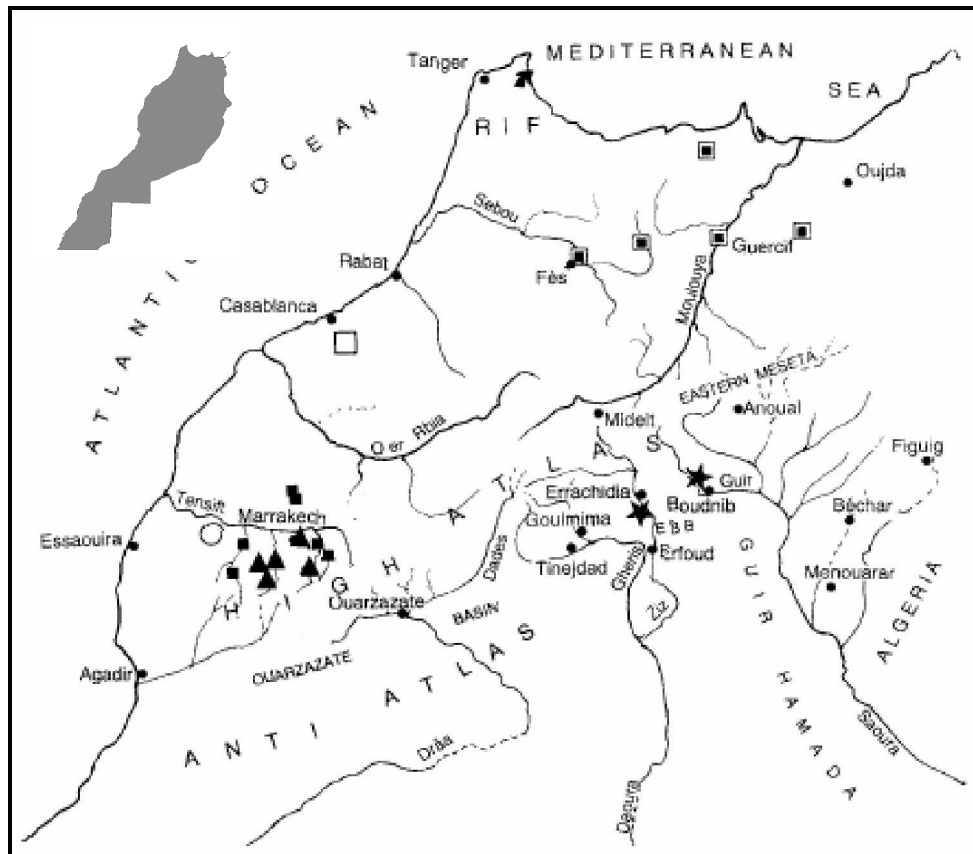


Figure 45 : Distribution des différentes espèces du genre *Microcharon* du Maroc: Étoiles noires, les 2 stations de *Microcharon oubrahimaie* n.sp.; carrés noirs, *Microcharon boutini*; triangles noirs, *Microcharon ourikensis* et les espèces du groupe *messoulii*; Carrés doubles (noirs et blancs) , *Microcharon alamaie*; carré blanc, *Microcharon* sp.1; cercle blanc, *Microcharon* sp.2; Flèche noire, *Microcharon marinus*.

c) Les Cirolanidae du Genre *Typhlocirolana*

Le genre *Typhlocirolana* RCOVITZA 1905, est représenté dans les pays méditerranéen par des dizaines d'espèces. Quelques unes sont connues d'Espagne péninsulaire (MARGALEF 1958 ; PRYUS 1986), des îles méditerranéennes telles que les Baléares et la Sicile (RAOVITZA, 1905) d'Algérie (RACOVITZA, 1912), du Maroc (NOURISSON 1956 ; MARGALEF 1958 ; BOTOSANEANU et al., 1985) et depuis peu de Tunisie (GHLALA et al., 2006).

Au Maroc, le genre *Typhlocirolana* est largement distribué sur la totalité du pays. Il est représenté par une bonne dizaine d'espèces (BOUTIN, 1993b). Récemment, nous avons récolté trois espèces du genre dans les deux régions étudiées : le Haouz et le Tafilalet. Il s'agit de *Typhlocirolana haouzensis*, de *Typhlocirolana leptura* et d'une nouvelle espèce inédite *Typhlocirolana* n. sp. qui a été récoltée dans les eaux du Tafilalet. Nous connaissons aussi l'existence de plusieurs espèces inédites dans la région du Sous (BOULAL, 2002).

La nouvelle espèce du Tafilalet semble présenter des ressemblances avec une espèce inédite que nous avons récoltée dans la source de Tgafaït près de Guercif et plus encore semble-t-il avec l'espèce *Typhlocirolana haouzensis* de Marrakech. En dépit de ces ressemblances certes importantes, l'espèce d'Errachidia, *Typhlocirolana* n.sp, présente des caractéristiques spécifiques bien visibles, surtout au niveau de l'uropode et du pléopode 1 du mâle et aussi au niveau de la forme du pléotelson. Des études génétiques réalisées sur les *Typhlocirolana* viennent confirmer ces résultats. *Typhlocirolana* n.sp présente une distribution très large dans la région du Tafilalet, puisque nous l'avons récoltée dans le sous-écoulement de d'oued Ziz depuis le Nord, dans la station de Tilecht jusqu'au Sud, dans les puits de Taouz. Elle est aussi présente dans l'eau des sources chaudes 'Hammat Moulay Hachem' au nord de la ville d'Errachidia et encore dans les eaux tièdes de la Source Bleue de Meski. La même espèce a été récoltée dans l'eau des puits de la vallée de Guir près de Boudnib et aussi dans les puits de Goulmima dans la vallée de Rheris (figure 48).

L'espèce *Typhlocirolana leptura* est une espèce bien particulière qui a été signalée et décrite par BOTOSANEANU et al., (1985), des régions de Chichaoua et de Marrakech et qui, comparée aux autres espèces du genre, semble aujourd'hui encore très rare, bien qu'elle soit également connue du versant nord des Jbilet.

À l'occasion de cette étude, nous avons récolté *Typhlocirolana leptura* dans les eaux du puits M1 situé dans la nappe de Jbilet (voir figure 48), ainsi que dans les eaux d'autres puits de la nappe de Marrakech non mentionnés dans cette étude.

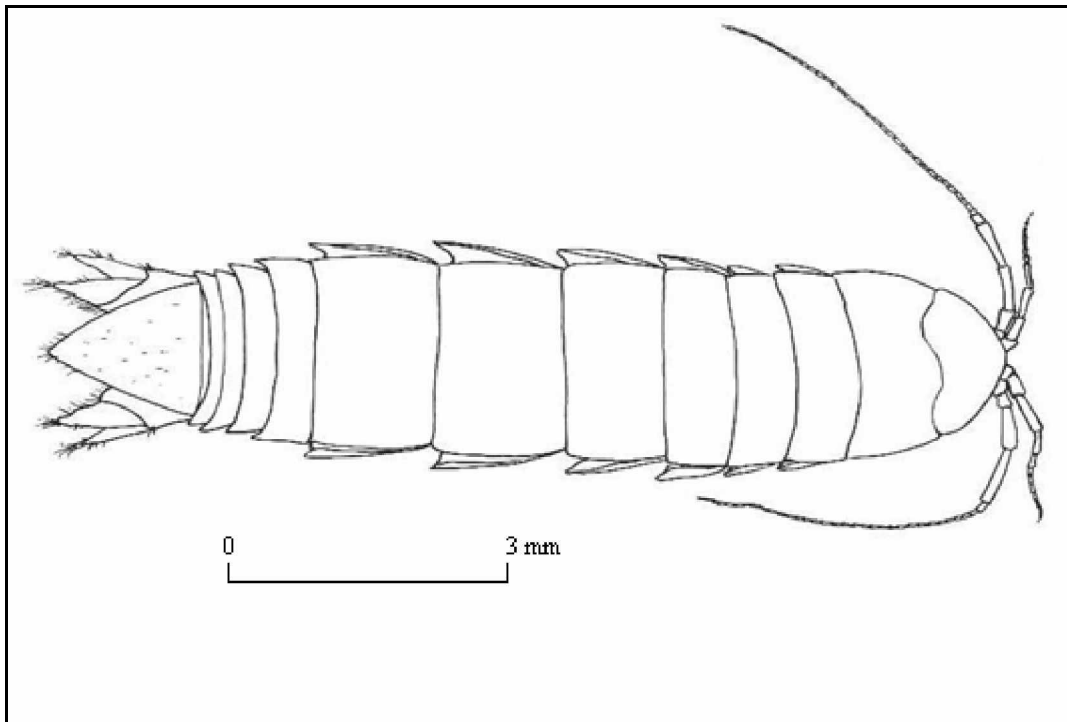


Figure 46 : Habitus de *Typhlocirolana haouzensis* (longueur, 11 mm).

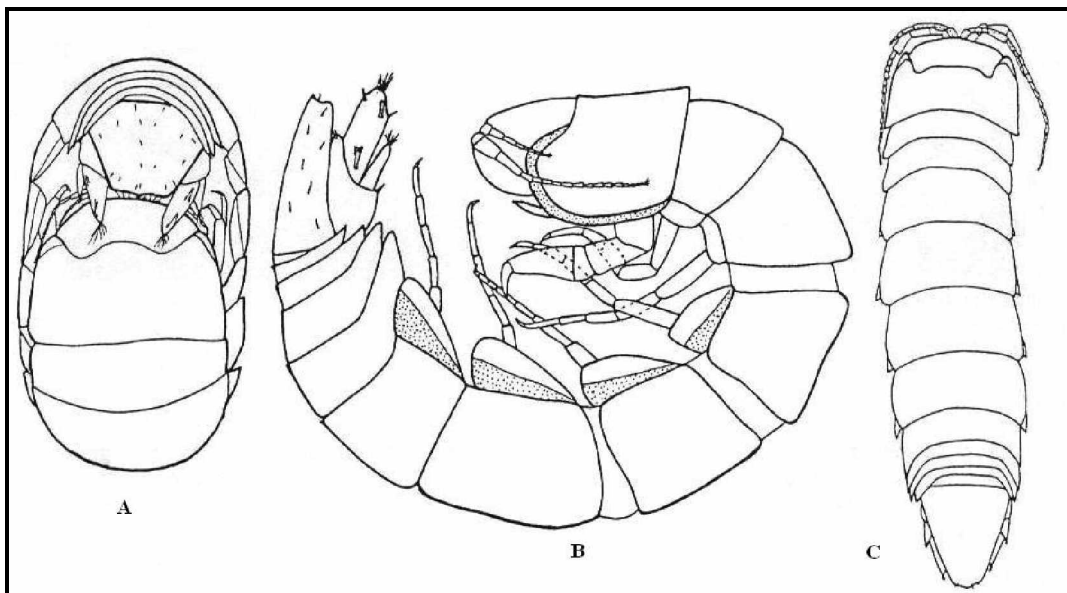


Figure 47 : *Marocolana delamarei* A : en volvation, B : partiellement déroulé en vue latérale et C : en vue dorsale; longueur 6 mm, d'après BOUTIN, 1993b et BOULANOUAR *et al.* (1993).

Tableau 19 : Principaux caractères morphologiques distinctifs entre les deux espèces connues du genre *Marocolana*, *M. delamarei* et *Marocolana sp.*, en cours de description.

	<i>Marocolana delamarei</i>	<i>Marocolana sp.</i>
Taille	Taille maximale du mâle : 6,5 mm Taille maximale de la femelle : 6 mm	Taille max du mâle : 7,65 mm Taille max de la femelle : 9 mm
Péréiopode 2	Pas d'organe propodial ni chez le mâle ni chez la femelle	Présence d'organe propodial chez le mâle, absence chez la femelle
Péréiopode du mâle	L'endopodite possède 6 ou 7 soies plumeuses	L'endopodite possède 2 ou 3 soies plumeuses
Uropode	- exopodite muni de courtes soies simples sur son bord externe - le sympodite ne porte que 2 soies plumeuses sur le bord interne et un éperon à soie additionnelle à l'angle postéro-externe	- exopodite réduit, muni de 2 éperons à soies additionnelles et quelques courtes soies simples - le sympodite porte 8 soies plumeuses sur le bord interne. Un éperon à soie additionnelle près de l'angle postéro-externe qui porte deux éperons
Pléotelson	Subtriangulaire, légèrement tronqué avec une fine pointe apicale et quelques courtes soies simples	De forme triangulaire avec une pointe apicale bien marquée. Il est muni de quelques courtes soies simples, marginales et submarginales

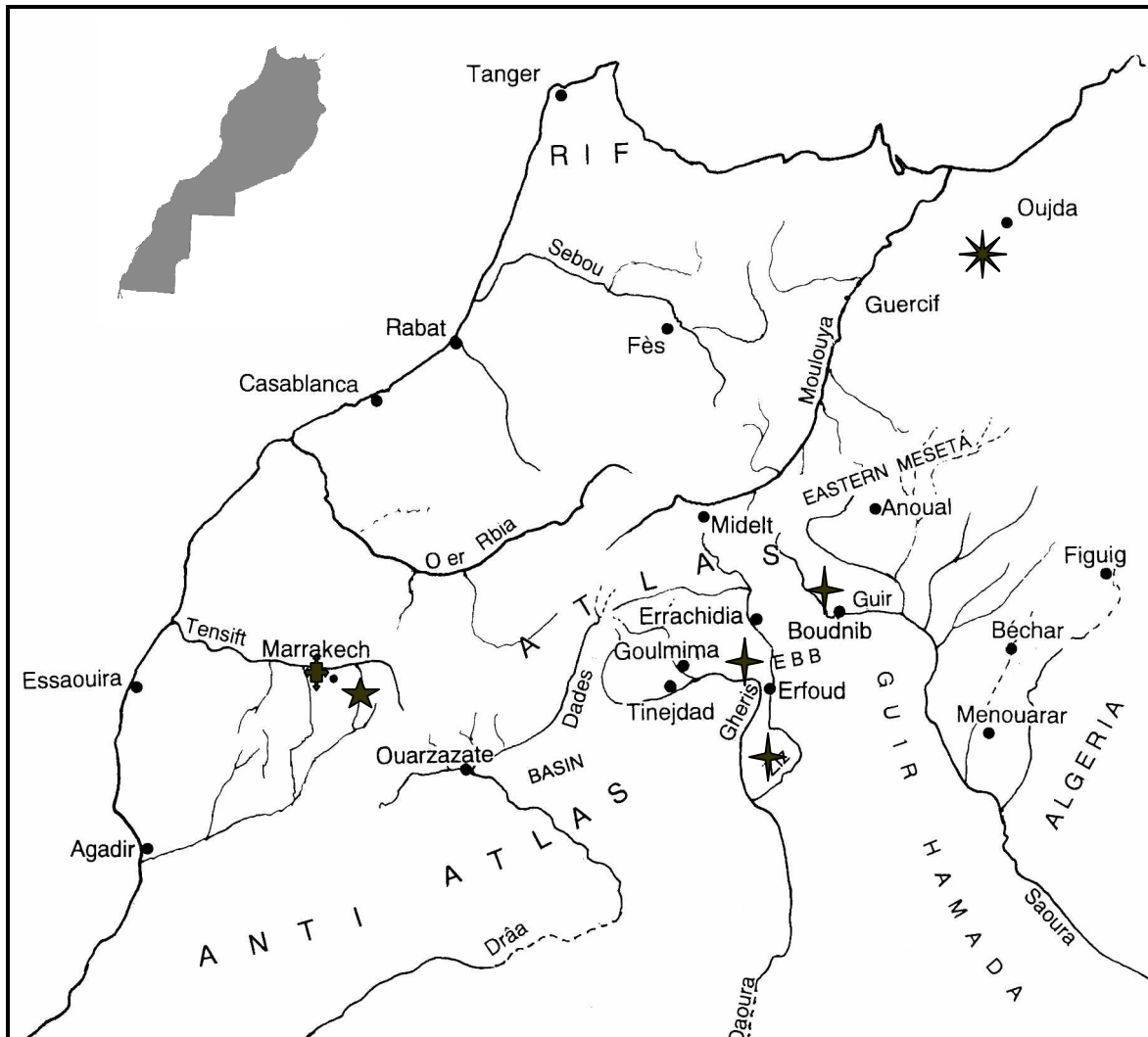


Figure 48 : Répartition géographique des populations du genre *Typhlocirolana* au Maroc.

- ★ *Typhlocirolana haousenzis* ;
- ✳ *Typhlocirolana sp.1*, population de Tgafaït ;
- ✦ *Typhlocirolana sp.2*, population de Tafilalet.
- ◆ *Typhlocirolana leptura*

d) Les Cirolanidae du Genre *Marocolana*

Le genre *Marocolana* créé par BOUTIN (1993b) à la suite de la découverte de *Marocolana delamarei* dans les puits de la région de Marrakech et de la région d'Essaouira (BEN ABBAS TAARAJI, 1986) se rapproche à la fois du genre *Typhlocirolana* et du genre *Turcolana* présent à l'Est de la Méditerranée en Turquie et à Rodhes. Cependant son aptitude à la volvation totale le rend plus proche du genre *Turcolana* (BOUTIN, 1993b).

Ce genre provient probablement de thalassostygobiontes littoraux qui ont colonisé les eaux souterraines continentales pendant la régression lutétienne, à la fin de l'Eocène donc beaucoup plus tardivement que les ancêtres des espèces du genre *Typhlocirolana*.

Le genre *Marocolana* comporte, jusqu'à présent, deux espèces *Marocolana delamarei* et *Marracolana n.sp.* (toujours en cours de description). Les principaux caractères qui distinguent les deux espèces sont résumés sur le Tableau 19. Les deux espèces se rencontrent dans la plaine de Haouz.

Au cours de cette étude, nous avons récolté les deux espèces à plusieurs occasions, dans les eaux des puits du nord de Marrakech et des Jbilet (voir Tableau 11).

e- Les Stenasellidae du genre *Magniezia*

Magniezia gardei MAGNIEZ (1978) est espèce qui a été décrite à l'origine de la grotte Kef Aziza, dans le site de Tazougart sur la rive droite de l'oued Guir (Sud-Est du Maroc ou Nord-Est du Tafilalet).

Le genre *Magniezia* est représenté par plusieurs espèces dans divers pays d'Afrique subsaharienne. Aussi a-t-on envisagé que des connections auraient pu s'établir avant l'assèchement du Sahara, dans une vaste région qui fut occupée alors par les nappes phréatiques, des fleuves et des lacs (MAGNIEZ, 1997). Mais des connexions entre le nord et le sud du Sahara ont pu exister bien avant cette période, vers la fin du Crétacé, lorsqu'un bras de mer trans-saharien a relié la Téthys (à l'origine de l'actuelle Méditerranée) au Golfe de Guinée dans l'Atlantique sud.

Au Maroc, nos campagnes de prospection dans le Sud du pays (figure 49), ont permis la récolte de formes très proches de *Magniezia gardei* probablement des sous-espèces ou espèces sœurs (YACOUBI-KHEBIZA *et al.*, 2004). La première forme a été récoltée en abondance, et pour la première fois depuis la description de cette espèce, dans deux puits sur le lit de l'oued Ziz. Le premier puits est situé à 3 Km au Nord de la ville d'Errachidia et le deuxième se situe dans la zone de Zouala à 40 km au sud de la ville d'Errachidia près de la

route nationale. Récemment, nous avons aussi récolté une forme très proche dans un puits à Agdez dans le bassin versant de l'oued Draâ et des *Magniezia* avaient aussi été récoltés en grand nombre en 1982, dans un puits creusé dans le lit de l'Oued Draâ à Ouarzazate (C. BOUTIN comm. pers.). Une autre espèce a été récoltée à plusieurs reprises dans le sous-écoulement des cours d'eau du Haut-Atlas près de Marrakech (BOUTIN, 1993). Du point de vue morphologique, ces espèces présentent beaucoup de ressemblances, ce qui complique le choix du statut taxonomique qui doit leur être assigné; aussi une étude génétique permettant notamment de confirmer ces observations s'impose (BOULANOUAR comm. Pers.).

Bien que la forme de Marrakech soit également très proche de *Magniezia gardei*, elle présente des caractères très particuliers surtout au niveau des pléopodes II, qui conduisent à penser qu'elle mérite par la suite d'être publiée comme nouvelle espèce (BOUTIN, comm. Pers.).

Les analyses génétiques réalisées sur les populations provenant du sud de l'Atlas et celle provenant de la région de la ville de Marrakech confirment ces observations morphologiques, Il s'agit certainement d'espèces sœurs faiblement différenciées, réparties de part et d'autre du Haut-Atlas (YACOUBI-KHEBIZA *et al.*, 2004).

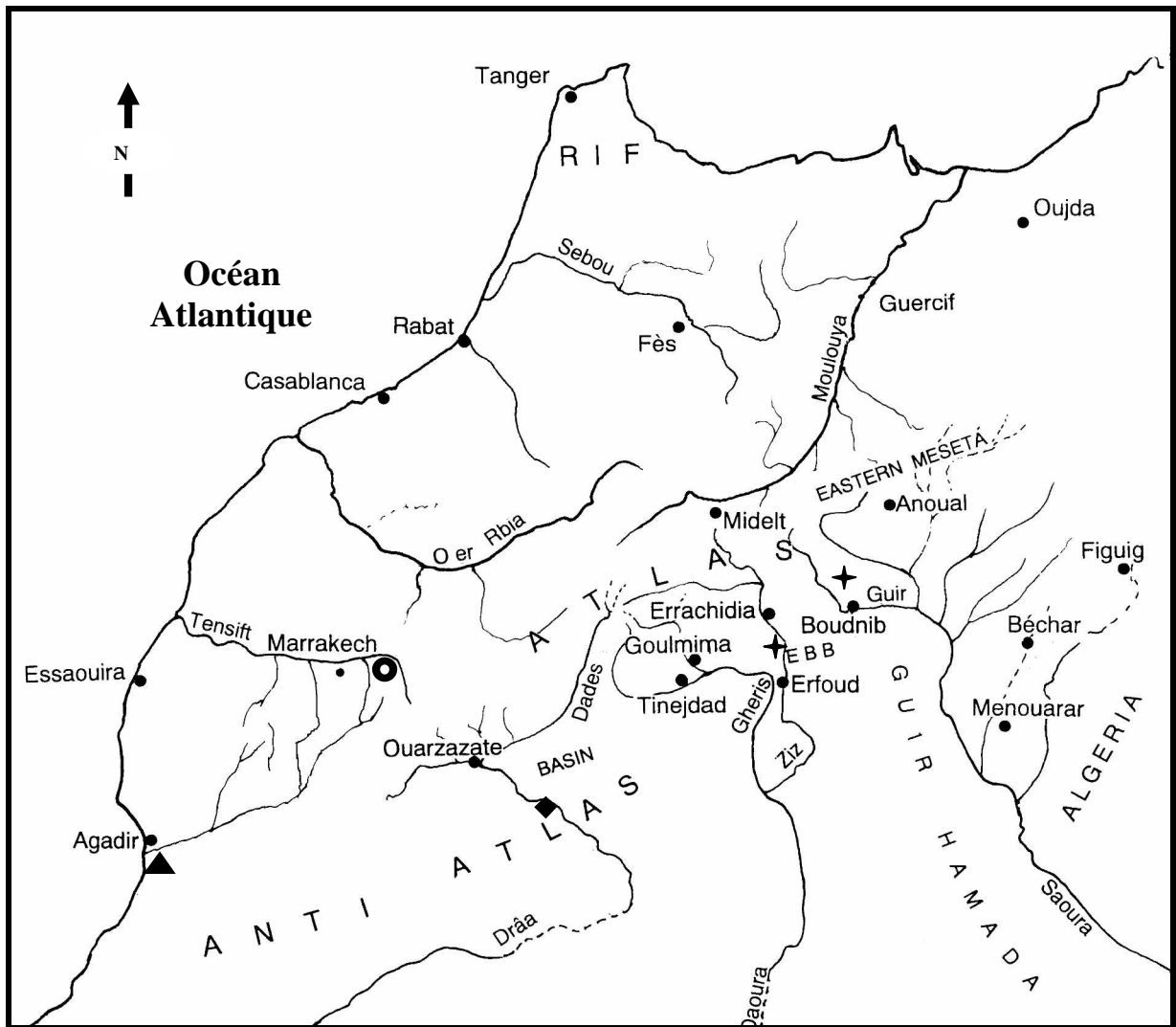


Figure 49: Répartition des populations du genre *Magniezia* dans le Maroc. ✦ *Magniezia gardei*
 ● *Magniezia sp.* : population de Marrakech ; ▲ *Magniezia sp.* : population d'Agadir ;
 ◆ *Magniezia sp.* : population de Zagora.

2°/ Les Amphipodes

a- Metacrangonyctidae

C'est la famille de Crustacés Amphipodes la plus diversifiée dans les eaux souterraines du Maroc. On en a récolté à ce jour environ 30 espèces au Maroc dont plusieurs n'ont pas encore été publiées. Leur aire de répartition s'étend dans le Sud du Bassin méditerranéen depuis les îles Canaries jusqu'au Proche-Orient (Palestine), en passant par les Baléares et l'Afrique du Nord, jusqu'au Sinaï (BOUTIN, 1994).

Les Metacrangonyctidae vivent dans les eaux souterraines, en particulier dans les milieux interstitiels des nappes phréatiques, au niveau des plaines, des vallées et également en montagne (MESSOULI, 1994). La majorité des spécialistes attribue à l'ensemble des Amphipodes une origine marine (STOCK, 1986).

Au Maroc la famille est très bien représentée, avec une trentaine d'espèces réparties dans trois grands domaines structuraux du pays: la Meseta, le domaine atlasique et le domaine Anti-Atlasique. Une étude portant sur l'écologie et la biogéographie de ce groupe a été réalisée par BOUTIN en 1993. Ainsi qu'une étude de synthèse sur leur histoire et leur diversité et celles des autres Crustacés Malacostracés du Maroc a été réalisée par MESSOULI (1994).

Durant notre étude 8 espèces d'Amphipodes ont été récoltées dont deux espèces nouvelles pour la science (MESSOULI com. pers.) leurs descriptions sont en cours. Les autres espèces sont :

- Espèces du Groupe *spinicaudatus*:

○ *Metacrangonyx spinicaudatus* : KARAMAN et PESCE, 1980 c'est une espèce ayant conservé un bon nombre de caractères ancestraux plus ou moins archaïques. Elle diffère de façon importante de celles du groupe *panousei* et se rapproche de *Metacrangonyx longicaudas* (MESSOULI, 1994), Avec *Metacrangonyx longicaudas* et les espèces proches, *Metacrangonyx spinicaudatus* appartient à un groupe d'espèces relativement primitives, ayant conservé des caractères de leurs lointains ancêtres marins qui ont pu coloniser les eaux souterraines lors des régressions marines qui ont suivi la grande transgression du Turonien, il y a environ 90 millions d'années. Les espèces du groupe *panousei* sont considérées comme plus récentes, et se sont probablement installées lors des régressions marines du Sénonien (70 Ma) à la fin du Crétacé (BOUTIN, 1993a et MESSOULI, 1994).

○ *Metacrangonyx longicaudus*

Cette espèce est décrite sur un individu unique provenant du Rheris (RUFFO, 1954), a été retrouvée par Notenboom en Algérie, dans l'oasis de Menouarar (Wilaya de Bechar). Nous l'avons récoltée régulièrement dans les eaux des puits de la région du Tafilalet. Elle est aussi signalée dans les puits de la vallée de Dades et du Todgha par Boutin et Coineau (1990).

- Espèces du Groupe *panousei*

Parmi les 11 espèces que contient ce groupe (MESSOULI, 1994), seules quatre espèces sont présentes dans les deux régions de notre étude.

○ *Metacrangonyx panousei*: BALAZUC et RUFFO (1953), a été décrite des Hamadas du Sud du Maroc, après avoir été trouvée dans un puits de la vallée de l'oued de Draâ. Cette espèce a été récoltée aussi dans cette même vallée plus en amont jusqu'au Agdez au Sud de Ouarzazate et plus en aval jusqu'à l'embouchure de l'oued Draâ, près de Tan-Tan (MESSOULI, 1994). C'est l'espèce qui présente la plus vaste répartition géographique puisque son aire de répartition s'étend sur quelque 800 km (BOUTIN *et al.*, 1992 et MESSOULI, 1994). Durant notre étude, nous avons récolté cette espèce régulièrement dans les eaux des puits de la nappe du Tafilalet. Elle a été rencontrée dans les puits, le sous-écoulement et les sources des trois cours d'eau de la région (Guir, Ziz et Rheris).

○ *Metacrangonyx notemboomi* (En cours d'étude)

Cette espèce a été récoltée d'abord dans les eaux souterraines dans l'oasis Menouarar dans la Wilaya de Béchar (Algérie), par J. NOTENBOOM. Elle présente une répartition très large dans la région de Tafilalet. On la rencontre fréquemment dans les eaux souterraines des oueds Rhéris, Ziz et Guir (figure 50).

○ *Metacrangonyx goulmimensis*

BENAZOUZ (1983) a largement contribué à la connaissance de la distribution géographique de cette espèce qui a été décrite par MESSOULI *et al.*, (1991). Nous l'avons récoltée dans les eaux d'une dizaine de stations de la plaine de Tafilalet au niveau des cours d'eau Ziz, Rheris et Guir.

○ *Metacrangonyx paurosexualis*

Les Jbilet constituent la limite nord de l'aire de répartition de cette espèce : aucun individu n'a été récolté au nord de cette chaîne. Vers le sud, l'espèce est limitée aux principaux cours d'eaux du réseau hydrographique du Tensift.

b) Les Bogidiellidae

Cette famille est représentée, au Maroc, par le genre *Bogidiella* dont l'espèce *Bogidiella chapuisi* provenant des eaux littorales méditerranéennes (COINEAU et STOCK, 1986) et par le genre *Maghrebidiella* (DIVIACO et RUFFO, 1985). Ce genre est signalé pour la première fois dans un puits de Marrakech (BOUTIN et BOULAOUAR, 1983) puis il a été rencontré dans les puits de la vallée du Zat et de l'Oued Lahjar (YACOUBI-KHEBIZA, 1996); par la suite, FAKHER EL ABIARI (1999) l'a récolté dans la région Nord du Maroc. Par sa morphologie, le genre *Maghrebidiella* possède à la fois des caractères qui le rapprochent du genre *Afridiella* de Somalie et d'autres qu'il partage avec le genre *Bogidiella*, péri-méditerranéen..

Au cours de ce travail, nous avons récolté trois espèces du genre *Maghrebidiella* : *Maghrebidiella maroccana* dans les puits des environs de Marrakech d'une part et deux espèces nouvelles d'autre part, toutes les deux dans la région du Tafilalet. La première espèce *Maghrebidiella* sp.1 a été signalée dans les eaux d'un puits situé à 60km au nord de la ville d'Errachidia, alors que la deuxième espèce, *Maghrebidiella* sp.2, a été capturée dans l'eau d'un puits dans la vallée de Ziz, au Sud, près de Jorf (figure 50).

C- Les Salentinellidae

La famille des Salentinellidae regroupe un nombre relativement très limité d'espèces puisqu'on en connaît seulement une douzaine, qui appartient presque toutes (sauf une) au même genre, *Salentinella*. Cette petite famille d'Amphipodes est bien représentée dans le bassin méditerranéen (RUFFO, 1961).

Le genre est représenté par *Salentinella angelieri* dans la région rifaine (PESCE *et al.*, 1981). Puis BOUTIN (1993) l'a signalé dans le milieu interstitiel de l'Oued Gheris et Messouli dans la région de Ouarzazate. Nous avons récolté plusieurs représentants de ce genre dans plusieurs stations du Tafilalet. Il a été également signalé dans les cours d'eau du Haut-Atlas de Marrakech par YAOUBI-KHEBIZA (1996).

Toutefois les spécimens récoltés de part et d'autre de l'Atlas semblent morphologiquement semblables elles appartiennent probablement à la même espèce ou à deux espèces sœurs (voire à deux espèces-jumelles) très proches morphologiquement. Il n'y a aucune raison de

supposer que les Salentinelles aient, plus que les autres stygobiontes thalassoides que nous connaissons, des capacités de dispersion insoupçonnées (BOUTIN et COINEAU, 2000), aussi nous croyons que si la même espèce vit dans les milieux interstitiels de part et d'autre de l'Atlas, cela signifie que l'ancêtre de cette espèce était installé dans cette région avant l'orogénèse atlasique qui a débuté vers la fin du Lutétien, donc au début du Cénozoïque. Même si l'on était en présence de deux espèces très proches, ces conclusions resteraient inchangées en l'état actuel de nos connaissances.

3°/ Les Thermosbaenacés

Le genre *Monodella*, très diversifié, compte de nombreuses espèces et présente une vaste répartition géographique; il se rencontre principalement dans les pays méditerranéens, mais aussi au Texas et aux Antilles ainsi qu'en Somalie (WAGNER, 1990).

Au Maroc, le représentant de ce genre a été décrit sous le nom de *Monodella atlantomaroccana* de l'eau des puits de Marrakech (BOUTIN et CALS, 1985), et découvert par la suite, dans plusieurs stations de la vallée de la Rheraya et de l'Assif El Mal (YACOUBI-KHEBIZA, 1996) sur le piémont nord du Haut-Atlas ancien. Au sud de ce massif, des formes semblables ont été récoltées dans les nappes phréatiques de Chtouka (BOULAL, 1988) et de Guelmim (IDBENNACER, 1990). Récemment, nous avons signalé des représentants du genre *Monodella* dans les eaux souterraines des nappes de la région du Tafilalet (ainsi que dans la nappe du Haouz près de Marrakech où il avait déjà été trouvé).

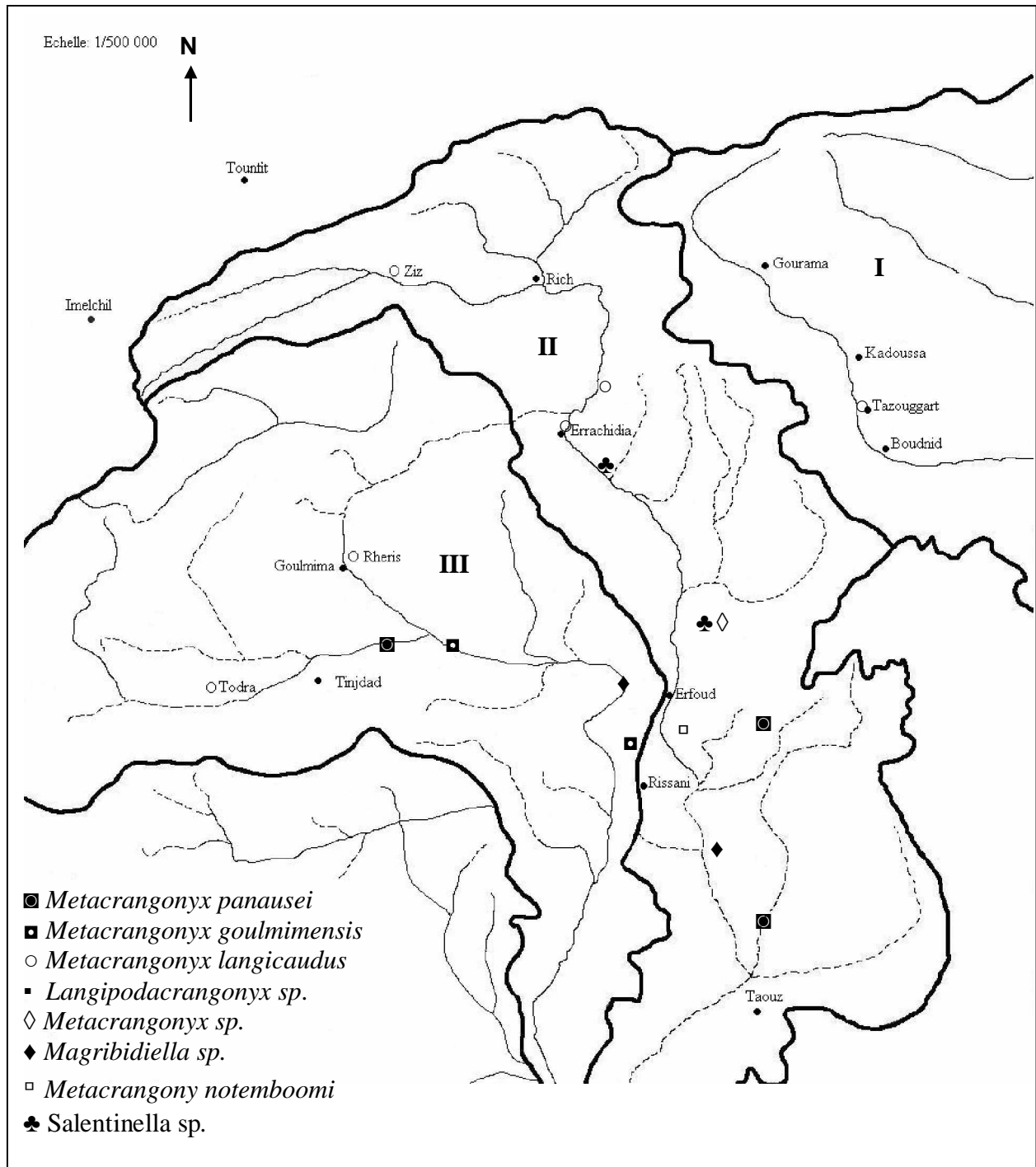


Figure 50: Carte de répartition géographique des Amphipodes dans les eaux souterraines de la région du Tafilalet. I : bassin versant du Guir, II : bassin versant de Ziz et III : bassin versant du Rheris.

4°/ Les Ostracodes

Les ostracodes sont présents dans un grand nombre de biotopes : eaux phréatiques, sources, mares temporaires et fossés, marécages, marais salants, lacs et étangs, ruisseaux et rivières (MEISCH, 1987 ; ROCA, 1993). Néanmoins la plupart des espèces préfèrent les eaux calmes à faiblement agitées, c'est la principale raison de leur rareté dans les eaux courantes et de leur abondance dans l'eau des puits.

Les principaux facteurs contrôlant la présence de telle ou telle espèce au niveau de ces eaux calmes sont la salinité, la végétation, la température, le substrat, la permanence ou non du milieu, le pH, la nourriture. Généralement les eaux acides, Oligotrophiques, sont pauvres en Ostracodes (HENDERSON, 1990).

Une étude réalisée sur les eaux de la Slack (Boulonnais, Nord de la France), portant sur les potentialités des Ostracodes comme bio-indicateurs des eaux courantes (MILHAU *et al.*, 1997) a permis de constater que les associations des Ostracodes sont corrélées avec les différentes qualités d'eau connues et certains espèces sont significativement corrélées avec certains paramètres physico-chimiques comme la teneur en nitrates, en oxygène dissous ou les matières en suspension.

Dans nos prélèvements, les Ostracodes sont représentés par sept espèces réparties de part et d'autre du Haut-Atlas, dans les eaux souterraines de la région du Tafilalet et de Marrakech. Ce sont *Pseudocandona cf albicans*, *Heterocypris cf. reptans*, *Cypridopsis vidua*, *Cypridinae* n.sp., *Herpetocypris* sp. et un représentant d'un nouveau genre de la famille *Eucypridinae* ainsi qu'une espèce stygobie du genre *Cypridopsis*.

C- Les Annélides Oligochètes

1- Origine

Traditionnellement, on admettait que les Oligochètes dérivent des Polychètes marins. Cette hypothèse est encore retenue par certains auteurs notamment HRABE (1983) et TIMM (1981). Ce dernier fait dériver les Oligochètes d'un ancêtre ayant la structure de certains Polychaeta Errantia qui, par l'intermédiaire du milieu saumâtre, auraient progressivement gagné les milieux d'eau douce dans la deuxième moitié du Paléozoïque.

BRINKHURST et JAMIENSON (1971) admettaient que les Oligochètes et les Polychètes dérivent d'un même ancêtre de type «Annélide ressemblant à un ver de terre» sans gonades

différenciées. D'autre part, ils considéraient les Haplotaxidae comme les représentants actuels de la souche de tous les Oligochètes, mais par la suite, JAMIESON (1981) a admis une évolution en deux lignées (aquatiques et lombricienne terrestre) séparées. Selon BRINKHURST (1982a), tous les Oligochètes dérivait alors d'un même type ancestral octogonadal et réunissant de nombreux caractères plésiomorphes.

L'existence d'Oligochètes marins est connue depuis fort longtemps, surtout parmi les Enchytraeidae. Les premiers Tubificidae marins ont été décrits par PIERANTONI (1902). La monographie de BRINKHURST et JAMIESON (1971) ne recense qu'environ 40 espèces de Tubificidae marins. Alors que GIANI (1984) et GIANI *et al.*, (2001) compte plus de 160 espèces regroupées en 40 genres.

2- Les Oligochètes aquatique au Maroc

À l'inverse des autres classes, les Oligochètes aquatiques du Maroc ne sont étudiées que sommairement. Les espèces signalées dans les eaux proviennent de quelques campagnes de prélèvement isolées et limitées. La seule étude relativement complète sur les Oligochètes du Maroc remonte à l'année 1987, réalisée par BAROUDI.

C'est pour cette raison et en parallèle à nos travaux de thèse, nous nous sommes engagé dans l'étude des Oligochètes du Maroc, et ce dans le cadre d'un projet GTI en collaboration avec Monsieur P. MARTIN, spécialiste des Oligochètes à l'Institut Royal des Recherches Scientifiques de Belgique.

Durant cette étude, nous avons compté 52 espèces réparties dans le Maghreb, certains étant des formes épigées à vaste distribution méditerranéenne (DOLE, 1983) alors que d'autres sont stygobies. Sept espèces proviennent des deux régions, Tafilalet et Haouz de Marrakech, il s'agit de deux espèces de la famille Naididae et de 5 espèces de la famille des Lumbriculidae enfin de dizaines d'autres espèces, provenant de la région Nord relativement bien prospectée.

a- Les Naididae

Ce sont des vers de petite taille (aux environs de 1mm), au corps translucide avec des yeux souvent présents. Les soies sont généralement pectinées le plus souvent absentes, les soies en aiguille (aciculaires) souvent présentes dorsalement. Cette classe est représentée dans nos échantillons par une espèce du genre *Dero*.

- Genre *Dero*

Le genre *Dero*, présent sur le pourtour de la Méditerranée, est représenté dans les eaux souterraines du Maroc par l'espèce *Dero (Aulophorus) furcatus* qui a été récolté dans les eaux

souterraines de Tinzit et d'Anzi (BOULAL, 1988) de Guelmim (IDBENNACER, 1990) de Marrakech (BOULANOUAR, 1995) et du Maroc septentrional (FAKHER EL ABIARI, 1999). Récemment, nous avons récolté un représentant du genre *Dero* dans les eaux souterraines des puits de la région de Marrakech.

b- Les Lumbriculidae

Cette famille est représentée dans nos récoltes par un seul genre : *Trichodrilus*. En effet les Lumbriculidae sont faiblement diversifiées en Afrique du Nord comme cela a été signalé par BAROUDI (1987).

Le genre *Trichodrilus* à été déjà signalé dans le sous écoulement des oueds du Haut-Atlas de Marrakech (YACOUBI-KHEBIZA, 1996).

Trois espèces appartenant au genre *Trichodrilus* ont été récoltées dans les eaux souterraines étudiées. Il s'agit de *Trichodrilus* sp.1, *Trichodrilus* sp.2 et *Trichodrilus icenorum*. Les deux premières espèces sont des espèces distinctes qui pourraient être nouvelles pour la science.

- Genre *Enchytraeus*

Ce genre est représenté dans nos échantillons par l'espèce *Enchytraeus cf. buchhalzi* qui a été récoltée dans les eaux des puits du Tafilalet. Un représentant du genre *Enchytraeus* a également été capturé dans une source en amont de l'oued Seyad près de Guelmim par IDBENNACER (1990), dans le sous écoulement des oueds du Haut Atlas de Marrakech par YACOUBI-KHRBIZA (1996) ainsi que dans les eaux des puits du Maroc septentrional et du Rif par FAKHER EL ABIARI (1999).

II- Aperçu sur la paléogéographie des deux régions

Avant d'essayer d'expliquer les origines possibles des différents taxons récoltés au cours de cette étude, nous pensons utile de donner un bref aperçu sur la paléogéographie des deux régions concernées Haouz et Tafilalet.

1°/ Le Tafilalet: Bassin Errachidia-Boudnib-Erfoud

Le bassin d'Errachidia-Boudenib-Erfoud (BEB), aussi bien que le bassin de Ouarzazate et le domaine de l'Atlas ont été successivement envahis par les mers du Cénomaniens (transgressions marines vers 96-91 MA) et par les celles du Turonien (91-88 MA) (CHOURBERT et FAURE-MURET, 1962 ; MICHARD, 1976). Vers la fin du Cénomaniens, la phase transgressive est maximale, la mer était ouverte au Nord et à l'Est dans le bassin d'Errachidia-Boudnib, ce qui permit l'installation d'un raccordement entre l'Atlantique-sud et la Téthys, constituant une continuité épicontinentale peu profonde : Le "Couloir du Sahara" (DUFAURE *et al.*, 1984 ; REYMENT, 1986; REYMENT et DINGLE, 1987 ; COURVILLE *et al.*, 1991 ; NÉRAUDEAU et MATHEY, 2000).

Pendant le Turonien le bassin de Ouarzazate a été couvert par une mer dont le faciès était Atlantique, tandis que dans le bassin d'Errachidia-Boudnib les dépôts marins montrent une influence de la Téthys (FERRANDINI *et al.*, 1985 ; RHALMI, 2000 ; MEISTER et RHALMI, 2002; ETTACHFINI et ANDREU, 2004). Il existait déjà un "seuil de Tinejdad" très peu profond entre les deux bassins méridionaux particulièrement au Turonien supérieur (RHALMI, 2000). En même temps, dans le bassin d'Errachidia-Boudenib, la mer était plus profonde, arrivant de l'est et du nord-est, et plusieurs impulsions transgressives se sont produites.

Plus tard, pendant le Sénonien (88-65 MA), un nouveau golfe transgressif a envahi le bassin de Ouarzazate (CHOURBERT et SALVAN, 1950 ; GAUTHIER, 1952 ; CHOURBERT et FAURE-MURET, 1962 ; ALGOUTI, 1999).

En revanche, selon Choubert et FAURE-MURET (1962), le bassin oriental d'Errachidia-Boudnib a seulement subi l'influence marine du nord-orientale jusqu'à la région d'Errachidia pendant le Coniacien (88-87 MA), à la base du Sénonien continental. Suite à ces événements, le Sénonien marin dans le bassin d'Errachidia-Boudnib n'a pas été conservé jusqu'à nos jours. Néanmoins, des données paléogéographiques (CHOURBERT et FAURE-MURET, 1962) ont prouvé que la mer a en particulier atteint la région de Tadighoust pendant le Sénonien, environ 50

kilomètres au nord-ouest de Zouala et la Vallée de Ziz dans le Tafilalt. À Tadighoust (ETTACHFINI et ANDREU, 2004) les recherches sur la colonne stratigraphique ont prouvé la présence de Foraminifères et d'Ostracodes benthiques provenant d'une origine marine certaine et datés du Santonien (ANDREU *et al.*, 1998). En outre, plusieurs cartes paléogéographiques avant le Coniacien (REYMENT, 1980, 1986 ; REYMENT et DINGLE, 1987) font état d'un golfe marin occidental couvrant partiellement la partie nord-est du Bassin Errachidia- Boudnib et de type épicontinental établissant une communication trans-Saharienne entre l'atlantique méridional et la Tethys. Vers la fin du Coniacien, il y avait une phase régressive. Ainsi les transgressions n'ont atteint que le bassin d'Errachidia-Boudnib-Erfoud.

2°/ Haut-Atlas de Marrakech

Le Haut-Atlas marocain a connu une évolution lente qui s'est déroulée en plusieurs étapes, comportant une série de transgressions-régressions (MICHARD, 1976).

Pendant le Trias, l'ensemble des terrains hercyniens plissés a subi une érosion qui a transformé cette chaîne en une plateforme sur laquelle se jouera l'histoire des mers secondaire et tertiaires.

La deuxième période débute avec le Lias et se termine au Jurassique supérieur. Dès le début, une transgression venant du nord est et de l'Est envahit la partie orientale du Haut-Atlas puis la mer se retire progressivement pour la quitter au Bathonien moyen. Cette période se caractérise par de véritables plissements atlasiques, cœur des structures anticlinales du Haut-Atlas central (CHOUBERT et FAURE-MURET, 1962).

Au cours du Crétacé, la mer atlasique envahit le Haut-Atlas occidental et central. Ce dernier ne se manifeste encore que par des îles haut-fonds. Tout le Haut Atlas ainsi que le Haouz sont envahis progressivement par la mer Cénomano-Turonienne, alors que les Jbilet demeurent émergées.

Au Sénonien, le Haut-Atlas commence à s'individualiser, mais ne forme pas encore des reliefs très élevés, car la mer éocène pourra le franchir, une dernière fois dans la région du Telouet et gagner le bassin de Ouarzazat qui s'étend à l'Est jusqu'à Tinejdad, entre Guelmim et Tinghir.

La phase suivante, qui s'est produite à la fin de l'Oligocène a été l'une des plus importantes. Un plissement affecte alors l'ensemble du Haut-Atlas, soulevant surtout le matériel des fosses jurassiques et leurs bordures (BUSSON, 1969).

Après l'Oligocène, plusieurs cycles d'érosion-sédimentation se sont succédés et se poursuivent durant le Pliocène, créant des voûtes anticlinales que l'érosion a immédiatement attaquées (MICHARD, 1976), et entraînant la formation des vallées du Haut-Atlas, ainsi que l'accumulation des produits de démantèlement de la chaîne atlasique dans la plaine du Haouz (CHOUBERT et FAURE-MURET, 1962).

III- Origine des Crustacés Péracarides : Biogéographie historique

1- les Amphipodes Metacrangonyctidae

Une trentaine d'espèces de Metacrangonyctidae ont été récolté à ce jour, dans différentes régions du Maroc (BOUTIN, 1993 ; MESSOULI, 1994). Aucune ne provient des eaux superficielles, marines ou continentales ; toutes vivent dans les eaux souterraines continentales. La majorité des spécialistes attribuent, à l'ensemble des Amphipodes une origine marine (STOCK, 1986).

Les Metacrangonyctidae paraissent phylogénétiquement proches à la famille des Hadziidae. Cette dernière renferme encore un grand nombre de formes marines ou littorales.

L'origine marine des Metacrangonyctidae étant admise, son emplacement et son évolution dans les eaux souterraines seraient liés aux différentes transgressions qu'a connues le Maroc. Lors de la grande transgression du Mésozoïque (transgression céno-mano-turonienne), un ancêtre déjà adapté à la vie littorale, fouisseuse ou interstitielle, a pu être à l'origine du genre *Metacrangonyx*.

Les différentes espèces du genre *Metacrangonyx* se rencontrent dans des régions qui ont été définitivement émergées à la fin du Crétacé, lors de la régression de la mer céno-mano-turonienne dont les limites des rivages ont été établies par ROCH, 1950, CHOUBERT et FAURE-MURET, 1962 ; MICHARD, 1976 ; SALVAN, 1986 ; TRAPPE, 1991. Aussi l'arrivée des Metacrangonyctidae, leur installation dans les eaux souterraines continentales, puis leur diversification apparaissent-elles comme le résultat d'un 'Modèle Biphase de colonisation et d'évolution' (BOUTIN et COINEAU, 1990 ; COINEAU et BOUTIN, 1992) comportant la 'Régression Model Evolution' proposé par STOCK (1977 et 1980), modèles qui ont fonctionné à plusieurs reprises, puisque l'origine des espèces du genre *Metacrangonyx* peut être rapportée au cycles de transgressions-régressions marines du Crétacé moyen et supérieur

(Cénomano-Turonien et Sénonien) qui se sont produits entre 96 et 65 millions d'années avant le présent.

L'aire de distribution des espèces de *Metacrangonyx* est nettement plus vaste que celle du genre *Longipodacrangonyx*. Plusieurs centaines de stations sont connues, elles se situent à l'intérieur de l'aire occupée par la mer cénomano-turonienne. La répartition de certaines espèces du genre *Metacrangonyx* dans la zone aval des oueds, en dehors de la zone occupée par la mer éocène, implique une colonisation passive par dérive le long des cours d'eau du Haut-Atlas.

2- Les Isopodes

a- Les Cirolanides

L'origine marine des Cirolanides est admise par l'ensemble des spécialistes (RCOVITZA, 1912 ; MONOD, 1930 ; JEANNEL, 1943 ; BOUTIN, 1993), d'une part parce que la famille des Cirolanides groupe beaucoup d'espèces marines épibenthiques que d'espèces d'eau douce (BOTOSANEANU *et al.*, 1985) et d'autre part parce que toutes les espèces de *Typhlocirolana* et *Maroccolana* peuplent des régions qui ont été, à une période donnée, submergées par la mer, au Secondaire ou au Tertiaire.

Comme cela a été signalé par BOUTIN et IDBENNACER (1989) et BOUTIN (1993) on remarque que toutes les stations connues au Maroc se trouvent dans des régions qui ont été recouvertes par la mer lors des grandes transgressions du Crétacé et du Tertiaire.

Nous retenons, comme BOUTIN (1993) le scénario de l'histoire des Cirolanides qui comporte trois phases principales (figure 51).

- pendant la régression marine du Turonien, qui est l'occasion d'une première 'transition horizontale', des thalassostygobiontes littoraux peuplent progressivement les nappes phréatiques des régions émergées. Leurs descendant actuels sont les espèces du 'groupe fontis' comme *Typhlocirolana haouzensis* et celle du 'groupe leptura' comme *Typhlocirolana leptura*, autre espèce, qui se rencontre actuellement dans la plaine du Haouz et le piémont du Haut-Atlas. Dans les régions qui n'ont pas été bouleversées par les phénomènes orogéniques, les Cirolanides ont évolué vers les espèces actuelles du 'groupe fontis' ; dans les régions affectées par l'orogénèse atlasiques, l'évolution plus marquée, plus rapide, a conduit aux espèces du 'groupe leptura'.

Pendant la régression suivante au Sénonien, des thalassostygobiontes un peu plus évolués, parce qu'ils ont mené plus longtemps une vie interstitielle dans le milieu littoral qui est plus instable que les nappes continentales (BOUTIN et COINEAU, 1991), vont se mettre sur place et

donner comme descendants actuels des espèces du groupes *zatensis* dont *Typhlocirolana zatensis* et *Typhlocirolana ourikensis*.

Pendant l'Eocène, la mer a pénétré pour la dernière fois profondément à l'intérieur du Maroc, notamment dans l'emplacement actuel de la plaine du Haouz et du Haut-Atlas, où le genre *Marocolana* a été trouvé. Les transgressions marines ultérieures n'ont affecté que les régions côtières du Maroc et il ne semble pas concevable (BOUTIN et COINEAU, 1990 ; COINEAU et BOUTIN, 1992) que les Crustacés interstitiels qui auraient colonisé les eaux souterraines sur les marges du pays se rencontrent aujourd'hui à des centaines de kilomètres dans l'intérieur. Il est donc probable que des populations ancestrales de Cirolanides marins ont pu se mettre en place, suivant un modèle biphasé de colonisation et d'évolution (BOUTIN et COINEAU, 1990 ; NOTENBOOM, 1991) pendant les régressions marines du Crétacé supérieur, et ainsi être à l'origine des espèces du *Typhlocirolana*, puis à nouveau pendant la régression du Lutétien et engendrer alors les espèces du genre *Marocolana*.

Nous pensons alors, que la nouvelle espèce *Typhlocirolana n.sp.* récoltée en abondance dans les eaux souterraines de la région d'Errachidia, dérive de la même encastré que *Typhlocirolana haouzensis* et qui a colonisé les deux régions Tafilalet et l'Haouz avants même l'apparition du Haut-Atlas. La formation du Haut-Atlas constitué une barrière entre les deux populations du Sud et du Nord. Les érosions qui ont contribué à l'apparition des cours d'eau de part et d'autre ont favorisé l'évolution des deux populations chacune à des conditions différentes de l'autre.

Cette hypothèse ne semble cependant pas en accord avec les résultats obtenus à l'aide d'une analyse moléculaire (BARRATI *et al.*, 2004). En effet les espèces du genre *Typhlocirolana* forment un clade monophylétique et groupe frère du genre *Marocolana* (figure 52), alors que les données basées sur la biogéographie font apparaître le genre *Typhlocirolana* comme paraphylétique

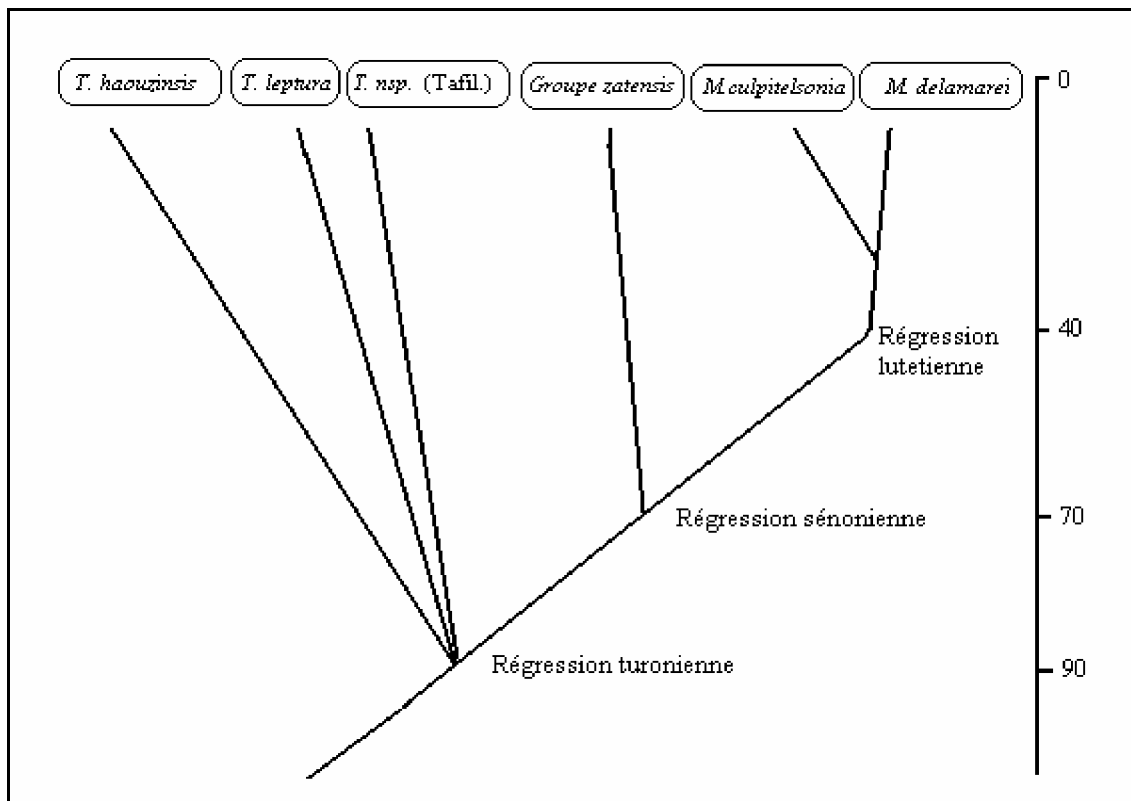


Figure 51: hypothèse des relations phylogénétiques entre les principaux groupes de Cirolanides stygobies des genres *Typhlocirolana* et *Marocolana*. *T. nsp.* (Tafil.) récoltée dans les eaux souterraines de la plaine du Tafilalet.

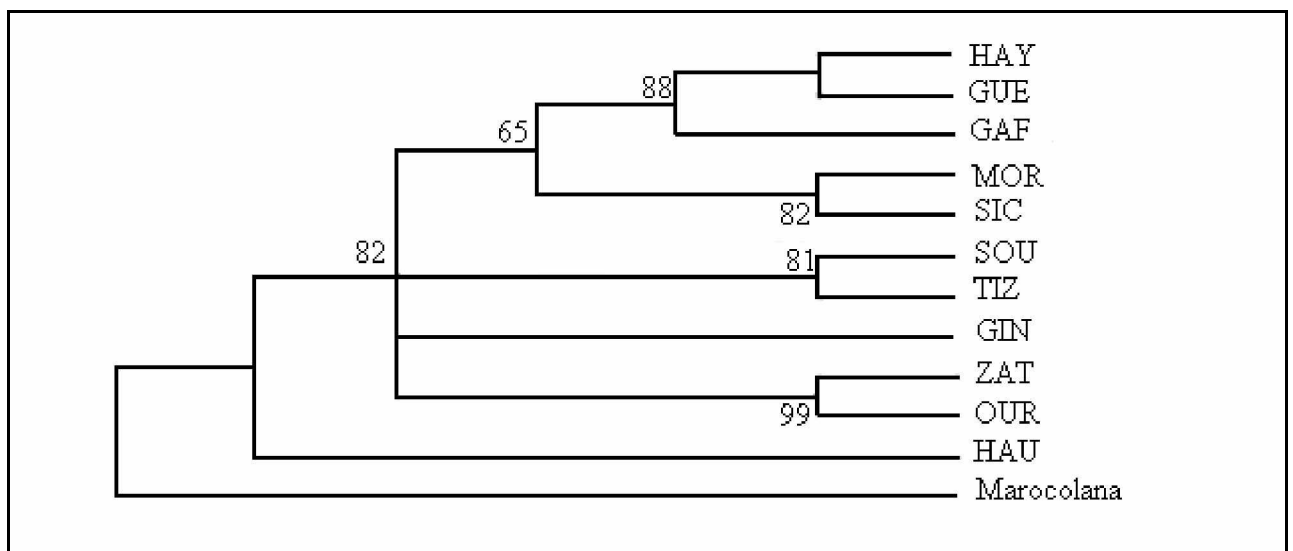


Figure 52: Arbre phylogénétique obtenu à partir du séquençage 12S rRNA. CI = 0,72 ; RI = 0,65; TL = 252. BARRATI *et al.* 2004.

b- Les Stenasellidae : *Magniezia*

La famille des Stenasellidae est largement distribuée dans le monde (BOTOSANEANU, COINEAU *et al.*, 1994), en Europe méridionale et en Asie jusqu'à l'extrême Orient et en Amérique du Nord (Mexique, Texas). En Afrique, le genre *Magniezia* est connu par plusieurs espèces de la zone éthiopienne (Côte d'Ivoire, Guinée, Sénégal, Mali).

Au Maroc, cette famille est représentée par le genre *Magniezia*. Depuis que MAGNIEZ (1978) a décrit l'espèce *Magniezia gerdei*, récoltée dans les eaux souterraines de la grotte Kehf Aziza près de Boudnib, plusieurs autres populations ont été signalées de part et d'autre du Haut-Atlas. Il apparaît donc que l'ancêtre du *Magniezia gerdei* a pu coloniser les eaux souterraines marocaines avant même la création du Haut-Atlas.

En raison des affinités morphologiques et phylogénétiques entre les populations de *Magniezia* qui vivent de part et d'autre du Haut-Atlas, il ressort que très certainement les populations ancestrales étaient installées dans les eaux souterraines de l'Afrique non seulement avant les changements climatiques qui ont entraîné la formation du Sahara au cours du Quaternaire, mais aussi avant l'orogénèse atlasique qui a commencé à la fin du Lutétien, période à laquelle une ligne de partage des eaux est apparue le long de la zone axiale du Haut-Atlas.

C- Les Microparasellides

Au Maroc comme ailleurs, toutes les espèces continentales vivent dans les régions qui ont subi une ou plusieurs transgressions de la Téthys.

Les événements paléogéographiques qui ont participé à l'histoire de ces régions et qui pourraient être responsables de divergences évolutives par vicariance permettent de formuler des hypothèses expliquant l'origine des espèces de *Microcharon* du Haut-Atlas et leur répartition. En effet, le genre *Microcharon* d'ancêtre marins (DELAMARE DEBOUTTEVILLE, 1960 ; STOCK, 1977 ; COINEAU, 1986 et 1992). Diverses espèces vivent d'ailleurs encore dans les sables littoraux et marins peu profonds. Les ancêtres des espèces vivant actuellement dans les eaux souterraines continentales se seraient établis dans les eaux douces souterraines interstitielles au cours des régressions marines qui se sont produites à diverses époques géologiques. Là encore le modèle biphasé de colonisation et d'évolution (COINEAU, 1985 ; COINEAU et BOUTIN, 1992) incluant le 'Regression Model Evolution' (STOCK, 1977 et 1980) détaille les deux étapes suivies par les ancêtres marins épibenthiques pour devenir des organismes interstitielles dulcicoles.

- ◆ Le genre *Microcharon* dans le sud du Haut-Atlas : le Tafilalet

Microcharon oubrahimae se rencontre dans les eaux interstitielles de l'Oued Guir à Tazougert, 40 kilomètres à l'est d'Errachidia. L'espèce habite également les eaux souterraines de l'Oued Ziz, 20 km au sud d'Errachidia. Par conséquent, elle est distribuée dans le bassin Errachidia-Boudnib-Erfoud (Er.B.E) dans le fossé pré-Africain entre le Haut-Atlas et partie orientale l'Anti-Atlas au sud-est du Maroc (CHOUBERT et FAURE-MURET, 1962 ; COMBE, 1977 ; CHAMAYOU et RUHARD, 1977 ; RHALMI, 2000). C'est la première fois que le genre *Microcharon* est découvert au sud du Haut-Atlas.

Dans les eaux souterraines de l'Oued Ziz, *Microcharon oubrahimae* est récoltée dans les domaines couverts successivement par le Cénomaniens et du Turonien à 50 kilomètres de Tadighoust aussi bien que dans les anciens golfes de Coniacien (CHOUBERT et FAURE-MURET, 1962). Par conséquent, les ancêtres de *Microcharon oubrahimae* ont probablement vécu aux fonds littoraux peu profonds de la mer pendant le Turonien, ou plus probablement pendant le Coniacien-Santonien.

Actuellement *Microcharon orghidani* se rencontre en Roumanie, ou son ancêtre a été installé. Nous pensons que le même ancêtre qui a vécu dans les deux extrémités Nord et Sud de Téthys a donné naissance à *Microcharon oubrahimae* qui se rencontre que dans le bassin Er.B.E après les phases de régression qui a permis à cet ancêtre de passer aux eaux littorales de la Téthys et après dans le Paratéthys, puisque l'histoire de l'évolution des espèces *Microcharon orghidani* et d'autres espèces proches (*Microcharon phlegetonis*, et *Microcharon bureschi*), est associée à l'évolution de la mer Paratéthys (COINEAU, 1994 ; GALASSI *et al.*, 1995). Il reste encore à préciser l'origine de *Microcharon oubrahimae*, s'elle dérive du Turonien ou Coniacien.

On se basant sur les affinités morphologiques de *Microcharon oubrahimae*, avec celles des espèces de la Roumanie, et aux données paléogéographiques, il apparaît que cette espèce a probablement une origine marine qui date du Sénonien qu'au Turonien.

Les caractères dérivés de ces espèces apparaissent de types récents dans les eaux douces continentales, après une longue période d'évolution dans les habitats instables littorales marines. En plus, *Microcharon oubrahimae* présente moins d'affinités phylogénétiques avec les autres espèces du genre qui se rencontrent au nord du Haut-Atlas et dans les eaux souterraines des cours d'eau atlasiques. Au contraire, *Microcharon oubrahimae* présente plus des affinités avec les espèces *Microcharon orghidani*, *Microcharon phlegetonis* et *Microcharon bureschi* qui se rencontrent dans les eaux souterraines de la Bulgarie et la Roumanie.

D'un autre côté, aucune espèce du genre n'a été signalée jusqu'à présent dans les eaux souterraines du bassin de Ouarzazate, et ce malgré les campagnes fréquentes d'échantillonnage. Dans le cas où on suppose une évolution de l'espèce *M. oubrahima* à partir d'un ancêtre provenant d'une régression Turonien, qui couvre les deux bassins (figure 53), on devrait récolter une espèce du genre dans le bassin de Ouarzazate, ce qui n'est pas le cas. Il est donc impossible d'adopter cette proposition. Alors que plusieurs espèces aquatiques souterraines ont été récoltées dans le bassin de Ouarzazate, appartiennent aux ordres d'Isopodes et d'Amphipodes stygobies. Ces derniers sont strictement d'origine Turonien et Coniacien, comme les espèces *Metacrangonyx* du groupe *panousei* (BOUTIN *et al.*, 1992). À l'inverse des régressions Turonien, le golf Sénonien (figure 53) est séparé des transgressions atlantiques à Tinghir (ALGOUTI *et al.*, 1999) et par la suite ces deux bassins ont été séparés dans la région de Tinjdad qui a constitué une limite entre les deux bassins.

D'autre part, *Microcharon oubrahima* se rencontre dans l'interstitielle des cours d'eau et cohabite avec d'autres espèces d'origine marine, comme les Amphipodes *Metacrangonyx*, les Isopodes *Typhlocirolana* et les Thermosbaenacés (BOUTIN et CALS 1985 ; BOUTIN *et al.*, 1992 ; BOUTIN, 1993 et 1994 ; MESSOULI, 1994).

À partir de ces données et d'autres plus détaillées par AÏT BOUGHROUS *et al.*, (2007), nous avons pu démontrer que l'ancêtre de la nouvelle espèce *Microcharon oubrahima* a probablement pu s'installer dans les eaux souterraines de la région du Tafilalet pendant le Coniacian-Santonian.

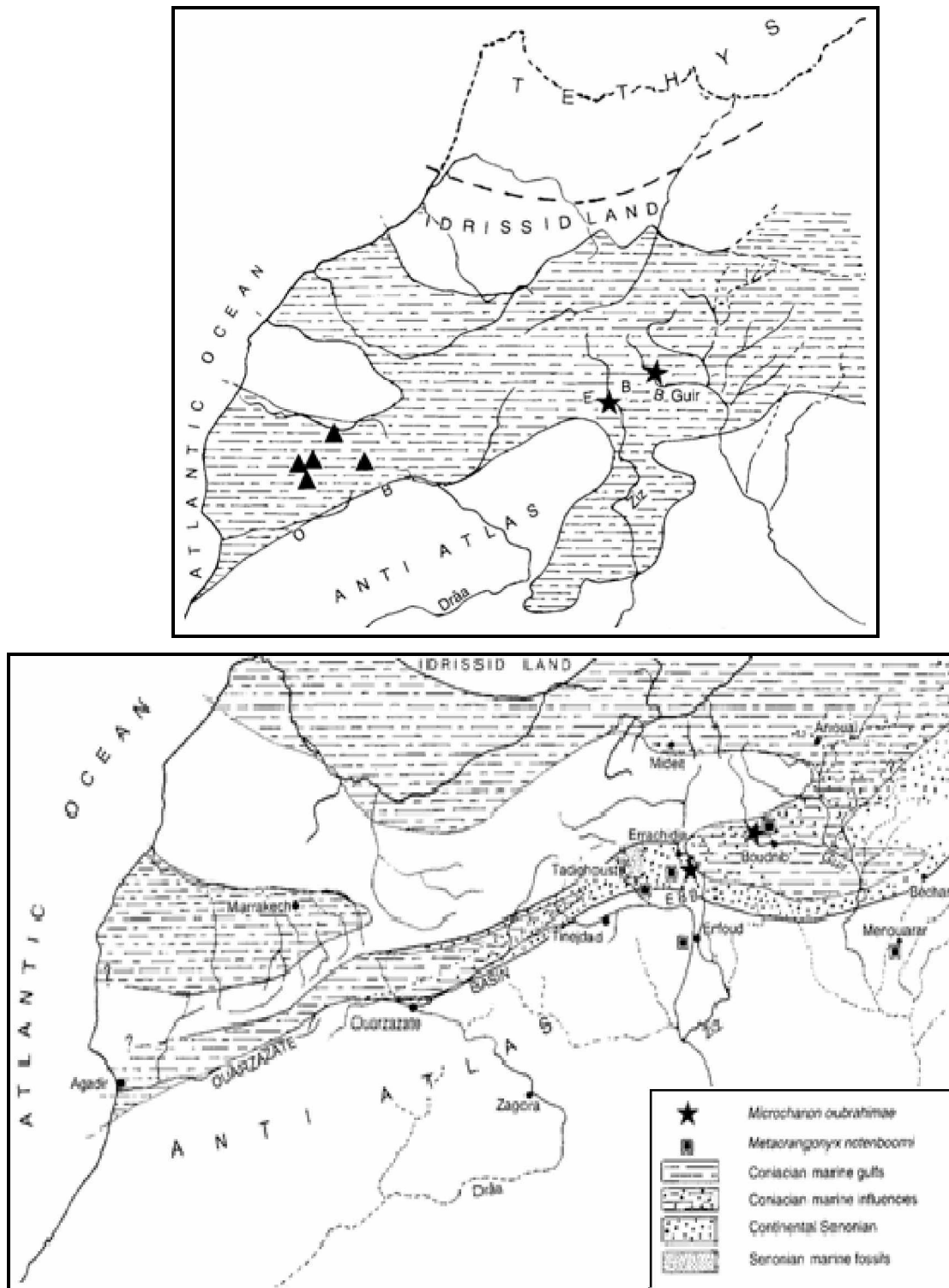


Figure 53 : En haut : limites des transgressions marines au Maroc pendant la période du Cénomanién-Turonien (CHUBERT et FAURE-MURET 1962, (modifiée) ; et distribution des espèces *Microcharon* dans le Haut-Atlas et dans le bassin Errachidia-Boudnib-Erfoud. Triangles : les espèces du groupe *messoulii* et étoiles : *Microcharon oubrahimae*. En bas, les transgressions marines au Maroc pendant la période du Sénonien et distribution de quelques espèces Crustacés stygobies actuelles récoltées dans les eaux souterraines.

◆ Le genre *Microcharon* dans le Haouz de Marrakech

Si l'on se reporte aux événements géologiques qui ont pu intervenir dans l'histoire des espèces de ce genre, on constate que les zones de l'Atlas peuplées par les espèces du groupe *messoulii* ont été recouvertes par la Téthys successivement au Cénomano-Turonien, au Sénonien, puis à l'Eocène, le golfe éocène étant le plus étroit (CHOUBERT et FAYRE-MURET, 1962 ; MICHARD, 1976). Leur ancêtre commun aurait donc pu, si on se limite à ces considérations, s'installer dans les eaux souterraines interstitielles continentales lors des régressions turoniennes, sénoniennes ou éocène, notamment à la fin de l'éocène, époque des dernières transgressions.

En ce qui concerne l'espèce *Microcharon boutini*, que nous avons récoltée dans la région de Jbilet, la première phase, c'est-à-dire la pénétration active de l'ancêtre marin commun de surface dans les sables littoraux, aurait pu s'accomplir au Mésozoïque, dès la fin du Crétacé inférieur, ou même avant. Après les larges transgressions du Cénomano-Turonien, les derniers golfs marins qui ont couvert les régions occupées par *Microcharon boutini* datent de l'Eocène (figure 53), aussi bien dans la zone située au nord des Jbilet que dans celle qui est à l'emplacement actuel du Haut-Atlas (CHOUBERT et FAURE-MURET, 1962 ; SALVAN, 1986 ; TRAPPE, 1991). Des populations déjà interstitielles et vivant sur les rives des golfs éocènes, ont pu demeurer sur place et devenir progressivement et passivement dulçaquicoles souterraines lors de l'une des régressions de la mer éocène selon le processus du 'Regression Model Evolution' décrit par STOCK (1980), aboutissant ainsi aux populations ancestrales de *Microcharon boutini*. C'est la seconde phase ou transition horizontale du 'Modèle biphasé'. Une spéciation par vicariance se produit au terme de régression lorsque le flux génique entre les populations littorales qui ont accompagné le retrait marin, et les populations du nouveau stygobionte des eaux souterraines douces (ou limnostygobiontes) restées sur place, est interrompu. Un tel scénario paléobiogéographique reconstituant l'origine, la colonisation des eaux souterraines continentales, l'histoire évolutive et la biogéographie historique a déjà été envisagé pour les espèces de *Microcharon* de France (DOLE et COINEAU, 1987), d'Italie (COINEAU *et al.*, 1992) et de l'ensemble du bassin méditerranéen (COINEAU *et al.*, 1994).

d- Thermosbaenacés

Les Thermosbaenacés sont des petits Crustacés stygobies, considérés comme des fossiles vivants, (DELAMARE DEBOUTTEVILLE, 1957 et 1960 ; DELAMARE DEBOUTTEVILLE et BOTOSANEANU, 1970 ; BOUTIN, 1998) parce qu'ils montrent, à côté des caractères de Malacostracés, un certain nombre de particularités interprétées comme des caractères

primitifs. Ces auteurs ont attribué au Monodellidae une origine qui date de la seconde moitié de Cénozoïque. Alors que MONOD (1975) envisage au contraire une origine plus ancienne 'antérieure à l'ouverture de l'Atlantique moyen'.

Selon BOUTIN et CALS (1985), la ressemblance entre les deux espèces africaines : *Monodella atlantomaroccana* du Maroc et *Monodella somala* d'Afrique orientale, et leur similitude avec l'espèce américaine *Monodella texana* du sud des USA, est un argument à l'appui de l'hypothèse de MONOD (1975).

En supposant que les affinités entre *Monodella atlantomaroccana*, *Monodella somala* et *Monodella texana* résultaient de leur descendance d'un ancêtre commun, BOUTIN (1993) envisage que la colonisation des terres par les trois espèces a dû être sensiblement synchrone dans les trois zones (Maroc, Somalie et Texas) où ces Monodelles sont présentes. Il admet donc que leur pénétration dans les eaux douces souterraines est encore plus ancienne ; elle s'est effectuée lors de la régression turonienne (produite sensiblement vers la même époque, à la fin du Mésozoïque dans les différentes zones où des Monodelles sont connues), régression qui fait suite à la grande transgression céno-mano-turonienne au cours de laquelle la Méditerranée et l'Atlantique se mêlent largement et un bras de mer traversait le Sahara du Nord vers le Sud, il y'a environs 90 millions d'années (COLLIGNON et LEFRANC, 1974).

En 1994, lors d'une révision des Thermosbaenacés, l'espèce *Monodella atlantomaroccana* est transférée par WAGNER dans le genre *Tethysbaena* et nommée, de ce fait, *Tethysbaena atlantomaroccana* pour souligner son origine téthysienne.

La preuve d'une origine relativement récente de *Tethysbaena atlantomaroccana* est apportée, selon WAGNER (1994), par les affinités morphologiques étroites entre cette espèce marocaine et celle découverte au Sud de l'Espagne *Tethysbaena tarsiensis*, elle est donc en rapport avec la crise messinienne.

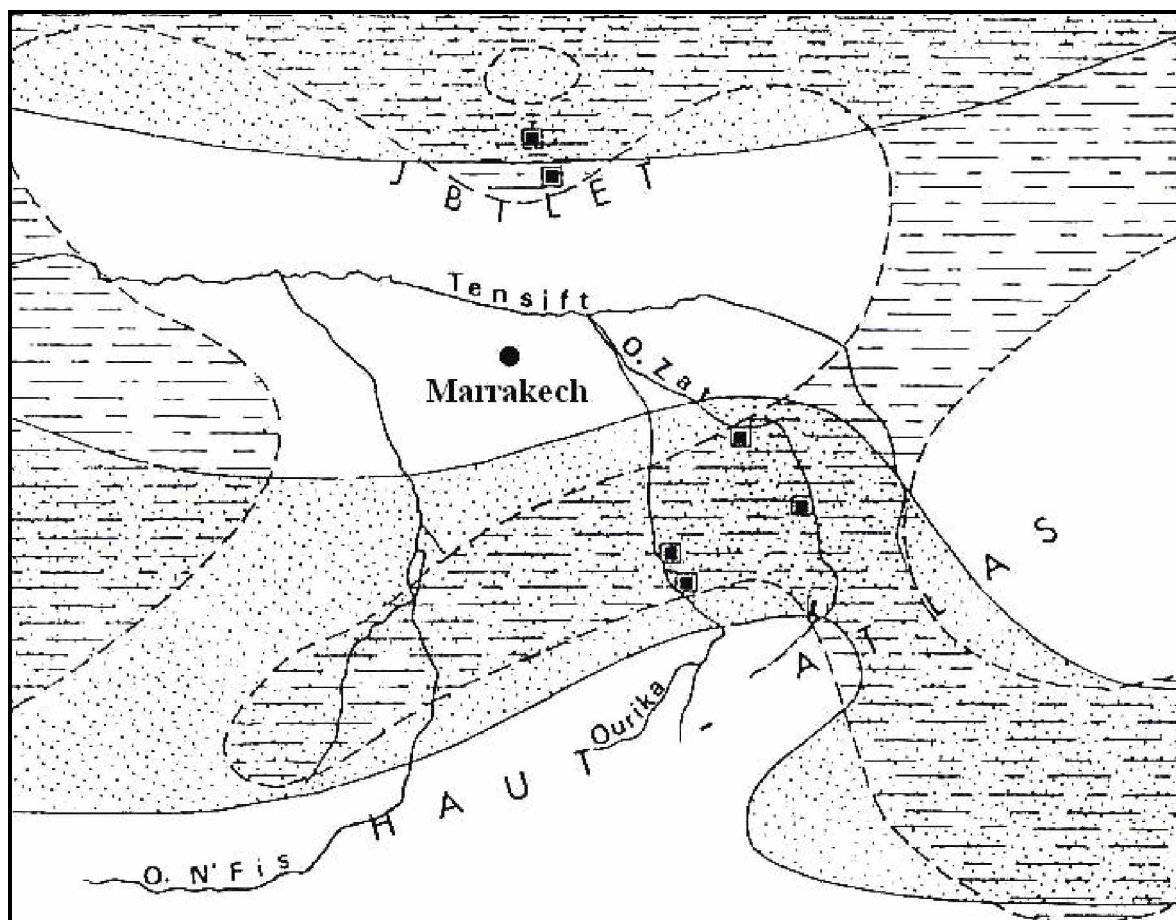


Figure 54 : Carte de la région des Jbilet, du Haouz et de la région de Marrakech, indiquant la répartition de *Microcharon boutini* et l'extension des golf éocènes (zones en pointillés) selon CHOUBERT et FAURE-MURET (1962) ; zones hachurées horizontalement selon SALVAN, 1986.

DISCUSSION GÉNÉRALE

Discussion et conclusion générale

Les eaux souterraines jouent un rôle major dans l'alimentation en eau potable de la population rurale marocaine. Elles participent aussi au développement des activités agricoles.

Dans la région du Tafilalet et celle du Haouz, les eaux souterraines sont exploitées au niveau des sources et des puits. Elles sont drainées par différentes techniques traditionnelles et modernes (Khetaras, Aghrou et les forages puissants) utilisées pour extraire les eaux des nappes pour l'irrigation des champs. Alors que les puits traditionnels, menus de motopompe ou non, sont fréquemment utilisés pour l'alimentation en eau potable.

Les sources constituent depuis longtemps des endroits sacrés, source d'eaux pérenne et symbole de vie. Elles sont généralement exploitées soit par extraction directe et sur place pour l'alimentation des populations et des cheptels ou indirecte par drainage des eaux vers les champs plus ou moins lointains à des fins agricoles. Il apparaît clairement que les eaux souterraines jouent un rôle fondamental dans la stabilité des populations rurales dans les régions arides marocaines. Elles sont donc l'objet de notre étude hydrobiologique dans les deux régions Tafilalet et l'Haouz.

L'objectif de cette étude était alors de connaître et d'analyser la structure et la distribution des peuplements aquatiques souterrains. Cette étude constitue la continuité d'un programme de recherche hydrobiologique des eaux souterraines du Maroc. Elle touche deux axes principaux :

- **Corrélation faune-qualité des eaux** : cet axe a été déjà traité à plusieurs occasions dans différentes régions marocaines BOULANOUAR (1995), YACOUBI-KHEBEZA (1996), dans la région de Marrakech, BOULAL (1988 et 2002) dans la région d'Agadir et de Tiznit ; IDBENNACER (1990) dans la région de Guelmim et FAKHER EL ABIARI, (1999) dans la région Nord. Alors que la présente étude est la première de son genre dans la région du Tafilalet. L'objectif était donc de vérifier le caractère général des corrélations faune-qualité des eaux établies par les différents auteurs déjà cités.
- **Biogéographie** des espèces : notre étude à caractère comparatif entre le nord et le sud du Haut-Atlas (Marrakech-Tafilalet), a pour but d'abord de compléter la liste de l'inventaire faunistique marocain et de connaître la composante faunistique dans la plaine du Tafilalet. D'autre part, c'est d'essayer d'expliquer la présence d'une espèce dans son cadre géographique et cela en relation avec l'histoire géologique de la région et aussi à la lumière des connaissances scientifiques et models déjà proposés.

D'ordre fondamental, ces recherches s'inscrivent dans une perspective finalisée de l'écologie souterraine, visant à comprendre la structure et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques souterrains du Maroc et de compléter les données déjà acquises.

Les études hydrobiologiques ont été réalisées sur les eaux des nappes du Haouz près de Marrakech et dans le site minier de Draâ Sfer ainsi que dans les eaux souterraines des trois vallées Ziz, Rheris et Guir de la région du Tafilalet. Elles présentent des résultats très intéressants d'ordre systématique, écologique et biogéographique. Ces derniers peuvent être valorisés pour la gestion, la préservation et l'évaluation de l'état de ces écosystèmes.

La recherche bibliographique faite sur les deux régions a montré que les ressources en eaux souterraines sont limitées et fragiles dans la région de Marrakech et elles sont encore plus influencées par les aléas climatiques dans la plaine du Tafilalet. Elles sont accessibles au niveau des puits, des sources et des sous écoulements des cours d'eaux.

De point de vue physicochimique, les eaux des puits de la région de Jbilet sont relativement minérales par rapport à la nappe du Haouz. Cette minéralisation est due à la nature géologique des terrains traversés. Ainsi, l'effet de la décharge publique sur les eaux souterraines dans la région de Jbilet est très remarquable au niveau des puits.

Les puits creusés dans l'ancienne zone d'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech présentent des eaux contaminées. Les analyses physicochimiques ont montré que les eaux de ces puits sont peu oxygénées, elles présentent des teneurs élevées en ions azotés et en orthophosphate.

À l'issue de l'étude menée sur les eaux de la nappe phréatique dans le site minier de Draâ Sfer, dans les environs de Marrakech, il apparaît que l'exploitation minière a entraîné une nette modification de la composition physico-chimique des eaux de la nappe. Ceci peut être due à une contamination probable suite à la lixiviation des rejets miniers déposés à proximité de la mine et aussi au drainage minier dans ce site. En effet, l'analyse minéralogique des résidus de la mine étudiée a montré que ces résidus sont composés de minéraux primaires (blende, pyrrhotite et pyrite) et de minéraux secondaires (Jarosite, clinocllore, quartz, soufre et sulfate de fer).

Au sud-est du Maroc, la région du Tafilalet est caractérisée par l'existence de plusieurs nappes très particulières par leurs caractéristiques morphologiques et physico-chimiques. Les hautes altitudes se caractérisent par la présence des nappes à fort thermalisme lié à la nature géologique des couches traversées par les eaux de ces nappes. Ces dernières sont

généralement accessibles à la surface du sol dans la source du Hammat Moulay Hachem et Hammat Moulay Ali Chirif, les eaux de ces sources sont généralement dures et salines et riches en sulfates.

Dans la partie médiane, au niveau de la ville d'Errachidia, la nappe est moyennement profonde, 20 à 40 m, le niveau piézométrique est très variable d'une année à l'autre en relation avec la pluviométrie est surtout des lâchers du barrage Hassan Eddakhil.

Alors que au niveau de la plaine du Tafilalet plusieurs nappes se présentent. Il s'agit d'abord de la nappe profonde artésienne qui se situe au sud de la ville d'Errachidia et dont l'accès est facile au niveau du radier d'Erfoud, puis la nappe du Tafilalet qui se caractérise par une charge minérale et une salinité très élevées. Le niveau piézométrique est généralement faible dans la plaine.

L'analyse comparative de la qualité des eaux souterraines des deux régions montre que cette qualité est altérée dans la région de l'Haouz soit par l'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech, ou par le lessivage des déchets ménagères de la décharge publique de la ville, ou encore par l'effet de l'activité minière dans le site de Draâ Sfer. La minéralisation des eaux de la nappe de Jbilet est plutôt naturelle. Alors que la plaine du Tafilalet présente des eaux thermales dans la partie amont, dures dans la partie médiane et salines dans la partie avale. La dégradation de la qualité des eaux des nappes s'accroît dans les zones immédiates de la ville d'Errachidia et encore dans les 'douars' par les fosses septiques et les puits perdus largement répandus dans la région.

D'une manière générale, il apparaît que le chimisme de l'eau souterraine subit une évolution de l'amont vers l'aval hydraulique des régions étudiées. Ce qui se traduit par un gradient croissant de la minéralisation des eaux et par des charges organiques élevées suivies par des charges bactériennes trop élevées.

Depuis lors, on peut déjà classer les sources de pollution rencontrées comme suit :

- *pollution ponctuelle*, c'est le cas des fosses septiques, des puits perdus et de la décharge publique.
- *pollution linéaire*, c'est le cas de l'épandage des eaux usées (des deux villes Errachidia et Marrakech);
- *pollution diffuse*, c'est le cas de l'activité minière dans le site de Draâ Sfer.

De point de vue biologique, les résultats obtenus sont dignes d'importance. Ainsi la richesse taxonomique est très importante pour les deux régions. Elle est composée d'espèces stygobies, qui vivent normalement dans les eaux souterraines et d'autres qualifiées d'espèces épigées présentes d'une manière accidentelle dans ces écosystèmes.

De point de vue systématique, six espèces nouvelles pour la science ont été récoltées. Il s'agit de trois Crustacés, la première est *Microcharon aubrahimae* signalée dans les eaux des puits de la région du Tafilalet et *Microcharon* sp. dans les eaux des puits de la région de Marrakech. Deux Amphipodes appartiennent au genre *Maghribidiella* dans les eaux souterraines de la région du Tafilalet dont l'étude est en cours. Enfin, deux espèces Gastéropodes du genre *Guistia*, dans les eaux souterraines de la vallée de l'Oued Ziz au sud du Haut-Atlas.

Nous avons aussi récolté une forme nouvelle du genre *Typhlocirolana* cette espèce présente des ressemblances avec *Typhlocirolana haouzensis* et de l'espèce de Tgafait. Une étude génétique est en cours pour essayer de distinguer entre ces formes.

Les Oligochètes aquatiques au Maroc, sont généralement négligés dans les études hydrobiologiques par manque de spécialiste au Maroc. À l'occasion de cette étude, nous avons récolté 7 espèces aquatiques dans les eaux souterraines des deux régions étudiées. Ainsi qu'un ensemble de formes d'Oligochètes appartenant au genre *Trichodrilus*. L'étude morphologique ne permet pas de scinder ce complexe. C'est pour cet objectif que nous proposons une prochaine étude d'ordre génétique qui sera réalisée en collaboration avec l'Institut Royale de Belgique.

Les Oligochètes aquatiques souterraines sont fortement négligés. Ainsi, avec les études paléogéographiques, nous pouvons facilement dire en quoi un crustacé Amphipode ou Isopode est adapté au milieu souterrain (on le dit « stygobie »), il est en revanche impossible de préciser actuellement pourquoi une telle espèce d'Oligochète est souterraine.

De point de vue écologique, il apparut que les espèces aquatiques souterraines reflètent fidèlement la qualité physico-chimique des eaux souterraines. Ainsi dans les eaux de bonne qualité physico-chimique, la diversité biologique est riche et diversifiée. Alors que les eaux de mauvaise qualité hébergent qu'une faune pauvre et composée d'espèces épigées.

Les Amphipodes aquatiques souterraines semblent les plus sensibles à la pollution organique de même que les espèces du genre *Microcharon* semblent être les plus sensibles à la dégradation de la qualité des eaux et à la perturbation du milieu. Les corrélations faune-qualité des eaux semblent présentées un caractère général puisque qu'ils se retrouve à nouveau à Tafilalet.

La qualité bactériologique semble moins corrélée avec la richesse faunistique. Nous avons récolté une faune aquatique souterraine diversifiée aussi bien dans les eaux des puits de bonne et de mauvaise qualité bactériologique. Des recherches bibliographiques ont montrés que les souches bactériennes pouvaient présenter une source de nutriment pour la faune stygobie (Hahn, 2006). Nous connaissons qu'une étude hydrobiologique dans ce sens est en cours de réalisation (HALLAM these en cours), et dont le but est d'éclaircir les différentes corrélations possibles de quelques Crustacés stygobies et de quelques souches bactériennes.

De pont de vue biogéographique, cette étude présente des résultats très importantes. Ainsi la faune est représentée par deux groupes d'espèces voisins dans les deux régions Tafilalet et Marrakech.

Les Amphipodes sont représentés par des espèces 'sœurs' de part et d'autre du Haut-Atlas.

Au cours de cette étude, nous avons récolté pour la première une nouvelle espèce du genre *Micrcharon* (*Microcharon oubrahima*) dans le sud du Haut-Atlas marocain, se qui a permis l'élargissent de l'aire de répartition de ce genre.

Les Gastéropodes sont représentés par les espèces du genre *Guistia* et du genre *Heideella* dans la région de Marrakech de même plusieurs espèces nouvelles inédites ont était récoltées dans la région du Tafilalet et quelques unes parmi elles attribuées au genre *Guistia* devraient appartenir à un nouveau genre (Ghaizi Comm. Pers).

À partir de l'ensemble de ces résultats, il apparaît que les écosystèmes souterrains plus au moins clos, abritent un nombre élevé d'espèces endémiques voisines. L'identification morphologique classique de ces dernières est parfois difficile, il est donc fortement recommandé de réaliser des études génétiques pour la majorité des populations récoltées de part et d'autre du Haut-Atlas marocain. Cette approche est beaucoup plus souhaitée pour les Amphipodes et les Isopodes et plus particulièrement pour les Oligochètes chez qui nous avons remarqué de très forte ressemblance entre les espèces rencontrées.

Du point de vue corrélation entre la faune et la qualité des eaux souterraines, la typologie de l'ensemble des stations de Marrakech et d'Errachidia effectuée à l'aide des paramètres abiotiques n'est pas identique à celle réalisée avec l'ensemble des espèces récoltées, ce qui implique que la faune reflète non seulement la qualité de l'eau, mais aussi le facteur biogéographique.

Annexes

Annexe 1 : Résultats des analyses bactériologiques de l'eau des puits prospectés dans la ville de Marrakech et ses environs.

Puits	M1	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
Coliformes Totaux	700	2900	3000	2100	1900	400	300	700
Coliformes fécaux	685	2775	2600	1675	1400	210	107	560
Streptocoques Totaux	600	540	490	330	220	32	12	45
CF / SF	1,14	5,14	5,31	5,08	3,36	6,56	8,92	12,44

Annexe 2 : Résultats des analyses bactériologiques de l'eau des puits prospectés dans la ville d'Errachidia.

Puits	Coliformes fécaux	E.coli	Streptocoques fécaux
Ain EL Atti	0	0	55
Azmour	5	6	12
Liberté	16	6	0
El Alam	30	60	4
Parc	550	95	25
Victoire	25	0	0
Abattoir	60	18	60
Bain Najah	12	24	22
Bostane	450	95	150
Ctouristique	150	15	0
El bassatin	900	80	200
Elmohite	0	0	0
marchée	450	130	0
Safa ain el atti	0	0	0
Sejelmassa	0	0	0
Sidi ammi	0	0	0
Tassin	0	0	0
Touchka	6	4	0

Annexe 3 : Valeurs moyennes (et écart-types) des résultats des analyses physicochimiques des eaux de la nappe d'Errachidia et ses environs.

	S1	S2	S3	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11
t °C	21 ±1,2	19 ±2,5	19 ±3	22 ±1,8	20,7 ±3,4	19,9 ±2,2	21,5 ±1,7	22,5 ±1,6	21,3 ±3,2	20 ±2,5	19 ±2,6	19,8 ±0,92	19,4 ±2,2	18,5 ±1,75
O2 mg.L⁻¹	6,90 ±1,2	4,10 ±0,9	7,35 ±0,8	7,30 ±0,25	6,15 ±0,4	6,50 ±0,32	4,90 ±0,24	6,70 ±0,3	6,45 ±0,15	6,60 ±0,5	5,35 ±0,3	5,85 ±0,34	2,40 ±0,25	5,10 ±0,13
pH	8,00 ±0,5	7,52 ±0,32	7,46 ±0,3	7,52 ±0,13	7,52 ±0,6	7,51 ±0,26	7,97 ±0,35	7,97 ±0,45	7,65 ±0,23	7,85 ±0,28	7,34 ±0,14	7,63 ±0,34	7,12 ±0,41	6,53 ±0,2
CE mS. cm⁻¹	0,39 ±0,02	2,53 ±0,01	2,13 ±0,008	0,99 ±0,04	1,63 ±0,023	1,62 ±0,012	1,70 ±0,01	1,87 ±0,04	1,36 ±0,014	2,88 ±0,013	2,23 ±0,18	1,84 ±0,011	2,47 ±0,016	10,83 ±1,1
NO3⁻ mg.L⁻¹	31,12 ±18,2	14,21 ±4,5	10,51 ±2,3	9,20 ±5,1	6,76 ±2,9	32,39 ±14,3	52,96 ±12,3	41,55 ±14,3	6,79 ±1,4	8,73 ±2,1	37,13 ±3,1	11,26 ±6,2	23,45 ±2,1	23,13 ±1,2
NO2⁻ mg.L⁻¹	2,49 ±0,01	0,68 ±0,1	0,40 ±0,03	0,71 ±0,1	1,34 ±0,6	1,86 ±0,31	3,47 ±0,21	4,59 ±0,11	1,39 ±0,17	2,73 ±0,16	2,05 ±0,09	1,89 ±0,2	0,75 ±0,04	9,60 ±0,12
NH4⁺ mg.L⁻¹	0,79 ±0,02	0,41 ±0,01	0,48 ±0,05	0,85 ±0,02	0,52 ±0,01	0,03 ±0,02	0,06 ±0,07	0,05 ±0,05	0,10 ±0,07	0,09 ±0,02	0,08 ±0,04	0,12 ±0,03	1,26 ±0,01	0,90 ±0,05
PO4³⁻ mg.L⁻¹	0,00 ±0,01	0,00 ±0,01	0,00 ±0,04	0,00 ±0,05	0,16 ±0,03	0,06 ±0,01	0,12 ±0,08	0,10 ±0,06	0,08 ±0,04	0,18 ±0,02	0,09 ±0,05	0,15 ±0,07	0,00 ±0,02	0,00 ±0,00
CaCo3 mg.L⁻¹	360,00 ±21,8	636,00 ±33,2	744,00 ±51,2	640,00 ±35	402,00 ±41,2	558,00 ±52,14	504 ±19,3	680 ±45,3	558 ±65,2	720 ±28,7	650 ±34,8	692 ±60,5	1760 ±35,2	6200 ±28,9
K⁺ mg.L⁻¹	3,45 ±0,9	3,40 ±0,14	4,00 ±0,2	3,75 ±0,08	3,29 ±0,24	3,29 ±0,32	3,14 ±0,15	2,55 ±0,15	3,16 ±0,31	3,43 ±0,13	4,06 ±0,15	2,85 ±0,21	3,14 ±0,31	2,84 ±0,15
Na⁺ mg.L⁻¹	88,64 ±12,5	120,00 ±21,3	140,00 ±6,5	98,75 ±14,2	71,03 ±9,8	72,65 ±14,2	35,30 ±13,1	32,06 ±12,8	77,97 ±14,2	71,58 ±14,3	94,49 ±17,2	70,34 ±15,4	98,14 ±12,2	112 ±19
SO4²⁻ mg.L⁻¹	82,32 ±7,5	155,17 ±8,9	140,12 ±6,5	107,76 ±7,4	120,85 ±14,2	237,95 ±18,7	159,38 ±20,1	269,86 ±34,5	208,07 ±17,2	254,05 ±24,1	208,82 ±20,6	255,11 ±19,9	68,47 ±14,8	106,25 ±15,4
TAC (HCO3⁻)	273,23 ±25,6	195,00 ±14,8	395,30 ±23	265,45 ±19,2	274,63 ±25,5	235,04 ±36,4	414,80 ±45,1	200,08 ±15,4	397,72 ±16,8	190,40 ±24,5	473,36 ±45,12	383,52 ±15,36	287,24 ±35,14	316,8 ±46,3
Ca²⁺ mg.L⁻¹	55,93 ±14,58	95,11 ±17,8	55,34 ±17,3	63,04 ±15,12	72,14 ±16,35	123,45 ±18,9	120,24 ±14,5	142,68 ±17,4	121,04 ±18,4	124,00 ±21,3	152,30 ±25,4	153,11 ±21,1	8,93 ±12,4	6,39 ±3,15
Mg²⁺ mg.L⁻¹	304,07 ±41,5	540,89 ±23,5	480,76 ±14,6	576,96 ±47,5	329,86 ±16,15	434,55 ±14,25	384,10 ±28,5	537,32 ±17,6	436,96 ±42,1	596,00 ±41,4	497,70 ±25,5	538,89 ±46,3	1751,07 ±47,8	6193,61 ±66,4
Cl⁻ mg.L⁻¹	794,16 ±31,1	487,01 ±25,8	602,19 ±19,2	857,27 ±27,8	504,10 ±35,6	227,20 ±17,5	383,40 ±40,5	340,80 ±31,2	198,80 ±15,4	752,60 ±29,5	312,40 ±24,7	411,80 ±47,5	1267,45 ±47,5	907,75 ±35,5

Annexe 4 : Valeurs moyennes des résultats des analyses physicochimiques des eaux de la nappe de Marrakech et ses environs.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
t°C	19 ±2,5	24 ±**	21 ±4,8	21 ±3,1	22 ±6	24 ±5,6	19 ±1,8	19 ±1,1	23 ±1,3	21 ±1
O2 mg.L ⁻¹	6,2 ±0,3	6,5 ±0,2	6,9 ±0,5	6,7 ±0,35	6,5 ±0,4	5,4 ±0,7	5,9 ±0,34	6,6 ±0,4	6,0 ±0,9	5,0 ±0,7
pH	7,5 ± 0,1	7,5 ± 0,6	7,90 ± 0,21	7,97 ± 0,24	7,7 ± 0,12	7,3 ± 0,15	7,6 ± 0,15	7,9 ± 0,14	7,3 ± 0,06	7,4 ± 0,33
CE mS. cm ⁻¹	3,8 ± 0,5	3,6 ± 0,7	6,53 ± 0,7	1,6 ± 0,8	2,3 ± 0,1	2,4 ± 0,4	2,6 ± 0,5	3 ± 0,3	2,4 ± 0,06	1,7 ± 0,24
NO3 ⁻ m.L ⁻¹	6,8 ± 5,47	12,4 ± 10,2	74,3 ± 15,3	31,55 ± 13,3	6,8 ± 5,14	17,1 ± 10,11	11,3 ± 12,5	8,7 ± 4,3	13,8 ± 4,1	6,2 ± 3,2
NO2 ⁻ mg.L ⁻¹	1,3 ± 0,05	1,9 ± 0,06	3,5 ± 0,02	4,6 ± 0,12	1,4 ± 0,17	2,0 ± 0,18	1,9 ± 0,1	2,7 ± 0,11	1,2 ± 0,3	2,0 ± 0,13
NH4 ⁺ mg.L ⁻¹	0,5 ± 0,02	0,0 ± 0,03	0,06 ± 0,05	0,05 ± 0,01	0,1 ± 0,08	0,1 ± 0,06	0,1 ± 0,01	0,1 ± 0,03	0,0 ± 0,01	0,0 ± 0,06
PO4 ³⁻ mg.L ⁻¹	0,2 ± 0,01	0,1 ± 0,09	0,12 ± 0,03	0,10 ± 0,05	0,1 ± 0,02	0,1 ± 0,06	0,1 ± 0,01	0,2 ± 0,03	0,0 ± 0,06	0,0 ± 0,07
CaCO3 mg.L ⁻¹	620,0 ± 20	558,0 ± 80	520 ± 29,4	680 ± 68,1	558,0 ± 49,2	650,0 ± 92	692,0 ± 68	720,0 ± 130	504,0 ± 66,6	732,0 ± 113,3
K ⁺ mg.L ⁻¹	3,3 ± 0,7	3,3 ± 0,35	3,1 ± 0,4	2,6 ± 0,61	3,2 ± 0,5	4,1 ± 0,2	2,9 ± 0,22	3,4 ± 0,29	4,0 ± 0,7	3,4 ± 0,45
Na ⁺ mg.L ⁻¹	71,0 ± 5,4	72,7 ± 9,2	35,3 ± 7,6	32,1 ± 9,3	78,0 ± 10,1	94,5 ± 6,5	70,3 ± 3,9	71,6 ± 4,7	140,0 ± 10	120,0 ± 11,2
SO4 ²⁻ mg.L ⁻¹	120,9 ± 33,4	269,9 ± 50,2	159,4 ± 51,4	237,9 ± 27,9	208,1 ± 17,2	208,8 ± 55	255,1 ± 43,2	254,1 ± 60,1	171,7 ± 50,3	241,1 ± 63
TAC mg.L ⁻¹ (HCO3 ⁻)	274,6 ± 2,47	235,0 ± 30,3	414,8 ± 50,1	200,1 ± 25	397,7 ± 19,2	473,4 ± 29,4	383,5 ± 27,1	190,4 ± 19,2	395,3 ± 32,1	195,2 ± 34,5
Ca2 ⁺ mg.L ⁻¹	109,9 ± 25,2	123,4 ± 40,6	169,9 ± 32,9	142,7 ± 19,3	121,0 ± 44,3	152,3 ± 36,9	153,1 ± 36,7	124,0 ± 14,1	104,2 ± 17,4	184,4 ± 36,8
Mg2 ⁺ mg.L ⁻¹	234,4 ± 48,4	117,8 ± 12,25	485,1 ± 89,9	155,1 ± 150,5	138,33 ± 178,8	127,63 ± 234,7	214,57 ± 36,5	249,07 ± 36,6	154,9 ± 35,3	94,25 ± 22,3
Cl ⁻ mg.L ⁻¹	724,1 ± 91,3	894,6 ± 86,1	1820,5 ± 48,2	750,6 ± 54,3	365,6 ± 84,4	337,25 ± 28,4	487,5 ± 93,1	459,1 ± 84,7	426 ± 60,7	244,95 ± 31,6

Annexe 5 : Caractéristiques physico-chimiques de l'eau des puits étudiés dans la région de Draâ Sfer (valeurs moyennes des paramètres et écarts-types).

	P1	P2	P3	P4	P 5	P 6	P 7
pH	7,26 ± 0,16	7,36 ± 0,27	6,79 ± 0,29	6,79 ± 0,30	6,64 ± 0,23	7,09 ± 0,53	7,03 ± 0,19
CE mS.cm⁻¹	1,77 ± 0,27	2,00 ± 0,32	18,42 ± 2,71	14,88 ± 3,54	10,01 ± 0,67	6,43 ± 0,23	2,62 ± 0,11
T°C	22,18 ± 4,98	23,86 ± 1,83	22,32 ± 1,85	24,42 ± 4,48	22,75 ± 0,97	23,03 ± 2,46	24,25 ± 1,48
O₂ dis mg.L⁻¹	6,03 ± 2,63	4,64 ± 1,95	4,48 ± 2,18	5,08 ± 0,40	5,10 ± 0,53	4,93 ± 0,81	5,00 ± 0,10
SO₄²⁻ mg.L⁻¹	118,69 ± 183,93	201,43 ± 58,92	547,93 ± 97,43	617,35 ± 89,53	317,97 ± 56,85	327,64 ± 34,79	149,73 ± 34,28
Cl⁻ mg.L⁻¹	359,42 ± 47,55	442,50 ± 113,74	7674,75 ± 3691,04	5120,67 ± 1443,18	3425,75 ± 297,72	1970,25 ± 106,50	674,50 ± 40,99
Na⁺ mg.L⁻¹	135,83 ± 110,152	166,94 ± 116,36	2747,75 ± 1911,85	1583,97 ± 1262,8	422,02 ± 136,76	258,42 ± 98,27	190,32 ± 103,47
Ca²⁺ mg.L⁻¹	285,77 ± 174,04	300,00 ± 173,21	1684,77 ± 411,5	1711,80 ± 396,81	1347,90 ± 167,62	959,23 ± 374,15	403,13 ± 215,78
Mg²⁺ mg.L⁻¹	21,97 ± 17,44	32,33 ± 28,29	270,23 ± 177,48	333,70 ± 234	263,33 ± 66,18	193,20 ± 65,38	59,43 ± 13,94
K⁺ mg.L⁻¹	1,20 ± 0,70	2,00 ± 0,64	2,49 ± 1,33	1,57 ± 0,62	1,45 ± 0,22	1,25 ± 0,33	1,05 ± 0,15
Zn²⁺ µg. L⁻¹	358,75 ± 157,33	1340 ± 785,93	1259,17 ± 1914,66	471,67 ± 460	124,17 ± 38,43	479,17 ± 380,33	285,00 ± 65,38
Cu²⁺ µg. L⁻¹	113,33 ± 68,85	94,16 ± 48,5	106,67 ± 158,79	25 ± 30,72	25 ± 24,75	45 ± 39,051	31,25 ± 1,77
Fe mg.L⁻¹	14,58 ± 3,47	25,05 ± 24,33	5,35 ± 1,6	3,10 ± 0,29	3,09 ± 0,99	8,45 ± 4,03	4,89 ± 1,21
Cd²⁺ µg. L⁻¹	1,68 ± 0,74	2,01 ± 1,159	2,05 ± 1	1,82 ± 2,21	1,133 ± 1,07	1,603 ± 0,83	1,613 ± 0,11
Pb µg. L⁻¹	271,67 ± 91,7	280,83 ± 249,78	340,83 ± 219,38	308,33 ± 275,82	184,17 ± 166,38	145,83 ± 34,49	237,50 ± 137,89

Références

Bibliographiques

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR 1983.** Association française de normalisation: Eaux, méthodes d'essai, 2^{ème} édition, Paris.
- AÏT BOUGHROUS A., BOULANOUAR M., YACOUBI M. et COINEAU N., 2007.** The first *Microcharon* (Crustacea, Isopoda, Microparasellidae) from the Moroccan North Saharan Platform. Phylogeny, origin and palaeobiogeography. *Contributions to Zoology*, 76,1: 19-32.
- AJAKANE A., 1988.** Étude hydrobiologique du bassin versant de l'Oued N'Fis (Haut-Atlas marocain). Biotypologie, Dynamique saisonnière, Impact de l'assèchement sur les communautés benthiques. Thèse D.E.S. Fac. Sci. Marrakech, 188p.
- ALGUTI A. 1999.** Le Sénonien (Coniacien, Santonien, Campanien et Maastrichtien) du Haut-Atlas occidental (Maroc): sédimentologie, stratigraphie séquentielle, biostratigraphie et évolution géodynamique. Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 418p.
- ALGUTI A., ALGUTI A. et TAJ-EDDINE K., 1999.** Le Sénonien du Haut-Atlas occidental, Maroc: sédimentologie, analyse séquentielle et paléogéographie. *Journal of African Earth Science*, 29, 4: 643-658.
- ALLEN M.J. et GELDREICH E.E., 1975.** Bactériological criteria for groundwater quality. *Groundwater*, 13: 45-51.
- AMORAS C. et PETTS G.E., 1993.** Hydrosystèmes fluviaux. Éditions Masson, Paris.
- ANDREU B., BOUTCHICH K. et CHBANI B., 1998.** Nouvelles espèces d'Ostracodes du Coniacien-Santonien et Maastrichtien du bassin d'Essaouira (Atlas Atlantique, Maroc). *Revue de Micropaléontologie*, 41, 2: 91-106.
- ANGELIER E., 1962.** Remarques sur la répartition de la faune dans le milieu interstitiel hyporéique. *Zoologischer Anzeiger*, 168-170.
- ANONYME, 2000.** Direction Régionale d'Hydraulique à Errachidia : Ziz, Gheris et Guir. Rapport annuel, 182p.
- BADRI A., 1993.** Influence des crues sur les écosystèmes lotiques du Haut-Atlas. Étude des perturbations et des mécanismes de recolonisation à travers les peuplements d'algues et d'invertébrés. Thèse doctorat d'État, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, 192p.
- BAKALOWICZ M., 1974.** Géochimie des eaux aquifères karstiques. I. Relation entre minéralisation et conductivité. *Ann. Spéléol.*, 29, 2 : 267– 282.
- BAKALOWICZ M. et AMINOT A., 1974.** Géochimie des eaux aquifères karstiques. III. Premiers résultats obtenus sur le système karstique du Baget durant le cycle hydrologique 1973. *Ann. Spéléol.*, 29, 4: 484 -493.
- BARATTI M., BURCHI A., MESSANA G. et YACOUBI-KHEBIZA M., 1999.** Inferring phylogenetic history of five taxa of the genus *Typhlocirolana* (Isopoda, Cirolanidae) by 12S sequence preliminary data. *Mém. Biospéologie.*, 16: 59-64.
- BARATTI M., YACOUBI-KHEBIZA M. et MESSANA G., 2004.** Microevolutionary processes in the stygobitic genus *Typhlocirolana* (Isopoda Flabellifera Cirolanidae) as inferred by partial 12S and 16S rDNA sequences. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 42: 27-32.

- BARBIER J., 2005.** Altitude et géochimie des eaux de source, Nord-Ouest du Massif central, France. *C. R. Geoscience*, 337: 763–768
- BARBAULT R., 1993.** Une approche écologique de la biodiversité. *Nature-Sciences-Sociétés*, 1: 322-329.
- BAROUDI M., 1987.** Contribution à l'étude des Oligochètes : I- Étude taxonomique de quelques genres d'Enchytraeida. II- Étude faunistique des Oligochètes aquatiques du Maroc. Thèse doct. 3^{ème} cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse, 256p.
- BEN ABBAS TAARJI R., 1986.** Paléogéographie et stygobiologie dans le bassin hydrogéologique d'Essaouira-Chichaoua (Maroc). Mem. C.E.A., Université Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech. 73p.
- BENAZOUZ A., 1983.** Recherche de la faune interstitielle dans la vallée de l'Oued Gheris (versant sud du Haut-Atlas Marocain). Mém. C.E.A., Université Cad Ayyad ; Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, 28p.
- BERNERT G. et PROST J.P., 1975.** Le Haouz de Marrakech et le bassin de Mjjate. In « Ressources en eau du Maroc Atlantique ». *Ed. Serv. Géol. Du Maroc*, Rabat, 2: 399-432.
- BOSCA C., 2002.** Groundwater law and administration of sustainable development, Mediterranean. *Magazine Science, training & Technology*, 13-17.
- BOTOSANEANU L., BOUTIN C. et HENRY J.-P., 1985.** Deux remarquables Cirolanides stygobies nouveaux du Maroc et de Rhodes. *Stygologia*, 1, 2 : 186-207.
- BOULAL M., 1984.** Premières données sur la faune souterraine de la région de Tiznit (Maroc). Mém. de C.E.A. ; Université Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, 43p.
- BOULAL M., 1988.** Recherches écologiques sur la faune de quelques puits de la région de Tiznit (Anti-Atlas occidental, Maroc). Thèse de 3^{ème} Cycle, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, 228p.
- BOULAL M., 2002.** Recherches phréatobiologiques dans le Souss et les régions voisines du Maroc occidental : Qualité de l'eau, Biodiversité, Écologie et Biogéographie Historique des espèces stygobies. Thèse de doctorat d'État, Université Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, 443p.
- BOULAL M., TOUYER A. et BOUTIN C., 1997.** Qualité de l'eau et faune aquatique des puits près d'Agadir, dans le secteur aval de la plaine du Souss (Maroc). *Bull. Soc. Hist. Nat.*, Toulouse, 133, 59-70.
- BOULANOUAR M., 1986.** Études écologiques comparées de quelques puits de la région de Marrakech. Impact des pollutions sur la zoocénose des puits. Thèse de 3^{ème} cycle, Université Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, 207p.
- BOULANOUAR M., 1995.** Faune aquatique des puits et qualité de l'eau dans les régions de Marrakech et des Jbilet. Statut et dynamique d'une population de *Proasellus coxalis africanus* (Crustacés Isopodes Asellidae) des Jbilet. Thèse de doctorat d'État, Université Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, 210p.
- BOULANOUAR M., BOUTIN C. et COINEAU C., 1993.** Un Cirolanide stygobie remarquable du Maroc, *Marocolana delamarei* (Crustacés Isopode) : description, écologie et biogéographie. *Mém. Biospéol.*, 10 : 39-48.
- BOULANOUAR M., HENRY J.-P. et BOUTIN C., 1989.** Première Aselle anophtalme du Maroc : *Proasellus gineti* n.sp. (Crustacea, Isopoda, Asellota). *Stygologia*, 6, 2 : 119-125.

- BOUTAYEB K., 1988.** Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines du Haouz (Marrakech). Thèse 3ème cycle, Université Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, 187p.
- BOUTIN C., 1984.** Sensibilité à la pollution et répartition de quelques espèces de Crustacés phréatobies à Marrakech (Maroc occidental). *Mém. Biospéol.*, Moulis, 11, 38: 55-64.
- BOUTIN C., 1993a.** Biogéographie historique des Crustacés Malacostracés stygobies du Maroc. Thèse doctorat Université Lyon I, 263p.
- BOUTIN C., 1993b.** Biogéographie historique des Crustacés Isopodes Cirolanidae stybobies du groupe *Typhlocirolana* dans le bassin méditerranéen. *C.R. Acad. Sc. Paris, Série Sc. Vie*, 316, 12: 1505-1510.
- BOUTIN C., 1994a.** Phylogeny and biogeography of metacrangonyctid Amphipods in North Africa. *Hydrobiologia*, 887: 49-64.
- BOUTIN C., 1994b.** Stygobiology and historical geology: the age of Fuerteventura (Canary Island), as inferred from its present stygofauna. *Bull. Soc. géol. France*. 165, 3: 273-285.
- BOUTIN C., 1996.** Book review: "H.P. Wagner, 1994. A monographic review of the Thermosbaenacea (Crustacea: Peracarida). A study on their morphology, taxonomy, phylogeny and biogeography". *Zool. Verhandelingen, Leiden*, 338pp. 500 Fig." *Crustaceana*, 69(6): 801-804.
- BOUTIN C., 1997a.** « Stygobiologie et paléorivages » Téthysiens entre les bassins crétacés/éocènes du Souss et de Tarfaya (Maroc occidental) Comm. Symposium « Les marges Téthysiennes de l'Afrique du Nord », *Soc. Géol. Fr.*, Paris, 16-17 déc. 1997. Abstract: 68-69. Cette référence et la précédente doivent être permutées (car le 1997a précède le 1997b).
- BOUTIN C., 1997b.** Stygobiologie et géologie historique: l'émersion des terres de Méditerranée orientale datée à partir des amphipodes Metacrangonyctidae actuels (microcrustacées souterraines). *GEOBIOS*, M.S. n° 21: 67-74.
- BOUTIN C., 1998.** Thermosbaenacea. In *Encyclopaedia Biospeologica*, Tome II, (C. Juberthie et V. Decou eds.), Soc. de Biospéologie, Moulis et Bucarest (1994, 1998, 2001). p. 877-888.
- BOUTIN C. et BOULANOUAR M., 1983.** Méthodes de capture de la faune stygobie: expérimentation de différents types de pièges appâtés dans les puits de Marrakech (Maroc occidental). *Bull. Fac. Sci. Marrakech, Section Sci. de la Vie*, 2: 5 – 21.
- BOUTIN C. et BOULANOUAR M., 1984.** Premières données sur la faune des puits des environs de Marrakech (Maroc occidental). *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 22: 1762-1765.
- BOUTIN C., et BOULANOUAR M., 1991.** Découverte d'un genre de Crustacé Isopode Cirolanide dans les eaux souterraines continentales du Maroc. Nouvelles hypothèses sur la biogéographie historique des Cirolanides du Bassin méditerranéen. *Comm. Congr. Int. Biospéol.*, 9-13 sept 1991, Liège : 37.
- BOUTIN C., BOULANOUAR M. et YACOUBI-KHEBIZA M., 1996.** Un test biologique simple pour apprécier la toxicité de l'eau et des sédiments d'un puits. Toxicité comparée, *in vitro*, de quelques métaux lourds et de l'ammonium, vis à vis de trois genres de crustacés de la zoocénose des puits. *Hydroécologie appliquée*, 7, 1-2 : 91-109.
- BOUTIN C. et CALS P., 1985.** Importance en biogéographie évolutive de la découverte d'un Crustacé phréatobie, *Monodella atlantomaroccana* n. sp. (Thermosbaenacea) dans la

- plaine alluviale de Marrakech (Maroc Atlantique). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 300, 3, 7: 267-270.
- BOUTIN C. et COINEAU N., 1990.** "Regression Model" "Modèle biphasé d'évolution" et origine des microorganismes interstitiels continentaux. *Revue de Micropaléontologie*, 33,3-4: 303-322.
- BOUTIN C. et COINEAU N., 1991.** Instabilité des conditions environnementales et vitesse de l'évolution. L'exemple des microcrustacés souterrains d'origine marine dans les pays méditerranéens. *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, Bordeaux, 50: 63-69.
- BOUTIN C. et COINEAU N., 1992.** Biological process in space and time. Colonisation, evolution and speciation in interstitial stygobionts. in A.I. Camacho Ed., the natural history of *Biospeology, monografias*, 7, 680 p. *Mus. Nac. Cien. Nat. et C.S.I.C*, Madrid, 423-451.
- BOUTIN C. et COINEAU N., 2000.** Evolutionary rates and phylogenetic age in some stygobiontic species. In *Ecosystems of the World*, 30: Subterranean Ecosystems (H. Wilkens, D.C. Culver and W.F. Humphreys eds.) Elsevier, Amsterdam: 433-451.
- BOUTIN C. et DIAS N., 1987.** Impact de l'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech sur la nappe phréatique. *Bull. Fac. Sci. Marrakech, Sér. Biol.*, 3: 5-27.
- BOUTIN C. et IDBENNACER B., 1989.** Faune stygobie du sud de l'Anti-Atlas marocain : premiers résultats. *Rev. Sci. de l'eau*, 2: 891-904.
- BOUTIN C., MESSOULI M. et COINEAU N., 1992.** Phylogénie et biogéographie évolutive d'un groupe de Metacrangonyctidae, Crustacés Amphipodes stygobies du Maroc. Cladistique et paléobiogéographie. *Stygologia*, 7, 3: 159-177.
- BOUZIDI A., 1989.** Recherches hydrobiologiques sur les cours d'eau des massifs du Haut-Atlas (Maroc). Bio-écologie des Macroinvertébrés et distribution spatiale des peuplements. Thèse de Doctorat ès-Sciences. Université d'Aix Marseille III, 181p.
- BRAKE S.S., CONNORS K.A. et ROMBERGER S.B., 2001.** A river runs through it: impact of acid mine drainage on the geochemistry of West Little Sugar Creek pre- and post-reclamation at the Green Valley coal mine, Indiana, USA. *Environ. Geol.*, 40, 1471-1481.
- BRINKHURST R.O. et KENNEDY C.R., 1965.** Studies of the biology of the Tubificidae (Annelida, Oligochaeta) in a polluted stream. *J. Animal Ecology*, 34: 429-443.
- BRINKHURST R.O., 1982.** Evolution in the Annelida. *Can. J. Zool.*, 60, 5:1043-1059.
- BRINKHURST R.O. et JAMIENSON B.G.M., 1971.** Aquatic Oligochaeta of the World. *Olivier & Boyd, Edinburgh*. 860p.
- BRUNKE M., et FISCHER H., 1999.** Hyporheic bacteria relationships to environmental gradients in a prealpine stream. *Archiv für Hydrobiologie*, 146, 2: 189-217.
- BRUNKE M., et GONSER T., 1997.** The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology*, 37: 1-33.
- BUSSON G., 1969.** Sédimentation, transgression et paléogéographie sur les grandes plates formes du Mésozoïques : l'exemple du Cénomaniens du nord-est de la plate forme sharienne et de Bérberie. *Bull. Soc. géol. France*, 1, 7: 687-703.
- CASTANY G., 1998.** Hydrogéologie, principes et méthodes. *Dunod*, Paris, 236p.
- CHAMAYOU J. et RUHARD J.P., 1977.** Sillon préafricain à l'est du Siroua : les bassins de Ouarzazate et de Errachidia (Ksar-Essouk) – Boudnib. In : ressources en eau du Maroc,

- tome3, Domaines atlasique et sud-atlasique. *Notes et Mémoires du Service Géologique*, 231, Service Géologique du Maroc Ed.: 224-242.
- CHAPUIS P.A., 1953.** Un nouvel Isopode Psammique du Maroc : *Microcerberus remyi*. *Vie et milieu*, 4, 4 : 659-663.
- CHOUBERT G. et CLARIOND L., 1950.** Essai paléogéographique du Sénonien au Maroc. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 7, 2: 15-50.
- CHOUBERT G. et FAURE-MURET A., 1962.** Évolution du domaine atlasique marocain depuis les temps paléozoïques. In : Livre à la mémoire du Professeur Paul Fallot, 1, 447-527. *Mém. h.s. Soc. géol. France*, Paris.1: 447-527.
- CHOUBERT G. et SALVAN H., 1950.** Essai paléogéographique du Sénonien au Maroc. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 7, 2: 13-50.
- COINEAU N., 1985.** Colonisation du milieu souterrain continental par les organismes d'origine marine. Moyen d'accès par le milieu interstitiel. *Bull. Soc. Biospéol.*, 11: 7-15.
- COINEAU N., 1986.** Isopoda: Asellota: Janiroidea. In: L. Botosaneanu N. 1986. Isopoda: Asellota: Janiroidea. In: L. Botosaneanu (ed.), *Stygofauna Mundi* E.J. Brill/W. Backhuys, Leiden: 465-472.
- COINEAU N., 1992.** Biogéographie évolutive des Crustacés interstitiel *Microcharon* (Isopoda, Janoroida) dans l'Ouest du bassin Méditerranéen. *Bull. Inst. Océano. Monaco*, 9: 101-114.
- COINEAU N., 1994.** Evolutionary biogeography of the microparasellid isopod *Microcharon* (Crustacea) in the Mediterranean Basin. In: Biogeography of subterranean crustaceans: the effects of different scales. Summer Meeting of the Crustacean Society, Charleston, June 1992. *Hydrobiologia*, 287, 1: 79-96.
- COINEAU N., ALBUQUERQUE E.F., BOULANOUAR M. et BOUTIN C., 1999.** Biodiversité des Microcerbérides (Crustacés isopodes) du Maroc. Aspects biogéographiques. *Bull. Soc. Hist. nat. Toulouse*, 135: 47-57.
- COINEAU N. et BOUTIN C., 1992.** Biological processes in space and time colonization, evolution and speciation in interstitial stygobionts. In "The natural history of biospeleology", 423-451, A.I. Camacho ed. *Monografias* 7, Mus. Nat. Cie. Nat. C.S.I.C, Madrid, 680p.
- COINEAU N. et BOUTIN C., 2004.** Crustacea : Isopoda (aquatic). In : *Encyclopaedia of Caves and Karst Science*, Gunn J. (Ed.), Fitzroy Dearborn, Taylor & Francis Books, 263-265.
- COINEAU N., HENRY J.P., MAGNIEZ G. et NEGOESCU I., 1994.** Isopoda Aquatica. In: *Encyclopaedia Biospeologica*, vol. 1.C. Juberthie and V. Decu eds., Société de Biospéologie, Moulis, Bucarest: 123-140.
- COLLIGNON M. et LEFRANC J.P., 1974.** Mise en évidence de la communication saharienne entre Téthys et Atlantique Sud d'après les fossiles cénomaniens et turoniens du Tadmaït (Sahara algérien). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 278, série D, 2257-2261.
- COMBE M., 1977.** Haut-Atlas calcaire. In: *Ressources en Eau du Maroc*, tome 3, Domaines atlasique et sud-atlasique. *Notes et Mémoires du Service Géologique*, 231, Service Géologique du Maroc Ed.: 116-139.
- COURVILLE P., MEISTER C., LANG J., MATHEY B. et THIERRY J., 1991.** Les corrélations en Téthys occidentale et l'hypothèse de la liaison Téthys-Atlantique Sud. Intérêt des faunes d'Ammonites du Cénomalien supérieur-Turonien moyen basal du

- Niger et du Nigeria (Afrique de l'Ouest). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 313: 1039-1042.
- CREUZÉ DES CHÂTELLIERS M. et DOLE-OLIVIER M.J., 1991.** Limites d'utilisation du sondage de type Bou-Rouch pour la capture de la faune interstitielle. (I) traçage chimique au chlorure de Sodium—*C.R. Acad. Sci. Paris*, 312, 3 : 671-676.
- CREUZÉ DES CHÂTELLIERS M. et POINSART D., 1991.** Caractéristiques des aquifères alluviaux et densité faunistique du sous écoulement du Rhône. *Hydrogéologie*, 3: 201-215.
- CREUZÉ DES CHÂTELLIERS M., TURQUIN M.J. et GIBERT J., 1991.** Les aquifères : des systèmes biologiques. *Hydrogéologie* 3: 163-185.
- CVETKOV L., 1968.** Un filet phréatobiologique. *Bull. Inst. Zool. Mus. Sofia*, XXII, 215-219.
- DAKKI M., 1986.** Recherches hydrobiologiques sur le Haut-Sebou (Moyen-Atlas). Une contribution à la connaissance faunistique, écologique et historique des eaux courantes sud- méditerranéennes. Thèse d'État. Université Mohamed V, Fac. Sci. Rabat, 214p.
- DALMAS A., 1972.** Contribution à l'étude des caractères physicochimiques et de la faune de quelques puits artificiels de la Provence. Thèse doctorat 3^e Cycle, Université Provence, 159p.
- DANIELOPOL D. L., GIBERT J., GRIEBLER C., GUNATILAKA A., HAHN H. J., MESSANA G., NOTENBOOM J. et SKET B., 2004,** Incorporating ecological perspectives in European groundwater management policy. *Environmental Conservation* 31, 3 : 185-189.
- DANIELOPOL D.L., GRIEBLER C., GUNATILAKA A. et NOTEMBOOM J., 2003.** Present state and future prospects for groundwater ecosystems. *Environmental conservation* 30, 2: 1004-130.
- DANIELOPOL D.L., POSPISIL P. et ROUCH R., 2000.** Biodiversity in groundwater: a large-scale view. *Trends in ecology and evolution*, 15, 6: 223-224.
- DAUBRÉE A., 1987.** Les eaux souterraines à l'époque actuelle. Dunod, Paris, 455.
- DELAMARE-DEBOUTTEVILLE C., 1957.** Lignées marines ayant pénétré dans les eaux souterraines continentales. Un problème de biogéographie actuelle. *C.R. somm. Soc. Biogéogr. Paris*, 296/297 : 53-67.
- DELAMARE-DEBOUTTEVILLE, 1960.** Biologie des eaux souterraines littorales et continentales. – *Vie et Milieu, suppl.* 9, 740p.
- DELAMARE DEBOUTTEVILLE C. et BOTOSANEANU L., 1970.** Formes primitives vivantes. *Hermann. Paris*, 232p.
- DENIMAL S., TRIBOVILLARD N., BARBECOT F. et DEVER L., 2002.** Leaching of coal-mine tips (Nord-Pas-de- Calais coal basin, France) and sulphate transfer to the chalk aquifer: example of acid mine drainage in buffered environment. *Environ. Geol.*, 42: 966-981.
- DIVIACO G. et RUFFO S., 1985.** Nuovi Bogidiellidi delle acque sotterranee africane (Crustacea Amphipoda). *Monit. Zool. Ital., Sup.* 20, 7 : 135-148.
- DOLE M.J., 1983.** Le domaine souterrain de la plaine alluviale du Rhône à l'est de Lyon ; écologie des niveaux supérieurs de la nappe. Thèse Doct. 3^{ème} cycle, Université Claude Bernard Lyon I, 168p.

- DOLE M.J. et COINEAU N., 1987.** L'Isopode *Microcharon* (Crustacea, Isopoda) abondant dans les eaux interstitielles de l'Est Lyonnais. *M. reginae* n. sp. Écologie et biogéographie. *Stygologia*, 3: 200-216.
- DUBAR G., 1952.** Haut-Atlas central. Livret-guide de l'excursion A34. Congrès Géologique International, Session, Alger (1952), série Maroc. 74p.
- DUFAURE P., FOURCADE E. et MASSA D., 1984.** Réalité des communications marines trans-sahariennes entre la Téthys et l'Atlantique durant le Crétacé supérieur. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 298, 2.15: 665-670.
- EL ACHHEB A., MANIA J. et MUDRY J., 2001.** Processus de salinisation des eaux souterraines dans le bassin Sahel-Doukkala (Maroc occidental), in : *Proc. 1st Int. Conf. on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers: Monitoring, Modeling, and Management*, Essaouira, Maroc.
- EL ADNANI M., AÏT BOUGHROUS A., NEJMEDDINE A. et YACOUBI-KHEBIZA M., 2005.** Impact d'une activité minière sur la biodiversité et la qualité des eaux souterraines près de Marrakech (Maroc). Comm. Conférence Internationale "Biodiversité : Sciences et Gouvernance", UNESCO, Paris, 24-28 janvier 2005.
- EL ADNANI M., AÏT BOUGHROUS A., YACOUBI-KHEBIZA M., EL GHARMALI A., ESBIA M.L., LOUKILI-IDRISSI et NEJMEDDINE A., 2007.** Impact of the mining wastes on the physicochemical characteristics of water and the structure of the zoocenoses of the wells in the area of Marrakech, Morocco. *Environmental Technology*, 28, 1: 71-82.
- EL GHARMALI A., 2005.** Impact des résidus miniers et des eaux résiduaires sur la contamination métallique des écosystèmes aquatiques et terrestres de la région de Marrakech, Maroc. Thèse d'État, Université Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, 212p.
- EL GHARMALI A., RADA A., EL ADNANI M., TAHLIL N., EL MERAY M. et NEJMEDDINE A., 2004.** Impact du drainage acide minier sur la qualité des eaux de surface et les sédiments dans la région de Marrakech, Maroc. *Environ. Technol.* 25: 1431-1442.
- EL OUALI A., 1999.** Modalité d'alimentation et échange entre aquifères de piémonts en conditions climatiques arides. Cas des systèmes aquifères du Haut-Atlas/Bassin Crétacé d'Errachidia (Maroc). Thèse d'État. École Mohammedia d'Ingénieurs, Rabat. 175p.
- EL RHAFFARI L. et ZAID A., 2005.** Développement durable et santé dans les pays du Sud, le médicament, de la recherche au terrain. Actes du colloque du 9 décembre 2005 - Centre Européen de Santé Humanitaire – Lyon.
- ETTACHFINI EM. et ANDREU B., 2004.** Le Cénomaniens et le Turonien de la Plate-forme Préafricaine du Maroc. *Cretaceous Research*, 25: 277-302.
- FAKHER EL ABIARI A., 1999.** Rôle des facteurs abiotiques dans la répartition de la faune aquatique souterraine : Cas des Crustacés Péracarides stygobies. Thèse de doctorat, Université Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, 208p.
- FAKHER EL ABIARI A., YACOUBI-KHEBIZA M., OULBAZ Z., BOULANOUAR M. et BOUTIN C., 1998.** Étude expérimentale de la sensibilité comparée de trois Crustacés stygobies vis à vis de diverses substances toxiques pouvant se rencontrer dans les eaux souterraines. *Mém. Biospél.*, 25: 167-181.

- FERRANDINI J. et LAMAREC A., 1982.** Nouvelles observations géologiques dans la « zone des cuvettes » d'Aït Ourir (sous zone septentrionale du Haut-Atlas). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 295, 2 : 813-816.
- FERRANDINI M., PHILIP J., BABINOT J.F., FERRANDINI J. et TRONCHETTI G., 1985.** La plate-forme carbonatée du Cénomano-Turonien de la région d'Erfoud-Errachidia (Sud-Est marocain): stratigraphie et paléoenvironnements. *Bulletin de la Société géologique de France*, 8, 1: 459-622.
- FERREIRA D., 2005.** Biodiversité aquatique souterraine de la France: base de données, patrons de distribution et implications en termes de conservation. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard, Lyon I, 230p.
- FRONTIER S., DAVAUT D., GENTILHOMME V. et LAGADEUC Y., 2001.** Statistique pour les sciences de la vie et de l'environnement, cours et exercices corrigés. Dunod, Paris, 377p.
- GALASSI D.M.P., DE LAURENTIIS P. et PESCE G.L., 1995.** Some remarks on the genus *Microcharon* Karaman in Greece, and description of *M. agripensis* n. sp. (Crustacea, Isopoda, Microparasellidae). *International Journal of Speleology*, 23, 3-4: 135-155.
- GAUJOUS D., 1995.** La pollution des milieux aquatiques : aide-mémoire. 2^{ème} Ed. 217p.
- GAUTHIER H., 1952.** Les formations de passage Crétacé à Eocène dans les bassins du Dadès et du Todra (sud du Haut-Atlas marocain). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 234: 859-860.
- GHAMIZI M., 1998.** Les Mollusques des eaux continentales du Maroc : Systématique, Bioécologie et Malacologie Appliquée. Thèse Doctorat d'État, Université Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, 549p.
- GHAMIZI M., BODON M., BOULAL M. et GIUSTI F., 1999.** *Atebbania bernasconii*, a new genus and species from subterranean waters of the Tiznit plain, Southern Morocco (Gatropoda : Hydrobiidea). *The Malacological Soc. of London, J.Moll. Stud.*, 65: 89-98.
- GHLALA A., BOULANOUAR M., CHARFI-CHEIKHROUHA F. et MESSANA G., 2006.** Description d'un nouvel asellide épigé (Isopoda, asellota) du nord de la Tunisie. *Proasellus tunisiensis* n.sp. Troisième congrès Franco-Tunisien de Zoologie, Tabarka (Tunisia).
- GIANI N., 1984.** Contribution à l'étude de la faune d'eau douce et plus particulièrement des Oligochètes. II- les Oligochètes aquatiques : Taxinomie, répartition et écologie. Thèse de Doctorat és-sciences, Université Paul Sabatier, Toulouse, 196p.
- GIANI N., SAMBUGAR B., RODRIGUEZ P. & MARTINEZ-ANSEMIL E., 2001.** Oligochaetes in Southern European groundwater: new records and an overview. *Hydrobiologia*, 463: 65-74.
- GIBERT J., 1986.** Écologie d'un système karstique jurassien hydrogéologie, dérive animale, transits de matières, dynamique de la population de *Niphargus* (Crustacé Amphipode). Thèse Doctorat d'État, Université de Lyon 1, 368p.
- GIBERT J., CULVER D.C., DANIELOPOL D.L. GRIEBLER C., GUNATILAKA A., NOTEMBOOM J. et SKET B., 2004.** Groundwater ecosystems: human impact and future management. Aquatic ecosystems: Trends and global prospect. N.V.C. polumin. Cambridge University Press, Cambridge.

- GIBERT J., DANIELOPOL D.L. et STANFORD J.A., 1994.** Groundwater Ecology. Academic Press, San Diego.
- GIBERT, J. et DAHARVENG, L. 2002.** Subterranean ecosystems: a truncated functional biodiversity. *Bioscience* 52: 473-481.
- GINET R. et DECOU V., 1977.** Initiation à la biologie et à l'écologie souterraine. *Edit. Univ.* J.P Delarge Paris, 345p.
- HAHN H. J., 2006.** The GW-Fauna-Index: A first approach to a quantitative ecological assessment of groundwater habitats. *Limnologica* 36: 119-137.
- HAKKOU R., 2001.** La décharge publique de Marrakech caractérisation des lixiviats, étude de leur impact sur les ressources en eau et essais de leur traitement. Thèse Doctorat D'état, Université Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, 113p.
- HAKKOU R., WAHBI M. et BACHNOU A., 2001.** Impact de la décharge publique de Marrakech (Maroc) sur les ressources en eau. *Bull. Eng. Geol. Env.* 60: 325-336.
- HEIKKINEN P.M., KORKKA-NIEMI K., LAHTI M. et SALONEN V.P., 2002.** Groundwater and surface water contamination in the area of the Hitura nickel mine, Western Finland. *Environ. Geol.*, 42: 313-329.
- HENDERSON P.A., 1990.** Freshwater ostracods. Synopses of the British Fauna (n.s.), 12, Universal Book Services/ Dr. W/ Backhuys, Oestgesst, 228p.
- HIBTI M., 2001.** Les amas sulfurés des Guemmassa et Jbilet (Meseta sud-Occidental Maroc) témoins de l'hydrothermalisme précoce dans le bassin mesetien. Thèse de Doctorat, Fac. Scie. Semlalia, 318p.
- HOLMSTROM H., SALMON U.J., CARLSSON E., PETROV P. et OHLANDER B., 2001.** Geochemical investigations of sulfide-bearing tailings at Kristineberg, north Sweden, a few years after remediation. *Sci. Total Environ.*, 273: 111-133.
- HRABE S., 1983.** Evolution of the family Lumbriculidae. Note on the classification of the class Oligochaeta. *Hydrobiologia*, 102: 171-173
- HUMPHREYS W.F., 2000.** Relict fauna and their derivation. in : Wilkens H. Culver D.C. and Humphreys W.F. (Eds.) Subterranean Ecosystems. Ecosystems of the world 30, *Elsevier, Amsterdam*, 417-432.
- IDBENNACER B., 1990.** Recherches écologiques, biogéographiques et démographiques sur la faune aquatique souterraine de la région de Guelmim (Sud-ouest de l'Anti-Atlas marocain). Thèse de 3^{ème} Cycle, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, 275p.
- JACQUES B., DEPIEREUX E. et FEYTMANS E., 1986.** Étude des effets d'une station d'épuration sur la qualité physico-chimique et la structure de peuplement de la faune benthique d'une rivière polluée, la Haute-Sémois. *Acta Ecologia*, 7: 261-279.
- JAMIESON B.G.M., 1981.** The ultrastructure of the Oligochaeta. *Academic Press Inc.*, London, 462p.
- JARAR OULIDI H., BENSLIMANE A., BENAABIDATE L. et ELJAAFARI S., 2005.** Elaboration d'un système d'information géographique pour l'identification des ressources en eau souterraines dans le bassin crétacé d'Errachidia (Maroc). Abstracts Conf. *WATMED 2* - (Marrakech 14-17 November 2005), p.23.
- JEANNEL R., 1943.** Les fossiles vivants des cavernes. In «L'avenir des sciences», N.S. 1, Gallimard, Paris, 321p.

- JOLY F. et MARGAT J., 1955.** L'évolution récente du réseau hydrographique dans la plaine du Tafilalt (Sud-Est marocain). *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, 123: 59-72.
- JUBERTHIE C., 1983.** Le milieu souterrain ; théories et modèles, relation avec la spéciation et l'évolution souterraines. *Mém. Biospéol., Moulis*, 16, 43: 3-14.
- JUBERTHIE C. et DECOU V., 1994.** Encyclopaedia Biospeleologica. Société de Biospéléologie, Moulis-Bucarest, 1, 834p.
- KARAMAN G. et PESCE G., 1980.** Research in Africa by the Zoological Institute of l'Aquila, Italy. V- On three subterranean Amphipods from North-Africa (Amphipoda Gammaridae). *Bull. Zool. Mus. Amsterdam*, 7, 20: 197-207.
- LAFONT M., DURBEC A. et ILLE C., 1992.** Oligochaete worms as biological describers of the interactions between surface and groundwaters: a first synthesis. *Regulated Rivers*, 7: 65-73.
- LECLERC H., GAVIN F. et OGER C., 1981.** Les indicateurs bactériens dans le contrôle bactériologique de l'eau, exigences et limites. *J. F. d'Hydrobiologie*, 12, 2, 35: 213-228.
- LEE C.H. et LEE H.K., 2001.** Hydrochemical monitoring and heavy metal contaminations at the Narim mine creek in the Sulcheon district, Republic of Korea. *Environmental geochemistry and Health* 23: 347-372.
- LEE C.H., LEE H.K. et LEE J.C., 2001.** Hydrogeochemistry of mine, surface and groundwaters from the Sangok mine creek in the upper Chungju Lake, Republic of Korea. *Environ. Geol.*, 40: 482-494.
- LÉVÊQUE C. et MOUNOLOU J.-C., 2001.** Biodiversité, dynamique biologique et conservation. Dunod, Paris, 148p.
- LYAKHLOUFI S., 2001.** Vulnérabilité et risque de pollution de la nappe phréatique du Haouz de Marrakech. Thèse Doctorat National, Fac. Scie. Université Cadi Ayyad, Marrakech, 180p.
- LYAKHLOUFI S., OUAZZANI N., ER ROUAANE S., HASSANI L., et EL HEBIL A., 1999.** Impact de l'utilisation des eaux usées urbaines brutes sur la qualité de l'eau d'une nappe alluviale près de Marrakech (Maroc). *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse*, 135: 59-70.
- LYAKHLOUFI S., RAZZOKI B., ER ROUAANE S. et OUAZZANI N., 1997.** Impact de l'activité humaine sur l'environnement au Maroc (cas de la ville de Marrakech), Ottawa 97, GAC/MAC annual meeting, Ottawa, May 19-21, 1997.
- MAGNIEZ G., 1978.** *Magneizia gardei* n. sp. (Crustacea Isopoda Asellota), un stenassellide des eaux souterraines du Maroc sud-oriental. *Int. J. Speleol.*, 9, 3-4: 321-329.
- MAGNIEZ G., 1997.** Facteurs intrinsèques et extrinsèques de la distribution actuelle des Crustacés Isopodes des eaux souterraines d'Europe. Proceedings of the 12th international congress of speleology, Switzerland, 3: 341-344.
- MALARD F., FERREIRA D., DOLÉDECS et WARD J.V., 2003.** Influence of groundwater upwelling on the distribution of the hyporheos in a headwater river flood plain. *Archiv. Für Hydrobiologie*, 157, 1: 89-116.
- MALARD F., GIBERT J. et LAURENT R., 1997A.** L'aquifère de la source du lez : un réservoir d'eau et de la biodiversité. *Karstologia*, 30: 49-54.
- MALARD F., TURQUIN M. J. et MAGNIEZ J., 1997.** Filter effect of karstic spring ecotones on the population structure of the hypogean amphipods *Niphargus virei*. in

- Groundwater/Surface Water Ecotones : Biological and Hydrological interactions and Managements options. *International Hydrology Series, Cambridge Univ. Press*, 42-50.
- MARQUÉS M.J., MARTÍNEZ-CONDE E., ROVIRA J.V. et ORDÓÑEZ S., 2001.** Heavy metals pollution of aquatic ecosystem in the vicinity of a recently closed underground lead-zinc mine (Basque Country, Spain). *Environ. Geol.*, 40: 1125-1137.
- MARGALEF R., 1958.** Algunos Crustáceos de las aguas continentales de España y norte de Africa. *Miscelánea Zoológica* (Barcelona), 1, 1: 54-59.
- MARGAT J. et ZEBIDI H., 1991.** Pour des statistiques internationales fiables et cohérentes. VII^{ème} congrès mondial des ressources en eau. Rabat, Maroc, 13-18 mai 1991.
- MARGAT J., 1962.** Mémoire explicatif de la carte hydrogéologique au 1/50000 de la plaine de Tafilalet. *Notes et Mém. Serv. Géol. Rabat*, n°150 bis, 13-67p.
- MARMONIER P., VERVIER P., GIBERT J. et DOLE-OLIVIER M.-J., 1993.** Biodiversity in ground waters. *Trends in Ecology & Evolution* 8, 11: 392-395.
- MAZLANI S., 1995.** Étude écotoxicologique de la contamination métallique des eaux, des sédiments et des organismes aquatiques dans la zone d'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech (Maroc). Thèse d'État, Université Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, 267p.
- MEISCH C., 1987.** Ostracodes d'eau douce récoltés dans le sud-ouest de la France. *Bull. Soc. Nat. Luxemb.*, 89-118.
- MEISTER C. et RHALMI M., 2002.** Quelques Ammonites du Cénomaniens-Turonien de la région d'Errachidia-Boudnib-Erfoud (partie méridionale du Haut-Atlas Central, Maroc). *Revue de Paléobiologie, Genève*, 21, 2: 759-779.
- MESSOULI M., 1984.** Recherche de la faune aquatique endogée des sources du Haouz. Mém. de C.E.A. Fac. Sci. Marrakech, 46p.
- MESSOULI M., 1988.** Les Crustacés Amphipodes souterrains du Groupe Metacrangonyx : Répartition, systématique et phylogénie. Thèse 3ème cycle, Université Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, 220p.
- MESSOULI M., 1994.** Évolution, phylogénie et Géographie historique des Metacrangonyctidae, Crustacés Amphipodes stygobies du Nord de l'Afrique et des régions voisines. Thèse doctorat d'État, Université Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, 311p.
- MESTROV M., 1962.** Un nouveau milieu aquatique souterrain : le milieu hypothelminorhérique. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 254, 14: 2677-2679.
- MICHARD A., 1976.** Éléments de géologie du Maroc. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, 252: 408p.
- MILHAU B., DEKENS N. et WOUTERS K., 1997.** Évaluation de l'utilisation des Ostracodes comme bioindicateurs potentiels de pollution. Application aux eaux de la Slack (Boulonnais, France). *Écololie*, 28, 1: 3-12.
- MILU V., LEROY J.L. et PEIFFERT C., 2002.** Water contamination downstream from a copper mine in the Apuseni Mountains, Romania. *Environ. Geol.*, 42: 773-782.
- MISEREZ J.J., 1973.** Géochimie des eaux du karst jurassien. Thèse doctorat, Université Neuchâtel, 299p.

- MOHATI A., 1985.** Recherches hydrobiologiques sur un cours d'eau du Haut-Atlas de Marrakech (Maroc) : L'Oued Ourika, Écologie, Biotypologie et impacts des activités humaines sur la qualité des eaux. Thèse de 3^{ème} cycle, Fac. Sci. Marrakech, 108p.
- MONOD Th., 1930.** Contribution à l'étude des « Cirolanides ». *Ann. Sci. Nat. Zool.*, 10, 13: 129-183.
- MONOD Th., 1975.** Sur la distribution de quelques Crustacés Malacostracés d'eau douce ou saumâtre. *Mém. Mus. Hist. Nat. Paris*, Nlle série, 88, 17^{ème} Cong. Intern. Zool. Monaco, septembre 1972: 98-103.
- MORETTE A., 1964.** Précis d'hydrobiologie. *Masson, Paris*, 532p.
- MOUKHCHANE M., 1983.** Contribution à l'étude des réservoirs aquifères profonds de la bordure Nord de l'Atlas, entre Demnate et Imin n'Tanout (Maroc). Thèse Doctorat 3^{ème} Cycle, Université de Franche-Comté, Fac. Sci. et Tech., 119p.
- NÉRAUDEAU D. et MATHEY B., 2000.** Biogeography and diversity of South Atlantic Cretaceous echinoids: implications for circulation patterns. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 156: 71-88.
- NISBET M., et VERNEAUX J., 1970.** Composantes chimiques des eaux courantes. Discussion et proposition de classes en tant que bases d'interprétation des analyses chimiques. *Ann. Limnol.*, 6, 2: 161-190.
- NOLA M., NJINÉ Th., BOUTIN Cl., MESSOULI M., SERVAIS P., FOTO MENBOHAN S., NGOBIDJECK L.M., ZÉBAZÉ TOGOUET S. et KEMKA N., 2004.** Rétention de *Escherichia coli* d'une eau d'infiltration en sol équatorial au Cameroun (Afrique Centrale): Rôle des divers horizons du sol. *Journ. of the Cameroun Acad. of Sciences*, 2: 107-116.
- NORDSTROM D.K., ALPERS C.N., PTACEK C.J. et BLOWES D.W., 2000.** Negative waters from iron mountain, California. *Environ. Sci. Technol.*, 34: 254-258.
- NOTENBOOM J., 1991.** Marine regressions and the evolution of groundwater dwelling Amphipods (Crustacea). *Journal of Biogeography* 18: 437-454.
- NOURISSON M., 1956.** Étude morphologique comparative et critique des *Typhlocirolana* (Crustacés Isopodes Cirolanides) du Maroc et d'Algérie. *Bull. Sci. Nat. Phys. Maroc*, 36 : 103-124.
- ORGHIDAN T., 1955.** Un non doumeniu de viata acvatica subterrana : "Biotopul hiporheic". *Bull. Sec. Biologie si sti. Agronon., si sect. Géol. Géologia. Acad.*, 7, 3: 657-676.
- PAINCHAUD J., 1997.** La qualité de l'eau des rivières du Québec : État et tendances. Direction des écosystèmes aquatiques. Rapport du Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec. 55p.
- PASCALIS, 2006.** Protocols for the Assessment and Conservation of Aquatic Life In the Subsurface: www.pascalis-project.com
- PESCE G.C., 1985.** The groundwater fauna of Italy: a synthesis. *Stygologia* 1, 2: 129-159.
- PESCE G.L., TÊTÉ P. et DE SIMONE M., 1981.** Ricerche faunistiche in acque sotterranee freatiche del Maghreb (Tunisie, Algérie, Morocco) et d'ell'Egitto. *Nat. Soc. Ital. Sci. nat. Museo. civ. Stor. Nat. e Acquario civ.* Milano, 72, 1-2: 63-98.
- PICARD J.Y., 1962.** Contribution à la connaissance de la faune psammique de Lorraine. *Vie et milieu*, 13, 3: 471-506.

- PIERANTONI U., 1902.** Due nuovi generi di Oligocheti marini rinvenuti nel golfo di Napoli. *Boll. Soc. Nat. Napoli*, 1, 16: 113-117.
- PLÉNET S., 1993.** Sensibilité et rôle des invertébrés vis à vis d'un stress métallique à l'interface eau superficielle/eau souterraine. *Diplôme de doctorat*, Univ. Claude Bernard, Lyon I, 249p.
- POOLE N.J. et HOBSON P.N., 1979.** Water pollution and its prevention. *Microbial. Ecology*. 226-245.
- PRETUS J.L., 1986.** *Typhlocirolana margalefi* n.sp. y *Typhlocirolana maraguesi aurea* nov; subsp. Dos. nuevos Isopodos Cirolanides limnotrogobios del levante Ibberico y Baléares. *Oecologia aquatica* 8: 95-299.
- RACOVITZA E.G., 1912.** Biospeologica, XXVII. Cirolanides (première série), *Arch. Zool. Expér. Gén.*, 5: 203-329.
- RAOVITZA E.G., 1905.** *Typhlocirolana moraguesi* n.g n.sp., Isopode aquatique cavernicole des grottes du Drach (Baléares). *Bull. Soc. France*, 30: 72-80.
- RCOVITZA E.G., 1912.** Biospeologica, 27. Cirolanides (première série), arch. Zool. Expér. Gén., 5, 5: 203-329.
- RÉFEA, 2003.** Réseau francophone sur l'eau et l'assainissement. www.oie.fr/ReFEZ/
- REYMENT R.R. et DINGLE R.V., 1987.** Palaeogeography of Africa during the Cretaceous period. *Palaeogeography, Palaeoclimatology Palaeoecology*, 59: 93-116.
- REYMENT R.R., 1980.** Biogeography of the Saharan Cretaceous and Paleocene Epicontinental Transgression. *Cretaceous Research*, 1: 299-327.
- REYMENT R.R., 1986.** Transgressional maxima of the Late Cretaceous in the western Tethys. International Symposium on shallow Tethys 2, Wagga Wagga: 303-308.
- RHALMI M., 2000.** Le Cénomano-Turonien au sud du Haut-Atlas central marocain (Bassins de Ouarzazate et Errachidia-Boudnib-Erfoud). Sédimentation, stratigraphie et diagenèse. Thèse doctorat d'État, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 217p.
- ROCA J.R., 1993.** Ecology and distribution of Ostracoda in Pyrenean springs. *J. Crustac. Biol.*, 13, 1: 165-174.
- ROCHE., 1939.** Description géologique des montagnes à l'est de Marrakech. *Notes et mém. des Serv. Géol. Du Maroc*, 245p.
- ROCHE., 1950.** Histoire stratigraphique du Maroc. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*. 80, 440p.
- ROCHE P.A., BILLEN G., BRAVARD J.P., DÉCAMP H., PENNEQUIN D., VINDIMIAN E. et WASSON J.G., 2005.** Les enjeux de recherche liés à la directive-cadre européenne sur l'eau. *C. R. Geoscience* 337(1-2): 243-267.
- RODIER J., 1984.** L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires et eau de mer. 7^{ème} édition, Dunod, 1365p.
- ROUCH R., 1970.** Le système karstique du Baget I. le phénomène d'hémorragie au niveau de l'exutoire principal. *Annales de spéléologie*, 23, 1: 5-168.
- ROUCH R., et DANIELOPL D.L., 1987.** L'origine de la faune aquatique souterraine, entre le paradigme de refuge et le modèle de la colonisation active. *Stygologia* 3, 4: 345-372.
- RUFFO S., 1961.** Problemi relativi alla studie delle fauna interstittiale ipporeica. *Bull. Zool.*, 28, 2: 273-319.

- RUHARD J-P., 1977.** Le Bassin Quaternaire du Tafilalt. In Ressources en eau du Maroc, domaines atlasique et sud-atlasique. *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, n°231, 252-415.
- SAHILI M., 1996.** Problématique des rejets liquides et solides au niveau de la région hydraulique : diagnostic et impact sur le milieu naturel et humain et proposition d'un plan d'action. Thèse présentée au ministère des travaux publics pour l'accès au grade d'ingénieur en chef, Maroc. 240p.
- SALVAN M.H., 1986.** Géologie des gîtes minéraux marocains. 2^{ème} édition, tome 3, Phosphates, *Notes et Mém. Serv. Géol. du Maroc* n° 276, Rabat, 392p.
- SCHOELLER H., 1962.** Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation des ressources. *Masson Ed*, 642p.
- SINAN M., MASLOUHI R. et RAZACK M., 2003.** 2nd FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco, December 2-5, 2003.
- SPSS., 1994.** SPSS: SPSS 6.1 for Windows Update. SPSS Inc., Chigago, Il.
- STOCK J.H., 1977.** The taxonomy and zoogeography of the Hadziid Amphipoda With emphasis on the west India taxa. Studies on the fauna of Curacao and other Carrabean Islands. University van Amsterdam, 177p.
- STOCK, J.H., 1986.** Carribean biogeography and a biological calendar for geological events, in *Crustacean Biogeography*, R.H. Gore and K.L. Heck eds., Rotterdam, 195-203.
- STOCK J.H., 1980.** Regression Model Evolution as exemplified by the genus *Pseudoniphargus* (Amphipoda). *Bijdr. Dierk.*, 50, 1: 105-144.
- STROMBERG B. et BANWART S., 1999.** Weathering of waste rock from the Aitik copper mine, Sweden: scale dependent rate factors and pH controls in large column experiments. *J. Contam. Hydrol.*, 39: 59-8.
- TAHLIL N., 1998.** Contamination métallique des plantes par l'épandage des déchets urbains et miniers. Utilisation des peroxydases comme marqueurs de stress chez deux variétés de courgette (*Cucurbita pepo* L.). Thèse Doctorat d'État, Université Cadi Ayyad, Fac. Scie. Semlalia, Marrakech, 143p.
- TIMM T., 1981.** On the orgin and evolution of aquatic Oligochaeta. Eesti NSV Tead. Akad. Toim., *Biologia*, 3: 174-181.
- TOUYER A., 1996.** Étude de la physicochimie et de la qualité des eaux souterraines de la plaine du Souss. Dynamique de quelques pesticides dans le sol. Journée d'Études « *l'Eau dans le Souss* » 9-11 mai 1996.
- TRABELSI R., ZAÏRI M., SMIDA H. et BEN DHIA H., 2005.** Salinisation des nappes côtières: cas de la nappe nord du Sahel de Sfax, Tunisie. *C. R. Geosciences* 337: 515–524.
- TRAPPE J., 1991.** Stratigraphy, facies distribution and paleogeography of the marine paleogene from the Western High-Atlas, Morroco. *Neues JB. Paläont. Abh.*, 180, 3: 279-231.
- VANDEL A., 1964.** Biospéologie : la biologie des animaux cavernicoles. *Gauthier-villars*, Paris, 612p.
- WAGNER H.P., 1990.** Biogeography of the Thermosbaenacea (Crustacea). *Mém. Biospéol.*, 17: 123-126.

- WAGNER H.P., 1994.** A monographic review of the Thermsbaenacea (Crustacea Paracarida). A study on their morphology, taxonomy, phylogeny and biogeography. *Zool. Verh.*, 291: 338p.
- WARD J. V., BRETSCHKO G., BRUNKE M., DANIELOPOL D., GIBERT J., GONSER T. et HILDREW A. G. 1998.** The boundaries of the river systems: The metazoan perspective. *Freshwater Biology*, 40: 531–569.
- WARD J.V., 1998.** Riverine landscapes: biodiversity patterns, disturbance regimes and aquatic conservation. *Biological conservation* 83, 3: 269-278.
- WISSMAR R.C., STANFORD J.A., et ILLIS B.K., 1997.** Stable niytrogen isotopic tracing of trophic relations in food webs of river and hyporheic habitats. Pp.166-171, in Groundwater/Surafce Water Ecotones: Biological and Hydrological Intercations and Managements Options. *International Hydrology Series*, Cambridge University Press, 246 p.
- YACOUBI-KHEBIZA M., 1990.** Écologie, Biogéographie des biocénoses aquatiques des nappes alluviales de quelques vallées du Haut-Atlas de Marrakech (Maroc). Paléogéographie des crustacés phréatiques. Thèse doctorat 3^{ème} cycle, Université Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia Marrakech. 246p.
- YACOUBI-KHEBIZA M., 1996.** Biocénoses aquatiques interstitielles des vallées du Haut-Atlas de Marrakech: Microdistribution, Dynamique de répartition, Écologie et Biogéographie. Thèse Doctorat d'État ès Sciences, Université Cadi Ayyad, Fac. Sci., Marrakech, 374p.
- YACOUBI-KHEBIZA M., AÏT BOUGHROUS A., BOULANOUAR M., BARATTI M. et MESSANA G., 2004.** The genus *Magniezia* (Crustacea Asellota, Stenasellidae) in Morocco. *XVII International Symposium on biospeleology*, India, 25-30 November 2004.
- YU J.Y., et HEO B., 2001.** Dilution and removal of dissolved metals from acid mine drainage along Imgok Creek, Korea. *Appl. Geochem.* 16: 1041-105.