

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hadj Lakhdar Batna



Institut des Sciences Vétérinaires et des Sciences Agronomiques

Département d'agronomie

# THESE

en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Filière : Sciences Agronomiques

Option : Pédologie

Thème

---

Impact de la mise en culture en irrigué sur les sols et les  
eaux dans un bassin endoreique en zone aride. Cas du sud  
du Hodna (Algérie)

---

Présentée par  
ABDESSELAM Salah

Soutenue publiquement le 15 mai 2013 devant le jury composé de :

BOUDOUKHA Abderrahmane	Président	Professeur, Université de Batna
HALITIM Amor	Directeur de thèse	Professeur, Université de Batna
BOURRIE Guilhem	Codirecteur de thèse	Directeur de Recherche, INRA France
BENSAID Rabah	Examineur	Professeur, Université de Skikda
HAMDI AISSA Belhadj	Examineur	Professeur, Université de Ouargla
ZOUAOUI Abdelhamid	Examineur	Maître de conférences, Université de Batna

## **DEDICACES**

*A la mémoire de mon père.*

*A la mémoire de ma mère.*

*A ma femme et mes enfants.*

*A mes frères et sœurs.*

*A mes neveux et mes nièces.*

## AVANT-PROPOS

Au terme de ce travail, je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à ceux qui, au long de mon travail m'ont apporté leurs aides, leurs conseils et leurs encouragements.

Il m'est très agréable de remercier, en premier lieu, Monsieur HALITIM A., professeur au département d'agronomie à l'université de Batna qui m'a encadré en première Post Graduation, et depuis, je continue à travailler toujours. Je le remercie d'avoir bien voulu diriger mes travaux de recherche. Je lui exprime ici ma profonde gratitude pour m'avoir prodigué maints conseils pratiques et théoriques.

Je remercie Monsieur BOURRIE G., Directeur de recherche à l'INRA d'Avignon France d'avoir accepté avec gentillesse de co-diriger ce travail de thèse. Sans lui je n'aurais pas réussi à bien terminer ce travail. Je le prie de trouver ici, l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je suis très sensible à l'honneur que me fait Monsieur BOUDOUKHA A., Professeur au département d'hydraulique à l'université de Batna, d'avoir bien voulu juger mon travail et présider le jury.

Je remercie Monsieur BENSALD R., Professeur à l'université de Skikda, d'avoir accordé un intérêt à mes travaux et accepter d'examiner cette thèse. Qu'il trouve ici le témoignage de mon profond respect.

Mes remerciements vont également à monsieur HAMDY AISSA B., Professeur à l'université de Ouargla d'avoir accepté de juger ce travail. Je lui suis reconnaissant de son appui et de la confiance qu'il m'a témoignée.

Je remercie aussi monsieur ZOUAOUI A., M.C.A. au département d'agronomie à l'université de Batna d'avoir accepté de faire partie de mon jury. Je lui exprime ici toute ma reconnaissance.

Cette thèse est aussi le fruit d'une collaboration avec l'INRA de France. A ce titre je dois exprimer mes vifs remerciements à Fabienne TROLAD Directrice de l'UR géochimie des sols et des eaux qui m'a permis de réaliser plusieurs stages dans son unité de recherche. Elle m'a mis en contact avec Monsieur BOURRIE et dès le premier stage on a déposé un projet CMEP sur l'étude des sols et des eaux de la zone du Hodna. C'était là un coup de départ pour ce travail de thèse. Je la remercie beaucoup pour ses encouragements et l'intérêt qu'elle a apporté à ce travail.

Je remercie les responsables de l'Agence National des Ressources en Hydraulique (ANRH) d'Alger, de Constantine et de Djelfa pour m'avoir permis de consulter la bibliographie disponible à leur niveau et de réaliser certaines analyses de sols et des eaux.

Au niveau du Haut Commissariat au Développement de la Steppe (HCDS) de Djelfa, j'ai pu consulter avec profit les archives de la FAO sur la zone du Hodna. Pour cela, je remercie les responsables du HCDS pour leur aide et leur collaboration.

Les responsables locaux de la commune de Khoubana m'ont beaucoup facilité la tâche lors des multiples déplacements sur le terrain. A chaque fois, on a mis à ma disposition un guide. Qu'ils soient tous remerciés ici.

La préparation d'une thèse nécessite aussi un environnement agréable. A ce titre je tiens à remercier tous les collègues de l'université de Djelfa et de Batna pour leurs encouragements et soutien moral dont j'ai ressenti tout le long de mon parcours de thésard.

Enfin, mes remerciements vont aussi à tous les amis (es) et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# **SOMMAIRE**

AVANT PROPOS

SOMMAIRE

RESUME

INTRODUCTION

## **PREMIERE PARTIE : LE MILIEU PHYSIQUE**

**Chapitre I** : LE CADRE DE L'ETUDE

## **DEUXIEME PARTIE : IMPACT DE LA MISE EN CULTURE EN IRRIGUE SUR LES SOLS**

**Chapitre II** : LE MATERIEL

**Chapitre III** : LES METHODES

**Chapitre IV** : RESULTATS ET DISCUSSION

## **TROISIEME PARTIE : IMPACT DE LA MISE EN CULTURE EN IRRIGUE SUR LES EAUX**

**CHAPITRE V** : L'HYDROSYSTEME

**CHAPITRE VI** : EVOLUTION DES PRELEVEMENT DES EAUX

**CHAPITRE VII** : QUALITE DES EAUX

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

TABLE DES MATIERES

ANNEXES

## Résumé

Le Sud du Hodna, zone aride destinée essentiellement aux pacages, est devenue aujourd'hui le siège de production végétale en irrigué en utilisant les eaux souterraines. Les changements d'utilisation des terres sont en relation avec l'histoire récente de cette région. L'étude de l'impact de la mise en valeur en irrigué sur les sols et les eaux a été abordée par des approches spatiales et temporelle.

Tout d'abord, l'étude diachronique par télédétection a révélé une extension très nette des surfaces affectées par l'ensablement entre 1972 et 2001 au sud du Hodna. Ce problème est en relation avec des périodes de sécheresse parfois prolongées mais surtout à l'action anthropique qui se manifeste dans cette région par le surpâturage et le défrichement des terres pour l'agriculture.

L'étude du sol a mis en évidence deux processus marquant ces sols et constituant le principal facteur qui influence leur évolution : il s'agit d'une morphogenèse hydrique et d'une morphogenèse éolienne. L'étude des horizons de surface, montre clairement que les sols où l'intensité de la mise en valeur en irrigué est la plus ancienne sont soumis au processus d'ensablement. La salinité ne constitue pas un problème majeur. L'éloignement par rapport au chott, la texture du sol, l'occupation du sol, la fréquence des apports d'eau et le drainage sont des facteurs qui influencent la salinité. Les eaux de la nappe profonde semblent ne pas provoquer la salinisation des sols sous condition de lessivage contrairement à la nappe phréatique.

Au sud du Hodna, on a commencé à utiliser les eaux de la nappe phréatique pour l'irrigation des cultures. Or des problèmes de salinisation secondaire ont été apparus et la recherche des eaux de la nappe profonde par forage est devenu une nécessité. Au fil du temps, le nombre de forage a été multiplié et une baisse du niveau piezométrique de la nappe profonde est constaté suite à une surexploitation de cette nappe ce qui peut compromettre la durabilité des aménagements hydro-agricole.

Deux archives concernant la nappe phréatique et la nappe profonde et nos propres analyses sur la nappe profonde ont été utilisés pour l'étude de la qualité des eaux. En tenant compte de l'évolution de l'utilisation de ces ressources en eau, on a remarqué que la qualité de l'eau d'irrigation s'est améliorée par l'utilisation de la nappe profonde mais surtout par l'amélioration de l'état des forages dans le cadre des aides de l'Etat (PNDA). Cependant, le fait le plus marquant est la contamination des eaux souterraines par les nitrates. Dans cette région, la concentration des eaux est expliquée par la salinité globale et les éléments solubles. Les faibles fluctuations de pH suggèrent que la précipitation de carbonates stabilise relativement la réaction des solutions selon le concept d'alcalinité résiduelle. La précipitation de la calcite et du gypse contrôle l'évolution des solutions qui évoluent vers la famille saline sulfatée (FSSU) ce qui mis en évidence une évolution vers la voie saline neutre.

Enfin, l'évaluation de l'efficacité de ces aménagements hydro agricoles, exige ici plus qu'ailleurs, la mise en place d'un système expert de suivi de la qualité des sols et des eaux parallèlement à un dispositif de vulgarisation des agriculteurs.

## **Abstract**

Southern Hodna is an arid region of Algeria where spaces was used for rangelands. Currently, it has become an area of irrigated crop production using groundwater. Changes in land use are related to the recent history of this region. To study the impact of the development on irrigated soils and waters, we used spatial and temporal approaches.

Firstly, the remote sensing diachronic study showed a clear extension of the area affected by sanding between 1972 and 2001 in southern Hodna. This problem is related to drought but also to human action that occurs in this region by overgrazing and land clearing for agriculture.

The soil survey has revealed two processes that we find in these soils and constituting the principal factor influencing their evolution : it is water and wind morphogenesis. The study of surface layers shows that areas where irrigated agriculture is intensive are subject to sanding. Salinity is not a major problem. The distance from the Chott, soil texture, land use, frequency of water supply and drainage are the factors that influence salinity. The waters of the deep aquifer seem not cause salinization of soils under leaching conditions unlike phreatic aquifer.

In south of Hodna, we began to use phreatic aquifer for irrigation. However, problems of secondary salinization appeared which influence farmers to drill more deeply to use the deep aquifer by boreholes. With time, the number of boreholes has increased and decreased piezometric level of the deep aquifer is found as a result of overexploitation of the aquifer which may compromise the sustainability of developments hydroagricultural.

Two archives on phreatic aquifer and deep aquifer and our own analysis of the deep aquifer were used to study the water quality. The evolution of the use of these water resources indicates that the quality of irrigation water is enhanced by the use of the deep aquifer but also by improving the condition of wells by the aid of government (PDNA). However, the analysis shows a nitrate contamination of groundwater. In this region, the concentration of water is explained by the salinity and soluble salts. The low pH fluctuations suggest that precipitation of carbonate relatively stable reaction solutions according to the concept of residual alkalinity. Precipitation of calcite and gypsum controls the evolution of solutions. During their concentration, these solutions tend to the sulphated saline family (FSSU). This revealed a trend towards saline path neutral.

Finally, the evaluation of the effectiveness of these hydro-agricultural demands here more than elsewhere, the establishment of an expert system for monitoring the quality of soil and water in parallel with a training program for farmers.

## ملخص:

جنوب الحضنة هي منطقة جافة تستعمل للرعي خاصة، وقد أصبحت الآن محل إنتاج زراعي عن طريق السقي وذلك باستعمال المياه الجوفية. إن التغيرات التي طرأت على استعمال التربة لها صلة بالتاريخ الغير بعيد الذي مرت به هذه المنطقة. إن دراسة تأثير استغلال الأرض عن طريق السقي على التربة والمياه كان باستعمال السلم المكاني والزمني.

أولا استعمال نظام الاستكشاف عن طريق صور الأقمار الصناعية أمكننا من دراسة الترسبات الرملية التي آلت مساحتها إلى الزيادة بمقارنة حالتها بين 1972-2001، هذه المشكلة لها علاقة بالجفاف، ولكن تأثير الإنسان واضح عن طريق الرعي الزائد وإزالة النباتات الطبيعية بهدف الزراعة.

إن دراسة التربة بينت بأن هذه المنطقة تحت تأثير الشكّل الرملي والشكّل المائي، كما أن دراسة الأفاق الترابي السطحي بين أن المناطق المزروعة هي عرضة إلى ترسبات رملية.

الملوحة ليست مشكلة البعد عن الشط، قوام التربة، استغلال المساحات، تزايد السقي، وتصريف المياه هي عوامل مؤثرة في ملوحة التربة. المياه الباطنية لا تؤدي إلى ملوحة التربة إذا أخذ بعين الاعتبار تصريف الأملاح من التربة.

في جنوب الحضنة بدأ استعمال المياه القريبة من السطح للسقي، لكن مع مرور الوقت تبين أن ذلك يؤدي إلى ملوحة التربة، وهذا ما أدى إلى استعمال المياه الجوفية عن طريق الآبار، مع مرور الوقت تضاعف عدد الآبار مما أدى إلى تناقص مستوى المياه الجوفية الناتج عن الاستغلال الغير عقلاني للمياه، مما قد يؤثر على دوامة هذه الإصلاحات الزراعية عن طريق السقي.

لدارسة نوعية المياه، استعمال أرشيف المياه القريبة من السطح والعميقة، وتحاليل أجريناها على المياه العميقة، ودراسة التطور الزمني لاستعمال المياه بين تحسين نوعية المياه نظرا للمساعدات المقدمة من طرف الدولة لحفر الآبار أو ترميمها، لكن في المقابل لوحظ تلوث المياه الجوفية بالنترات في هذه المنطقة.

تركيز المياه يمكن ملاحظته في الملوحة العامة والأيونات الذائبة. التغيرات الطفيفة لـ pH يفسر بترسب الكربونات التي تؤثر على استقرار معادلة المحاليل حسب نظرية القاعدة الباقية، ترسب الكالسيوم والجبس سيطر على تطور المحاليل إلى العائلة المالحة الكبريتية، مما بين تطور طريق الملوحة المحايدة.

وفي الأخير إن تقييم جدية الإصلاحات الزراعية عن طريق السقي تتطلب هنا أكثر من غيره إلى وضع جهاز خيرة لمتابعة نوعية التربة والمياه بالموازاة مع هيئة لإرشاد الفلاحين.

## INTRODUCTION GENERALE

La zone aride est caractérisée à la fois par son climat toujours peu pluvieux, et parfois très sec, et très irrégulier, et par sa végétation herbacée ou frutescente, rarement arborée, très irrégulièrement répartie, et constituant un couvert excessivement lâche (Aubert, 1963).

En Algérie, cette zone est occupée par une steppe qui couvre environ 20 millions d'hectares. C'est le pays du mouton, où le pasteur est toujours à la recherche de l'eau et la quête de l'herbe ce qui fait de lui un nomade. Un certain équilibre s'est maintenu pendant des siècles dans cette région, entre des ressources minimales et aléatoires et un genre de vie adapté à ce milieu hostile, et maintenant l'activité humaine dans des limites très précaires. Cet équilibre est actuellement rompu et la rupture se manifeste par une dégradation générale du milieu (MARA, 1974).

Plusieurs études menées dans cette région ont mis l'accent sur une dégradation très intense donnant lieu à une réduction du tapis végétal et à des phénomènes d'ensablement et de désertification (MARA, 1974 ; Bedrani et Bensouiah, 2000 ; Mouhous, 2005 ; Bensaid et al., 2007 ; Benslimane et al., 2008 ; Hadeid, 2008 ; Nedjraoui et Bedrani, 2008 ; Daoudi et al., 2010 ; Bouchetata et Bouchetata, 2011).

Le Hodna, localisé au cœur même de cette steppe, constitue une entité naturelle bien individualisée : une cuvette de 8500 km<sup>2</sup>, très déprimée et entourée de massifs montagneux assez élevés, qui sert de niveau de base à un bassin versant trois fois plus étendu dont les oueds les plus nombreux et les moins pauvres viennent du Nord et de l'Est. Cette région connaît une situation défavorisée résultant non seulement de l'inclémence du milieu mais surtout d'une évolution désastreuse des rapports entre l'homme et son environnement sous le double effet de la colonisation et des structures socio-économiques mises en place par elle et d'une démographie marquée par un fort accroissement de la population (Sebhi, 1987).

Afin de faire face à la forte pression humaine sur le milieu, d'assurer l'autosuffisance alimentaire et de résorber le chômage, Les différentes politiques agricoles qui se sont succédées depuis l'indépendance ont favorisé la mise en valeur en irrigué dans cette région par l'extension des surfaces agricoles utiles au détriment des parcours en défrichant ces derniers. Le Sud du Hodna, destiné essentiellement aux pacages, est devenue aujourd'hui le siège de production végétale par la mise en culture en irrigué en exploitant les eaux de la nappe profonde.

L'agriculture irriguée est entamée avec la révolution agraire avec l'irrigation de 300 ha par ruissellement des eaux provenant de la nappe en charge sous jacente (Sebhi, 1987). A l'état actuel, la superficie irriguée au Sud du Hodna avoisine 20000 ha selon les statistiques des services agricoles (DSA). Il s'agit de parcelles morcelées en multiples exploitations dont bénéficient environ 5000 agriculteurs. Plus de la moitié des superficies emblavées sont consacrés aux céréales et le reste constitue les cultures maraîchères et l'arboriculture.

Si l'essor de l'agriculture dans cette région est tributaire notamment à une mobilisation des ressources en eau, le plan national du développement agricole (PNDA) a pu constituer une véritable relance au développement de cette zone déshéritée. Les actions menées concernent essentiellement la mobilisation des ressources en eau et les équipements nécessaires.



Néanmoins, les méthodes d'aménagement inadaptées ont transformé le milieu dans le Sud du Hodna et contribuent à la désertification et des problèmes de salinisation secondaire des sols irrigués à partir la nappe phréatique ont été déjà rapportés par Mimoune (1995).

Cette région n'a pas fait d'objet de travaux de recherche sur les sols et les eaux à l'exception du projet réalisé par la FAO au début des années 1970 intitulé « projet ALGERIE 9 HODNA » qui a permis d'inventorier les types de sols du Hodna, de recensements des points d'eau par l'ANRH, du travail de thèse de Mimoune (1995) sur la gestion des sols salés et la désertification au sud du Hodna et de l'étude menée par ICOSIUM forage and engineering services (ANRH, 2006 et 2007) sur la modélisation du système aquifère du Hodna.

Face à une carence en matière d'études et de recherches sur cette zone fortement anthropisée, un constat sur l'état des sols et des ressources en eau, après une dizaine d'années de mise en valeur en irrigué, serait particulièrement indispensable afin de cerner les problèmes de dégradation du milieu, et de focaliser les efforts sur la lutte et la conservation des ressources naturelles dans une perspective de développement durable de cette région.

Dans ce cadre, on se propose d'étudier les sols et les eaux du sud du Hodna et d'analyser les changements induits par la mise en culture en irrigué sur ce milieu.

Le document rédigé, comporte trois parties essentielles :

- **La première partie** comporte une présentation du milieu physique de la région d'étude.

On aborde dans cette partie le cadre général de la région d'étude (chapitre 1).

- **La seconde partie** englobe l'impact de la mise en culture en irrigué sur les sols.

On présente tout d'abord le matériel d'étude (chapitre 2) puis les méthodes utilisées dans les différentes approches (chapitre 3). Les résultats seront par la suite exposés et discutés (chapitre 4).

- **La troisième partie** est consacrée à l'impact de la mise en culture en irrigué sur les eaux.

On commence par l'analyse de l'hydrosystème du Hodna (chapitre 5), puis on évoque l'évolution des prélèvements des eaux (chapitre 6), enfin, la qualité des eaux sera étudiée (chapitre 7). Dans un premier temps, on présente la méthodologie adoptée puis les résultats et discussion concernant ce volet seront détaillés.

Nous terminons enfin par une conclusion générale.

**Première partie**  
**Le milieu physique**

## Chapitre I : LE CADRE DE L'ETUDE

### 1- LE CADRE GEOGRAPHIQUE

Le bassin du Hodna est situé à quelques 200 km (à vol d'oiseau) au Sud-Est d'Alger (fig. I.1). Isolé de la mer méditerranéenne par 150 km de chaînes de montagnes, il est entouré par les monts du Hodna au Nord, le massif des Aurès à l'Est, les monts du Zab au Sud-Est, ceux des Ouled Nail au Sud-Ouest ; il passe graduellement à l'Ouest aux hauts plateaux algérois. L'ensemble du bassin du Hodna pourrait être subdivisé en quatre régions.

Le relief du Hodna se compose de deux ensembles nettement différenciés : le cadre montagneux des deux Atlas et le bassin hodnéen compris entre ceux-ci (fig. I.2). C'est ce dernier qui constitue la véritable région du Hodna ; cependant, le cadre montagneux ne peut être négligé pour une bonne compréhension du milieu naturel du bassin.

#### 1.1- LA ZONE MONTAGNEUSE

Au Nord, le Hodna est encadré par les monts du Hodna qui forment une véritable barrière (1900 m) que seul l'oued Ksob arrive à franchir. Séparés des monts du Hodna par l'oued Barika qui pénètre profondément dans les massifs montagneux, les monts de Belzema à l'Est (2141 m) limitent le bassin versant.

Au Nord-Ouest, les monts du Titeri forment un ensemble complexe, qui dissèque l'oued L'ham et ses nombreux affluents (1810 m). On est ainsi en présence d'un véritable écran montagneux.

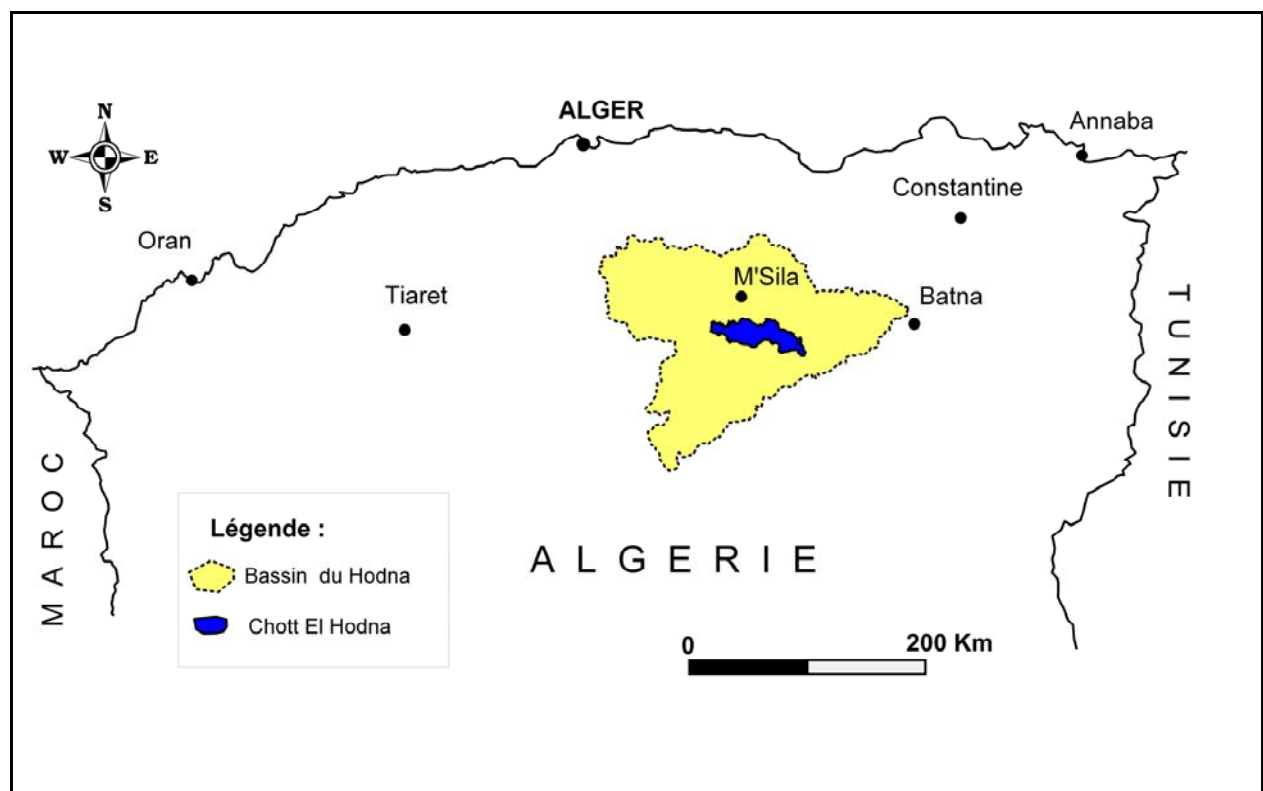


Figure I.1 : Localisation du Bassin du Hodna

Au Sud, le cadre montagneux est nettement plus confus. Le bassin versant du Hodna est encadré par l'Atlas saharien dont le djebel Fernane est le plus élevé (1667 m) et encadre au sud la vaste cuvette hydrologique de l'oued M'Cif. D'autre part, vers le sud est, les monts du Zab ferme la cuvette Hodnienne. Ces montagnes d'orientation grossière sud-ouest nord-est, ne forment pas en réalité un verrou efficace ; elles sont généralement d'altitude peu élevée (700 à 800 m) et laissent de larges ouvertures. De plus, à l'Ouest, les monts de Ouled Naïl, se terminent au nord de l'oued Maïter, en plateaux ondulés, dont les fronts de cotes, dominant le Hodna (1027m 1258 m). Enfin, vers le Nord, une zone confuse succède à ces plateaux de petites collines (700 m) qui s'annoient au niveau de la plaine de l'oued L'ham.

## **1.2- LA CUVETTE**

Nous distinguons de manière générale :

### **1.1.1- LE PIEMONT**

Vaste plan incliné de 2 à 5%, avec une altitude de 700 et 500 m. il comporte une série de glacis et de collines aux matériaux grossiers, peu épais et découpés en longs glacis étagés par une série d'oueds parallèles, qui l'entaillent profondément, et dont les ramifications latérales érodent en badlands les versants marneux des glacis. Son extension est importante au Nord et à l'Est.

### **1.1.2- LA PLAINE**

Elle est définie assez exactement par la courbe de niveau 500 m et s'étale copieusement jusqu'aux abords de la Sebkhah. Elle couvre les deux tiers du Hodna. Cette plaine est constituée par une pente générale en direction de la Sebkhah, qui ne dépasse pas les 0,5%. Dans la zone amont, le cours d'eau entaille les matériaux de 2 à 3 m et déborde rarement, sauf par action volontaire de l'homme (épandage des crues). Dans la zone avale, l'entaille est moins prononcée et les débordements sont saisonniers (crues d'automne et de printemps). Ainsi ce paysage de plaine est une des caractéristiques de la zone nord du bassin versant du Hodna. Cette zone est le lieu privilégié de l'agriculture où les Hodnéens ont depuis des siècles utilisé les épandages de crues sur les glacis limoneux. Elle est constituée par de larges et épaisses accumulations fines d'origine alluviale.

Au Sud, le R'mel offre un paysage d'étendues sablonneuses, plates avec souvent des champs de dunes de quelques mètres de hauteur. le sable est accumulé soit en masse informe, soit en petits massifs allongés ; de véritables dunes vives appelées *erg* ou *zbar* qui masquent en partie les bonnes terres et le chott.

### **1.1.3- LA CUVETTE D'EPANDAGE DES EAUX DE CRUES (SEBKHA)**

Grande étendue argileuse quasiment plane, elle couvre une superficie de plus de 1000 km<sup>2</sup> au centre de la plaine avec une altitude pratiquement constante (395 à 400 m). Du fait des apports importants des oueds, elle se caractérise surtout par l'étalement total des eaux de ruissellement qui sont évaporées en majeure partie dès le début de l'été ; c'est une zone fortement salée, où toute végétation est absente.

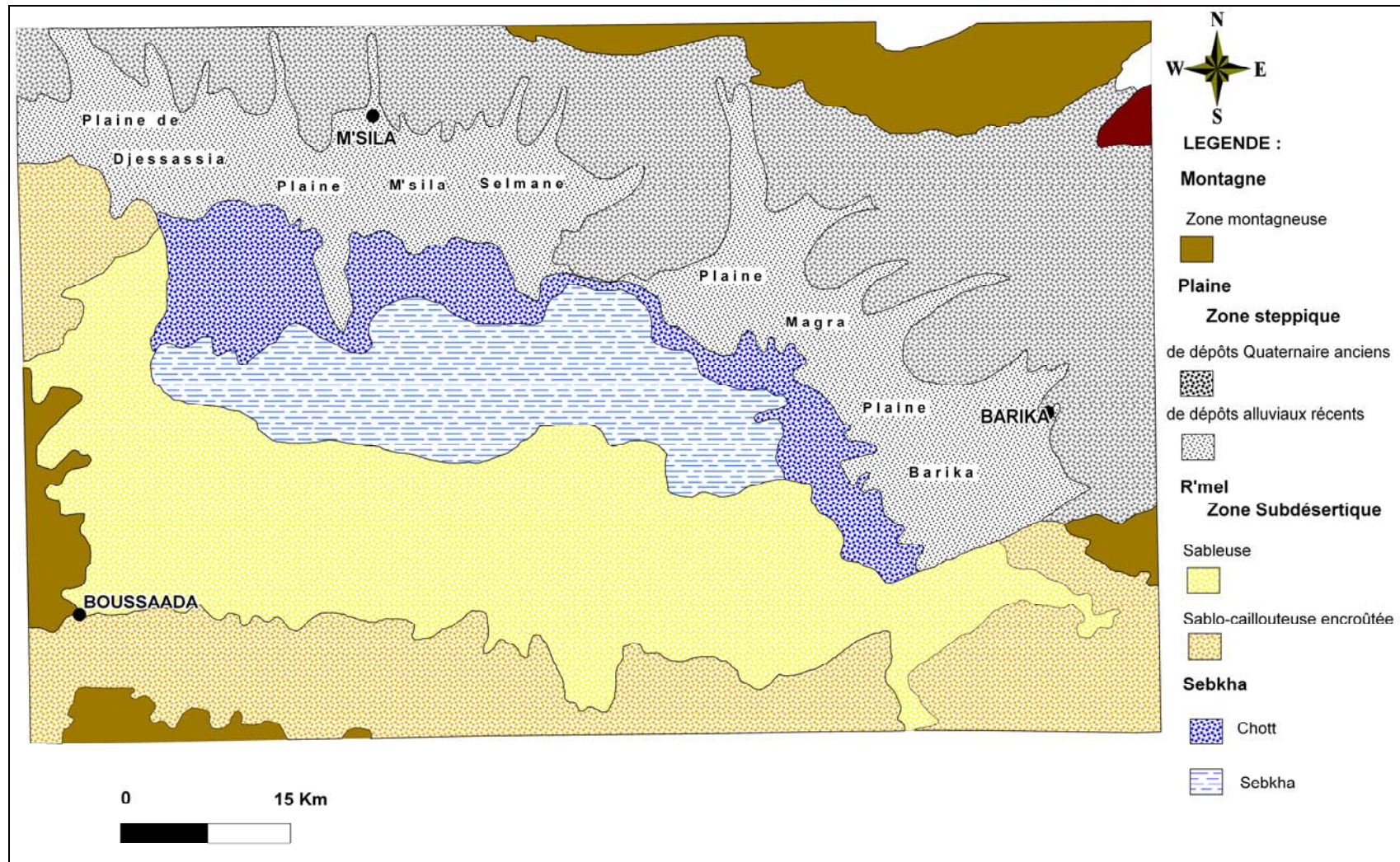


Figure I.2 : Le Hodna : Une variété de paysages (Sebhi, 1987)

## 2- LE CLIMAT

Par sa position de transition située au-delà du Tell maritime et humide et en deçà du désert saharien, le Hodna se trouve tantôt soumis aux perturbations qui affectent le bassin occidental de la Méditerranée tantôt aux influences desséchantes du désert.

Plus encore que la latitude méridionale, l'orientation et le commandement du relief sont responsables des conditions climatiques particulièrement sévères qui règnent sur le Hodna.

Au Nord, la barrière montagneuse formée par les monts du Hodna et du Titteri (1500-1800 m) perpendiculaire à la circulation atmosphérique générale, empêche la région hodnéenne, qui est située en contre bas (400-700 m), de bénéficier régulièrement de l'humidité d'origine méditerranéenne. Elle subit encore plus durement l'action desséchante du désert en se trouvant plus ouvert aux infiltrations d'air chaud et sec du Sahara du fait de la faible vigueur de l'Atlas saharien assez peu élevé, particulièrement au niveau des mont du Zab.

La caractéristique essentielle du climat du Hodna est l'extrême variabilité des précipitations dans l'espace et dans le temps. Selon Boyadgiev (1975), les régions montagneuses reçoivent plus de 400 mm au nord des plaines et plus de 300 mm au sud du R'Mel. Dans les plaines du Hodna, les pluies varient de 200 à 400 mm ; dans la région du R'mel, on a enregistré 200 à 300 mm dans la zone encroûtée et moins de 200 mm dans la zone sableuse. Enfin le chott et la sebkha reçoivent moins de 200 mm.

La carte des bioclimats dressée par la FAO (Sebhi, 1987) (fig. I.3) illustre cette situation du climat du Hodna.

### 2.1- LES PRECIPITATIONS

Les données météorologiques brutes figurent en annexe (1). Elles ont été recueillies auprès de la station de Ain Diss sur une durée de 21 ans (1985-2006). Celle-ci étant localisée au sud du Hodna.

Les précipitations moyennes annuelles fluctuent selon une fourchette de 77 à 316 mm par an.

On utilise généralement la pluviosité moyenne annuelle pour caractériser la quantité de pluie en un lieu donné. La moyenne annuelle de la pluviométrie pour la période de 1985 à 2006 est de 172 mm environ au sud du Hodna. , répartie sur 57 jours pluvieux venant souvent sous forme d'averse. Outre la faible quantité de pluies, ces dernières se font très irrégulières. Cette irrégularité est prononcée tant au cours des années qu'au cours des saisons.



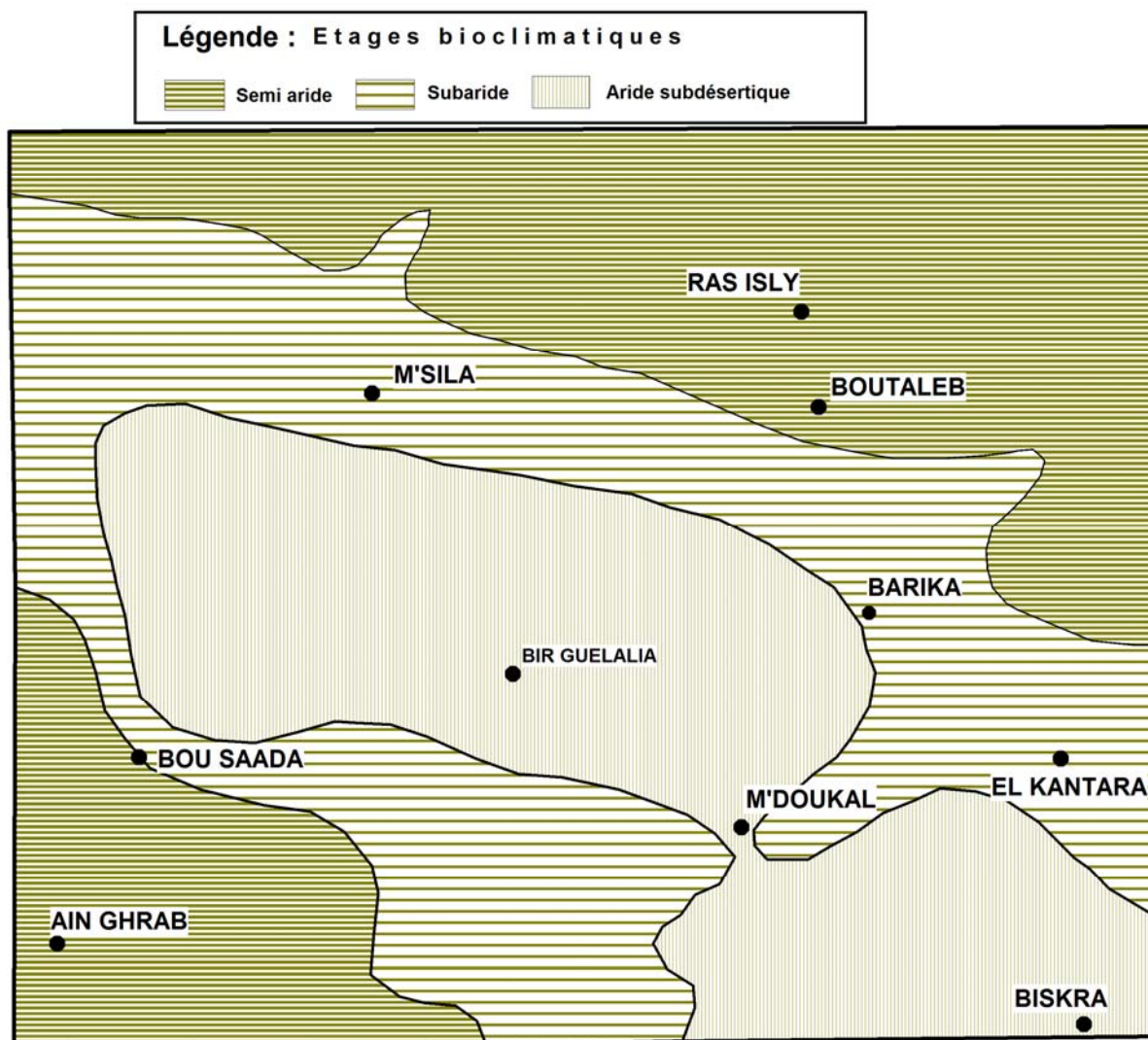


Fig.I.3 : Les zones climatiques du Hodna (Sebhi, 1987).

La distribution des moyennes mensuelles des pluies montrent que le mois de juillet est le plus sec (5,8 mm en moyenne) mai est le mois le plus arrosé (25,1 mm en moyenne). La répartition mensuelle des pluies (fig.I.4) fait apparaître deux maxima. L'un correspond aux pluies d'automne (septembre à novembre), l'autre correspond au début du printemps (mars à mai). Le minimum d'été est toujours marqué avec une pluviosité toujours faible.

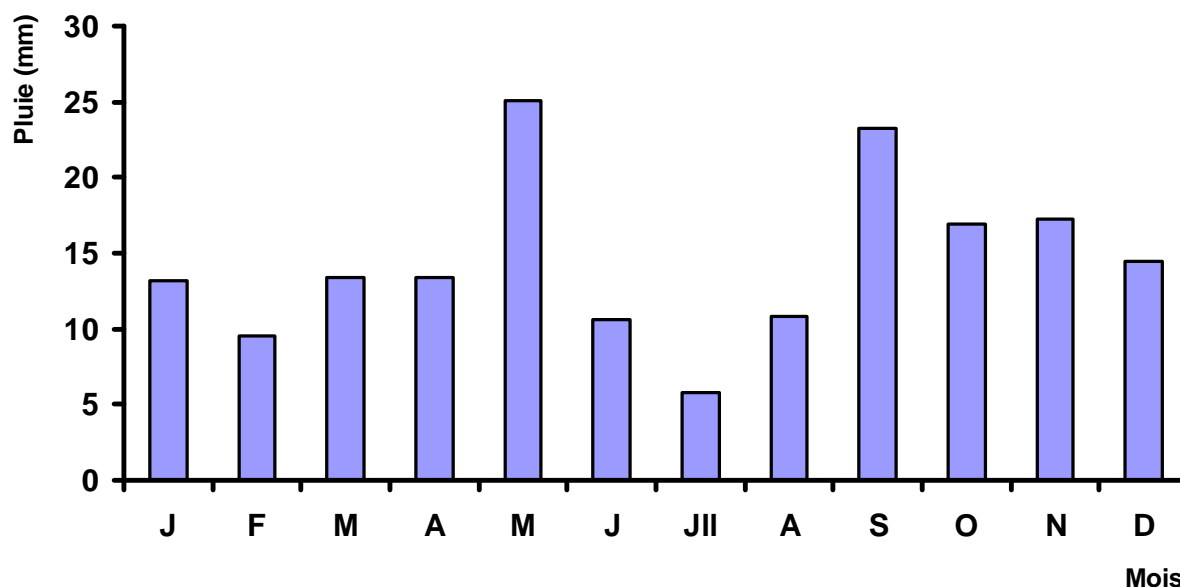


Fig. I.4 : Moyennes mensuelles des précipitations (station de Ain Diss)

Le caractère fondamental du climat hodnéen reste l'extrême variabilité des précipitations dans le temps. L'inégale répartition des pluies dans l'espace introduit des nuances dans l'aridité.

L'étude du régime des pluies, par le calcul du pourcentage des pluies par saison (Tableau.I.1), indique l'importance des pluies automnales et printanières et la part insignifiante de l'été.

Tableau I.1 : Pourcentage de pluie durant les quatre saisons de l'année

	Automne	Hivers	Printemps	été
mm pluie	57.30	37.26	51.97	27.20
%	33.4	21.7	30.3	15.8

## 2.2- LES TEMPERATURES

Les températures moyennes annuelles ont une influence considérable sur l'aridité du climat. Au sud du Hodna, les températures varient normalement dans l'année ; elles sont élevées en saison estivale et basses en saison hivernale. Les grandeurs thermiques retenues pour la région (annexe.1), nous permettent de faire les constatations suivantes :

- La moyenne annuelle est de l'ordre de 19,4°C.
- La figure (I.5) montre une forte variation saisonnière des températures (31,3°C en juillet, 8,7°C en janvier).
- La température maximale enregistrée est de l'ordre de 39°C (Juillet), tandis que le minimum absolu est de l'ordre de -4,6°C (Janvier).
- L'amplitude thermique est considérable ; elle est de 15,3°C en juillet et de 9,9°C en décembre.



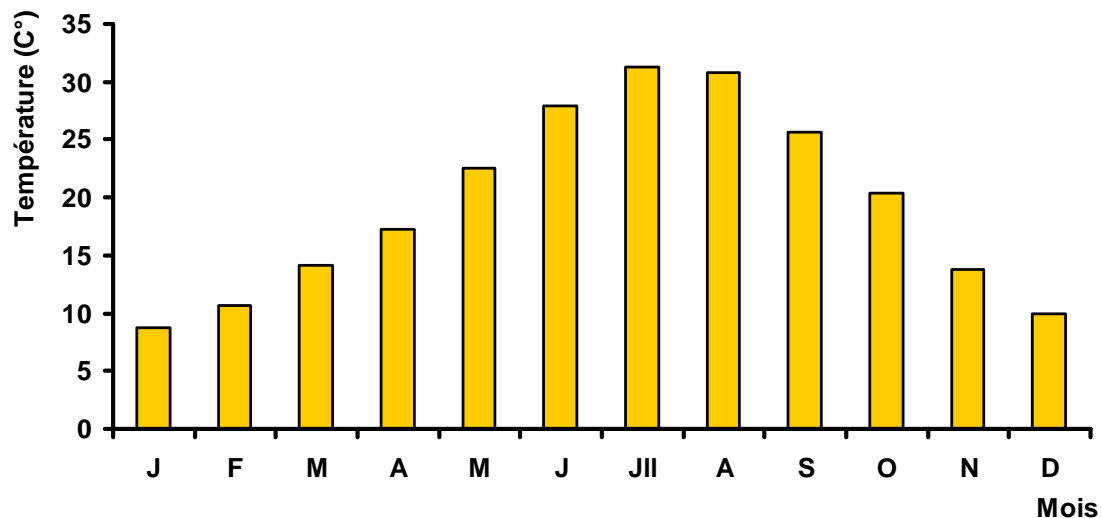


Fig. I.5 : Moyennes mensuelles des températures.

### 2.3- LE VENT

Les vents sont relativement fréquents dans cette région. On enregistre 59,7 jours de sirocco et 69,4 jours de vent de sable au cours de l'année.

En période hivernale, souffle fréquemment les vents du Nord-Ouest qui sont relativement humides. Cependant, en fin de printemps et en été, les vents deviennent très desséchants particulièrement le sirocco qui est un vent sec et très chaud venant du Sud-Est.

Les vents de sables se manifestent, notamment, au printemps et en été où le maximum des forces des vents est enregistré. La vitesse des vents varie de 1,83 à 8,75 m/s.

### 2.4- L'HUMIDITE

L'humidité relative moyenne est faible, elle est plus élevée en hiver qu'en été. Elle varie d'environ 27% en juillet à 59% en janvier. La moyenne annuelle est de l'ordre de 43 %.

### 2.5-L'INSOLATION

La radiation solaire est importante dans la région car l'atmosphère présente une grande clarté durant toute l'année. La durée d'insolation moyenne est de 8,2 heures par jour. Le nombre d'heures d'ensoleillement est de 2775,4 heures par an.

### 2.6- EVALUATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION PAR LA METHODE DE TURC

La formule de Turc s'écrit comme suit :

$$ETP(\text{mm}) = 0,40 \frac{T}{T+15} (I_g + 50) \quad \text{Avec,}$$

- T : moyenne mensuelle de la température (°C).
- $I_g$  : moyenne mensuelle de la radiation solaire globale ( $\text{cal./cm}^3/\text{jr}$ ).

Toutefois  $I_g$  n'est disponible que rarement. On aura recours à son calcul de la manière suivante :

$$I_g = I_{ga} \left( 0,18 + 0,62 \frac{h}{H} \right) \quad \text{Avec,}$$

- H : durée astronomique du jour (en heures).
- h : insolation (en heures).

Si l'humidité relative est inférieure à 50% (cas le plus fréquent dans les zones arides), la formule exige un terme correctif (Halimi, 1980) et devient égale à :

$$ETP(\text{mm / mois}) = 0,4 \frac{T}{T+15} (I_g + 50) \left[ 1 + \frac{50 - H(\%)}{70} \right]$$

L'examen du tableau (I.2) montre que l'E.T.P est très importante. Son calcul par la méthode de Turc, donne une valeur de 1422 mm/an. L'intensité de l'évaporation est fortement renforcée par les vents, notamment, ceux qui sont chauds comme le sirocco.

Tableau.I.2 : L'ETP mensuelle calculée pour la région sud du Hodna (méthode Turc).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
E.T.P (mm)	42,48	63,47	90,73	124,25	158,35	201,36	223,89	197,50	128,41	91,67	58,97	40,91

## 2.7- SYNTHÈSE CLIMATIQUE

### 2.7.1- Indice d'aridité de De Martonne

Il prend pour formule :

$$I_a = \frac{P}{T+10} \text{ où,}$$

- P : pluviosité annuelle moyenne (mm).
- T : température annuelle moyenne (°C).

Le calcul pour notre station de  $I_a$  donne 5,90 d'où l'abaque de De Martonne qui considère ce climat comme aride.

### 2.7.2- Diagramme ombrothermique de Gaussen

Dans ce diagramme, les températures sont portées à une échelle double de celle des précipitations. Un mois est considéré comme sec si la pluviométrie (Pmm) est égale ou inférieure au double de la température ( $P_{mm} < 2T^{\circ}C$ ).

Le diagramme ombrothermique du sud du Hodna (fig.I.6) montre que la saison sèche s'étale tout le long de l'année.

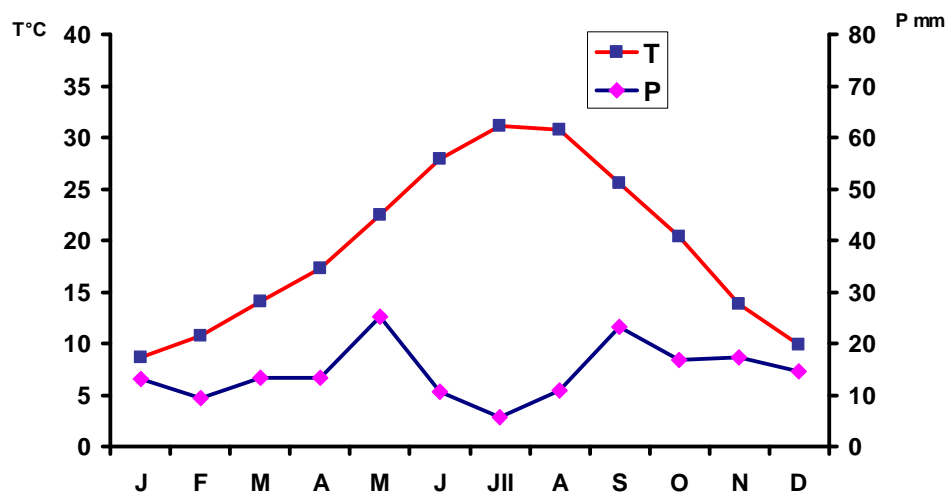


Fig. I.6 : Diagramme ombrothermique de la zone d'étude.

### 2.7.3- Climagramme pluviothermique

Pouget (1980) a élaboré un diagramme analogue à celui d'Emberger où les étages et les sous-étages bioclimatiques correspondent bien, sauf, un décalage quant à la limite de l'étage aride.

Selon ce diagramme (fig. I.7), on apprécie le climat du sud du Hodna comme suit :

- L'étage bioclimatique : aride inférieur ( $200 > P > 100$  mm).
- Variante thermique : à hivers tempéré, avec  $+3^{\circ}\text{C} < m < +6^{\circ}\text{C}$ .

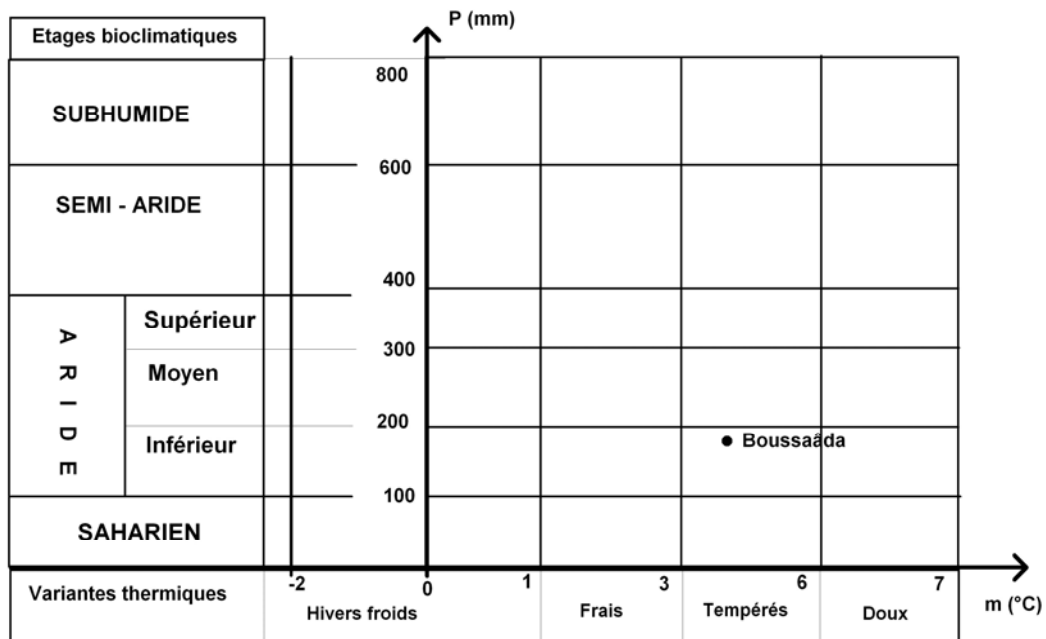


Fig.I.7 : Diagramme pluviothermique de la zone d'étude.

En conclusion, on peut dire que le climat du Hodna est marqué par :

- Une pluviosité faible et très irrégulière.
- Des températures moyennes assez élevées.
- Une sécheresse estivale très prononcée et longue.
- Une grande luminosité.
- Une évaporation intense.

Tous ces facteurs déterminent une forte aridité.

### 3- GEOLOGIE

La géologie du Hodna a été étudiée par de nombreux auteurs (Savornien, 1920 ; Emberger, 1964 ; Kieken et Dame 1962 ; Kieken, 1975 ; Guiraud, 1966, 1971, 1973, 1990 ; FAO, 1968). Elle est assez complexe en raison de la position de la cuvette au contact des Atlas tellien et saharien. La cuvette du Hodna appartient à la zone préatlasique.

#### 3.1- ELEMENTS DE STRATIGRAPHIE

Les formations post-triasiques du bassin sont (fig. I.8 et I.9) :

##### 3.1.1- Jurassique Supérieur

Affleure au Nord-Est du bassin et au cœur de l'anticlinal du Djebel Meharga ; essentiellement calcaire et dolomitique.

##### 3.1.2- Néocomien

Au Djebel Meharga, série marno-calcaire avec bancs massifs de calcaires et dolomies ; faciès marno-gréseux dans les Monts du Hodna.

##### 3.1.3- Barrémo-Bédoulien

Dans la région de Boussaâda, le Barrémien est représenté par une épaisse série de grès tendres continentaux à stratification entrecroisée et d'argile vertes ou lie de vin silteuses, avec des intercalations de bancs calcaires et dolomitiques rattachées à l'Aptien inférieur ou Bédoulien. C'est l'ensemble Barrémo-Bédoulien. Au Nord-Est du bassin, le Barrémien et l'Aptien inférieur forment une épaisse série de calcaire, dolomies, marnes et grès.

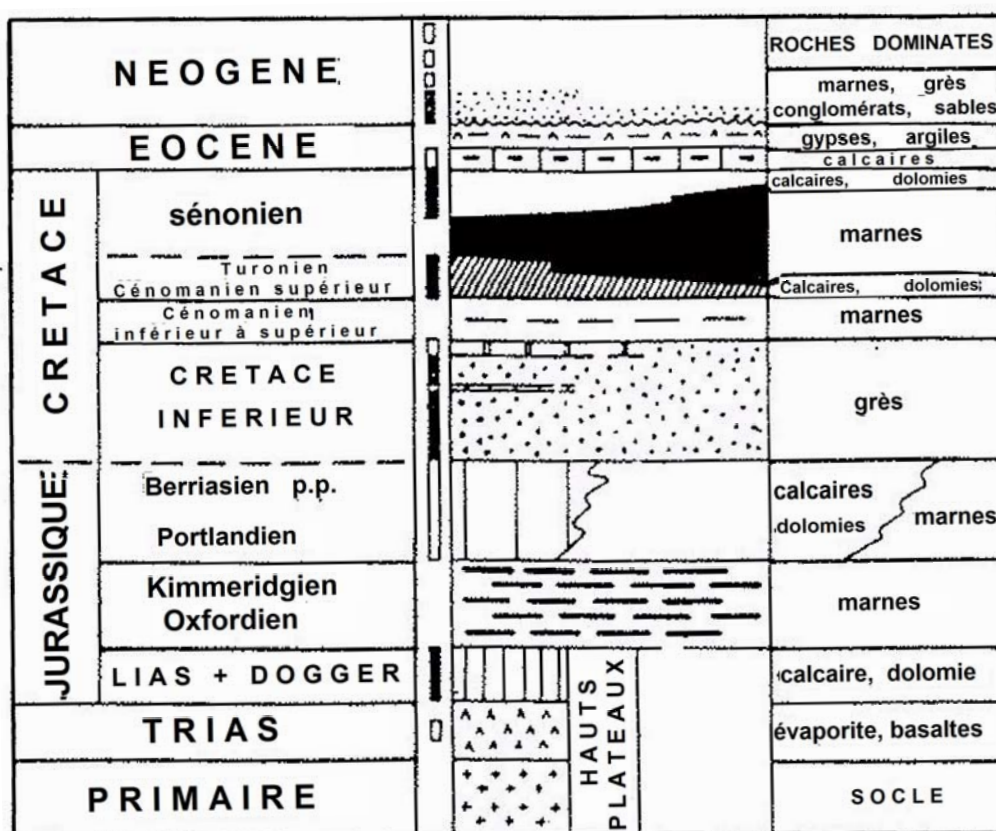


Fig. I.8 : Stratigraphie du Hodna (Guiraud, 1973)

### **3.1.4- Aptien supérieur**

Au dessus d'une barre repère de calcaire dolomitiques on trouve : soit une alternance de dolomies, grès et argiles, soit des marnes et calcaires marneux.

### **3.1.5- Albien**

Dans la région de Boussaâda : série de grès tendre à stratification entrecroisée, sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, avec intercalations d'argiles vertes silteuses et sableuses, faciès annonçant le « continental intercalaire » saharien, parfois surmontées par une série carbonatée alternant avec des formations détritiques. Dans les Monts du Hodna, l'Albien est très réduit (calcaires et marnes) ou absent.

### **3.1.6- Cénomanién**

Sur environ 500 m on trouve : une série argileuse, puis une série de gypses et calcaires. Au sommet, la puissante formation calcaire-dolomitiques aquifère est parfois attribuée au Turonien.

### **3.1.7- Turonien**

Absent dans les Monts du Hodna. Dans la région de Boussaâda, ce sont des calcaires bitumineux en plaquettes, marnes et dolomies sur environ 100 m. à M'doukal, les dolomies sont aquifères. Au Djebel Metlili, la série fait 400 m d'épaisseur.

### **3.1.8- Sénonien inférieur**

Série argileuse et marneuse de 100 m surmontée dans la région de Boussaâda par d'épais calcaires et marnes. Les marnes ont 600 m d'épaisseur au Djebel Metlili.

### **3.1.9- Campanien-Maestrichtien**

Série marneuse et marno-calcaire du Campanien surmontée par 150 à 400 m de calcaires maestrichtiens.

### **3.1.10- Tertiaire**

Dans la région de Boussaâda, le Tertiaire est formé uniquement de dépôts continentaux : argiles rouges et conglomérats d'âge indéterminé. Au Nord du chott, le Tertiaire est bien plus développé.

### **3.1.11- Eocène-Oligocène**

L'Eocène affleure largement au Nord de M'sila où il constitue les appuis du barrage du Ksob. Son extension sous la couverture miocène a été reconnue par les prospections pétrolières de la S.N.Repal. dans la région de M'sila l'Eocène comprend : 100 m de marnes, 100 m de calcaires Lutétien inférieur, 400 m d'argiles et marnes à gypse Lutétien supérieur. Ces formations disparaissent rapidement vers le sud. L'Eocène est également absent du Hodna Orientale. L'Oligocène est continental : argiles rouges à grès et conglomérats, série détritique attribuée à l'Aquitainien. L'Oligocène affleure sur le versant sud des Monts du Hodna.

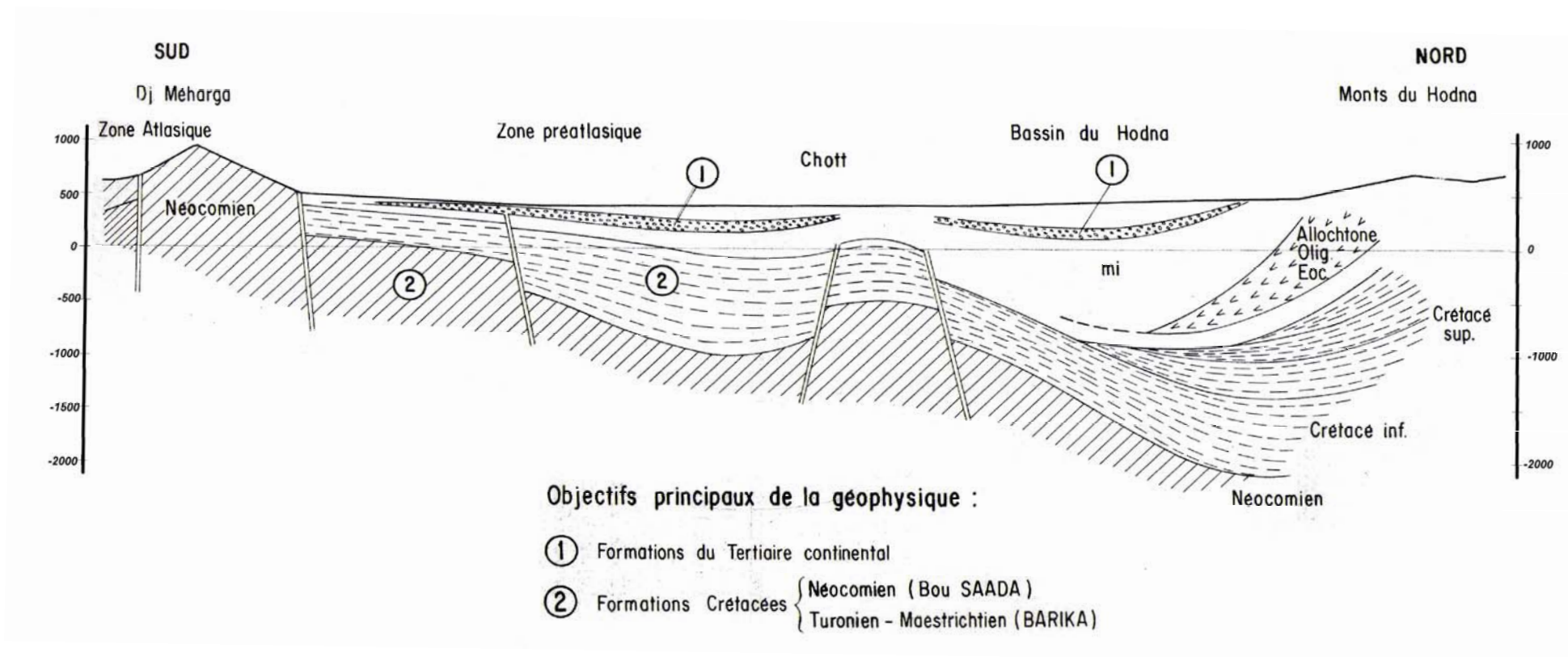


Fig .I.9 : Coupe schématique du bassin de chott El Hodna (FAO, 1968)

### 3.1.12- Miocène-Pliocène

Le Miocène affleure largement dans les parties Nord et Est du bassin. A l'Est, il est largement transgressif sur le Crétacé. Région de M'sila-Barika : le Miocène est divisé en trois cycles. Les deux premiers sont marins et marneux, le 3<sup>ème</sup> cycle est formé de :

a) marnes (absente à M'sila), b) conglomérat et grès, c) « Miocène continental » ou « Pontien », ou encore constitué de conglomérats gréseux peu consolidés, mais il est souvent formé par des séries brun rougeâtres qui surmontent les précédentes dans les forages : marnes et grès sableux ou marneux à lentilles de galets.

La limite d'extension vers le sud du Miocène marin passe par Baniou, la limite sud du chott, et entre le Djebel Meharga et les fennds.

### 3.1.13- Quaternaire

Le Quaternaire est réduit aux recouvrements alluviaux récents et aux formations dunaires. Il est formé de limons souvent très chargés en matériel sableux. Les niveaux grossiers à galets sont localisés à la périphérie des formations conglomératiques du Tertiaire continental ou du Pontien.

## 3.2- TECTONIQUE

LE Hodna est un vieux fossé de subsidence dont l'origine remonte à une période d'activité tectonique bien connue : celle des plissements pyrénéens (ou « plissements éocène », datés du Lutécien supérieur), le bassin est, pour ses grands traits, issu de cette période.

Suite à ce plissement, s'accumulent dans la dépression des dépôts continentaux (produits de démolition des chaînes pyrénéennes) de l'Eocène et de l'Oligocène. Dès le début du Miocène, la mer burdigalienne envahit la quasi-totalité du bassin. Cet épisode marin dure jusqu'à la fin du Miocène. À partir de cette période et durant tout le pliocène, la cuvette hodnéenne se remplit d'une importante couche de dépôts provenant essentiellement des reliefs qui l'entourent : c'est le remblaiement continental « Mio-Pliocène ».

Au cours du Quaternaire ancien, les dépôts Mio-pliocènes sont modérément plissés par une tectonique qui ne s'est pas encore stabilisée, donnant naissance aux collines du Nord-Ouest. Les formations quaternaires se développent ensuite à partir des produits de démolition de ces collines et des reliefs du pourtour créant des surfaces larges et inclinées, bordées au Sud par la sebkha, que l'on peut observer aujourd'hui.

## **4- GEOMORPHOLOGIE**

### **4.1- LE RELIEF**

En raison de la végétation clairsemée, les formes structurales sont bien mises en évidence. L'érosion profitant du contraste lithographique, dégage les bancs les plus durs et creuse les plus tendres, mettant ainsi en valeur des formes classiques de relief : cuestas, monoclinaux etc...

Les points hauts des djebels modelés dans les roches dures (calcaires dolomitiques) se présentent sous forme de crêtes (djebel Meharga au sud, Monts du Hodna au nord).

La couverture pédologique se réduit davantage en descendant les djebels avec une disparition de la végétation forestière et une faible densité de *Juniperus phoenicea* (genévrier) (tableau I.3). Le sol se localise alors dans les diaclases ou à l'amont direct des blocs.

L'action érosive est fonction du type de roches. Trois cas de figure se présentent au niveau des reliefs du Hodna.

#### **4.1.1- Les marnes (roches tendre)**

Le paysage de bad-lands est observé au Nord du Hodna (marne du Miocène). Dans le Sud, l'érosion régressive entaille les argiles sableuses rouges du Tertiaire continental (région de Boussaâda). Il est à noter que tous les versants modelés en roches tendres ne sont pas tous des bad-lands. En effet, la nature lithologique intervient et certaines marnes se caractérisent par des modelés à pentes beaucoup plus douces et par des sols plus épais et un peu plus évolués (sols régosoliques).

#### **4.1.2- Les marno-calcaires**

Ces types de roches ont donné un modelé de collines. L'érosion a été intense dans les marnes du fait de l'absence du couvert végétal forestier. Les gouttes d'eau de pluie douées d'une énergie cinétique, au cours des pluviaux du Quaternaire n'ont trouvé aucun obstacle pour éroder les marnes des collines. L'érosion du bassin versant de l'oued Ksob a provoqué l'envasement du barrage du Ksob et a fait chuter sa capacité de 2/3 avant ses travaux récents de surélévation datant de 1975.

Au Sud, la croûte calcaire semble jouer un rôle efficace dans la protection du modelé.

#### **4.1.3- Alternance de roches dures et tendres**

L'alternance de grès et argile Jurassico-crétacé est un système d'érosion qui a réalisé un aplanissement des reliefs avec des alignements rocheux et des niveaux encroûtés du Quaternaire ancien. Il s'agit de glaciaires de dénudation. La surface du sol est recouverte par un voile discontinu de sables grossiers, graviers et quartz provenant de la destruction des grès. Les sols se développent sur les argiles ou sur les traces des grès plus friables (sols régosoliques, sierozems). On note localement des alluvionnements récents sur lesquels se développe un sol peu évolué d'apport alluvial.



## 4.2- LES HERITAGES MORPHO-PEDOLOGIQUES

Les grands traits de la sédimentation détritique quaternaire et des modalités de formation du Quaternaire et de la cuvette du Hodna ont fait l'objet de travaux de nombreux spécialistes (Capolini et Sary, 1969 ; Guiraud, 1971).

La nature des dépôts quaternaires du Hodna et leur façonnement dépendent essentiellement des variations cycliques du climat : succession de périodes pluvieuses (pluviaux) et de périodes sèches (interpluviaux).

**Au cours des pluviaux**, le substratum constitué par du Mio-Pliocène où alterne marne, grès et conglomérats, a été facilement modelé en de grandes surfaces planes recouvertes par des matériaux grossiers lors des pluviaux anciens (en provenance des reliefs jurassico-crétacés du cadre montagneux à matériel calcaro-dolomitique et marno-gréseux) ; ensuite, par des matériaux fins (issus du remodelage des dépôts antérieurs) lors des pluviaux moyens et actuels.

**Au cours des interpluviaux**, l'aridité du climat a permis la formation des croûtes en dalles anciennes conglomératiques ou d'encroûtements diffus plus récents, en relation directe avec la nature chimique des dépôts et celle du substratum (avec présence de gypse et de sels dans les argiles). Ces encroûtements coiffent souvent les glacis et identifient la fin du pluvial au cours duquel les glacis sous-jacents ont été formés.

## 4.3- LES NIVEAUX DU QUATERNAIRE

En discordance sur le Mio-Pliocène plissé, cinq niveaux de glacis ont été reconnus (Capolini et Sary, 1969) : le Moulouyen (Q<sub>5</sub>), le Salétien (Q<sub>4</sub>), le Tensiftien (Q<sub>2</sub>), le Soltanien (Q<sub>1</sub>) et le Rharbien et actuel (Q<sub>0</sub>). L'Amérien (Q<sub>3</sub>) pose problème parce qu'il ne correspond pas aux descriptions de ce milieu dans les autres régions du Maghreb (faciès limoneux rougeâtre).

Les glacis généralement étagés et emboîtés, avec des apports fin limono-argileux, occupent la plus grande surface dans les zones arrosées et bien drainées situées au Nord et à l'Est du chott. Par contre, au Sud et à l'Ouest de ce dernier, les glacis anciens sont superposés et masqués par les apports sableux récents et actuels.

## 4.4- L'EROSION

Le Hodna est une région venteuse. Cependant, au nord de la sebkha, l'érosion hydrique est très marquée. Elle se lit dans le paysage par l'importance des lits majeurs des oueds, la présence de glacis minés par l'érosion régressive, les phénomènes de « bad lands » et enfin par la mise à nu des formes structurales. Elle est également particulièrement intense dans les bassins versant des oueds.

Au sud du Hodna, l'érosion éolienne remplace l'érosion hydrique et pose de graves problèmes pour la mise en valeur et même les villages ne sont pas épargnés. Elle se traduit dans l'espace par des accumulations dunaires qui ont été remises en mouvement par les hommes, par leurs actions de destruction de la végétation naturelle.

Tableau I.3 : Correspondances entre sols, les substrats et les morphologies.

Zone	Géologie et géomorphologie	Sols
<b>Zone montagneuse xérique</b> (Monts du Hodna)	Anticlinal instable depuis le Crétacé. Ces Monts sont gypseux et constitués de calcaire, marnes, conglomérats à ciment calcaire d'âge crétacique supérieur (Cénomaniens). Certaines dépressions sont recouvertes de dépôt plio-quadernaire.	Sols bruns calcaires en association avec régosols et lithosols.
<b>Zone steppique de dépôts quaternaires anciens et moyens</b> entre les monts du Hodna et la route Tarmount-Msila-Barika.	Succession de glaciaires : Q5 (haute surface moulouyenne) : conglomérats, galets ferruginisés, matrice à FeO <sub>2</sub> et à tâches CaCO <sub>3</sub> surmontées par une dalle calcaire. Q4 : Matériel très grossier souvent gélifracé encroûtement relativement friable de calcaire ou de gypse. Q2 : Matrice fine, limoneuse avec encroûtement pulvérulent de calcaire ou de gypse.	Siérozems sur croûte calcaire (Q5). Encroûtement calcaire (Q4) Siérozems à nodules calcaires (Q2) Sols minéraux bruts et sols peu évolués régosoliques. Sols peu évolués d'apport alluvial.
<b>Zone steppique de dépôts alluviaux récents</b> (entre la zone précédente et le chott)	Zone de glaciaires d'épandage. Le niveau le plus élevé (glaciaire I) est limono-argileux, noircis en profondeur. Le niveau suivant (glaciaire Q, Holocène, Rharbien et actuel) est un limon de débordement ou matériel à dominance argileuse compact.	Sols peu évolués d'apport alluvial : ( <i>Peu steppisés - Calcimorphes - Hydromorphes</i> ). Sols peu évolués halomorphes. Sols sodiques.
<b>Zone subdésertique argileuse</b> du chott et de la sebkha.	Dépression plate continue et vaste avec une orientation Ouest-Est. Les matériaux parentaux sont de l'argile lourde gleyifiée en profondeur.	Sols très fortement à excessivement salins.
<b>Zone subdésertique sableuse</b> avec dunes de sable (entre le chott et une série de collines appartenant à l'Atlas saharien).	C'est une zone avec de nombreuses failles à orientation W-E ou NE-SW et quelques synclinaux. Elle est entièrement couverte de dépôts quaternaires. Les collines rocheuses sont constituées de calcaires, dolomies, marnes plus ou moins gypseuses et localement du grès d'âge crétacique.	Sols minéraux bruts xériques inorganisés d'apport. Sols peu évolués d'apport éolien. Sols peu évolués d'apport alluvial. Sierozems modaux.
<b>Zone subdésertique sablo-caillouteuse</b> (partie septentrionale de l'Atlas saharien).	Vaste ensemble de plis de direction WSW-ENE constitués de calcaires, dolomies, marnes plus ou moins gypseuses et grès d'âge jurassico-crétacé. Les dépôts quaternaires sont surtout des cônes et glaciaires d'accumulation à matériaux grossiers d'âge moyen (Q2). L'encroûtement calcaire est généralisé.	Sols sur croûte et encroûtement calcaire. Sierozems à nodules calcaires. Sols minéraux bruts d'érosion.

## 5- LES RESSOURCES EN EAU

### 5.1- LES EAUX SUPERFICIELLES

Le bassin versant du Hodna, dont la superficie est estimée à 25000 km<sup>2</sup>, est drainé vers la sebkha par d'importants oueds.

De l'Ouest à l'Est, les principaux oueds du bassin du Hodna sont :

- L'Oued Leham, dont le bassin présente 1/5 ou 1/6 de la totalité du bassin hydrologique du Hodna. Il draine les terrains gypso-salins du nord-ouest du bassin. L'eau de l'oued de Targa, l'un de ses affluents est particulièrement salée. Le régime de cet Oued est permanent ;

- L'Oued Lougmane, dont le régime est permanent ;

- L'Oued Ksob sur lequel existe un important barrage construit en 1939 à 15 Km en amont de M'Sila. Son régime est permanent ;

- L'Oued Ennfida, son régime est temporaire ;

- L'Oued Nakrar, dont le régime est temporaire ;

- L'Oued Barika, sur lequel existe un barrage de dérivation. Cet Oued draine les Monts du Belazma. Son régime est permanent ;

- L'Oued Bitam dont le régime est temporaire.

Par contre dans la zone Sud du Chott El-Hodna. Il n'existe que deux oueds importants :

- L'Oued Boussaâda et son affluent Maitar. Son régime est temporaire ;

- L'Oued Melah ou Oued M'Cif plus en aval rejoint le chott à l'Ouest de Guelalia, son régime est permanent.

### 5.2- LES EAUX SOUTERRAINES

La nappe la mieux connue, exploitée à M'Sila, Barika et au sud du chott est celle du Miopliocène, au sein de laquelle les horizons du Pontien occupent une place privilégiée. Cette nappe captive, artésienne autour du chott, généralisée sur à peu près l'ensemble du bassin, et contient une eau relativement d'assez bonne qualité. La nappe phréatique est contenue dans les premiers horizons aquifères du Plio-Quaternaire : à proximité immédiate du chott, la teneur en sels y est élevée. Il existe par ailleurs d'autres formations aquifères importantes, en relation avec les précédentes, mais qui ne se développent pas sur l'ensemble du bassin : les grès Albiens dans le Hodna méridionale et occidentale, les calcaires Turoniens dans le Hodna oriental.

## 6- VEGETATION NATURELLE

La carte de végétation du Hodna a été réalisée par Claudin et ses collaborateurs (Claudin et al., 1975). Le couvert végétal est en rapport direct avec la nature des sols. On distingue du Nord vers le Sud (fig. I.10) :

Dans les régions montagneuses, des groupements forestières : *Cedrus atlantica* (le cèdre), *Pinus halepensis* (pin d'Alep) et *Quercus ilex* (chêne vert).

Dans les plaines, des groupements calcicoles à alfa (*Stippa tenacissima*), armoise (*Artemisia herba alba*). Des groupements gypso-calciphiles (*Anabasis oropedioides* et *Salsola vermiculata*).

Dans le chott, des groupements argilo-halophiles (*Atriplex halimus*). Des groupements hyperhalophiles (*Salicornia arabica*) qui disparaissent dans la Sebkha.

En bordure Sud du chott, essentiellement des psammophiles : *Aristida pungens*, *Eremobium oegyptiacum*, *Retama retam* en association avec d'autres groupements : *Limoniastrum guyonianum*, *Atriplex halimus*, *Tamarix gallica*.

Au niveau du Djebel Meharga (Sud du chott) et de son piémont (glacis récent), des groupements psammophiles (*Aristida pungens*), des groupements calcicoles (*Artemisia herba alba* et *Stippa tenacissima*), *Juniperus phoenicea* (genévrier) en associations avec d'autres groupements : *Olea europea*, *Peganum harmala*, *Anabasis articulata*, *Thymeria hirsuta*, *Rhus tripartita*, *Lavandula multifida* (lavande), *Erigeron bonariensis* (vergerette), *Frankenia thymifolia*, *Lavatera alba* (lavatère). *Thapsia garnica* (Derias), *Liceum sp* (liciate), *Maribium vulgare* (marube), *Erodium triangulare* (bec de grue), et *Ziziphus lotus* (surtout au niveau du piémont du djebel Meharga) (Mimoune, 1995).

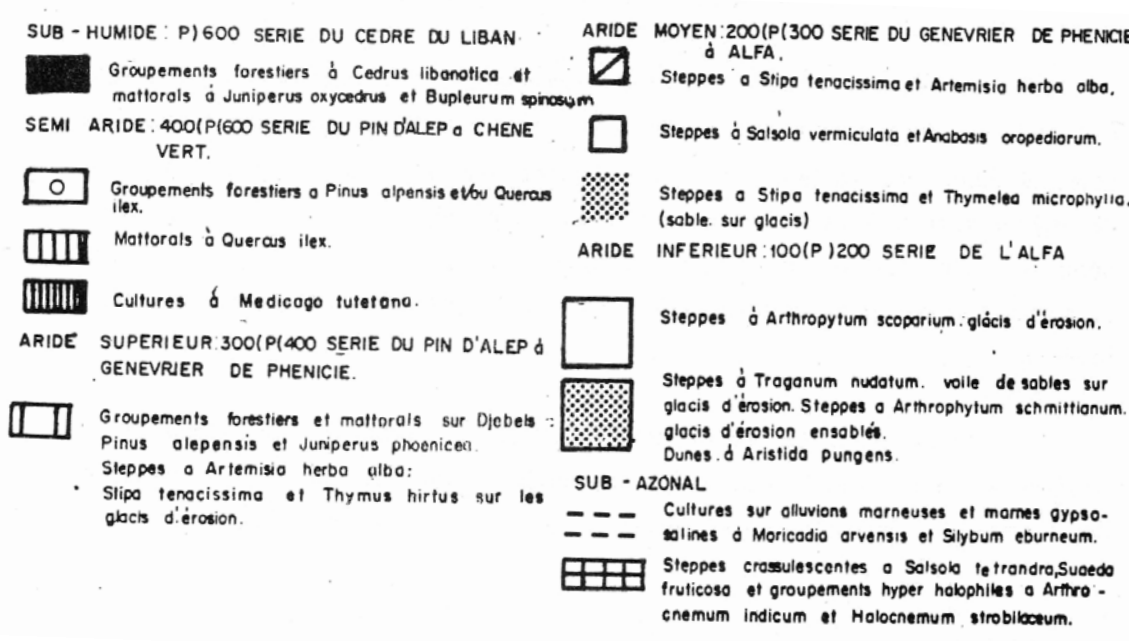
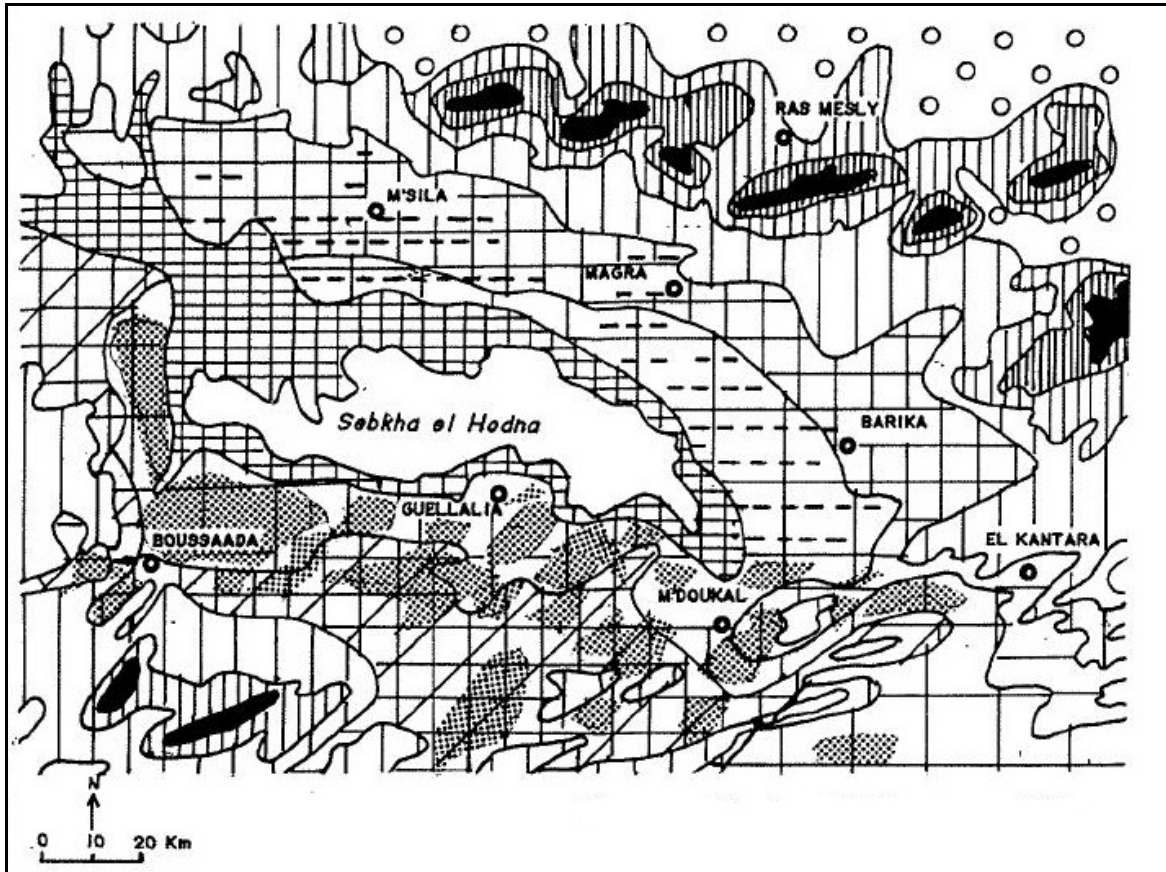


Fig.I.10 : Carte phyto-écologique du Hodna (Claudin et al., 1975).

## 7- LES SOLS

Plusieurs travaux pédologiques ont été réalisés dans le Hodna (Belouam, 1976 ; Dekkich, 1974 ; Boyadgiev, 1975 ; Dekkich, 1975a ; Dekkich, 1975b ; Daoud et Doggar, 1985). Cependant, le sud du Hodna n'a pas bénéficié de travaux sur les sols à l'exception du projet FAO (Boyadgiev, 1975) et du travail de Mimoun (1995) qui a plutôt traité la désertification.

Les sols, en majorité sableux, présentent des caractères salins, calcaires ou gypseux ou soumis à l'effet de la nappe phréatique ou à l'érosion éolienne. D'une manière générale, à cause de leur texture et leur faible teneur en matière organique, le niveau de fertilité est faible (faible capacité d'échange cationique et de rétention en eau) ; le recours à la fertilisation et aux amendements organiques est indispensable pour assurer des rendements acceptables.

Selon Boyadgiev (1975), le chott entourant la sebkha et la sebkha elle-même portent des sols à accumulations gypso-salines de nappe qui deviennent franchement salines dans la sebkha (chlorure de sodium) ; leur conductivité électrique est très élevée. Au sud du chott, la situation est toute autre. La partie centrale a été et est fortement influencée par des apports massifs de sables éoliens (R'Mel) formant des sols minéraux bruts auxquels succèdent les glacis encroûtés comparables à ceux du nord.

On trouve les Lithosols et les Régosols sur les montagnes qui émergent du centre du R'Mel, ou forment la limite sud du bassin versant du Hodna.

La carte pédologique du sud du Hodna (feuille de Boussaâda) (Boyadgiev, 1975) présente les types de sol suivants selon la classification française (CPCS, 1967) (Tableau I.4).

Toutefois, l'extension de la zone agricole s'est faite aux dépens des sols suivants (Abdesselam et Halitim, 2010a) :

- Sols minéraux bruts non climatiques d'apport alluvial et minéraux bruts xérique inorganisés d'apport.
- Sols peu évolués non climatiques d'apport alluvial et éolien,
- Sols isohumiques à pédoclimat frais pendant les saisons pluvieuses, siërozems (très localisés)
- Sols hydromorphes minéraux ou peu humifères à redistribution de calcaire ou gypse à encroûtement gypseux.
- sols halomorphes à structure non dégradée et/ou dégradée, salins à alcalis.

Selon la base de référence mondiale pour les ressources en sols (WRB, 2006), ces sols sont classés comme suit :

Haplic Arenosols (Aridic)

Haplic Fluvisols (Aridic, Gypsiric)

Haplic Gypsisols (Aridic)

Gypsic Gleysols (Aridic)

Gypsic Solonchaks (Aridic)

Haplic Solonchaks (Aridic)

Tableau I.4 : Les types de sols et leur localisation au Sud du Hodna.

Classification française des sols	localisation
<p><b><u>SOLS MINERAUX BRUTS</u></b>  <b>NON CLIMATIQUES</b>  <b>d'érosion</b>  Lithosols  Régosols  d'apport alluvial</p> <p><b>XERIQUE</b>  Inorganisés d'apport</p>	<p>Relief montagneux de Meharga et de Boussaâda et Ouest de l'oued Boussaâda.</p> <p>Au Sud de Maârif et Khoubana, au Nord et Sud de Djebel Meharga</p>
<p><b><u>SOLS PEU EVOLUES</u></b>  <b>NON CLIMATIQUES</b>  <b>D'apport alluvial</b>  Modal  Steppisé  Halomorphe</p> <p><b>XERIQUE</b>  <b>D'apport éolien</b>  Calcimorphe</p>	<p>Sud de Maârif et Khoubana. Ouest de l'Oued Boussaâda  Nord-Est et au Sud de Djebel Meharga.  Nord de M'Cif</p> <p>L'Ouest de l'oued Boussaâda et Nord de la zone caillouteuse.</p>
<p><b><u>SOLS CALCIMAGNESIQUES</u></b>  <b>CARBONATES</b>  <b>Bruns calcaires xériques</b>  à encroûtement calcaire  à croûte calcaire</p> <p><b>GYPSEUX</b>  <b>A encroûtement gypseux</b>  à croûte et à encroûtement gypseux</p>	<p>Dominant toute la zone extrême sud (zone caillouteuse).</p> <p>Localement à l'extrême sud (zone caillouteuse).</p>
<p><b><u>SOLS ISOHUMIQUES</u></b>  <b>A PEDOCLIMAT FRAIS PENDANT LA SAISON PLUVIEUSE</b>  <b>Siérozems</b>  Modal  à amas et/ou à nodules calcaires</p>	<p>Localement au sud des sols Halomorphes de Maârif.  Localement à l'extrême sud à Boussaâda et Houamed et l'Ouest de Boussaâda.</p>
<p><b><u>SOLS HYDROMORPHES</u></b>  <b>MINERAUX OU PEU HUMIFERES</b>  <b>A redistribution de calcaire ou de gypse</b>  à encroûtement et à croûte gypseux</p>	<p>Dans la zone de Khoubana et Maârif et localement à M'Cif près des sols Halomorphes  Localement au sud (zone de Boussaâda et Houamed) zone caillouteuse.</p>
<p><b><u>SOLS HALOMORPHES</u></b>  <b>A STRUCTURE NON DEGRADEE ET /OU DEGRADEE</b>  <b>Salins à alcalis</b>  moyennement salin  fortement salin  très fortement salin  excessivement salin</p>	<p>Au alentour du chott</p>
<p><b><u>SOLS JUXTAPOSES</u></b>  - Sols Hydromorphes et sols minéraux bruts xériques  - Sols peu évolués et sols minéraux bruts xériques  - Sols calcimagnésiques et sols minéraux bruts xériques  - Sols minéraux bruts d'érosion et sols calcimagnésiques  - Sols calcimagnésique et sols minéraux bruts non climatique d'érosion  - Sols Calcimagnésiques et sols Isohumiques à amas et/ou à nodules calcaires</p>	<p>Très réponsus au Nord entre le chott et Djebel Meharga (Zone du R'Mel).  Nord Ouest de oued M'Cif.</p> <p>Sud ouest de la zone caillouteuse.</p> <p>Centre de la zone Caillouteuse.</p> <p>Localement au centre et l'Ouest de la zone Caillouteuse</p> <p>Localement à l'Ouest de la zone Caillouteuse</p>

## **8- APERÇU HISTORIQUE SUR L'UTILISATION DES TERRES.**

### **8.1- LA SOCIÉTÉ PASTORALE PRECOLONIALE**

Sebhi (1987) a bien décrit, dans son travail, les mutations du monde rural du Hodna. L'auteur précise que, la vie pastorale précoloniale dans la région du Hodna, comme d'ailleurs le cas dans toute la région steppique, était empreinte de solidarité, d'équilibre et de complémentarité (MARA, 1974).

Deux traits caractérisent la société Hodnéenne : une structure hiérarchique où la cellule de vie économique et culturelle était la tribu et les fractions dont elle se composait d'une part, et la prééminence du collectif sur l'individu, d'autre part.

Les fondements économiques de la société hodnéenne précoloniale consistaient en la pratique de l'élevage associé à la céréaliculture. Celle-ci restait cependant une activité secondaire, localisée auprès des principaux oueds, avec pour but essentiel la couverture d'une partie des besoins alimentaires des populations.

La société pastorale trouve dans la mobilité dans l'espace une solution aux problèmes issus de la précarité des pâturages du Hodna. Cette mobilité des hommes et des troupeaux prenait un rythme saisonnier et s'opérait à deux échelles de mouvements.

#### **8.1.1- Les déplacements de moyenne distance**

Après les labours d'automne, les Hodnéens conduisent leurs troupeaux dans les dunes situées au sud de la sebkha (le Rmel). Ils trouvent là, pendant la saison hivernale (d'octobre à mai) des pâturages suffisants et variés. Le Rmel oriental est réservé au Ouled Derradj de l'Est (Berhoum, Ain Khadra, Magra et Barika) et aux Saharis (Mdoukal et Bitam). Le Rmel occidental est fréquenté par les Ouled Derradj de l'Ouest (Ouled Adi Guebala, Ouled Derradj et partie Est de la commune actuelle de M'sila) et par la totalité des Ouled Madhi (Chellal, M'cif et partie Ouest de la commune de M'sila). Cette transhumance d'hivers concerne également les troupeaux des habitants des Hautes plaines et leurs familles qui doivent cependant payer un droit d'âchaba.

#### **8.1.2- La transhumance d'été sur les hautes plaines**

Au printemps, les nomades du Hodna rentrent chez eux après le séjour au Rmel, moissonnent leur orge et leur blé, procèdent rapidement aux battages, vendent leurs laines et se rendent en estivage sur les Hautes plaines constantinoises. L'ensemble des tribus hodnéennes participe à ces déplacements.

L'économie pastorale précoloniale était donc basée sur le nomadisme au sens le plus strict du terme. Il fallait se déplacé aussi souvent que l'état des pâturages le nécessitait pour offrir en chaque saison une alimentation palatable au cheptel. Le pasteur nomade, qui connaissant bien ces pâturages, utilisait la complémentarité entre les parcours des différents étages bioclimatiques et des différents milieux physiques.

Les tribus nomades du Hodna ont donc su jouer des complémentarités qu'offrent les pâturages entre leur région et les hautes plaines réalisant un heureux équilibre entre les activités humaines et le milieu tout en évitant toute dégradation de ce dernier. La solidarité tribale s'exprimait par la jouissance en commun des pâturages devenue un véritable droit d'usage collectif. La cohésion de la tribu était, à cet égard, la condition inévitable pour maintenir des équilibres délicats atteints par les formes traditionnelles de la vie pastorale.

## **8.2- LA COLONISATION ET LA DESTRUCTION DES FONDEMENTS DE L'AGROPASTORALISME TRADITIONNEL**

L'équilibre de la société pastorale traditionnelle s'est trouvé gravement compromis par la politique coloniale qui consista avant tout à contrôler, à encadrer les nomades considérant la libre errance de ces derniers comme un obstacle à sa domination. Pour y arriver, plusieurs moyens furent utilisés, en particulier, des actions visant les structures internes des groupes et d'autres, leurs assises territoriales.

Le Sénatus-consulte fut une véritable arme pour déstructurer progressivement le groupe tribal. Cette législation opéra de véritables opérations chirurgicales dans les tribus du Hodna. Les deux grandes tribus hodnéennes (les Ouled Derradj et les Ouled Madhi) furent scindées en une vingtaine de douars entre 1866 et 1904. Cette division des tribus en douars constitua une étape décisive vers la désintégration sociale en entamant la cohésion tribale.

L'espace qui jusqu'alors avait été totalement ouvert, aussi bien physiquement que juridiquement, se trouvait à présent découpé en morceaux dont la réalité était absolument étrangère aux esprits des nomades du Hodna.

La colonisation directe des hautes plaines à partir de 1870 assura la ruine du nomadisme : les colons européens, qui se rendirent propriétaires de vastes surfaces, n'étaient en aucun cas disposés à maintenir les échanges avec les éleveurs nomades ce qui a entravé sérieusement le jeu de la complémentarité.

L'élevage devenant aléatoire, les hodnéens ont été acculés, surtout que leur nombre ne cessait d'augmenter démesurément, à la mise en culture de portions de plus en plus importantes de leurs terrains de parcours pour assurer leur subsistance.

Enfin, on peut dire que le genre de vie pastoral et nomade qui caractérisaient les populations hodnéennes avant l'intervention coloniale, persista jusqu'au début de ce siècle et connaîtra avec la période coloniale une altération progressive qui se manifeste au niveau de la vie collective et surtout au niveau de l'utilisation de l'espace. Peu à peu la vie sédentaire, symbolisée par l'extension de la céréaliculture se développe au dépens de la vie pastorale. Les paysans et les nomades, dont le cadre d'existence a été ainsi bouleversé, s'efforcent de survivre en adoptant leurs techniques traditionnelles aux conditions actuelles.

## **8.3- PERIODE APRES L'INDEPENDANCE**

Depuis son indépendance en 1962, l'Algérie a connu plusieurs réformes agraires (Baci, 1999 ; Bencherif, 2011). Le secteur agricole a connu cinq réformes : 1- Nationalisation et autogestion, 2- la Révolution Agraire, 3- Restructuration et libéralisation, 4- le Plan National du développement agricole (PNDA) et 5- Réorganisation et renouveau rural.

Les politiques qui ont marqué le plus le milieu Hodnéen seront présentés dans ce qui suit :

### **8.3.1- La révolution agraire**

Avant le lancement de la révolution agraire en Algérie, la zone du Hodna a bénéficié d'un vaste projet international intitulé « projet ALGERIE 9 (HODNA) ». Ce dernier intitulé « Etude des ressources naturelles et expérimentations, et démonstrations agricoles dans la région du Hodna » avait pour but d'entreprendre les études et inventaires des ressources en terres et en eaux, en vue de leur utilisation optimale pour le développement agricole de la région. En 1975, le but a été atteint et la zone dispose d'études d'une haute valeur scientifique qui permettent une meilleure mise en valeur de cette région longtemps marginalisée.



L'application de la troisième phase de la révolution agraire, dès 1975, s'est traduite par la mise en place d'un certain nombre de coopératives d'élevage dans le monde steppique. La wilaya de M'sila a été choisie pour constituer un terrain de lancement de cette importante opération. La mise en valeur du secteur Sud Hodna représente une rupture totale avec la tradition (Sebhi, 1987). Le projet Sud Hodna a démarré d'abord en tant que projet de mise en valeur agricole de faible envergure Sebhi (1987). Il s'agissait, dans le cadre du programme spécial de développement économique et social, de permettre l'irrigation d'une superficie de 300 ha (150 ha à Guellalia (M'cif) et 150 ha à Ain Diss (Chellal) par ruissellement avec des eaux provenant de la nappe en charge sous-jacente. A cela s'ajoute la création de 24 CARRA (coopérative agricole de production de la révolution agraire) de 7 CEPRA (coopérative d'élevage pastoral de la révolution agraire) et de 6 villages socialistes.

Les CAPRA constituées se présentent dans l'espace sous forme d'une série de petits périmètres irrigués, isolés les uns des autres et s'échelonnant sur un axe qui va de Guellalia à Ain Diss (60 Km). Dix coopératives (1503 ha) sur les 24 (2200 ha) utilisent l'oued M'cif pour irriguer leurs cultures ; le reste profite de l'eau artésienne (celles qui sont près du chott) ou par pompes. Les forages réalisés ont un débit qui varie entre 20 et 50 l/s.

Les périmètres sont stéréotypés : un carré de 20 à 80 ha tracé dans la steppe et clôturé de fil de fer et de brise-vent. Orientés dans un premier temps vers l'arboriculture dans le cadre du barrage fruitier, ils sont, par la suite, tenus de réaliser un plan de culture comportant 40% de maraîchage et 60% de fourrages.

L'un des problèmes les plus importants qui se posent à ces périmètres est la salure des terres après quelques années seulement d'irrigation. Celle-ci est liée d'une part au fait que les terres de certaines coopératives sont à proximité du chott, et d'autre part, à la méconnaissance des techniques d'irrigation d'une population constituée en majorité d'éleveurs (ou d'anciens éleveurs) peu familiarisés avec le travail de la terre.

### 8.3.2- L'accession à la propriété foncière agricole (APFA)

Avec l'application de la loi 83/18 du 13 août 1983 portant accession à la propriété foncière agricole par la mise en valeur des terres, beaucoup de terres ont été attribuées là où les potentialités en eaux souterraines existent (Tableau I.5).

Tableau I.5 : Bilan des attributions des terres. Superficies attribuées par commune à l'initiative locale (Anonyme, 1995)

Commune	Superficies attribuées par arrêté	Nombre de bénéficiaires
BOU SAADA	1434	478
KHOBBANA	2530	602
MAARIF	1318	169
M'CIF	1755	186

### 8.3.3- Le plan national du développement agricole (PNDA)

En l'an 2000, le gouvernement algérien est engagé dans un vaste programme de renforcement de l'agriculture piloté par le ministère de l'agriculture. Le principal objectif du plan national de développement agricole (PNDA) est d'essayer de résoudre les problèmes liés au manque d'investissements privés dans l'agriculture. L'accent est mis sur l'objectif à court terme d'injecter des investissements relativement importants et fortement subventionnés. Cette politique est renforcée par l'introduction d'un système de crédits sans intérêts et dans des conditions de garanties et d'échelonnement très souples (Guemraoui et Chabaca, 2005).

Si l'essor de l'agriculture dans la zone sud du Hodna est tributaire notamment à une mobilisation des ressources en eau, le plan national du développement agricole (PNDA) a pu constituer une véritable relance au développement de cette zone déshéritée (fig. I. 11). Les actions menées concernent la mobilisation des ressources en eau et les équipements nécessaires, les plantations arboricoles, la plasticulture, les pépinières, les chambres froides et autres. A titre d'exemple, on peut dresser un bilan comparatif de quelques actions réalisées entre 2000 et 2007 pour la commune de M'Cif (Tableau, I.6).

Tableau I.6 : Bilan comparatif de quelques actions menées dans le cadre du PNDA dans la commune de M'Cif.

	Mobilisation des ressources hydriques				superficie		irrigation		emplois créé
	Forage	puit	bassin	équipement	SAU	Irriguée	goutte à goutte	aspersion	
Unité	U	U	U	U	Ha	Ha	Ha	Ha	U
Potentiel à la fin 2000	39	321	06	470	7992	3180	70	84	1780
Réalisation FNRDA 2001-2006	64	31*	181	199	7992	3330	667	120	923

Si la mise en valeur en irrigué à commencer au sud du Hodna dans les années 1970 avec environ 300 ha, à l'état actuel, les superficies irriguées, avancés par les statistiques de la DSA, sont de l'ordre de 21000 ha dans les quatre communes du Sud du Hodna à savoir Maarif, Khobana, M'Cif, Boussaada et Houamed, ce qui considérable.



Fig. I. 11 : Planche photographique représentant la mise en valeur des terres au sud du Hodna. **a)** Bassin d'accumulation des eaux pompées d'un forage bénéficié dans le cadre du PNDA **b)** verger **c)** céréales **d)** culture en plein champ et arboriculture **e)** labours **f)** maraîchage.

**Deuxième partie**  
**Impact de la mise en culture**  
**en irrigué sur les sols**

## **DEUXIEME PARTIE**

# **IMPACT DE LA MISE EN CULTURE EN IRRIGUE SUR LES SOLS**

### **INTRODUCTION**

Depuis le début des années 1970 une mise en culture en irrigué s'est développée dans le Sud du Hodna faisant rupture avec la vocation pastorale de cette région. Ce milieu steppique, marqué par des conditions physiques sévères, a subi une évolution importante en matière d'utilisation des ressources en eau et en sols en relation avec les politiques agricoles adoptées. Les surfaces agricoles ont connu une extension aux dépens des parcours, et l'utilisation des potentialités en eau souterraine a permis le développement des superficies irriguées.

Pour aborder cette partie concernant l'étude des changements sur le sol après la mise en culture en irrigué, un examen des documents disponibles relatifs à la zone d'étude a été effectué ; il concerne notamment les cartes topographiques, géologiques, hydrogéologiques et les images satellitaires de Landsat. Aussi, nous avons consulté les études cartographiques existantes (Boyadgiev, 1975), ainsi que, d'autres travaux relatifs à la région d'étude (FAO, 1968, 1972, 1970, 1972, 1973 ; Boyadgiev, 1975 ; Kebiche, 1986 ; Sebhi, 1987 ; Benabderrahmane, 1988 ; A.N.A.T, 1993a, 1993b ; Mimoune, 1996 ; Hadjab, 1998 ; Bouteldja, 2005 ; ANRH, 2006, 2007 ; Abdesselam et al., 2007 ; Abdesselam et al., 2008a et b ; Abdesselam et al., 2009 ; Abdesselam et Halitim, 2010a et b ; Bouhmed et Abdesselam, 2010 et 2011). Cependant, mis à part le rapport d'inventaire des ressources naturelles réalisé par la FAO et le travail de thèse sur la gestion des sols salés et désertification de Mimoun (1995), rare sont les travaux pédologiques récents réalisés dans la zone sud du Hodna. Ceci nous a amené à effectuer une prospection sur le terrain.

Des prospections de reconnaissance ont été faites au préalable dont le but de prendre connaissance du degré de complexité du terrain et du milieu dans son ensemble. Ce travail a pu être mené grâce, d'une part, à la présence de guides, d'autre part, aux renseignements utiles recueillis lors des enquêtes auprès des organismes en relation avec le monde rural (DSA, APC, Direction des Forêts, ANRH, etc...). Au terme de cette phase préliminaire, nous avons choisi la zone d'étude en se basant, d'une part, sur la diversité du paysage et de son aspect morphologique (zones d'accumulation de sable, zones affectées par les crues des oueds et la zone chotteuse), et d'autre part, sur la localisation de la zone affectée par la mise en culture en irrigué.

Cette partie abordera les changements induits par l'action anthropique au sud du Hodna et notamment l'ensablement et la dégradation de la qualité des sols après le changement d'utilisation des terres et la création des aménagements hydro-agricoles en s'appuyant sur plusieurs approches convergentes :

Cartographie de l'ensablement à partir des images satellitaires, étude des variations des caractéristiques du sol dans sa partie superficielle et sur fosses pédologiques et essai expérimental sur colonne de terre.

## **Chapitre II : MATERIEL**

### **1- UTILISATION DES IMAGES SATELLITAIRES**

La cartographie de la dynamique de l'ensablement a été réalisée par l'utilisation de trois images satellitaires de dates différentes :

- Une image Landsat 1 de type MSS de la scène du 13 novembre 1972.
- Une image Landsat 5 de type TM de la scène du 01 août 1987.
- Une image Landsat 7 de type ETM+ de la scène du 22 avril 2001.

### **2- ETUDE DE L'HORIZON DE SURFACE**

Ce travail porte sur la couche arable influencée par le travail du sol. L'objectif est de vérifier les changements des caractéristiques de sol suite à la mise en culture en irrigué. La zone de Bir Heni (commune de Khoubana) a été choisie pour réaliser ce travail.

Quatre sites présentant des diversités morphologiques ont été retenus (fig. II.1). Il s'agit de Guebouhia, Defla, Mergueb et Chott. Pour chaque site, un témoin non irrigué, constituant l'état de référence, a été également échantillonné de la même manière.

Au total, les sols de 40 parcelles irriguées, ayant des superficies inférieures à 5 ha, ont été échantillonnés sur une profondeur de 0 à 30 cm. Les parcelles échantillonnées ont été irriguées durant des périodes variables (dans la plupart des cas moins de dix ans).

En réalité, les agriculteurs travaillent parfois leurs terres avec des périodes de repos (jachère). Le mode d'utilisation des terres n'est pas fixe. Il n'existe pas de rotation bien définie. Se sont notamment les moyens matériels et financiers des agriculteurs et la demande du marché, d'une part, et les politiques agricoles, d'autre part, qui influencent le mode d'utilisation des terres dans cette région. D'une manière générale, Les cultures pratiquées sont les céréales, l'arboriculture et le maraîchage. Les caractéristiques des sites retenus pour cette étude sont :

#### **2.1- LE SITE DE GUEBOUHIA**

Elle constitue la zone la plus déshéritée. Les sols sont très sableux et se trouvent près des Zbars (dunes de sables). Ce sont des terres marginales destinées aux parcours ; la mise en valeur est récente. L'absence du réseau d'électrification oblige les agriculteurs à utiliser les moteurs diesels. Au total, six échantillons ont été prélevés. L'irrigation par planche est adoptée par les agriculteurs.

#### **2.2- LE SITE DE DEFLA**

Cette zone constitue les meilleures terres agricoles de la région de Bir Heni. Les sols du site de Defla sont les plus fertiles et les plus favorables à l'agriculture. C'est une zone d'expansion des crues ou zone inondable. Elle profite des eaux des crues de l'oued Defla de meilleure qualité et des limons calcaires qu'elles transportent. Dix échantillons ont été prélevés.

#### **2.3- LE SITE DE CHOTT :**

Cette zone est affectée par la nappe phréatique, les accumulations gypseuses et même par le sable. Dans le cas naturel, la végétation est constituée d'espèces halophytes. Le nombre d'échantillons prélevés est de cinq.



## 2.4- LE SITE DE MERGUEB

Zone intermédiaire dont les sols présentent, selon leur position, des accumulations gypseuses, calcaires, sableuses ou des alluvions. Dix neuf échantillons ont été prélevés.

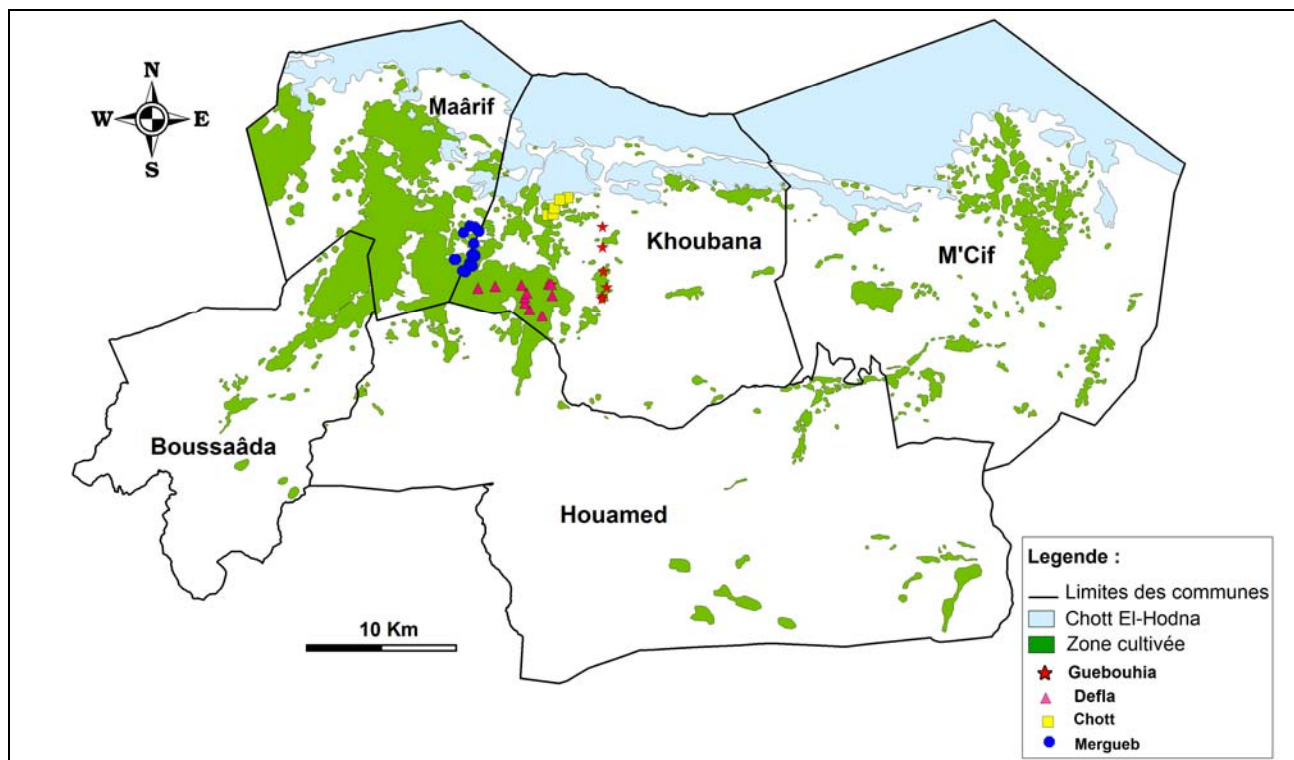


Fig. II.1 : Localisation des échantillons de sol

## 3- ETUDE EXPERIMENTALE SUR COLONNES

L'objectif de ce travail est de vérifier l'effet de l'irrigation par les eaux de la nappe profonde sur la salinisation du sol, d'une part, et de comparer avec les données recueillies sur le terrain d'autre part.

L'échantillonnage de plusieurs dizaines de kilogramme de sol, sur une parcelle labourée, a été réalisé sur l'horizon de surface (0-30 cm). Les eaux utilisées proviennent d'un forage de la même exploitation (Photo II.1).

### 3.1- REMPLISSAGE DES COLONNES

Les échantillons de terre sont séchés à l'air libre puis tamisés à 2 mm. Pour entreprendre notre expérimentation, on a préparé des colonnes en roulant du film plastique d'une manière à obtenir un diamètre intérieur de 8cm et une hauteur de 45 cm. Enfin, on a utilisé un ruban adhésif transparent pour coller le film plastique au sens de la hauteur. La base de la colonne est couverte d'une compresse et coller à la paroi par du chatterton pour éviter les pertes du sol.

Le remplissage des colonnes est effectué de façon à obtenir une densité homogène à l'intérieur de la colonne. Pour cela, le sol est introduit en utilisant une colonne en PVC de diamètre inférieur à celle de la colonne d'expérimentation, ceci en subdivisant la colonne en plusieurs parties à des hauteurs égales. On commence par le remplissage de la subdivision basale et on effectue un tassement par de légères secousses. On veille à ce que les autres

couches qui se suivent aient la même densité apparente que la subdivision basale en mettant les mêmes quantités de terre pour les mêmes hauteurs ; avec bien sur un tassement équivalent.



(a)



(b)



(c)

Photo II.1 : Essai expérimental en colonne (a : l'eau du forage utilisée en irrigation, b : parcelle échantillonnée, c : colonnes de sol réalisées).

#### 4- ETUDE SUR DES FOSSES PEDOLOGIQUES

L'objectif de ce travail est de vérifier les changements pouvant se produire en profondeur sous l'effet de la mise en valeur en irrigué.

Suite aux différentes prospections pédologiques sur le terrain, trois sites ont été retenus pour l'implantation de profils pédologiques. Il s'agit de la zone de Memdouda, Mergueb et chott. Les profils se présentent sur une séquence d'environ 7 km allant du chott vers le sud de la zone. Ils se localisent dans des parcelles ayant été cultivées et irriguées depuis environ 15



ans. Des profils adjacents à ces parcelles n'ayant jamais été ni irrigués ni cultivés ont été considérés comme témoins (Fig.II.2).

Une description détaillée des profils a été réalisée ; elle englobe les caractéristiques stationnelles et morphologiques annexes (2). Enfin, des prélèvements de sol ont été effectués sur 06 profils, soit 23 échantillons au total.

Pour la fabrication de lames minces, le prélèvement d'échantillons a été fait sur des mottes consolidées prélevées sur les horizons de profils pédologiques. Les numéros et l'orientation des échantillons ont été reportés sur les boîtes de prélèvement. Certains de ces mêmes échantillons ont servi à l'analyse minéralogique sur poudre.

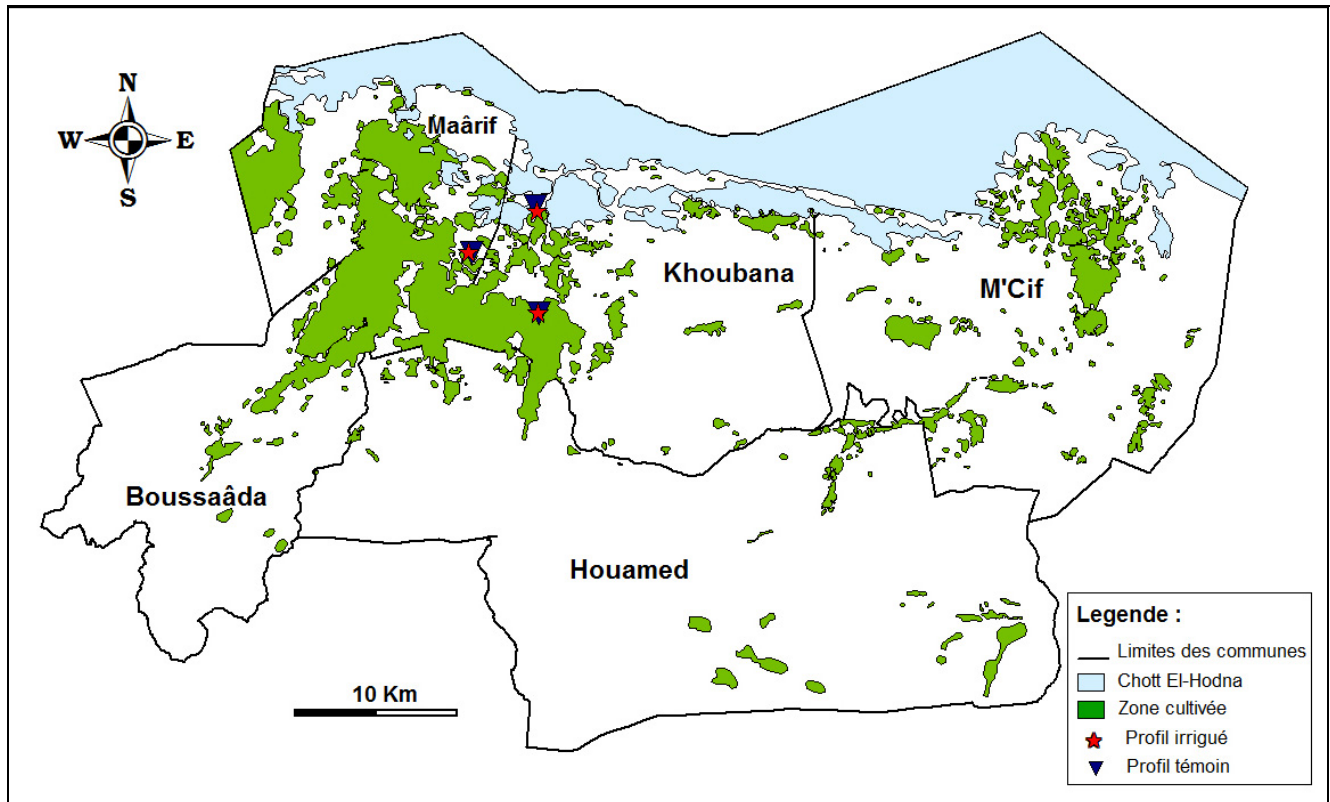


Fig. II.2 : Localisation des profils étudiés

## **Chapitre III : LES METHODES**

### **1- CARTOGRAPHIE DIACHRONIQUE DE L'ENSABLEMENT**

#### **1.1- ZONE CONCERNEE PAR L'ETUDE**

La zone d'étude est localisée au Sud du Chott El-Hodna (fig. III.1). Elle s'étend sur une superficie de 103300 ha englobant la partie où les principaux changements se sont produits. Elle est limitée au Nord par le Chott El Hodna, à l'Ouest par oued Maitar, à l'Est par oued Mellah et au Sud par djebel Meharga. Elle est constituée de dunes de sable, de dépôts alluviaux récents et de collines rocheuses isolées, dont l'altitude s'élève jusqu'à 900 m (djebel Meharga). Au Nord, le chott borde la sebkha et présentant un relief plat.

La région d'étude est située à 35° 25' et 35° 13' Nord de latitude et à 4° 13' et 4° 45' Est de longitude. Elle est représentée par les communes de Mâarif, Khoubana et M'Cif et une partie de la commune de Houamed et Boussaâda.

#### **1.2- METHODOLOGIE**

L'analyse de la signature spectrale des différents objets de l'occupation du sol est une étape importante pour le choix des canaux des scènes de Landsat. Nous nous sommes intéressés par la combinaison des trois canaux (4, 2 et 1) Car, dans cette combinaison de canaux, l'aspect visuel naturel des différentes unités paysagères est mieux représenté et traduit la réalité du terrain. La classification supervisée des images a été réalisée par le logiciel ENVI 3.5 (Abdesselam et al., 2009). On s'est intéressé, par la suite, uniquement à la couche d'ensablement. Cette dernière est digitalisée en utilisant le logiciel MapInfo Professionnal Version 7.5 ce qui a permis d'analyser les variations temporelles. Un support cartographique (éléments de toponymie, relief, routes) est ajouté, finalement, pour obtenir les cartes d'ensablement.

### **2- ANALYSE DES SOLS ET TRAITEMENT DES ECHANTILLONS**

Les échantillons de sols ont été séchés à l'air libre, broyés puis tamisés à 2 mm.

Les analyses réalisées sont les suivantes :

#### **2.1- ANALYSES PHYSIQUES**

##### **2.1.1- Granulométrie**

Détermination des argiles et des limons par la pipette Robinson et séparation des sables fin et sables grossiers par tamisage.

##### **2.2.2- Perméabilité**

Utilisation de la méthode Henin (colonnes à charge constante et mesure sur échantillons remaniés avec l'application de loi de Darcy).

##### **2.2.3- Calcaire total**

Utilisation du calcimètre Bernard.

##### **2.2.4- Gypse**

Méthode de chauffage proposée par Vieillefon (1979).

## **2.2- ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES ET CHIMIQUES**

### **2.2.1- Capacité d'échange cationique (CEC)**

Méthode à l'acétate d'ammonium à pH 7.

### **2.2.2- Conductivité électrique (CE)**

Mesurée par un conductimètre sur une suspension sol/ eau 1:5, la lecture sera traduite en dS/m à 25°C.

### **2.2.3- Carbone organique**

Méthode Walkley-Black.

### **2.2.4- pH<sub>eau</sub>**

Mesuré avec un pH mètre, le rapport sol-eau est de 1:2,5

## **2.3-METHODE DE SUIVI DES COLONNES DE SOL**

15 colonnes, une fois remplies de terre, sont humectées et exposées à l'évaporation. Deux semaines au plus tard, l'évaporation est arrêtée, 3 colonnes sont sacrifiées pour l'étude du mode de redistribution de la salure ; les 12 colonnes restantes sont ré-humectées d'une quantité d'eau égale à celle perdue par évaporation et réexposées au dessèchement. On opère ainsi en sacrifiant 3 colonnes par cycle d'humectation-dessiccation. Cinq cycles ont été réalisés.

L'irrigation goutte-à-goutte par l'eau de forage, a été pratiquée à l'aide de diffuseurs de sérum. Pour éviter l'impact de la goutte sur la surface supérieure du sol, des papiers filtres ont été placés à la surface de l'échantillon comme écran protecteur. Des pesées quotidiennes sont effectuées. L'ouverture des colonnes se fait en fonction des conditions d'évaporation (une à deux semaines). On divise après la colonne en trois parties égales : partie supérieure, partie médiane et partie inférieure.

Des anneaux en PVC (Hauteur 4cm X diamètre 4 cm) sont enfoncés immédiatement dans chaque partie de la colonne. Les anneaux sont portés au séchage à l'étuve à 105 C° pendant 24 heures pour la mesure de la densité apparente. Le sol restant est séché à l'air libre et la mesure de la conductivité électrique a été réalisée.

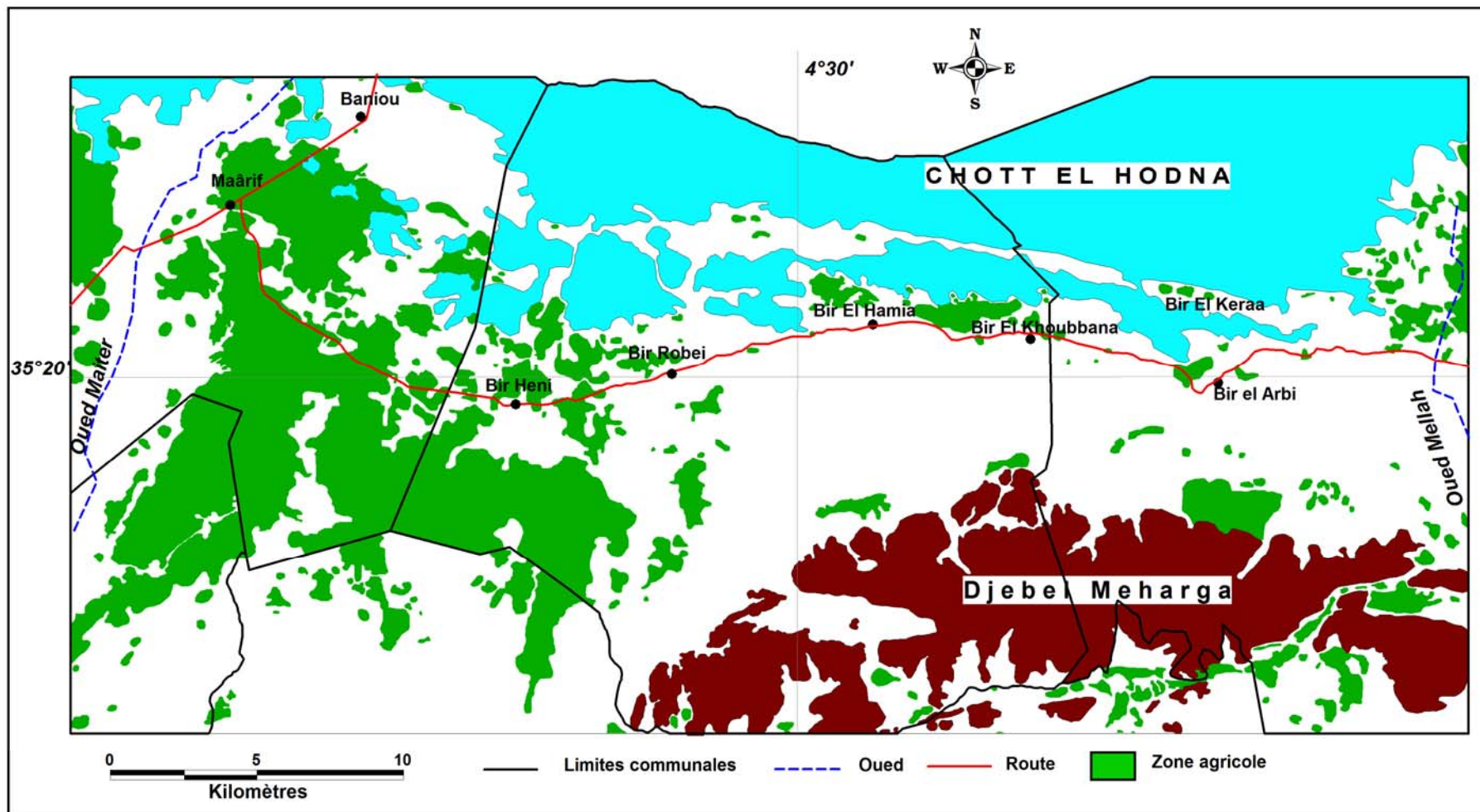


Fig. III.1 : Limites de la zone étudiée

### 3- ANALYSES GEOCHIMIQUE MICROMORPHOLOGIQUE ET MINERALOGIQUE SUR FOSSES PEDOLOGIQUES

#### 3.1- LA SOLUTION DU SOL

L'étude de la solution du sol a été réalisée en utilisant la pâte saturée (USSLS, 1954). Les analyses effectuées sont :

##### 3.1.1- Conductivité électrique

Mesurée par un conductimètre (sans diluer la solution), la lecture sera traduite en dS/m à 25°C.

##### 3.2.2- Le bilan ionique

Le bilan ionique a concerné les analyses suivantes :

##### *b) Les cations :*

-  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  : Les concentrations des ions calcium et magnésium ont été déterminées par analyse à flux continu (appareil SKALAR SAN plus). Après formation d'un complexe coloré, la mesure est réalisée par spectrophotométrie.

-  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  : Les concentrations des ions sodium et potassium ont été mesurées par photométrie à flamme.

##### *c) Les anions :*

- $\text{CO}_3^{--}$  et  $\text{HCO}_3^-$  par volumétrie.
- $\text{Cl}^-$  par dosage colorimétrique.
- $\text{SO}_4^{--}$  sont dosés par turbidimétrie.

#### 3.2- ETUDE MICROMORPHOLOGIQUE

Pour mieux comprendre l'évolution des sols, et dans le but d'expliquer l'impact de l'action anthropique sur le sol, nous avons fait appel à la micromorphologie.

La préparation des lames comporte l'imprégnation, la taille et le polissage. Les lames ont été réalisées en France à l'atelier de fabrication de lames minces de l'INRA de Rennes (France).

Pour la description micromorphologique, nous avons employé la terminologie proposée par Bullock et al. (1985), en se servant de la traduction de la terminologie élaborée par Stoops (1986).

#### 3.3- ANALYSE MINERALOGIQUE

Des analyses minéralogiques sur échantillons broyés (en poudre), ont été réalisées au Centre de Recherche et de Développement (CRD) de Boumerdès.

Les conditions expérimentales sont les suivantes :

- Diffractomètre X'Pert PRO de PANalytical, tube radiogène céramique à anticathode de cuivre.
- Longueur d'onde  $\text{CuK}\alpha$  [Å]: 1,5418

### **3.4- MORPHOSCOPIE DES SABLES**

La morphoscopie des sables peut être définie comme la détermination statistique des différents types de grains de quartz dans les dépôts sableux. Elle permet la recherche de la nature de l'agent de transport donc d'usure.

La morphoscopie des sables est une méthode très pratiquée dans les études de sédimentologie (Berthois et Crosnier, 1966 ; Ters et Fara, 1968 ; Michel, 1969 ; Ritchot et Cailleux, 1971 ; Diop, 1990 ; Rocheleau, 1997 ; Bruzzi et Prone, 2000). C'est une méthode pouvant aider, quand un doute subsiste, à identifier certains dépôts.

Les échantillons du sol des différents horizons (23 au total) ont été utilisés dans cette étude consacrée à la morphoscopie des sables. Nous nous sommes intéressés à la taille des sables dominante représentée par les sables très fins à moyen.

Tout d'abord, si l'échantillon fait effervescence à l'acide, on le traite d'abord à l'HCl, pour le débarrasser des grains calcaires et ne pas risquer de confondre ceux-ci avec d'autres roches ou minéraux (Ritchot et Cailleux, 1971). Le sol est lavé ensuite sous jet d'eau sur un tamis de 100 $\mu$ m en frottant fortement avec les doigts pendant quelques minutes, pour le débarrasser des éléments fins. Les échantillons ainsi traités sont placés dans une l'étuve pour le séchage avant l'observation à la loupe.

L'observation des sables a été réalisée à la loupe binoculaire. Le comptage des grains a été effectué le plus souvent sur 100 grains environ.

## **4- TRAITEMENT DES DONNEES**

Le traitement statistique des données a été réalisé grâce au logiciel Statistica V6. Trois méthodes ont été utilisées :

### **4.1- ANALYSE DE LA VARIANCE**

L'objectif est d'étudier la variabilité des paramètres pédologiques inter-site, on a soumis nos résultats à une analyse de la variance (ANOVA) à un facteur de variation, avec le test de Newman Keuls au seuil de 5% ( $p < 0.05$ ) pour identifier les groupes homogènes. Pour cela, les données doivent satisfaire à deux conditions :

- une distribution normale des données (test de Shapiro-Wilk) et ;
- l'homogénéité des variances (test de Bartlett).

Si la normalité n'a pas pu être vérifiée ; une transformation des variables peut être réalisée (Dagnelie, 1975). Dans certains de nos variables (conductivité électrique, limon grossier), la normalité de la distribution n'a pas pu être observée. Dans cette situation, on a adopté le test de Kruskal-Wallis (analyse de variance à un critère) qui est un test non paramétrique.

### **4.2-ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES**

Les échantillons prélevés sur les quatre sites ont fait l'objet de mesures physiques et physico-chimiques diverses. Dans le cas de nombreux paramètres, le traitement statistique le plus approprié est l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette méthode permet d'étudier les sources indépendantes de la variabilité, tous paramètres confondus. L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique qui permet de faire la synthèse de l'information contenue dans un grand nombre de variables.

Les composantes principales sont de nouvelles variables, indépendantes, combinaison linéaire des variables initiales, possédant une variance maximum. Les composantes principales autorisent en outre la représentation graphique de grands tableaux de données trop

complexes à décrire par les méthodes graphiques habituelles. C'est incontestablement cette dernière propriété qui est à l'origine de leur large utilisation. En toute rigueur, une ACP ne nécessite aucune condition de validité et s'applique à des variables quantitatives (Falissard 1998).

#### 4.3- TEST DE CONFORMITE D'UNE MOYENNE

Dans le but d'étudier l'ampleur des changements et de l'évolution des paramètres pédologiques, dans chaque site, suite au changement d'utilisation des terres dans cette région, on a utilisé le test de conformité d'une moyenne (Dagnélie, 1975). Il s'agit de la comparaison d'une moyenne observée et d'une moyenne théorique (Vessereau, 1957). Ce test a été appliqué pour chaque site indépendamment des autres. L'objectif est de vérifier si la moyenne « m » d'une population est ou n'est pas égale à une valeur donnée «  $m_0$  ».

On va donc tester l'hypothèse nulle  $H_0$  contre l'hypothèse alternative  $H_1$  :  $\{H_0 : m=m_0$   
 $\{H_1 : m \neq m_0$

On rejette l'hypothèse nulle lorsque la moyenne observée est trop différente de la valeur témoin. Le test de normalité de Shapiro-Wilk a été appliqué pour les différents paramètres pédologiques étudiés. Pour les variables ne présentant pas une distribution normale, un test non paramétrique a été appliqué.

### 5- UTILISATION DES ECHELLES D'APRECIATION DES ANALYSES DU SOL

#### 5.1- LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE

Elle est appréciée en utilisant l'échelle de la CE du rapport 1:5 pour les analyses de l'horizon de surface et l'échelle de Richard (USSLS, 1954) pour la pâte saturée (tableau III.1 et III.2).

**Tableau III.1** : Appréciation de salinité du sol sur rapport 1/5 (Mathieu et Pieltain, 2003)

Echelle	0,6	1	2	4	
CE (rapport sol/eau 1:5) (dS/m)	Non salé	Légèrement salé	Salé	Très salé	Extrêmement salé

**Tableau III.2** : Appréciation de salinité du sol sur extrait saturé (Mathieu et Pieltain, 2003)

Echelle	2	4	8	16	
CE (sur extrait de pâte saturée) (dS/m)	Non salé	Légèrement salé	Salé	Très salé	Extrêmement salé

#### 5.2- LA TEXTURE DU SOL

La texture de sol se rapporte à la proportion en poids des fractions du sol (sable, limon, et argile) inférieures à 2 mm déterminées au laboratoire par l'analyse granulométrique. La fraction supérieure à 2 mm (graviers, cailloux, ...) n'est pas utilisée pour la définition de la texture. La texture du sol est établit après le report des pourcentages des différentes fractions sur le triangle texturale. Dans ce dernier, des plages limitées par des segments de droites ou de courbes définissent les différentes textures. Ces plages correspondent en principe à des comportements spécifiques des échantillons au niveau de leurs propriétés mécaniques. En fait,

elles ne sont pas exactement équivalentes dans les nombreux et différents systèmes de représentation existants.

### 5.2.1- Le triangle textural de l'USDA

Il présente douze classes qui sont :

1. Sand, 2. Silt, 3. Clay, 4. Loamy Sand, 5. Silty Clay, 6. Loam, 7. Clay-loam 8. Loamy sand, 9. Sandy loam, 10. Silt loam, 11. Sandy clay loam, et 12. Silty clay loam (fig. III.2).

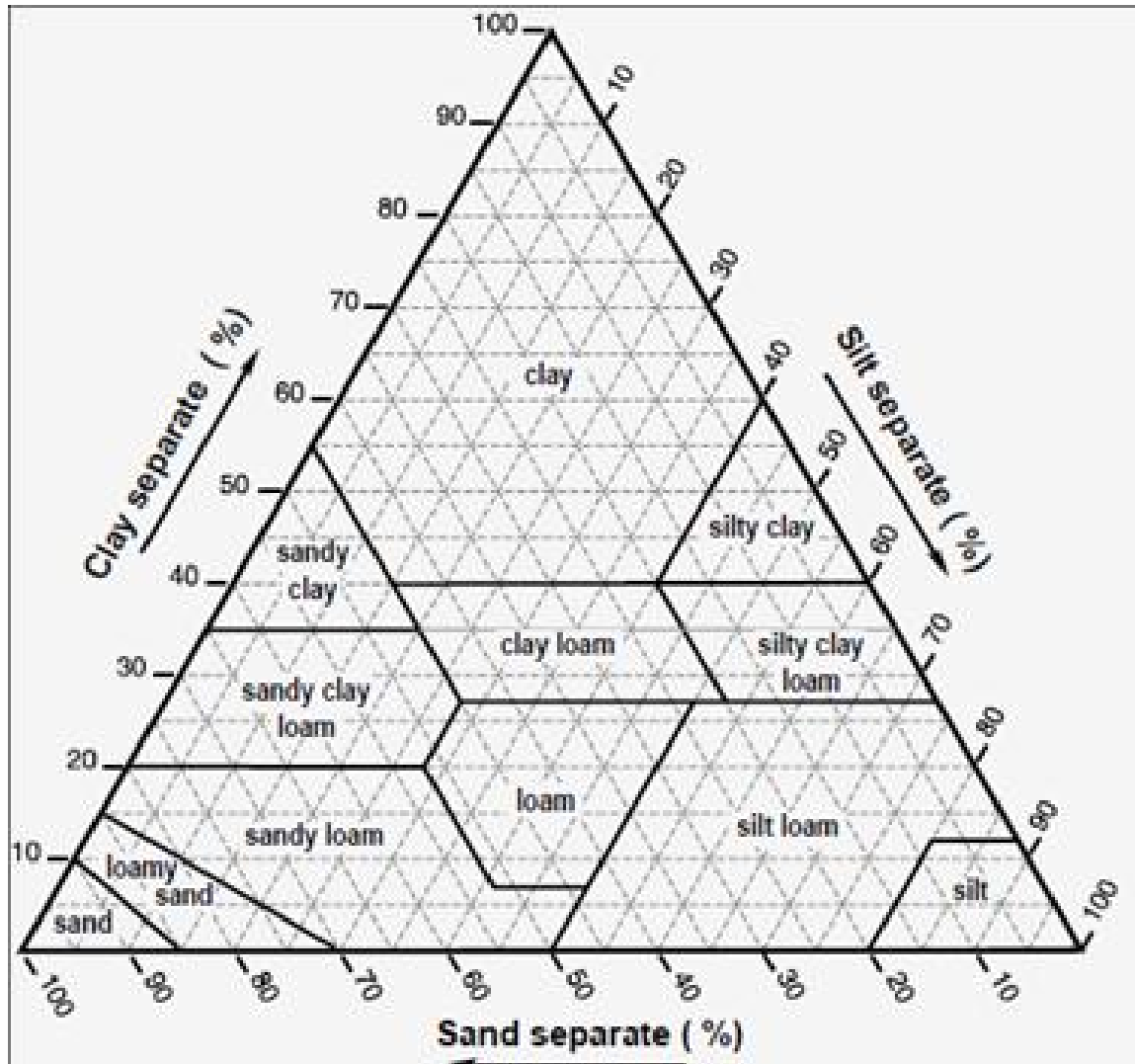


Fig. III.2 : Triangle textural Américain.

### 5.3- LA PERMEABILITE

Elle est appréciée en utilisant l'échelle représentée dans le tableau III.3 suivant :



**Tableau III.3** : Appréciation du coefficient de perméabilité.

(Lozet et Mathieu, 1990)

Unité de perméabilité	Seuil et appréciation du coefficient de perméabilité en drainage agricole.								
m/s	Sol non perméable	$10^{-7}$	Sol peu perméable	$10^{-6}$	Sol modérément perméable	$10^{-5}$	Sol perméable	$10^{-4}$	Sol très perméable
cm/s		$10^{-5}$		$10^{-4}$		$10^{-3}$		$10^{-2}$	
cm/h		0,036		0,36		3,6		36,0	
m/j		0,0086		0,086		0,86		0,64	

#### 5.4- LE CALCAIRE TOTAL

Il est apprécié par l'échelle suivante (Tableau III.4) :

**Tableau III.4** : Evaluation des pourcentages des classes de calcaire.

Classe de CaCO <sub>3</sub> (%)	Appréciation (Lozet et Mathieu, 1990)
0-2%	Très faible
2-10%	Faible
10-25%	Moyenne
25-50%	forte

#### 5.5- LA CAPACITE D'ECHANGE CATIONIQUE (CEC)

Les valeurs de la CEC sont interprétées en fonction de l'échelle suivante (Tableau III.5)

**Tableau III.5** : Appréciation des valeurs des classes de CEC.

Classes de CEC cmol(+)/kg	Appréciation (Hazelton et Murphy, 2007)
<6	Très faible
6 – 12	Faible
12 – 25	Moyenne
25 – 40	Elevée
>40	Très élevée

## **Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSION**

### **1- EVOLUTION DE L'ENSABLEMENT AU SUD DU HODNA**

#### **1.1-INTRODUCTION**

Le phénomène de l'érosion éolienne et ses effets néfastes sur le milieu naturel et l'environnement, constituent un sérieux problème, surtout dans les zones arides du pays. Le phénomène de l'ensablement s'est amplifié durant ces dernières années avec un changement profond de l'écosystème steppique où le matériel éolien (sable) remplace la végétation steppique (alfa) (Bensaid, 2006). La télédétection spatiale est un outil performant de suivi diachronique de cette dégradation, par le nombre élevé de données mobilisables, par l'homogénéité synoptique des informations transmises et par la répétitivité de leur acquisition (Bensaid, 2006 ; Benmessaoud et al., 2009 ; El Zerey, 2009 ; Haddouch et al., 2011).

Plusieurs travaux ont révélé une dégradation des milieux steppiques Algérien (MARA, 1974 ; Bedrani et Bensouiah, 2000 ; Mouhous, 2005 ; Bensaid et al., 2007 ; Benslimane et al., 2008 ; Hadeid, 2008 ; Nedjraoui et Bedrani, 2008 ; Bouchetata et Bouchetata, 2011) .

Le sud du Hodna, appelée aussi zone du R'mel (zone de sable), est une zone pastorale qui a connu, depuis quelques décennies, des changements importants de l'utilisation des ressources en eau et en sol (Sebhi, 1987 ; Abdesselam et al., 2007 ; Abdesselam et Halitim, 2010b ; Hadjab, 2010). L'évolution rapide d'usage des terres et les différentes pressions exercées sur l'environnement (d'ordre naturel et anthropique) exigent de faire un constat et d'établir un bilan de l'évolution du milieu. Depuis quelques décennies, on assiste dans le Sud du Hodna à une rapide transformation du paysage due principalement à l'ensablement, une des manifestations de la désertification. Ce phénomène constitue un défi majeur auquel les populations sont à l'heure actuelle confrontées. Nous essayons dans ce paragraphe d'étudier la dynamique et les causes de l'ensablement dans ce milieu.

#### **1.2- DYNAMIQUE GLOBALE DE L'ENSABLEMENT AU SUD DU HODNA**

Sur une superficie étudiée de 103300 ha, on a constaté, globalement, qu'entre 1972 et 2001, soit à 30 ans d'intervalle environ (fig. IV.1, IV.2 et IV.3), l'occupation des terres a subi une progression des superficies ensablées de l'ordre de 6500 hectares. Le pourcentage de la zone affectée par l'ensablement par rapport à la superficie totale de la zone étudiée a passé de 4,57% en 1972 à 7,72% en 1987 pour atteindre 10,86% en 2001.

La dynamique du sable indique une extension de l'ensablement qui peut être interprétée par l'action éolienne dans cette région. Cette érosion, d'origine climatique, a été amplifiée par une action anthropique (mise en valeur agricole en irrigué) amorcée au début des années soixante dix.

Les formations éoliennes sont concentrées au sud du Hodna où l'homme contribue d'une manière efficace en détruisant les espèces vivaces (labours surpâturage). La couverture sableuse est fortement érodée avec remise en mouvement du sable. D'après Mimoune (1995), des prélèvements au niveau du cordon dunaire de bir Larbi et des voiles éoliennes de Kaf Rouah et Bir Khoubana permet de dire que les sables sont siliceux jaune rougeâtres (5YR6/6 à 7.5YR6/6) et leur granulométrie se caractérise par des sables fins très bien triés et une courbe de fréquence unimodale à mode situé entre 125 et 160  $\mu\text{m}$ .

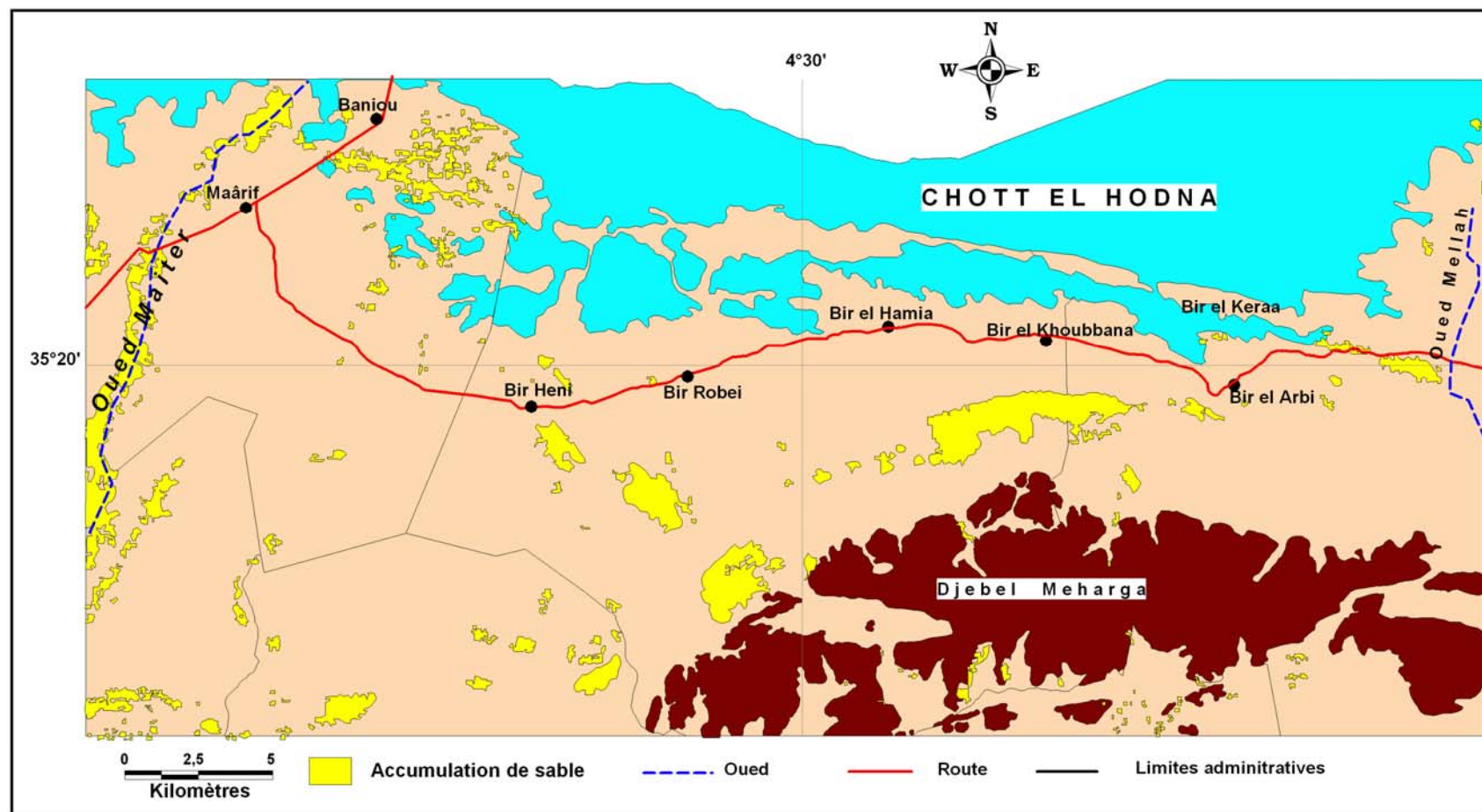


Fig. IV.1 : Carte d'ensablement du sud du Hodna. (Période 1972).

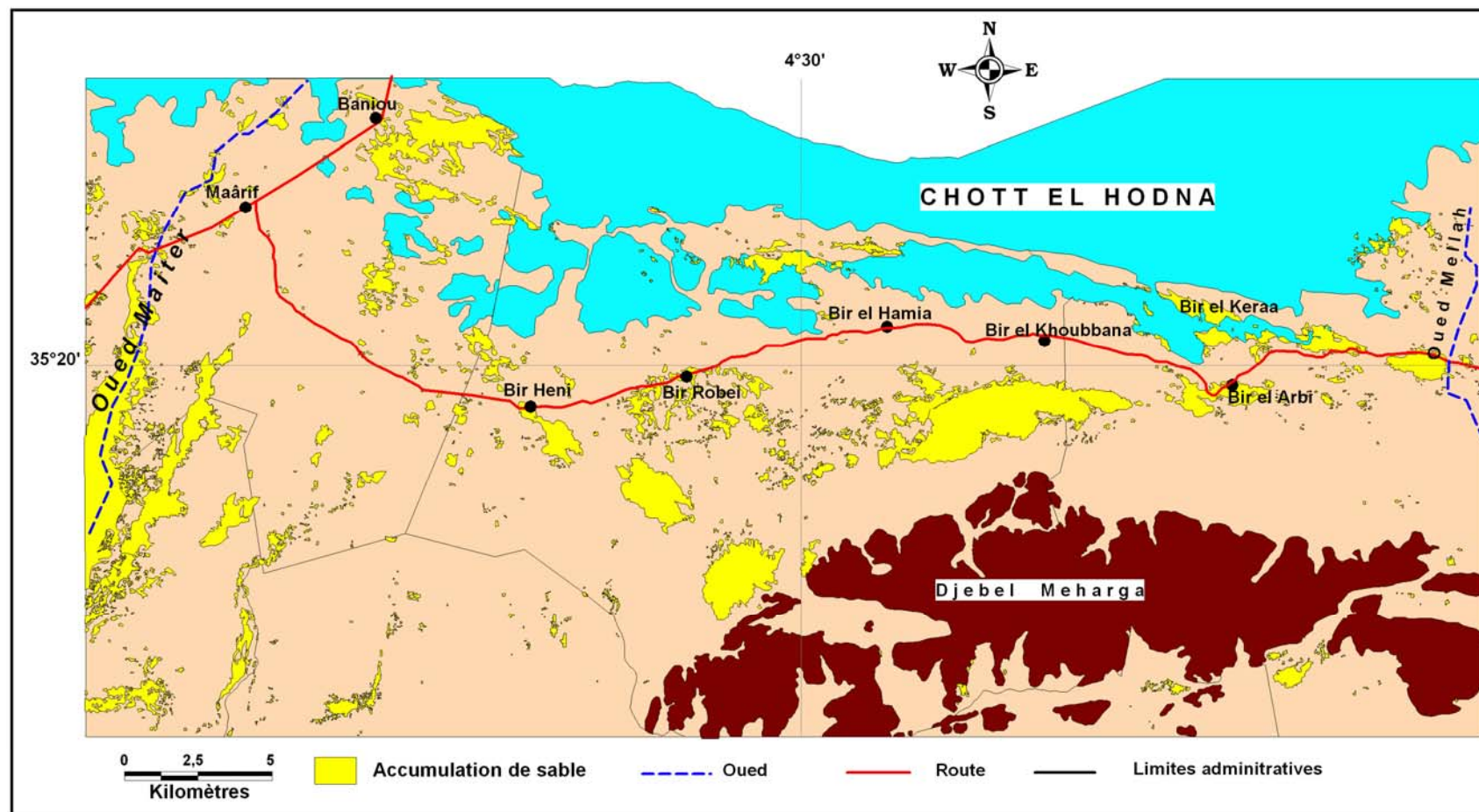


Fig. IV.2 : Carte d'ensablement du sud du Hodna. (Période 1986).



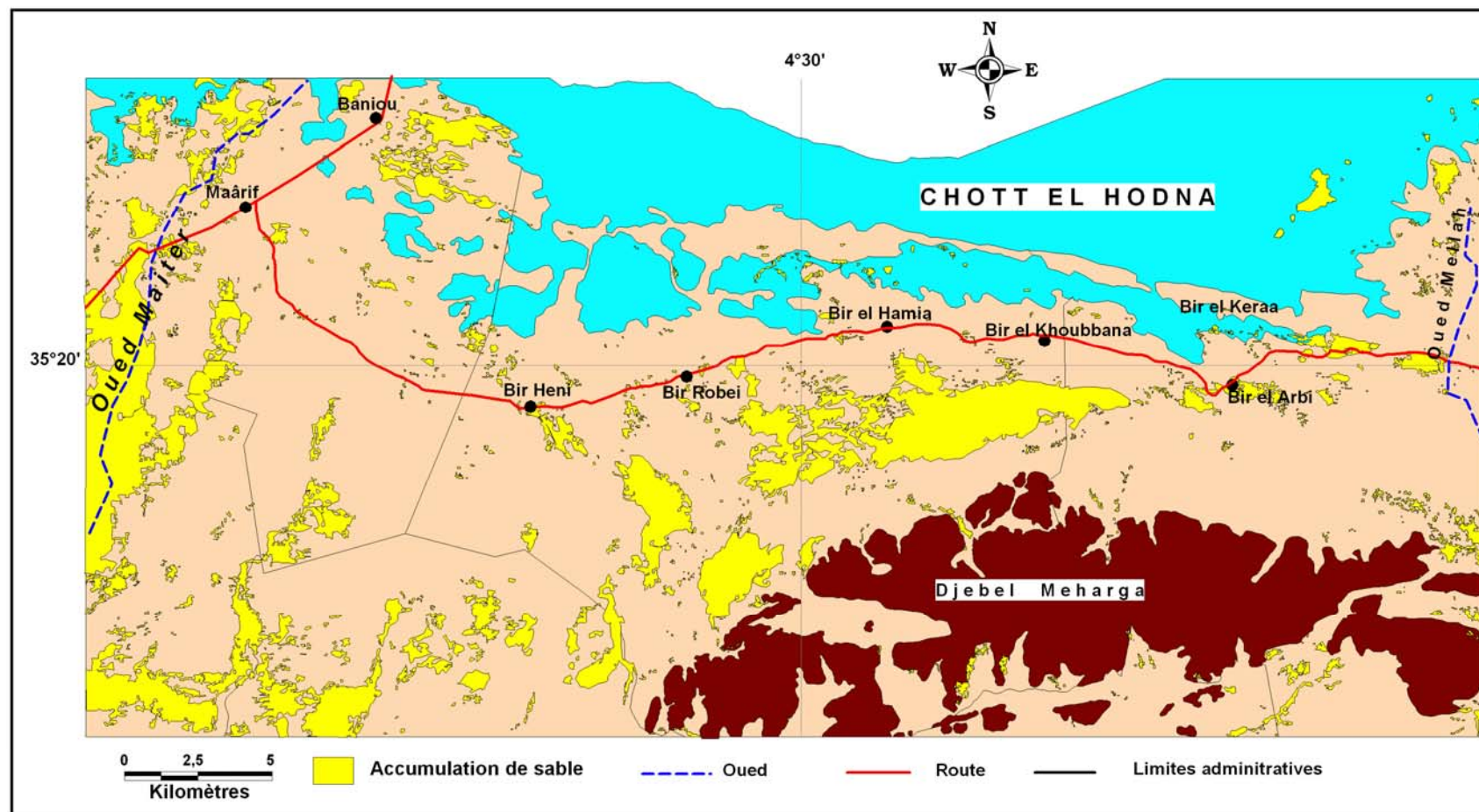


Fig. IV.3 : Carte d'ensablement du sud du Hodna. (Période 2001).

Ceci correspond aux sables les plus fins transportés par saltation. Ces sables sont d'origine locale ; ils proviennent de l'altération des grès Barémiens et Albiens qui affleurent largement.

### 1.3- LES FACTEURS INFLUENÇANTS LA DYNAMIQUE DE L'ENSABLEMENT

Il faut dire que l'érosion éolienne a toujours existé dans ces zones mais, ce sont ses effets qui se sont accentués alors que ces régions ont bénéficié de plusieurs aménagements hydro-agricoles à partir de 1970, date paradoxalement à partir de laquelle le phénomène d'ensablement et de désertification a commencé à se manifester avec plus d'acuité.

#### 1.3.1- Causes naturelles

La faiblesse et l'irrégularité des précipitations (77,5 à 316,2 mm en moyenne) (fig. IV.4), avec une médiane de 168,5 mm, aggravent les processus de dégradation jusqu'à les rendre irréversibles. En effet, la réduction du couvert végétal, dû essentiellement à la pression humaine, est accentuée par l'influence de la sécheresse. La figure (IV.4) indique qu'au cours de la période d'étude, le climat présente des années relativement favorables entrecoupées par des périodes sèches. Or, la courbe de tendance des pluies ne révèle pas une évolution à la baisse.

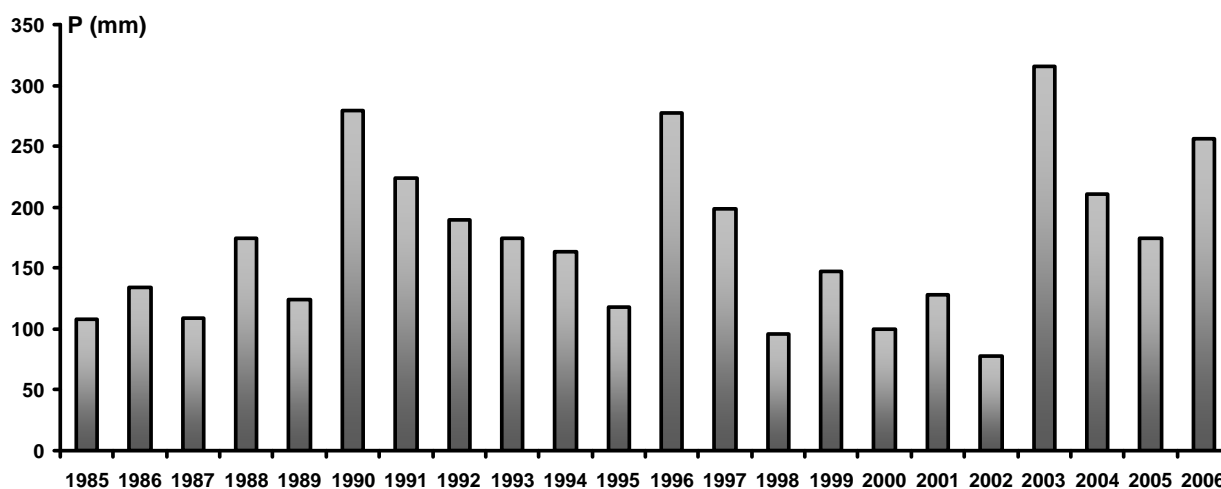


Fig. IV.4 : Variabilité interannuelle des pluies au sud du Hodna

Les conditions climatiques sévères de la région, marquée par une forte aridité, ont toujours joué un rôle important sur l'évolution de ce milieu. Le Sud du Hodna est une région venteuse, elle est le siège d'une érosion éolienne intense. En effet, l'érosion éolienne pose des problèmes graves pour la mise en valeur et même aux villages. Elle se traduit dans l'espace par des accumulations dunaires qui ont été remises en mouvement par les hommes par leurs actions de destruction de la végétation naturelle.

### 1.3.2- Causes anthropiques

Le Sud du Hodna était une zone de parcours où les nomades Hodnéens passaient l'hiver avant de se rendre en estivage au Nord sur les hautes plaines constantinoises. Au fil des temps, et notamment à partir de la période coloniale, la limitation des déplacements des nomades les priva d'une grande partie de leur parcours et de leur pâturage habituel (Sebhi, 1987). Acculés dans leur région, ils se sont efforcés, pour répondre au besoin d'une population en constante augmentation, d'étendre les labours dans des zones très peu favorables à l'agriculture ; ce qui a eu pour conséquence de favoriser, dans des proportions inquiétantes, l'érosion et de réduire d'autant le pâturage.

L'extension de l'agriculture dans ce milieu (fig. IV.5) est étroitement liée à l'histoire récente de cette région. Au début des années soixante dix, cette zone a été choisie comme zone pilote dans le cadre de la révolution agraire et un projet de mise en valeur agricole a été lancé Sebhi (1987). Le schéma élaboré et inscrit sur le terrain avaient trois objectifs précis avec la spécialisation de l'espace délimités : les parcours ont accueilli les CEPRAs (coopérative d'élevage pastoral de la révolution agraire), les céréales les CAPRAS (coopérative agricole de production de la révolution agraire), les périmètres irrigués dans la bande chotteuse. Au début des années quatre vingt, et avec l'application de la loi portant accession à la propriété foncière agricole par la mise en valeur des terres, beaucoup de terres ont été attribuées là où les potentialités en eaux souterraines existent. Cette zone connaîtra une parcellisation excessive avec extension des terrains défrichés au dépend des parcours. En l'an 2000, le plan national du développement agricole (PNDA) a été lancé. Le but est d'essayer de résoudre les problèmes liés au manque d'investissements privés dans l'agriculture. L'accent est mis sur l'objectif à court terme d'injecter des investissements relativement importants et fortement subventionnés. Ces actions ont contribué à une pression forte sur les ressources des milieux.

L'augmentation de la population (fig. IV.6) a intensifié la pression sur le milieu naturel. Cette population rurale, malgré sa tendance à s'agglomérer dans les grands centres urbains (cas de Boussaâda), s'attache solidement à la possession d'une parcelle de terre, acquise soit dans le cadre de la collectivité, soit dans le cadre des différentes politiques agraires. C'est ce phénomène qui a contribué au morcellement de cet espace fragile au dépend des parcours (Tableau IV.1).

L'intensité de la mise en valeur s'est accru et a augmenté l'exploitation et les labours des terres gagnées au profit des parcours déjà dégradés (fig. IV.7). Ce qui a stimulé les phénomènes de salinisation secondaire, parce que les sols sont déjà salés mais à différent degré, et d'ensablement dont l'empreinte sur le terrain est réelle (Mimoune, 1996 ; Abdesselam et Halitim, 2010b ; Hadjab, 2010). La désertification a pris le pas, par une utilisation irrationnelle et irraisonnée.

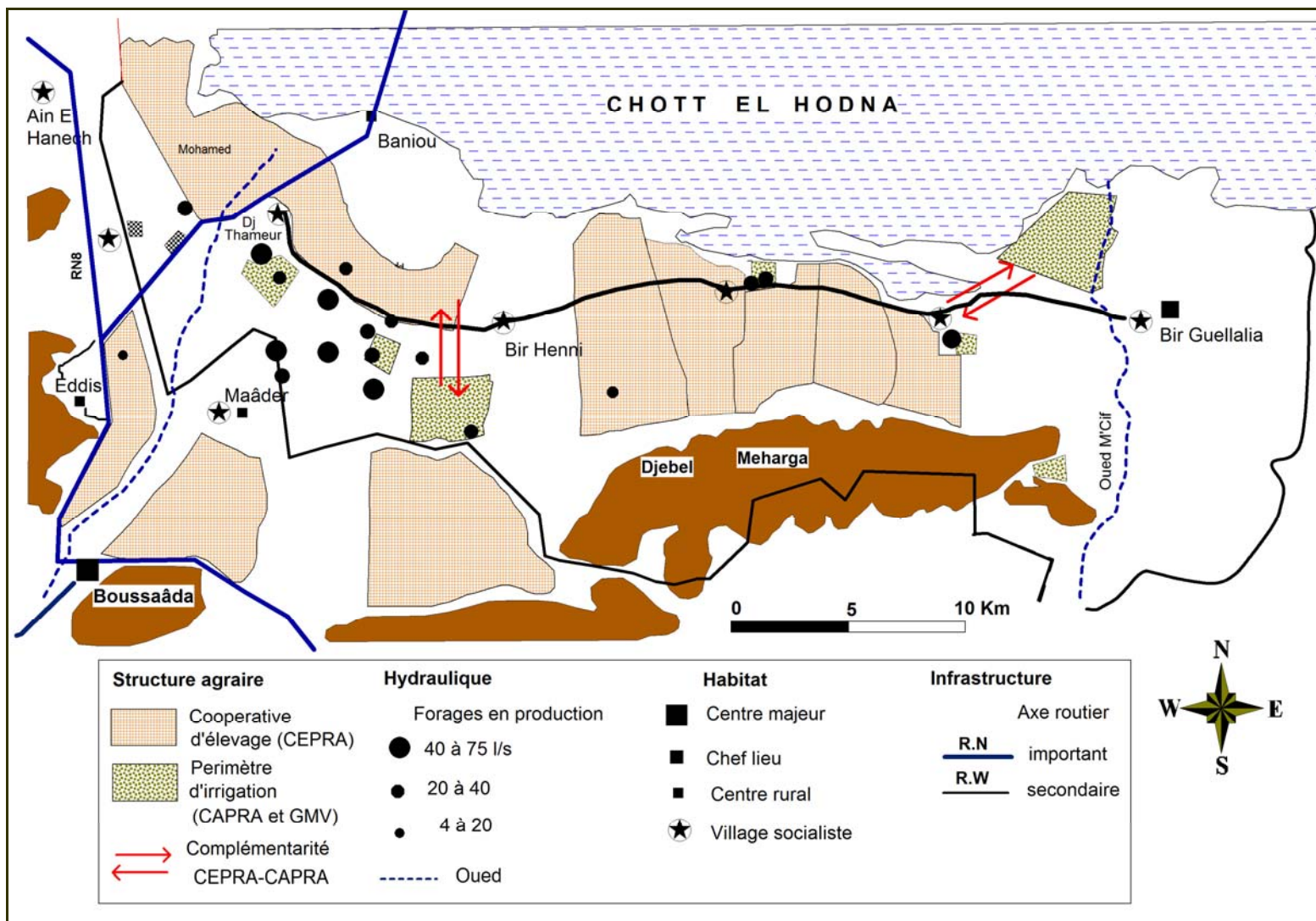


Fig. IV.5 : Schéma d'aménagement rural intégré au sud du Hodna dans les années soixante dix (Sebhi, 1987).



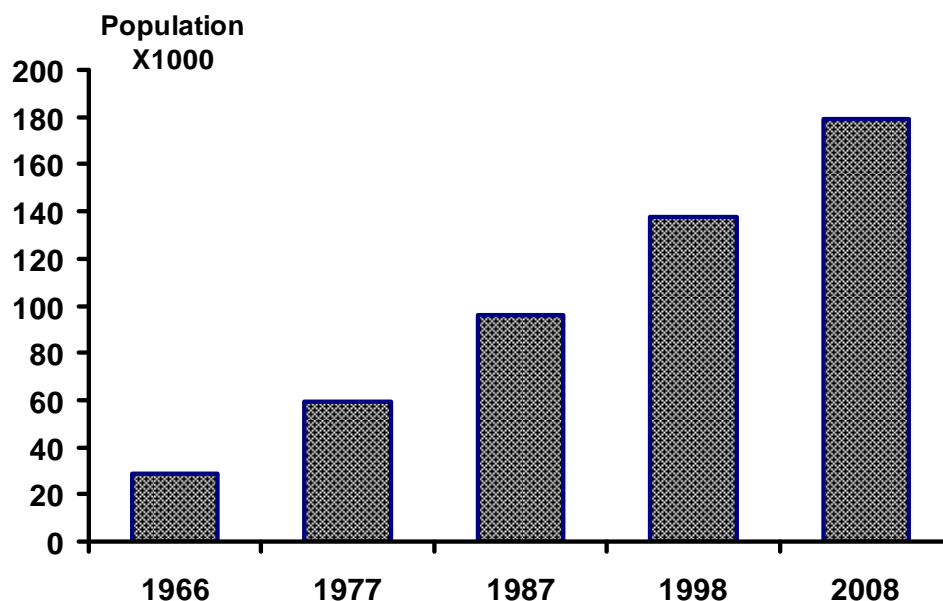


Fig. IV.6 : L'accroissement démographique au sud du Hodna.

Le surpâturage sur des parcours déjà dégradés (fig. IV.8) constitue une menace de plus sur l'évolution de cet écosystème fragile. Le surpâturage entraîne des dégradations irréversibles favorables aux entreprises des processus mécaniques. Le cheptel en surnombre "détruit" le couvert végétal protecteur tout en rendant par le piétinement la surface du sol pulvérulente (érosion éolienne) et tassant celui-ci, ce qui réduit sa perméabilité, donc ses réserves en eau et augmente le ruissellement (érosion hydrique).

Communes	Nombre d'exploitations
Boussaâda	1209
Khoubana	805
Maârif	787
M'cif	873
Houamed	1171
Total	4854

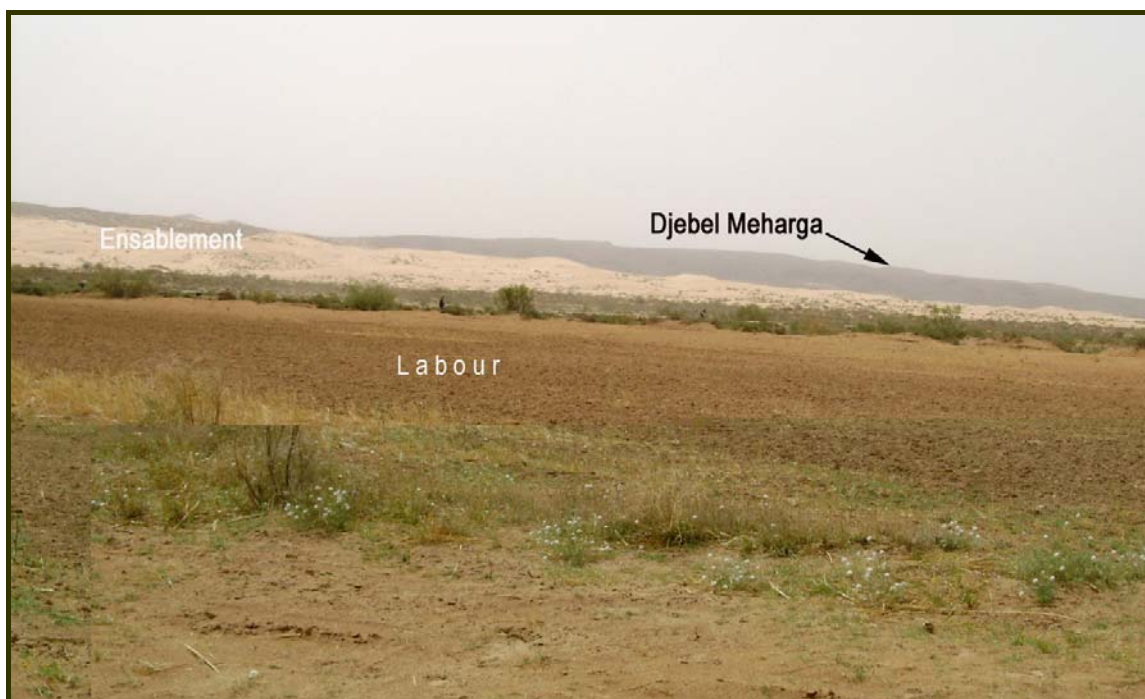


Fig. IV.7 : Défrichement des terres au piedmont nord du Djebel Meharga (Cliché : S Abdesselam, 2008)



Fig. IV.8 : Parcours dégradé (Cliché : S Abdesselam, 2008)

## **1.4- CONCLUSION**

Cette région à vocation pastorale a connu ces dernières décennies une anthropisation croissante. Elle se trouve ainsi sujette à des pressions diverses d'ordre naturelles et anthropiques. L'occupation des terres a subi par conséquent des changements notables. Les résultats trouvés indiquent une extension très nette de l'ensablement qui constitue une contrainte sérieuse au développement local. Ce résultat révèle une situation très alarmante de l'état de dégradation des terres de cette région. Les cartes d'ensablement constituent un outil précieux pour la connaissance de la dynamique récente de ce milieu. La recrudescence des phénomènes d'ensablement et de désertification dans le Sud du Hodna est beaucoup plus liée à l'accroissement de la pression humaine qu'à la péjoration des conditions climatiques peu favorables.

## 2- ETUDE DE L'HORIZON DE SURFACE

Les résultats analytiques obtenus sont reportés en annexe (3). Dans cette partie, les points suivants seront abordés :

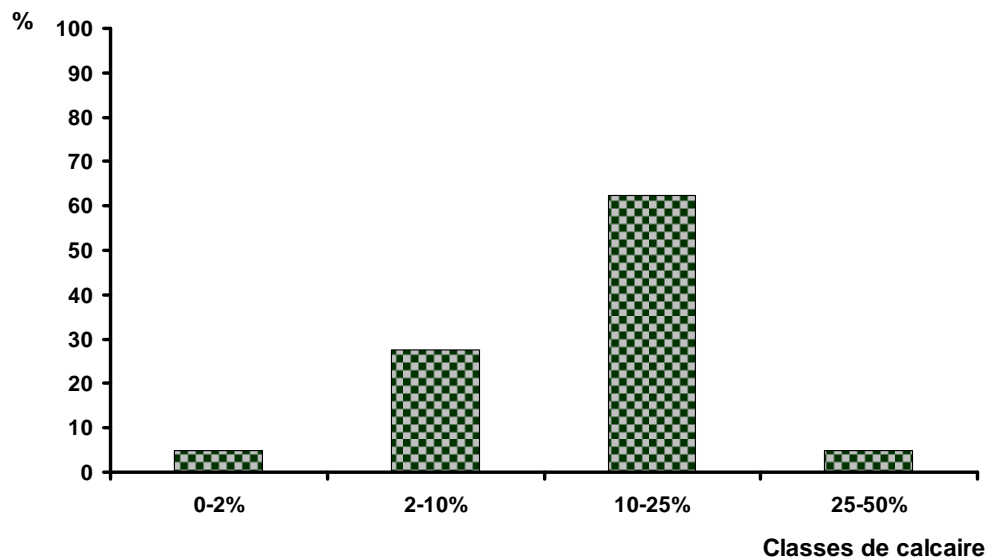
- Un examen des analyses de l'horizon de surface avec comparaison entre les différents sites.
- Une analyse en composante principale (ACP) des caractéristiques du sol.
- Une comparaison d'une moyenne avec un témoin pour chaque caractéristique du sol et pour chaque site.

### 2.1- ANALYSE GLOBALE DES ECHANTILLONS DE SURFACE

#### 2.1.1- Le calcaire

Les valeurs de calcaire dans les échantillons de surface sont consignées dans l'annexe 3. La teneur moyenne est de 13,30%. Les valeurs limites varient de 0,99 à 29,11 %. La médiane indique que 50% des échantillons sont inférieurs à 13,7%.

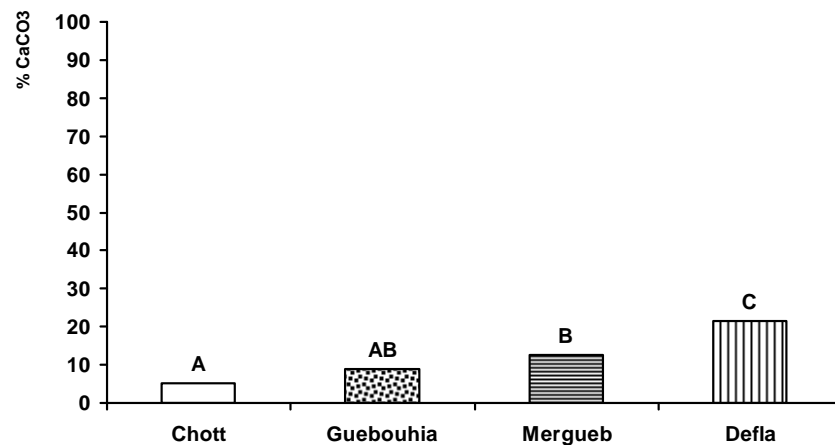
Selon les valeurs retrouvées (fig. IV.9) seulement 5% des échantillons présentent de fortes teneurs en calcaire, environ 62,5% des échantillons présentent des teneurs moyennes et 32,5% sont considérées comme faibles à très faibles (valeurs entre 0 et 10%).



**Fig. IV.9** : Pourcentage des classes de calcaire des échantillons de surface

L'analyse de la variance à un critère de classification montre une différence significative entre les différents sites ( $F=17,14$  et  $P<0,001$ ).

Le test de Newman Keuls au seuil de 5%, permet de classer les sites en groupes homogènes. Selon la figure (IV.10), On constate la présence de trois groupes homogènes (chott, Mergueb et Defla) et un groupe intermédiaire (Guebouhia).



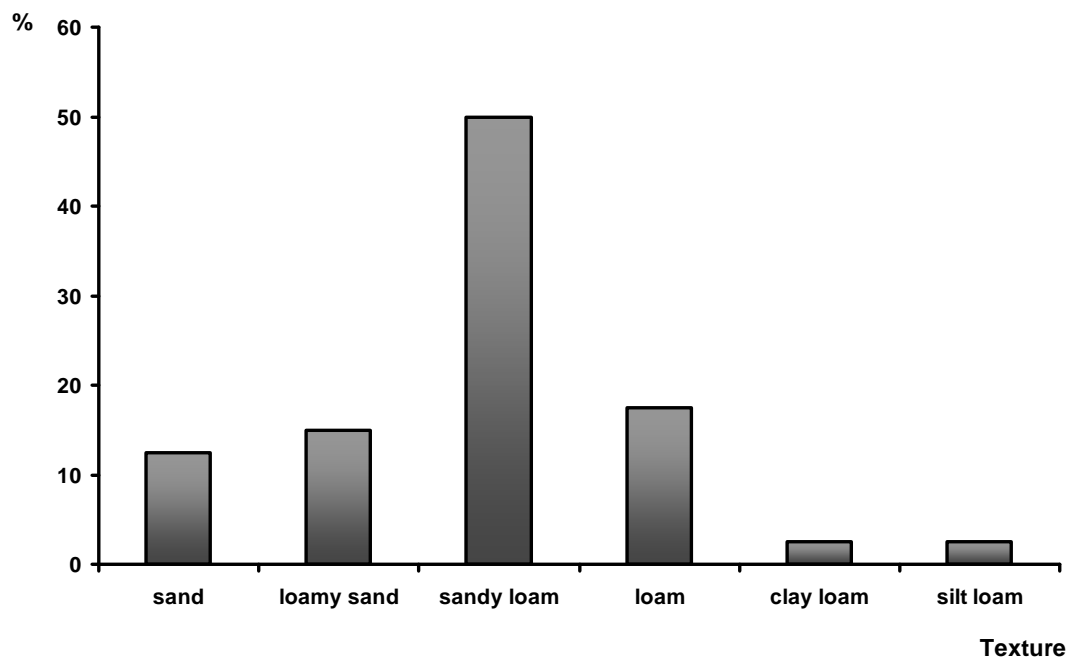
**Fig. IV.10** : Valeur moyenne de calcaire par site.

(Les lettres sur les barres sont les groupes homogènes selon le test de Newman Keuls)

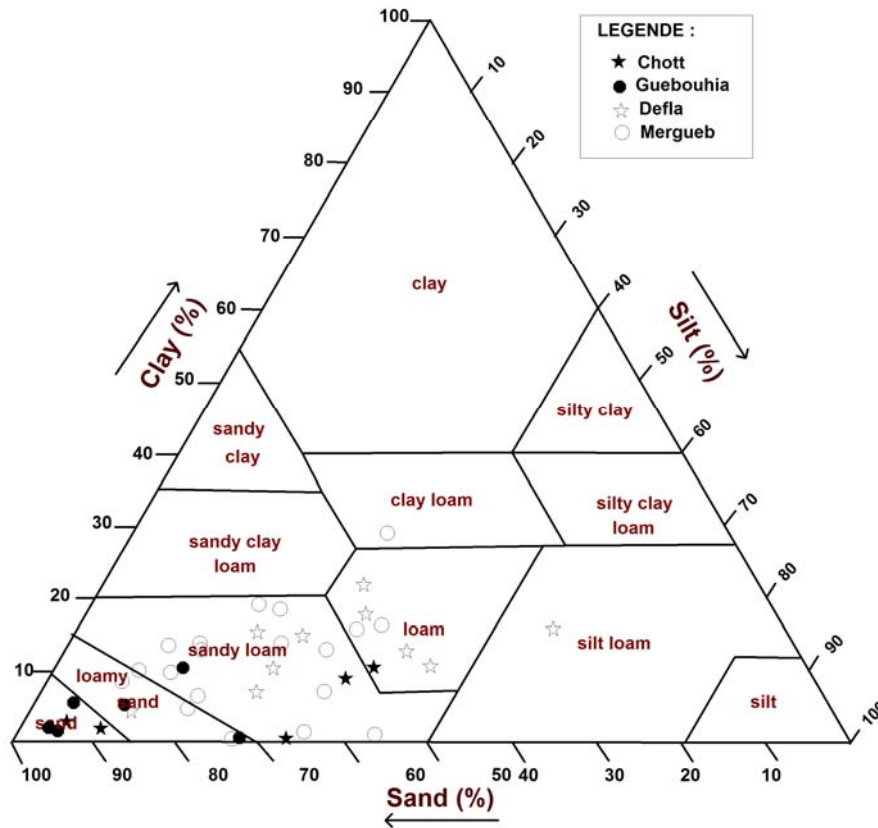
### 2.1.2- La texture

Le résultat global (fig. IV.11 et IV.12) révèle la présence de six classes texturales. Il s'agit des classes suivantes :

Sand, loamy sand, sandy loam, loam, clay loam et silt loam.



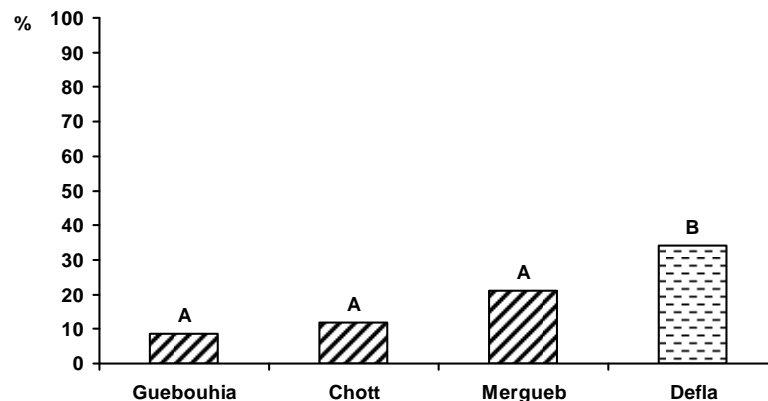
**Fig. IV.11** : Pourcentage des classes texturales



**Fig. IV.12 :** Report des pourcentages des différentes fractions sur le triangle textural.

Si on prend en considération les éléments fins (argile+limon fin), l’analyse de la variance à un critère de classification révèle une différence significative entre les différents sites ( $F=8,6$  et  $P<0,001$ ).

Le test de Newman Keuls au seuil de 5% indique la présence de deux groupes homogènes : chott, Mergueb et Guebouhia d’une part et Defla d’autre part (fig. IV.13).

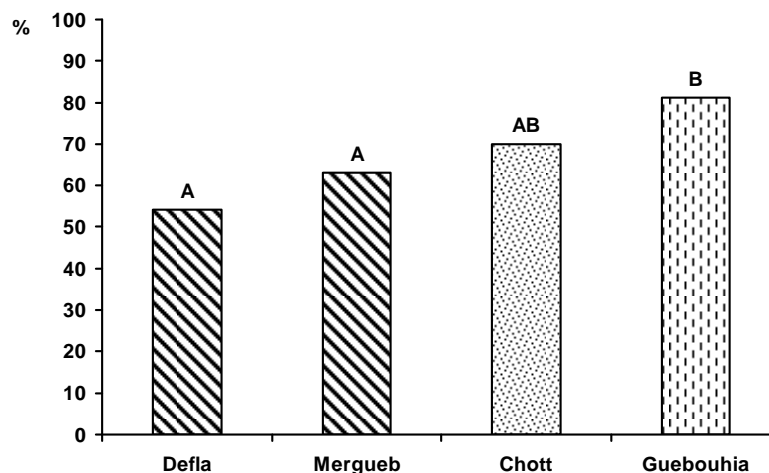


**Fig. IV.13 :** Valeur moyenne des éléments fins (argile+limon fin) par site.

(Les lettres sur les barres sont les groupes homogènes selon le test de Newman Keuls)

Du point de vue éléments grossiers (sable fin+sable grossier), l’analyse de la variance à un critère de classification indique une différence significative entre les différents sites ( $F=5,03$  et  $P=0,005$ ).

Le test de Newman Keuls au seuil de 5% indique la présence de deux groupes homogènes : Defla et Mergueb d'une part et Guebouhia d'autre part (fig. IV.14). Chott est un groupe intermédiaire.



**Fig. IV.14** : Valeur moyenne des éléments grossiers (sable fin+sable grossier) par site.

(Les lettres sur les barres sont les groupes homogènes selon le test de Newman Keuls)

Les résultats de la texture par sites, nous permet de faire les constatations suivantes :

- Le site de Defla et, d'une moindre importance, le site de Mergueb présentent les sols les plus favorables à la mise en valeur.

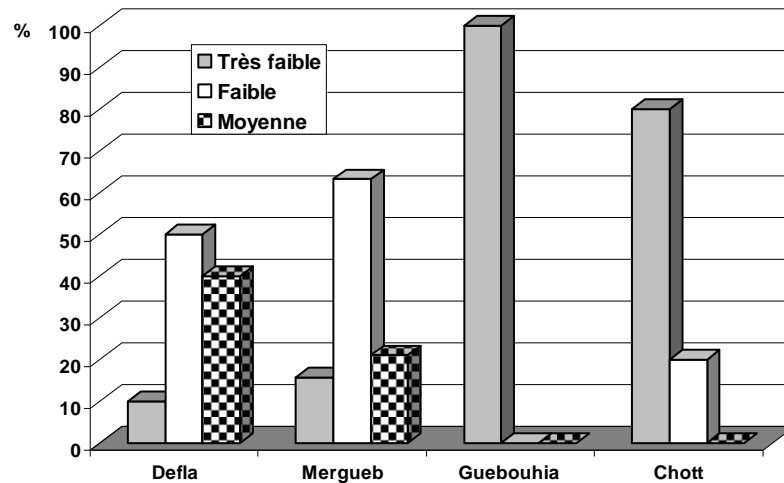
- Le site de Guebouhia est constitué de sols sableux. C'est des terrains de parcours affectés à l'agriculture sous l'effet de pression anthropique.

- Le site du chott est intermédiaire.

### 2.1.3-La CEC

Les valeurs de CEC dans les échantillons de surface figurent en annexe 3. La valeur moyenne est de 7,86 mé/ 100 g de sol. Les valeurs extrêmes oscillent entre 3 et 17,05 mé/100g de sol. La médiane indique que 50% des échantillons sont inférieurs à 6,9 mé/100 g de sol.

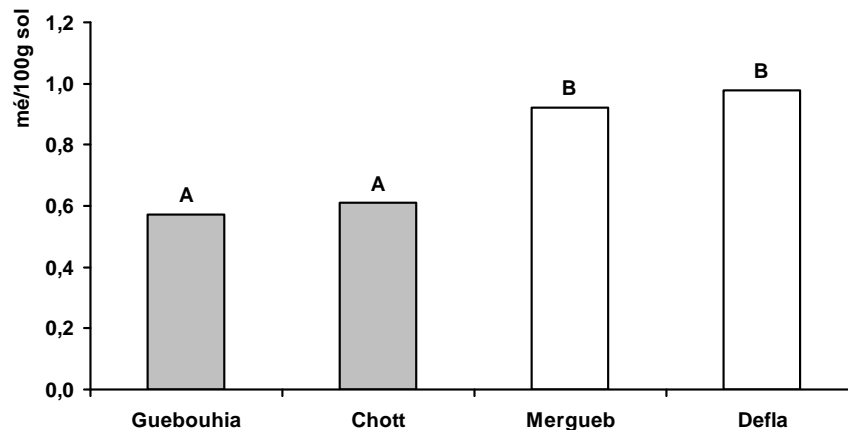
Selon les valeurs retrouvées (fig. IV.15), seulement 20% des échantillons présentent des valeurs de CEC moyennes, environ 45 % des échantillons présentent des valeurs faibles et 35% sont considérées comme très faibles.



**Fig. IV.15 :** Répartition des classes de CEC par site.

Après une transformation log, pour satisfaire la normalité de la distribution, l'analyse de la variance à un critère de classification montre une différence significative entre les différents sites ( $F=14,57$  et  $P<0,001$ ).

Le test de Newman Keuls au seuil de 5% indique la présence de deux groupes homogènes : Defla et Mergueb d'une part et Guebouhia et Chott d'autre part (fig. IV.16).



**Fig. IV.16 :** Valeur moyenne de Log<sub>10</sub> CEC par site.

(Les lettres sur les barres sont les groupes homogènes selon le test de Newman Keuls).

#### 2.1.4- Le gypse

En surface, les teneurs en gypse sont négligeables (traces). Cependant, lorsqu'il se présente en quantités significatives, il se produit à partir d'une accumulation généralisée de profondeur ou proche de la surface sous l'effet du travail du sol. Les sables éoliens sont pauvres en gypse (Mimoune, 1995).

#### 2.1.5- La perméabilité

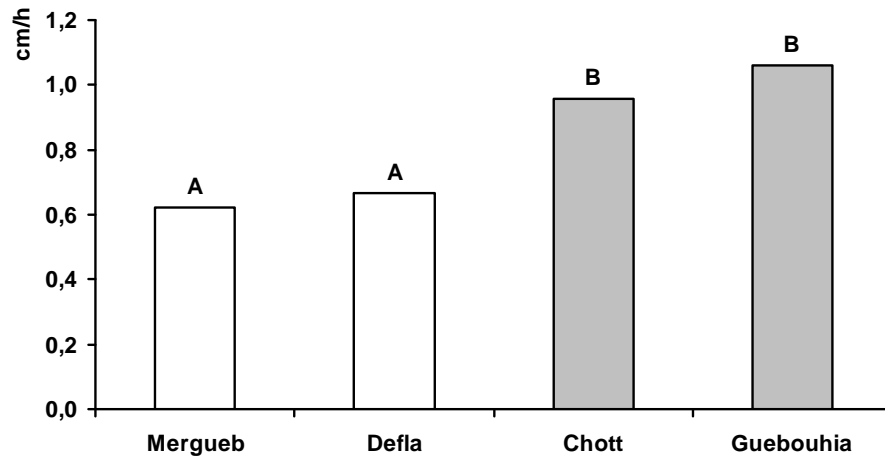
L'évaluation de la perméabilité a permis de déterminer le coefficient de perméabilité K (annexe 3). Les valeurs enregistrées varient de 1,43 à 35,30 cm/h avec une moyenne de 6,96



cm/h. Selon l'échelle d'appréciation de ce coefficient, 17,5% des échantillons sont modérément perméables et 82,5 % sont perméables.

Après une transformation log, on note selon l'analyse de la variance à un critère de classification une différence significative entre les différents sites ( $F=6,73$  et  $P=0,001$ ).

Le test de Newman Keuls au seuil de 5% indique la présence de deux groupes homogènes : Defla et Mergueb d'une part et Guebouhia et Chott d'autre part (fig. IV.17).



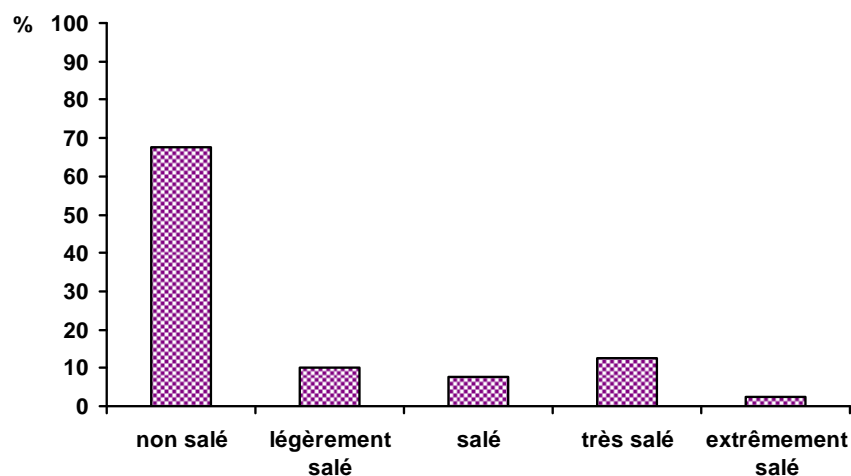
**Fig. IV.17 :** Valeur moyenne de perméabilité ( $\text{Log}_{10}K$ ) par site.

(Les lettres sur les barres sont les groupes homogènes selon le test de Newman Keuls)

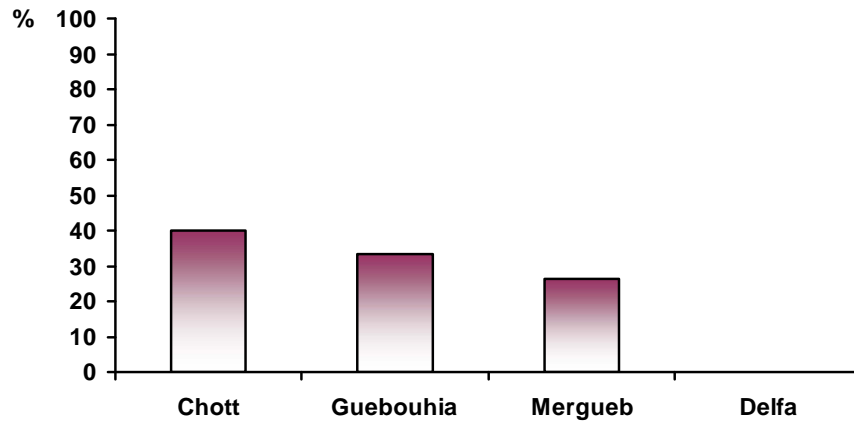
### 2.1.6- La salinité globale

Les résultats retrouvés sont consignés en annexe 3. La conductivité électrique (CE) mesurée sur un rapport sol/eau 1:5 révèle une valeur moyenne de 948,3  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 25 °C. Les valeurs extrêmes varient entre 130 et 9770  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 25 °C.

Selon l'échelle de salinité, on a enregistré 77,5% d'échantillons non salés à légèrement salés contre 22,5% d'échantillons salés à excessivement salés (fig. IV.18). Les échantillons salés se répartissent au niveau du chott, de Mergueb et en moindre cas à Guebouhia. Les sols de Defla sont non salés (fig.IV.19).



**Fig. IV.18 :** Répartition des échantillons de sol par classe de salinité.

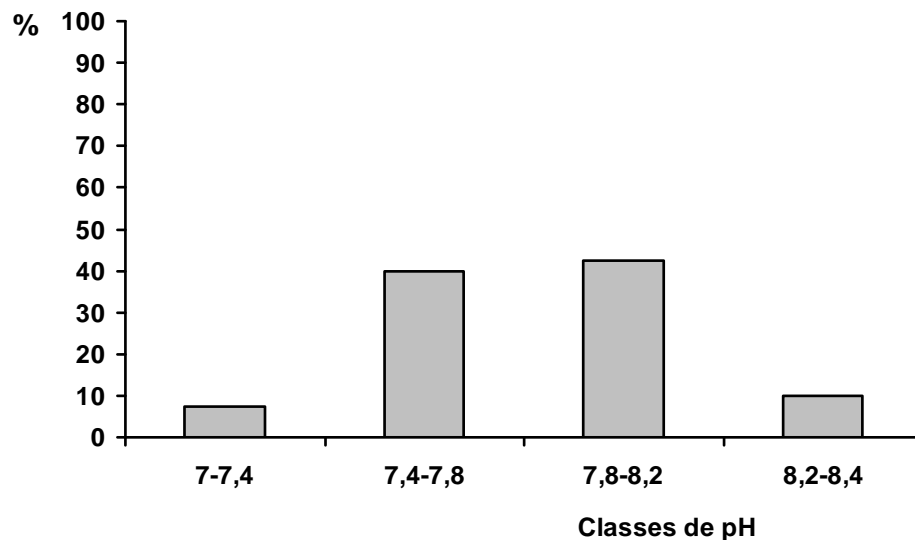


**Fig. IV.19 :** Distribution des échantillons salés ( $CE_{1:5} > 1dS/m$ ) au niveau des sites d'étude.

L'analyse de la variance à un critère de classification (Test de Krustal-Wallis) montre qu'il n'existe pas de différences significatives entre les différents sites ( $H=0,74$  et  $P=0,86$ ).

### 2.1.7- Le pH

Le pH est légèrement à moyennement alcalin. Les valeurs enregistrés varient de 7,1 à 8,4 avec une moyenne de 7,8 et plus de 92% d'échantillons avec un pH inférieurs à 8,3 (fig. IV.20).



**Fig. IV.20 :** Pourcentage des classes de pH des échantillons de surface.

### 2.1.8- La matière organique

Les teneurs en matière organique de la zone d'étude sont très faibles (annexe 3). Elles ne dépassent pas dans l'ensemble le 1 %.

L'analyse de la variance à un critère de classification indique qu'il n'existe pas de différences significatives entre les différents sites ( $F=1,61$  et  $P=0,2$ ).

### 2.1.9- Conclusion

Dans cette caractérisation des échantillons de surface, on a pris en considération huit paramètres pédologiques : le calcaire, le gypse, la perméabilité, la texture, la CEC, la CE, le pH et la matière organique. De ce qui précède on peut faire les constatations suivantes :

- Généralement, les sols en surface, dans la zone travaillée, sont peu calcaires et non gypseux. Ils sont influencés par la fraction grossière et sont, par voie de conséquence, perméables. Les sols présentent un pH alcalin et sont pour la plupart non ou légèrement salés.

- le site de Defla est une zone relativement fertile en comparaison avec les autres sites. De tels milieux qu'on peut trouver au sud du Hodna, mais qui n'ont pas fait l'objet d'étude dans ce travail, méritent une attention particulière. Compte tenu des possibilités de mise en valeur des terres en irrigué limités dans cette région et dans la perspective d'une meilleure utilisation de ces terres dans le cadre du développement durable, ces endroits devraient d'être surveillés et protégés et des travaux de recherches doivent être focalisés pour une exploitation raisonnable.

- la salinisation et l'hydromorphie, qui autrefois caractérisent ses sols, sont moins marquants suite au retrait de la nappe phréatique.

- l'analyse statistique (ANOVA) a met en évidence des différences significatives entre les paramètres pédologiques des sites étudiés. Les résultats ainsi obtenus confirment bien les observations faites au cours de la prospection sur le terrain. Ceci traduit, d'une part, une bonne représentativité des sites retenus et, d'autre part, soutient les conclusions qui pourraient être émises sur la mise en valeurs en irrigué des terres au sud du Hodna.

## 2.2- ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE (ACP)

Les échantillons prélevés sur les quatre sites ont fait l'objet de mesures physiques et physico-chimiques diverses. Dans le cas de nombreux paramètres, le traitement statistique le plus approprié est l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette méthode permet d'étudier les sources indépendantes de la variabilité, tous paramètres confondus.

L'étude statistique par l'analyse en composantes principales (A.C.P) a été effectuée sur un tableau de 40 individus (observations) et 9 variables. Les variables utilisées sont : Argile+limonfin (Alf), limon grossier (LG), sable fin+sable grossier (S), matière organique (MO), capacité d'échange cationique (CEC), perméabilité (K), calcaire total (Cal), gypse (Gypse) et conductivité électrique (CE).

La reconstitution finale de la distribution des paramètres pédologiques (caractéristiques du sol), nous a permis de définir les axes factoriels ou facteurs responsables de cette distribution et par conséquent, faire ressortir les affinités entre les différents paramètres pédologiques (caractéristiques du sol) et déduire les paramètres qui les caractérisent au mieux. Les trois premiers axes expriment 80% de la variance totale ; avec 48% pour le premier axe ; 19,7% pour le deuxième axe et 12,7% pour le troisième axe.

Le tableau (IV.2) exprime les valeurs propres de la matrice des coefficients de corrélation, le pourcentage de variance expliquée ainsi que celui de la variance cumulée par chacun des axes.

Tableau IV.2 : Distribution des valeurs propres et de la variance selon les différents axes factoriels dans les échantillons de surface.

Axes	Valeur propre	% variance expliquée	% variance cumulée
<b>1</b>	<b>4,32</b>	<b>48,0</b>	<b>48</b>
<b>2</b>	<b>1,77</b>	<b>19,7</b>	<b>68</b>
<b>3</b>	<b>1,14</b>	<b>12,7</b>	<b>80</b>
4	0,63	7,0	87
5	0,40	4,4	92
6	0,33	3,6	95
7	0,21	2,4	98
8	0,17	1,9	100
9	0,03	0,3	100

### Corrélations entre variables

L'étude des corrélations linéaires bivariées entre les paramètres étudiés renseigne sur la force des associations entre ceux-ci. La matrice des corrélations des 09 paramètres étudiés est présentée dans le tableau (IV.3).

L'observation de la matrice de corrélation montre les faits suivants :

Tout d'abord, un premier groupe constitué d'éléments texturaux (argile et limon fin), la CEC, la matière organique et le calcaire sont interdépendants et présentent des corrélations positives.

Un deuxième groupe formé par les sables et le coefficient de perméabilité K présente une corrélation positive.

Ces deux groupes sont négativement corrélés.

Le gypse dans les échantillons de surface est généralement absent (90% de cas). Lorsqu'il est présent, il est corrélé négativement avec le calcaire, relation habituellement présentée dans les travaux relatifs aux sols gypseux (Boyadjiev, 1974, Baci, 1985, Abdesselam, 1998). Il est aussi corrélé avec le limon grossier ce qui suggère une individualisation de ce sel dans cette dimension.

La salinité globale, représentée par la conductivité électrique (CE), ne présente aucune corrélation avec les autres paramètres pédologiques sauf avec le coefficient de perméabilité K ( $r= 0,66$ ) ; ce coefficient de corrélation doit être interprété avec précaution. En effet, cette corrélation est induite par l'échantillon sableux ayant la valeur la plus élevée de la CE, et avec l'éliminant de cet échantillon de l'analyse la relation devient non significative avec  $r= 0,29$ .

Ce premier résultat nous laisse penser que les paramètres pédologiques : gypse, limon grossier et CE ne semblent pas expliquer d'une manière très nette les changements au niveau de la surface du sol, ils ne constituent donc pas des variables essentielles à traiter dans l'ACP.

Tableau IV.3 : Matrice de corrélation

	ALf	LG	S	MO	CEC	K	Cal	Gypse	CE
ALf	1								
LG	-0,22	1							
S	<b>-0,73</b>	<b>-0,45</b>	1						
MO	<b>0,70</b>	0,07	<b>-0,63</b>	1					
CEC	<b>0,70</b>	-0,01	<b>-0,60</b>	<b>0,58</b>	1				
K	<b>-0,54</b>	-0,18	<b>0,63</b>	<b>-0,44</b>	<b>-0,53</b>	1			
Cal	<b>0,81</b>	0,03	<b>-0,69</b>	<b>0,63</b>	<b>0,68</b>	<b>-0,54</b>	1		
Gypse	-0,22	<b>0,44</b>	-0,15	-0,02	-0,18	-0,07	<b>-0,32</b>	1	
CE	-0,22	-0,04	0,29	-0,09	-0,18	<b>0,66</b>	-0,24	-0,09	1

L'observation des corrélations entre les variables et les axes principaux (Tableau IV.4) montre que l'axe 1 est très bien corrélé positivement à MO, CEC et Cal et négativement avec S et K. L'axe 2 présente une très bonne corrélation positive avec LG et Gypse. Par ailleurs, l'axe 3 est corrélé positivement avec la CE.

Tableau IV.4 : Corrélations variables/axes principaux

	Axe 1	Axe 2	Axe 3
LG	0,1102	<b>0,8111</b>	0,3478
MO	<b>0,7728</b>	-0,0511	0,3179
CEC	<b>0,8082</b>	-0,1706	0,1043
K	<b>-0,7650</b>	-0,2887	0,4291
Cal	<b>0,8729</b>	-0,2214	0,0865
Gypse	-0,1130	<b>0,8106</b>	0,1199
CE	-0,4125	-0,3146	<b>0,8096</b>
S	<b>-0,8600</b>	-0,3291	-0,2108
ALf	<b>0,8865</b>	-0,2941	0,0572

L'observation du graphe de la figure (IV.21) qui est une représentation formée par les deux premiers axes principaux (plan 1x2) fournit 67,68% de l'information contenue dans le nuage de points.

Le premier plan factoriel représente (47,98+19,70) de la variance, ce qui est considérable ; le premier axe reflète près de la moitié de la variance.

Dans ce plan (axe1x2), on constate tout d'abord que les variables éléments fins (argile+ limon fin), CEC, Calcaire, matière organique se trouvent en abscisses positives alors que le

sable grossier et coefficient K en abscisses négatives. Le limon grossier et le gypse se localisent en ordonnées positives.

Cette disposition des variables permet de repérer un premier groupe homogène formé des éléments fin, de la CEC et de la MO qui évoluent dans le même sens témoignant d'une morphogenèse hydrique, et s'opposant aux éléments grossiers (sables) et la forte perméabilité du sol caractérisant une morphogenèse éolienne.

Le premier axe représente les deux phénomènes majeurs qui marquent l'évolution des sols de cette région. Il s'agit des zones qui ont bénéficié des crues des oueds qui favorisent la régénération de la fertilité du sol par les apports des limons calcaires et les zones soumises aux effets des apports éoliens qui favorisent la dégradation des sols sous l'action éolienne. Ces deux processus constituent donc le mécanisme principal de l'évolution de ces sols.

Le second axe représente l'individualisation du gypse qui semble se produire dans la fraction limon grossier mais qui reste un phénomène secondaire dans l'évolution des échantillons de surface dans cette région.

L'observation du graphe de la figure (IV.22) qui est une représentation formée par les axes principaux 1 et 3 (plan 1x3) fournit 60,67% de l'information contenue dans le nuage de points.

Dans ce plan (axe1x3), on observe tout d'abord en abscisse les mêmes variables représentées dans la figure précédente, tandis que la salinité globale, représentée par la conductivité électrique (CE), se trouve en ordonnée positive.

Cette disposition nous permet de faire les mêmes constatations que précédemment. En effet, on retrouve les mêmes éléments expliquant la fertilité et la dégradation des sols portés sur le premier axe.

Le troisième axe représente la salinité globale qui constitue un phénomène secondaire dans l'évolution des échantillons de surface dans cette région.

Selon la figure (IV.23), on constate que l'agencement horizontal des individus indique la fertilité des sols et dans le sens opposé la dégradation des sols. Par ailleurs, si on considère ces individus selon leur agencement vertical, on remarque que leur arrangement se fait selon leur teneur en gypse. Selon la figure (IV.24), on constate que l'agencement horizontal des individus se fait de la même manière que dans la figure (IV.23). Cependant, si on considère ces individus selon leur agencement vertical, on remarque que leur arrangement se fait selon leur salinité.

En conclusion, on peut dire que de l'approche statistique il faut retenir une opposition entre éléments : Ceux qui favorisent la fertilité des sols dont l'évolution est liée à la présence des éléments fins (se sont : CEC, calcaire, MO) et ceux qui favorisent la dégradation des sols dont l'évolution est liée aux sables (perméabilité) ; l'individualisation du gypse et la salinité ne semble pas avoir un effet important sur l'évolution des sols en surface dans la zone d'étude.

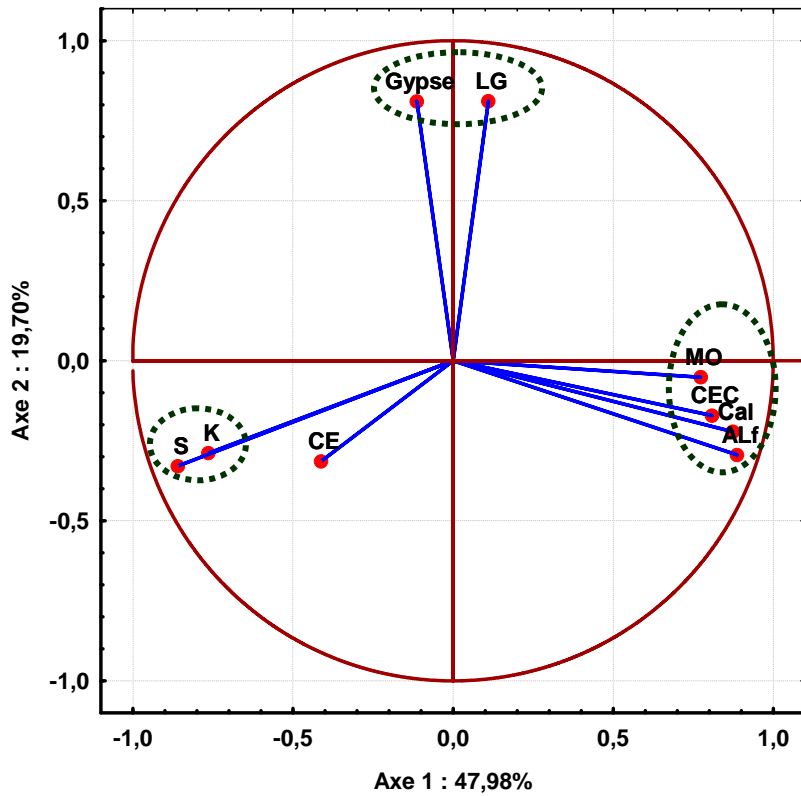


Fig. IV.21 : ACP des sols en surface, représentation des variables dans le plan 1x2

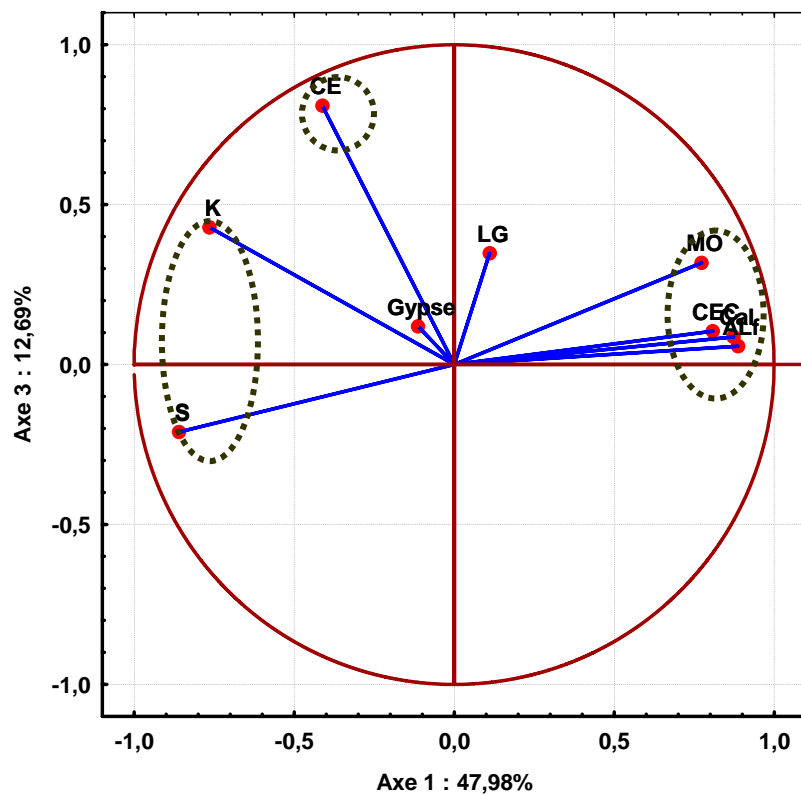


Fig. IV.22 : ACP des sols en surface, représentation des variables dans le plan 1x3

(S : Sable, Alf : Argile+limon fin, LG : Limon grossier, K : Coefficient de perméabilité, Cal : Calcaire total, MO : Matière organique, CEC : Capacité d'échange cationique).

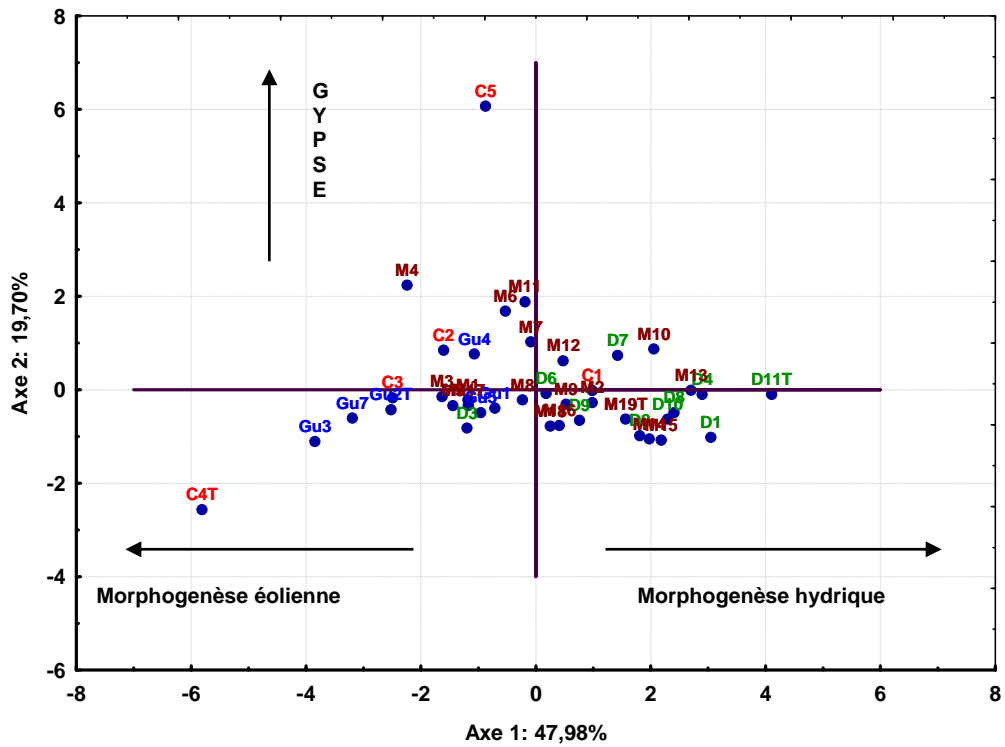


Fig. IV.23 : ACP des sols en surface, représentation des individus dans le plan 1x2.

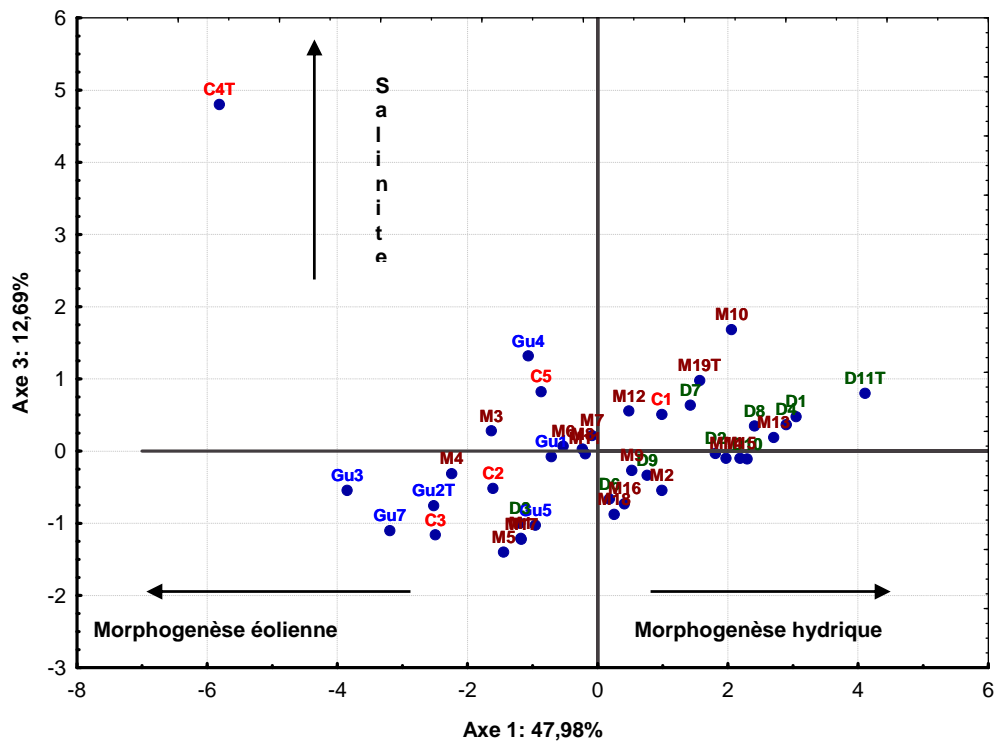


Fig.IV.24 : ACP des sols en surface, représentation des individus dans le plan 1x3.

(C : Chott, D : Defla, Gu : Guebouhia, M : Mergueb).



## 2.3- EVOLUTION DES PARAMETRES PEDOLOGIQUES

Dans le but de mettre le point sur l'état de la dégradation des sols suite à la mise en valeur irriguée dans les sites étudiés en s'appuyant sur l'utilisation de tests statistiques, on a comparé, pour chaque paramètre pédologique étudié, la moyenne du site à un témoin (référence) du même site qui a été échantillonné de la même manière et qui reflète le sol naturel non perturbé par l'action humaine. L'objectif est aussi de vérifier les paramètres qui contribuent le plus à la dégradation des sols dans cette région suite au changement d'utilisation des terres.

Les paramètres pédologiques pris en considération sont ceux qui présentent une forte corrélation et dont l'analyse en composante principale a révélé une interdépendance sur le terrain. Il s'agit de :

**La texture :** parmi les cinq fractions granulométriques étudiées (argile, limon fin, limon grossier, sables fin, sable grossier), on a constaté, d'après l'étude statistique (analyse en composantes principales), que les variables qui permettent de percevoir la variabilité du terrain de manière continue sur l'ensemble de la région sont deux fractions seulement. Il s'agit de la fraction fine représentée par l'**argile et le limon fin** et les **sables** représentés par les sables fins et les sables grossiers. La première fraction caractérise les apports des crues et la seconde fraction les apports éoliens.

**La matière organique :** même à des taux faibles, la matière organique montre une forte corrélation avec la fraction fine la CEC et le taux du calcaire.

**La CEC :** globalement les valeurs sont faibles, la CEC présente une forte corrélation avec la fraction fine la matière organique et le taux du calcaire.

**La perméabilité :** le test de percolation indique toujours une corrélation avec les sables totaux.

**Le calcaire :** les valeurs sont variables dans la région, mais la forte corrélation entre le calcaire et la fraction fine suggère une origine sédimentaire par les apports des alluvions des crues. Par voie de conséquence, il est corrélé avec la CEC et la matière organique.

### 2.3.1- RESULTATS

➤ **Pour le site de Defla,** le test t indique une différence significative entre la moyenne et le témoin pour les paramètres pédologiques suivants :

Fraction fine, sables, calcaires (Tableau IV.5). Ces résultats permettent de faire les constatations suivantes :

Le changement de l'utilisation des terres par mise en culture en irrigué des zones autrefois consacrées au parcours dans ce site a engendré une dégradation des terres qui se manifeste par :

1- une variation texturale se traduisant par une augmentation des sables et une diminution de la fraction fine favorisant ainsi un processus d'ensablement dans les zones agricoles de ce site.

2- Une augmentation de la salinité globale dans les zones irriguées quoique toujours inférieure au seuil critique mais pouvant induire à la longue une salinisation secondaire.

➤ **Pour le site de Mergueb,** le test t montre une différence significative entre la moyenne et le témoin pour les paramètres pédologiques suivants :

Fraction fine, sables, calcaire, perméabilité et CEC (Tableau IV.5). De même, le test non paramétrique indique une différence significative de la CE ( $Z=3,72$  et  $p<0,01$ ).

Ces résultats nous permettent de faire les mêmes observations que pour le site de Defla. De plus, on enregistre une différence significative avec la CEC et la perméabilité qui semble être en relation avec les teneurs en argile et limon fin dans la fraction fine considérée et du taux des sables fins et des sables grossiers.

➤ **Pour le site de Guebouhia**, on n'a pas observé de différence significative entre les paramètres pédologiques et leurs témoins.

➤ **Pour le site du Chott**, le test t montre uniquement une différence significative entre le limon grossier et son témoin.

Tableau IV.5 : Test statistique de la comparaison d'une moyenne avec un témoin.

	<b>Variable</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Valeur de « t »</b>	<b>p</b>
<b>Site Defla</b>	<b>CaCO<sub>3</sub></b>	20,70	4,47	<b>0,002</b>
	<b>S</b>	57,44	6,99	<b>&lt;0,001</b>
	<b>A+Lf</b>	32,11	6,31	<b>&lt;0,001</b>
<b>Site Mergueb</b>	<b>CEC</b>	8,65	6,22	<b>&lt;0,001</b>
	<b>K</b>	4,85	4,30	<b>&lt;0,001</b>
	<b>CaCO<sub>3</sub></b>	12,33	4,38	<b>&lt;0,001</b>
	<b>S</b>	64	6,30	<b>&lt;0,001</b>
	<b>A+Lf</b>	20,33	6,15	<b>&lt;0,001</b>
<b>Site du Chott</b>	<b>LG</b>	11	6.47	<b>&lt;0,001</b>

Les valeurs en gras indiquent une différence significative au seuil 5%.

Des résultats du test de conformité de la moyenne, on peut faire les constatations suivantes :

➤ Il ressort clairement que les sols, où l'intensité de la mise en valeur en irrigué est la plus intense notamment le site de Defla et de Mergueb, sont soumis au processus d'ensablement. L'érosion éolienne constitue un phénomène qui menace l'environnement. Dans notre région, cette dégradation se manifeste par un changement textural qui s'exprime par une augmentation des sables et une diminution des éléments fins.

➤ Les sites de Defla et de Mergueb où l'action anthropique est la plus ancienne, malgré le passage des eaux des crues sur ces terres et l'utilisation des eaux de nappe profonde de qualité meilleure que celle de la nappe phréatique, présentent des signes de salinisation secondaire.

Cette étude a révélé un processus d'ensablement et des signes de salinisation qui touche les zones agricoles.

### **3- VARIATION VERTICALE DES PROPRIETES DU SOL**

#### **3.1- LA SALINISATION DES SOLS**

Le phénomène de salinisation secondaire des périmètres irrigués constitue une menace particulièrement grave. C'est un problème qui touche la plupart des pays au sud de la méditerranée (Cheverry et Robert, 1998). Le développement de l'irrigation s'accompagne, dans la majorité des situations, par l'apparition de processus de salinisation, de sodisation ou d'alcalinisation des sols à des degrés d'importance divers (Marlet, 2004).

En Algérie, les travaux de Boulaine (1957), Durand (1958), Aubert (1975), Daoud (1983), Daoud et Halitim (1994) et Douaoui (2005) ont montré que l'intensification agricole sous irrigation conduit fréquemment à la dégradation des sols.

Au sud du Hodna, la mise en valeur en irrigué est relativement récente. Elle a été entamée depuis plus de 30 ans environ. La variation latérale de la salinité des sols a été étudiée sur des fosses pédologiques. Trois profils pédologiques, implantés dans des parcelles cultivées et irriguées depuis une dizaine d'années, ont été réalisés sur une séquence qui commence dans la zone chotteuse et s'éloigne dans la partie sud de la zone sur une distance d'environ 7 Km. Trois situations seront abordées dans ce paragraphe selon la localisation du profil pédologique par rapport au chott et donc de l'influence de la nappe phréatique.

- Situation loin du chott (Cas du site de Memdouda).
- Situation près du chott (Cas du site de Mergueb).
- Situation au niveau du chott (Cas du site de Chott).

Lorsque cela est possible, une comparaison avec les résultats de Mimoune (1995) a été faite en vue de mettre en évidence les changements subis par le sol après irrigation par l'eau de la nappe phréatique et dans le cas de l'utilisation de la nappe profonde.

##### **3.1.1- Situation loin du chott (le site de Memdouda)**

Cette zone est soumise aux apports hydriques (crues des petits oueds qui traversent cette région). Le profil pédologique est localisé dans une parcelle exploitée depuis 1978 par les céréales et le maraîchage avec des périodes de repos. Lors de notre prospection sur le terrain, le sol était en jachère. Les profils ont été échantillonnés pendant la fin du printemps où l'évapotranspiration est importante. Au cours de cette période, le sol nu et découvert aux vents très fréquents à cette époque augmente l'évaporation et favorise la migration des sels en surface.

En comparant les résultats de la conductivité électrique (CE) obtenus sur pâte saturée à l'échelle de salinité de Riverside (USSLS, 1954), on constate que les échantillons de terre sont considérés comme non salés.

Les profils étudiés des deux parcelles, témoin et cultivée, présentent un profil salin ascendant selon Servant (1976). Il est le même dans les deux situations mais légèrement salés en surface dans la parcelle travaillée et irriguée (fig. IV.25).

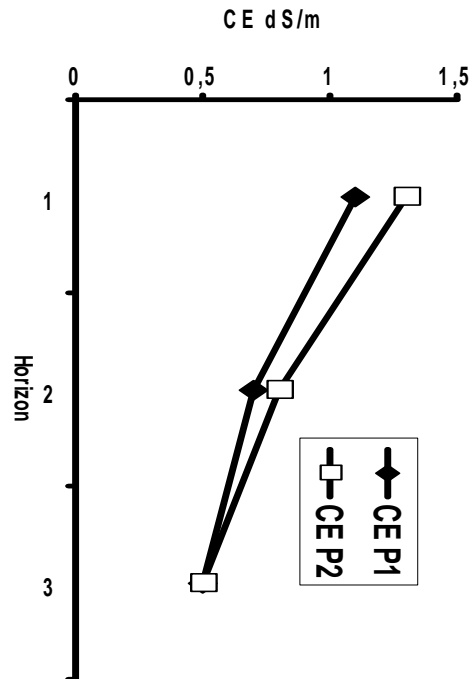


Fig. IV.25 : Profils salins (site de Memdoua)

(CEP1 et CEP2 : Conductivité électrique au niveau du profil 1 (témoignage) et du profil 2 (irrigué)).

L'eau d'irrigation utilisée provient d'un forage exploitant les eaux de la nappe profonde dont les caractéristiques analytiques sont consignées dans le tableau (IV.6). Selon les critères de Riverside, on constate que l'eau présente un risque de salinité moyenne et un risque de sodicité faible (C3S1).

**Tableau IV.6 :** Valeurs des caractéristiques physico-chimiques des eaux d'irrigation

N° du forage	pH	T°C	CE μS/cm	TDS	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SAR
4	7,40	21,1	950	870	112,93	42,54	63,87	0,37	189,1	210	125	82	1,3

A travers les résultats de cet exemple, nous pouvons faire les constatations suivantes :

Après environ 30 ans d'utilisation des sols, on n'a pas constaté une augmentation sérieuse de la salinité par rapport au témoin. Les échantillons enregistrent des valeurs très proches des témoins (1,18 fois plus élevé).

Cet état de fait est lié à :

- L'éloignement de cette zone par rapport au chott, donc de l'effet de la nappe phréatique.
- L'utilisation des eaux de la nappe profonde moins chargée.
- L'irrigation gravitaire qui apporte un surplus d'eau qui contribue au lessivage des sels.
- La localisation de ce site dans une zone inondable, l'eau des crues contribue ainsi au lessivage des sels. Nous avons analysé l'eau de la crue en 2008, les résultats analytiques sont

reportés dans le tableau (IV.7). Selon la classification de Riverside, cette eau présente un risque de salinité et de sodicité faible (C2S1).

**Tableau IV.7 :** Caractéristiques analytiques de l'eau de crue dans le site de Memdouda en 2008.

Eau de crue	pH	T°C	CE μS/cm	TDS	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SAR
				mg/l									
4	7,16	28,5	460	326	70,26	6,96	13,37	1,31	237,9	8	20	0	0,20

Nous avons essayé de comparer notre situation avec celle de 1993, période pendant laquelle on utilise encore l'eau de la nappe phréatique pour l'irrigation. Nous avons consulté les résultats de Mimoun (1996) qui a décrit un profil pédologique à El Adhla au même niveau par rapport au chott que ceux de Memdouda.

Les caractéristiques des eaux utilisées sont les suivantes :

- Une CE égale à 5800 μS/cm (12 fois plus élevée que dans notre cas).
- Un SAR de 6,9 (5 fois plus élevé)
- Un pH proche de la neutralité (6,5).

Le sol est sableux et modérément salés (CE de 5 à 8 dS/m).

L'auteur dénote que les agriculteurs irriguent leurs parcelles à partir de la nappe phréatique. Il signale que ce site a subi l'action humaine par l'arrachage de la végétation naturelle afin d'exploiter les sols à des fins de cultures vivrières (maraîchage, céréaliculture et arboriculture). L'auteur indique, aussi, que le même sol était non salé au début des années 1970 selon l'étude de la FAO (CE variant de 0,3 à 0,6 dS/m).

### 3.1.1.1- Commentaire

D'après cet exemple, on constate tout d'abord que la zone située loin du chott n'étaient pas salés avant la mise en culture en irrigué (donnée de la FAO). Selon l'origine des eaux utilisées, les sols peuvent évoluer selon deux cas :

- Lorsque le sol est irrigué avec les eaux de la nappe phréatique, cas des résultats d'El Adhla (Mimoun, 1996), le sol a été affecté par un processus de salinisation secondaire.
- Lorsque le sol est irrigué avec l'eau de la nappe profonde, cas du site de Memdouda, on n'a pas observé de phénomène de salinisation des sols.

Ceci démontre l'intérêt pratique de l'utilisation des eaux de la nappe profonde pour l'irrigation de ces terres.

### 3.1.2- Situation près du chott (le site de Mergueb)

La parcelle échantillonnée est un vergé relativement ancien qui est occupé autrefois par les céréales. Dans un tel environnement l'évapotranspiration se trouve atténuée de même que l'action éolienne.

Les échantillons de terre sont considérés comme étant non salés à peu salés en profondeur selon l'échelle de salinité de Riverside (USSLS, 1954).

Les profils salins des deux parcelles, témoin et cultivée, sont descendants (fig. IV.26). Ils présentent la même allure dans les deux cas, mais plus salé dans la parcelle irriguée. L'irrigation gravitaire en continu, notamment dans la période de chaleur, et l'environnement créée par le vergé, favorise la migration descendante des sels.

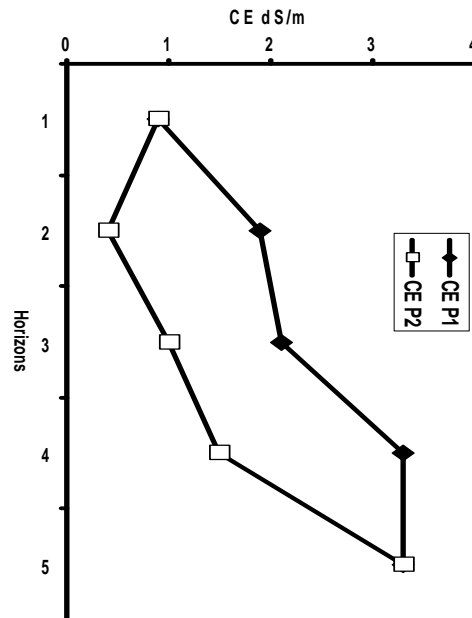


Fig.IV.26 : Profils salins (site de Mergueb)

(CEP1 et CEP2 : Conductivité électrique au niveau du profil 2 (témoin) et du profil 1 (irrigué)).

L'eau d'irrigation utilisée provient d'un forage dont les caractéristiques analytiques sont reportées dans le tableau (IV.8). Selon les critères de Riverside, on constate que l'eau présente un risque de salinité élevé et un risque de sodicité faible (C4S1).

Tableau IV.8 : Valeurs des caractéristiques physico-chimiques des eaux d'irrigation

N° du forage	pH	T°C	CE μS/cm	TDS	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SAR
34	7.20	22.1	2540	1492	249,6	75,64	126,5	0,51	164,7	620	200	76	1,79

A travers les résultats de cet exemple, il ressort que :

La salinité a augmenté suite à la mise en culture en irrigué après plus d'une quinzaine d'année d'utilisation des sols. La conductivité électrique s'est multipliée par 2 voire 4 fois dans la zone médiane du profil. Cet état est lié à :

- La qualité de l'eau utilisée présentant une CE relativement élevée.
- L'augmentation de la fraction fine dans la partie médiane entravant le lessivage.
- Le microclimat du verger qui diminue l'évapotranspiration.
- L'irrigation gravitaire en continue dans certaine période donnant une allure descendante du profil salin.
-

### 3.1.3- Situation au niveau du chott (le site de Chott)

La parcelle échantillonnée est localisée au niveau du chott. La nappe phréatique était proche de la surface. La réalisation d'un réseau de drainage a permis l'exploitation de la parcelle après l'abaissement du niveau de cette nappe.

Le sol est cultivé en céréales. Selon l'échelle de salinité de Riverside, les échantillons de terre sont considérés comme peu salés à salés. Le profil de la parcelle cultivé se trouvant près du drain présente un profil salin descendant (fig.IV.27). Ceci démontre l'avantage d'une telle pratique pour la réhabilitation des milieux salés.

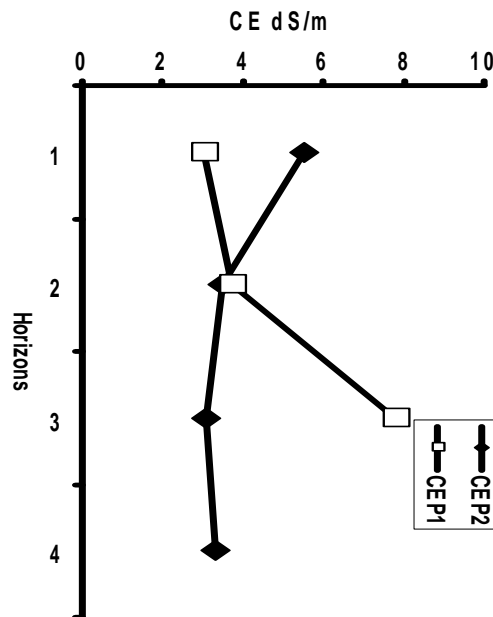


Fig.IV.27 : Profils salins (site du Chott).

(CEP1 et CEP2 : Conductivité électrique au niveau du profil 1 (témoine) et du profil 2 (irrigué)).

L'eau d'irrigation utilisée provient d'un forage dont les caractéristiques analytiques sont consignées dans le tableau (IV.9). On constate que l'eau présente un risque de salinité moyen et un risque de sodicité faible (C3S1).

Tableau IV.9 : Valeurs des caractéristiques physico-chimiques des eaux d'irrigation

N° du forage	pH	T°C	CE μS/cm	TDS	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SAR
40	7,22	24,5	1643	1326	215,4	57,81	58,88	0,55	207,4	450	155	35	0,92

A travers les résultats de cet exemple, nous pouvons conclure que :

Après plus d'une dizaine d'année d'utilisation des sols, la salinité a augmenté en surface dans la parcelle irriguée (1,8 fois plus que la parcelle témoin) mais a baissé considérablement en profondeur sous l'effet du drainage.

### 3.1.4- Conclusion

Ne disposant pratiquement pas d'étude sur le suivi de la qualité des sols au sud du Hodna, nous avons tenté d'apprécier l'évolution de la salinité des sols sous irrigation en comparant les résultats de profils pédologiques localisés dans des parcelles irriguées depuis une quinzaine d'années et des témoins adjacents non cultivés représentant l'état du sol avant culture.

A travers ces résultats, on constate les faits suivants :

- Les sols localisés loin du chott sont naturellement non salés selon l'étude de la FAO.
- Durant les trente dernières années, suite à la mise en culture en irrigué, on a au départ utilisé les eaux des puits largement répondus et exploitant les eaux de la nappe phréatique fortement minéralisée. Ceci a engendré des problèmes de salinisation secondaire, en plus des contraintes déjà existantes d'ordre climatique ce qui a poussé certains agriculteurs à délaisser leurs parcelles.
- Par la suite, on a commencé à exploiter l'eau de la nappe profonde moins chargée ce qui a multiplié le nombre de forages dans la région. L'utilisation des eaux profondes moins chargées semble baisser le risque de salinisation secondaire mais pourrait engendrer une surexploitation de cette nappe. C'est ce que nous allons voir plus loin dans le chapitre en relation avec l'aspect quantitatif des eaux.
- On remarque aussi que dans les sites inondables éloignés du chott, la mise en valeur pourrait être rentable à condition de bien lutter contre l'érosion éolienne par des brise vents et par un système de rotation des culture ne laissant pas trop de temps à la jachère.
- La comparaison des profils des parcelles témoins avec ceux des parcelles irriguées révèle des résultats différents selon le cas. D'une manière générale, les caractéristiques du site d'étude, notamment l'éloignement par rapport au chott, la texture du sol, l'occupation du sol et la fréquence des apports d'eau, sont des facteurs qui pourraient influencer la salinisation des sols de cette région. Il y a lieu de noter que l'utilisation des eaux de la nappe profonde semble ne pas provoquer la salinisation des sols lorsque la quantité d'eau d'irrigation permet le lessivage des sels.
- Dans les sites inondables, l'eau des crues constitue une source complémentaire d'irrigation pas très importante sur le plan quantité mais présentant beaucoup d'intérêt sur le plan qualitatif. En effet, l'eau n'est pas salée et participe ainsi au lessivage des sels. Cependant, le faciès chimique indique une forte teneur en bicarbonate par rapport au calcium. Au cours de la concentration des eaux par évaporation, des risques d'alcalinisation peuvent avoir lieu.

### 3.2- FACIES CHIMIQUE DES SOLUTIONS DU SOL

Dans la figure (IV.28) sont reportés les analyses de la solution de sol sur le triangle de Piper. On constate que le faciès dominant est sulfaté calcique et magnésique pour tous les échantillons. Les solutions sont peut concentrés, plus de la moitié des échantillons est non salé ( $CE < 2dS/m$ ), 40% environ sont peut salés ( $2 < CE < 4dS/m$ ) et seulement 8% sont considérés comme salés ( $4 < CE < 8dS/m$ ). Ces derniers sont localisés au niveau du Chott.

Tous les échantillons ne sont pas saturés par rapport à la calcite et au gypse.



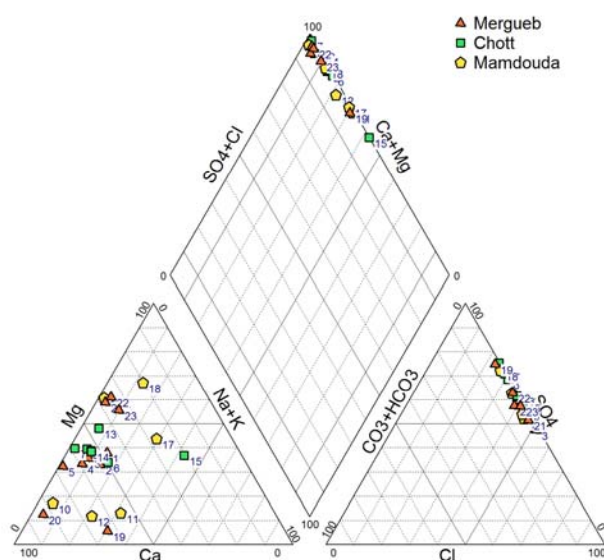


Fig. IV. 28 : Triangle de Piper des solutions de sol

### 3.3- ESSAI EXPERIMENTALE SUR COLONNES

Au vu des résultats précédents, on a constaté que l'utilisation de l'eau de la nappe profonde, moins chargée, pourrait atténuer les effets de la salinisation. Néanmoins, l'étude de l'évolution des propriétés du sol en surface, notamment l'étude statistique, a mis en évidence des signes de contamination par les sels dans des parcelles irriguées depuis assez longtemps avec les eaux de la nappe profonde quoiqu'ils demeurent au dessous du seuil critique de salinisation.

Dans le but de simuler le processus de salinisation des sols et de voir aussi l'évolution de la densité apparente en profondeur, un essai sur colonne de sol a été réalisé. Les conditions d'irrigation ont été fixées dès le départ à la capacité de rétention maximale.

On a remarqué une diminution de niveau du sol en surface des colonnes et une prise en masse au 3<sup>ème</sup> jour du 1<sup>er</sup> cycle d'humectation–dessiccation. Elle provoque un décrochement de la terre des parois des colonnes. On a remarqué, aussi, l'apparition des efflorescences blanchâtres sur la surface du sol depuis le 8<sup>ème</sup> jour du 1<sup>er</sup> cycle.

Du 2<sup>ème</sup> au dernier cycle, on a enregistré, aussi, une prise en masse du sol et un décrochement de la terre des parois des colonnes d'intensité moins importante par rapport au 1<sup>er</sup> Cycle. Cependant, l'apparition des efflorescences blanchâtres sur la surface devient plus visible.

La prise en masse observée pourrait être liée à la phase d'humectation–dessiccation. Ceci permet ensuite un réarrangement des éléments solides, à l'occasion du second dessèchement, qui occupe alors un volume inférieur à leur volume initial. Cette évolution se traduit par une augmentation de la densité apparente sèche (Daoud, 1983).

#### 3.3.1- Evolution de la densité

Les valeurs obtenues indiquent qu'au niveau de la couche supérieure les densités varient de 1,73 à 1,85 avec une moyenne de 1,78. Dans la couche inférieure les densités oscillent entre 1,84 et 1,87 avec une moyenne de 1,84. Dans la zone intermédiaire la densité donne des valeurs entre 1,79 et 1,88 avec une moyenne de 1,86. L'observation de l'évolution des densités au cours de l'expérimentation (fig. IV.29) révèle que la densité dans la première

couche est moins élevée que dans les couches sous jacentes dans tous les cycles. Ceci pourrait être lié au phénomène de tassement observé durant l'expérimentation. En effet, les couches profondes sont plus exposées au tassement donc à une forte densité. Néanmoins, du point de vue statistique, il n'existe pas de différences significatives entre les valeurs de densité au début et à la fin de l'expérimentation.

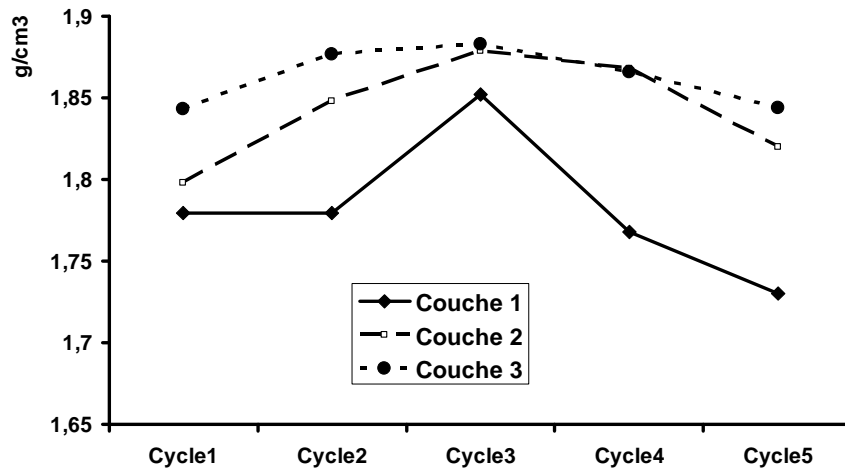


Fig. IV.29 : Evolution de la densité apparente au cours des cycles

Les valeurs de densité apparente enregistrées en profondeur ( $>1,8$ ) semblent être très élevées. Elles caractérisent des conditions de sol très compactes pour les textures sableuses (Hazelton and Murphy, 2007).

### 3.3.2- Les profils salins

Les profils de distribution des sels solubles montrent diverses allures. On distingue les formes suivantes :

Une forme descendante pour le cycle 3 et 5 (fig. IV.30), dans ce cas, le maximum de la CE est enregistré en surface puis les valeurs diminuent en profondeur. Une forme relativement régulière pour le cycle 1, 2, et 4, où les valeurs de la CE sont relativement homogènes tout le long de la profondeur. Toutefois, on constate, globalement, que la conductivité électrique n'est pas très élevée. Celles-ci varient de 297 à 504,66  $\mu\text{S}/\text{m}$ . Ainsi, les valeurs enregistrées nous permettent de dire que les variations de la CE sont faibles. Par conséquent, l'allure générale de ces profils salins est relativement régulière.

Un profil salin descendant est un profil de salinisation (profil de type A de Servant, 1976). Il caractérise un milieu généralement évaporant avec présence de nappe superficielle chargée en sels. Dans notre cas, il représente une colonne où il existe une homogénéité dans les différentes couches du sol (densité apparente et granulométrie plus ou moins homogènes). Les mouvements des solutions du sol seront ainsi réguliers. Dans notre essai d'humectation/dessiccation ceci provoque la migration des sels en surface.

Un profil salin relativement régulier ou homogène est un profil où la dynamique des sels est plus ou moins faible. Dans notre essai d'humectation/dessiccation, cette situation semble caractériser les colonnes où les variations de la CE entre les couches ne sont pas importantes et l'allure des profils salins n'est pas nette. Cette situation pourrait être expliquée par une

hétérogénéité du matériau du sol (densité apparente et granulométrie plus ou moins hétérogènes) ceci provoque une rupture du film capillaire et empêche la circulation normale des solutions du sol (Massoumi, 1968).

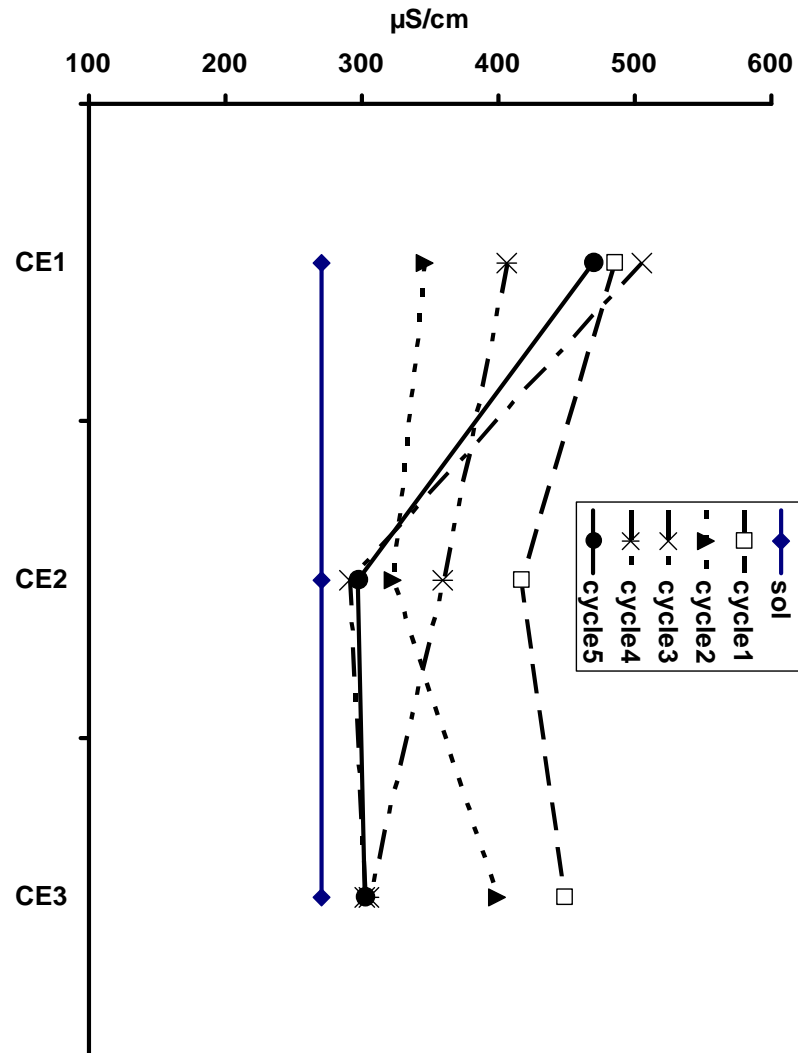


Fig. IV.30 : Profils salins des différents cycles des colonnes de sol.

### 3.3.3- Evolution de la salinité globale (CE)

Depuis le 1<sup>er</sup> cycle au 5<sup>ème</sup> cycle, on constate une variation entre les conductivités électriques des différentes couches. L'évolution de la CE est variable mais toujours supérieure à celle de l'état initiale. Pour la deuxième et troisième couche, la conductivité électrique augmente durant les 1<sup>er</sup> cycles puis évolue faiblement durant les autres cycles.

D'une manière générale, la conductivité électrique est plus grande dans la couche de surface que dans la couche profonde. Ceci est lié essentiellement au phénomène d'évaporation qui fait migrer les sels en surface. En témoin, les efflorescences blanchâtres en surface.

Au cours des cycles (fig. IV.31), les résultats retrouvés montrent que la CE de la couche supérieure varie de 270 à 504  $\mu\text{S/cm}$ . Dans la zone intermédiaire, la CE oscille entre 270 et

416  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et au niveau de la couche inférieure, elle varie entre 270 et 447  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . L'augmentation de la salinité est surtout remarquable dans les couches supérieures.

Durant cette expérimentation une augmentation de la salinité au cours du phénomène d'humectation-dessiccation a été enregistrée. Cependant, les analyses statistiques (analyse de la variance) ne montrent pas de différences significatives au niveau des couches et au niveau des cycles.

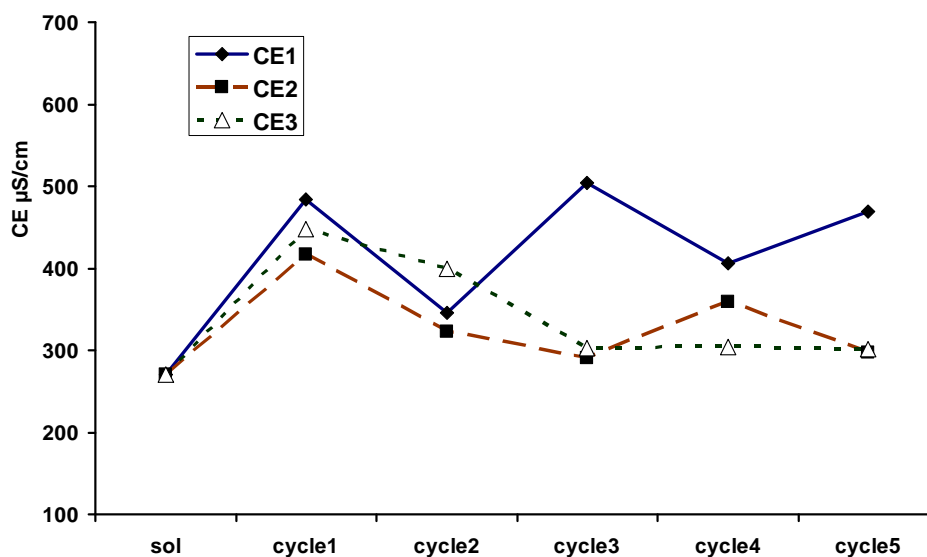


Fig.IV.31 : Evolution de la salinité globale au cours des cycles.

(CE1, CE2 et CE3 : conductivité électrique dans la couche supérieure, intermédiaire et inférieure de la colonne respectivement)

Cet essai sur colonnes c'est déroulé au laboratoire durant trois mois environ. Dans les milieux naturels, et surtout dans les périmètres irrigués, telle que la zone d'étude, le phénomène pourrait prendre une ampleur plus importante en fonction de la quantité et de la qualité de l'eau apportée.

Cet essai très court, qui a pour objectif de simuler le phénomène d'irrigation/évaporation, montre que le bilan salin est toujours positif (Tableau IV.10). Il démontre aussi la possibilité de tassement de sol par augmentation de la densité apparente dans les couches profondes.

Tableau IV.10 : Bilan de la salinité globale au niveau des colonnes

	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )		
	Couche 1	Couche 2	Couche 3
<b>Sol</b>	270	270	270
<b>Dernier cycle (C5)</b>	469,3	297	301,7
<b>différence</b>	199,3	27	31,67

Ce schéma est une représentation très simplifiée de ce que pourrait se produire sur le terrain. Cet essai révèle d'une manière claire que même l'irrigation avec les eaux de la nappe

profonde peut provoquer, à la longue, une salinisation du sol si on ne tient pas compte dans le calcul de la dose d'irrigation le lessivage des sels. Il est cependant important de signaler qu'au sud du Hodna, où les sols sont dominés par la texture grossière, la pratique de l'irrigation par planche est généralisée et les quantités d'eau apportées semblent être au-delà des besoins des cultures et du lessivage.

### 3.4- LES PROFILS TEXTURAUX

Dans la zone d'étude, la connaissance de la variation de la granulométrie des constituants minéraux revêt un intérêt capital. En effet, soumise à une érosion éolienne et une érosion hydrique d'une part et subissant une pression anthropique intense (notamment l'irrigation) d'autre part, l'évolution de ces sols méritent une attention particulière sachant que l'agriculture constitue un volet important du développement socio-économique de cette région.

Dans ce qui suit, on essaye de présenter les résultats obtenus de l'analyse granulométrique et d'étudier la variation verticale des différentes fractions.

#### 3.4.1- Analyse statistique

L'analyse statistique des horizons des profils étudiés (Tableau IV.11) montre que la fraction sableuse est importante et marque la composition granulométrique de ces sols. En effet, la moyenne est de 59,6%. Les résultats révèlent que 78% des échantillons dépassent 50% de sable.

La fraction argileuse est faiblement représentée dans les échantillons de sols avec une moyenne de 9,2%. Par contre le limon fin est relativement bien représenté avec une moyenne de 19,65%. Si on considère la fraction argile plus limon fin, le tableau (IV.11) indique une moyenne assez importante de l'ordre de 26%. La présence de ces deux fractions en quantité significative est un signe de fertilité de ces sols. Il est ainsi utile d'étudier sa variation verticale au niveau du profil pédologique.

**Tableau IV.11** : Statistiques descriptives des valeurs des fractions granulométriques

	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Ecart-type
A	9,20	8,5	0	22	6,78
LF	19,65	17	0	67	18,01
LG	12,04	7	0	56	13,50
SF	33,91	35	19	54	10,51
SG	25,65	27	1	66	16,11
S	59,57	64	20	92	22,35
A+LF	26,00	27	4	69	17,09

La matrice de corrélation entre les différentes fractions granulométriques (Tableau IV.12) permet de noter les relations suivantes :

- Une corrélation négative entre l'argile et les limons grossiers.
- Une corrélation négative entre le limon fin et les sables.
- Une corrélation négative entre l'argile plus limon fin et les sables.
- Une corrélation positive entre l'argile plus limon fin et le calcaire total.
- Une corrélation négative entre les sables et le calcaire total.
- Pas de corrélation entre le limon grossier et l'argile plus limon fin.

De ce qui précède, on peut faire les remarques suivantes :

Dans les échantillons étudiés, l'augmentation de la fraction fine (argile et limon fin) coïncide avec la diminution des pourcentages des sables totaux et vis versa. Le calcaire évolue proportionnellement avec la fraction argile+limon fin, ce qui suggère sa localisation dans cette fraction.

**Tableau IV.12** : Matrice de corrélation des fractions granulométriques.

	A	LF	LG	SF	SG	S	A+Lf	Calcaire
A	1							
LF	-0,41	1						
LG	<b>-0,47</b>	0,40	1					
SF	0,26	<b>-0,67</b>	<b>-0,59</b>	1				
SG	0,18	<b>-0,79</b>	<b>-0,58</b>	0,39	1			
S	0,25	<b>-0,88</b>	<b>-0,69</b>	<b>0,74</b>	<b>0,90</b>	1		
A+Lf	-0,03	<b>0,93</b>	0,25	<b>-0,63</b>	<b>-0,79</b>	<b>-0,87</b>	1	
Calcaire	0,29	0,36	0,28	<b>-0,58</b>	-0,33	<b>-0,51</b>	<b>0,51</b>	1

### 3.4.2- Variation verticale des fractions granulométriques

#### 3.4.2.1- Site de Memdouda

##### a) Profil de la parcelle témoin

Les pourcentages des sables totaux (fins et grossiers) sont très importants au niveau du profil. Ils varient de 50 à 76%. Le profil textural sableux présente une onde au centre correspondant à l'abaissement des valeurs de sable (fig. IV.32).

Les teneurs en argile+limon fin varient de 14 à 39%. Le profil textural de cette fraction présente une onde au centre témoignant de l'accroissement de la fraction fine (fig. IV.32).

##### b) Profil de la parcelle travaillée et irriguée

Les valeurs relatives en sables sont très importantes, ils varient de 54 à 92%. Le profil textural est descendant (fig. IV.32).

Les pourcentages de la fraction argile+limon fin oscille entre 4 et 35%. Le profil est ascendant.

##### c) Commentaire

En profondeur le sol est très sableux. En surface, lorsque le sol est travaillé, la terre fine (argile et limon fin) est ramenée en surface.

Lors de la description morphologique du profil, on a constaté que la transition entre l'horizon 2 et 3 est graduelle avec la présence parfois de languettes de terre fine ce qui suggère un déplacement de ces éléments au dépens des parties superficielles.

#### 3.4.2.2- Site de Mergueb

Dans ce site, les profils pédologiques présentent plusieurs successions d'horizons (5 au total).

##### a) Profil de la parcelle témoin

Les pourcentages des sables totaux sont très importants, ils varient de 53 à 87%. Le profil présente une onde au centre correspondant à une diminution des sables.

La fraction argile+limon enregistre des valeurs allant de 7 à 39%. Le profil textural présente une onde au centre correspondant à une augmentation de cette fraction (fig. IV.33).

On note aussi un noircissement au niveau des horizons médians témoignant d'une ancienne hydromorphie.

#### **b) Profil de la parcelle travaillée et irriguée**

Les sables totaux varient de 52 à 75%. Le profil représente une onde au centre correspondant à sa diminution.

Les pourcentage de la fraction argile+limon fin oscillent entre 10 et 37%. Le profil textural présente une onde au centre qui coïncide avec une augmentation de ces fractions (fig. IV.33).

A la base de l'horizon 4, se présente une croûte nodulaire calcaire de quelques cm. On note aussi, comme dans le profil précédant, la présence d'un noircissement témoignant d'une ancienne hydromorphie.

#### **3.4.2.3- Site du chott**

Mis à part certaines parties du chott affecté en surface par l'ensablement, le chott est un lieu de dépôt des éléments transporté par les cours d'eau.

#### **a) Profil de la parcelle témoin**

Il se présente sous trois horizons.

Les pourcentages des sables totaux sont inférieurs à 20%. Ils enregistrent une diminution considérable par rapport aux autres sites. Les sables grossiers sont rares.

Les valeurs de l'argile sont négligeables. Les taux des limons sont très élevés (77 à 83%). Leur teneur est relativement homogène au niveau du profil.

#### **b) Profil de la parcelle travaillée et irriguée**

Ce profil est localisé près d'un drain. Le sol était sous l'influence d'une nappe phréatique très salé. Le profil se présente sous 4 horizons ; les deux derniers forment un encroûtement gypseux. Les microcristaux de gypse sont de la tailles des sables ce qui influence sur la texture.

Les sables totaux varient de 24 à 83%. Le profil est descendant (fig. IV.34), les sables augmentent avec la teneur en gypse.



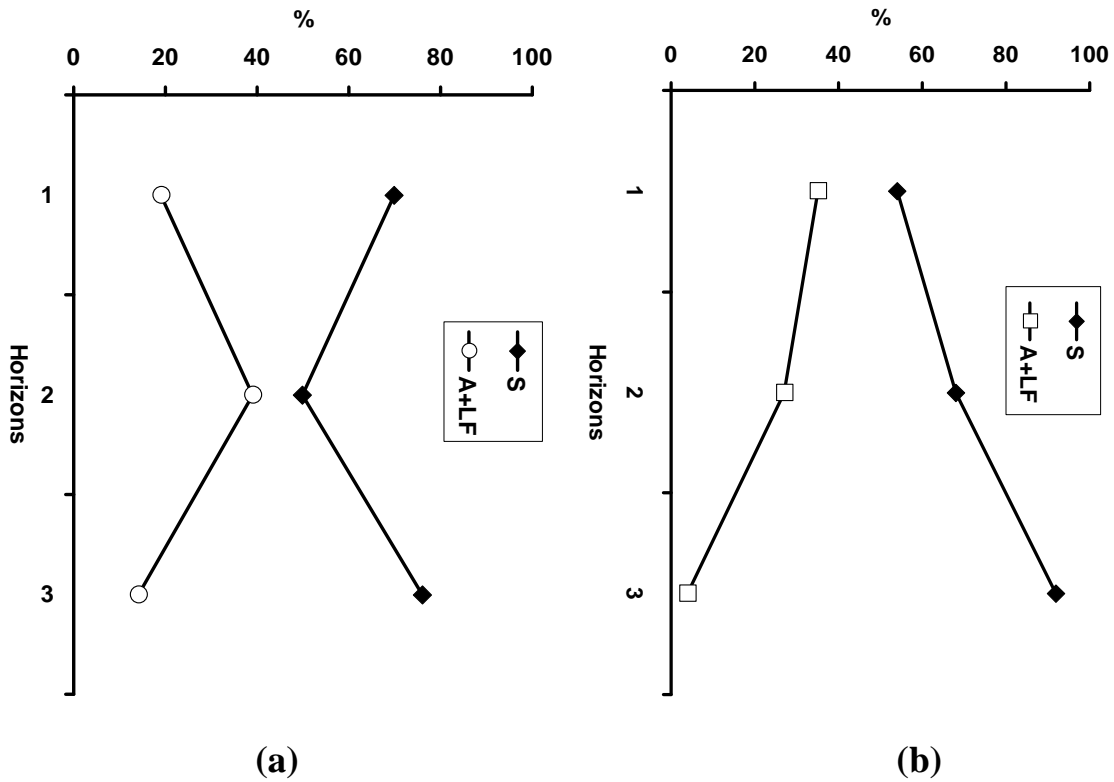


Fig. IV.32 : Variation des fractions granulométriques (cas de Memdouda)  
(a : témoin, b : parcelle irriguée)

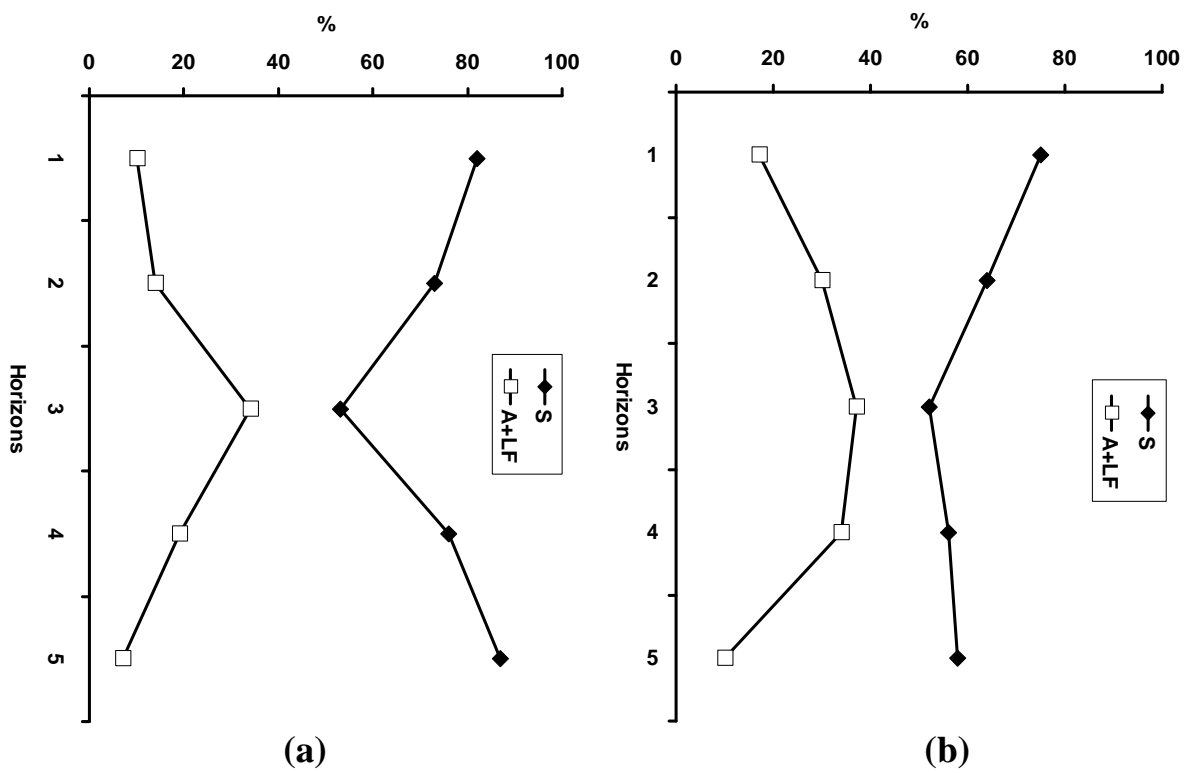


Fig. IV.33 : Variation des fractions granulométriques (cas de Mergueb)  
(a : témoin, b : parcelle irriguée)

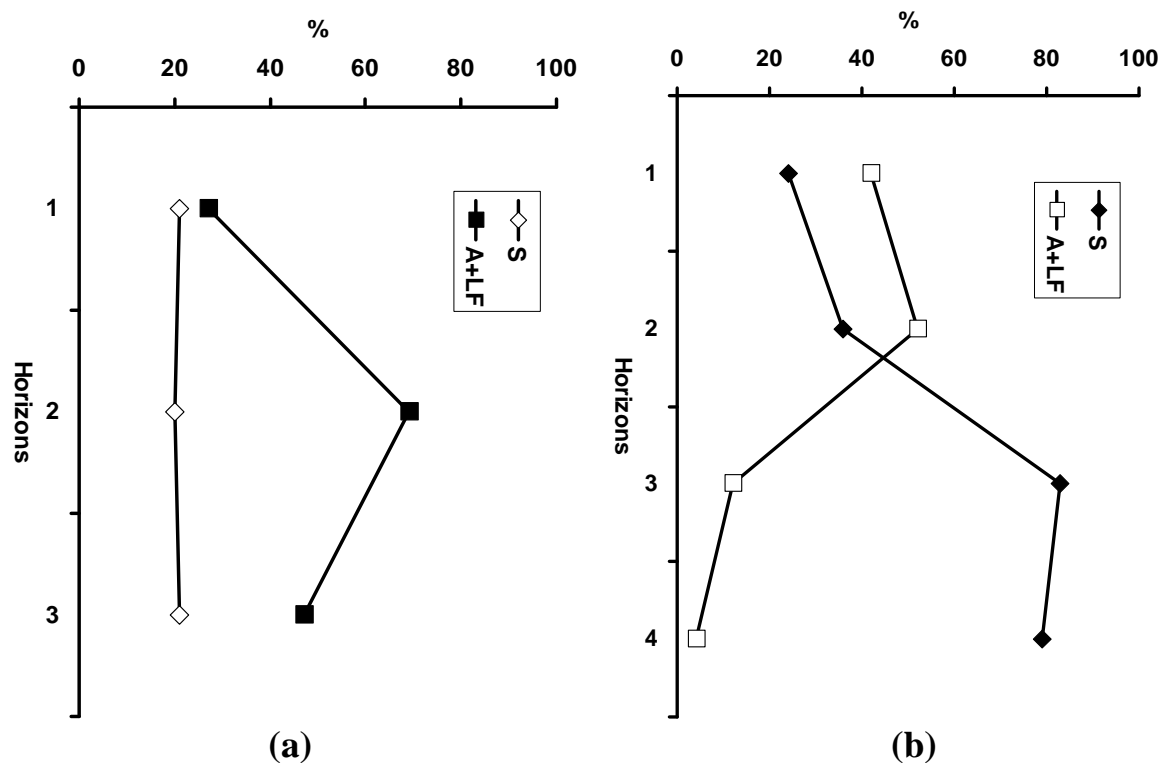


Fig. IV.34 : Variation des fractions granulométriques (cas du Chott)

(a : témoin, b : parcelle irriguée)

### 3.4.3- Conclusion

Les sols dans leur ensemble sont très riches en sable dont les pourcentages dépassent 50% et atteignent parfois 92% exception faite pour le site du chott où les résultats révèlent des valeurs de sables totaux de l'ordre de 20% avec une raréfaction des sables grossiers quartzeux.

La diminution des sables correspond toujours à une augmentation de la fraction argile plus limon fin. Cet enrichissement semble être localisé dans les horizons médians où le profil textural marque une onde indiquant les valeurs les plus élevées.

Dans les horizons de surface des parcelles cultivées, la teneur en éléments fins (argile+limon fin) est toujours supérieure à celle du témoin. Ceci est en fait lié au travail du sol qui ramène ces éléments fins en surface.

### 3.5- ORIGINE DES MATERIAUX DU SOL (MORPHOSCOPIE DES SABLES)

#### 3.5.1- Le site de Mamdoua

Les résultats obtenus nous permettent de faire les remarques suivantes :

Au niveau du profil, les émoussés luisants et les ronds mats sont presque égaux.

Au niveau du profil 1, les émoussés luisants varient de 45 à 50%. Les ronds mats oscillent entre 51 et 55%. Les non usés sont rares. Au niveau du profil 2, les émoussés luisants varient de 49 à 50%. Les ronds mats oscillent entre 46 et 50%. Les non usés sont très faibles.

Ses résultats sont reportés sur la figure (IV.35). Ils supposent un façonnement mixte éolien et fluviatile dans le site de Mamdoua.

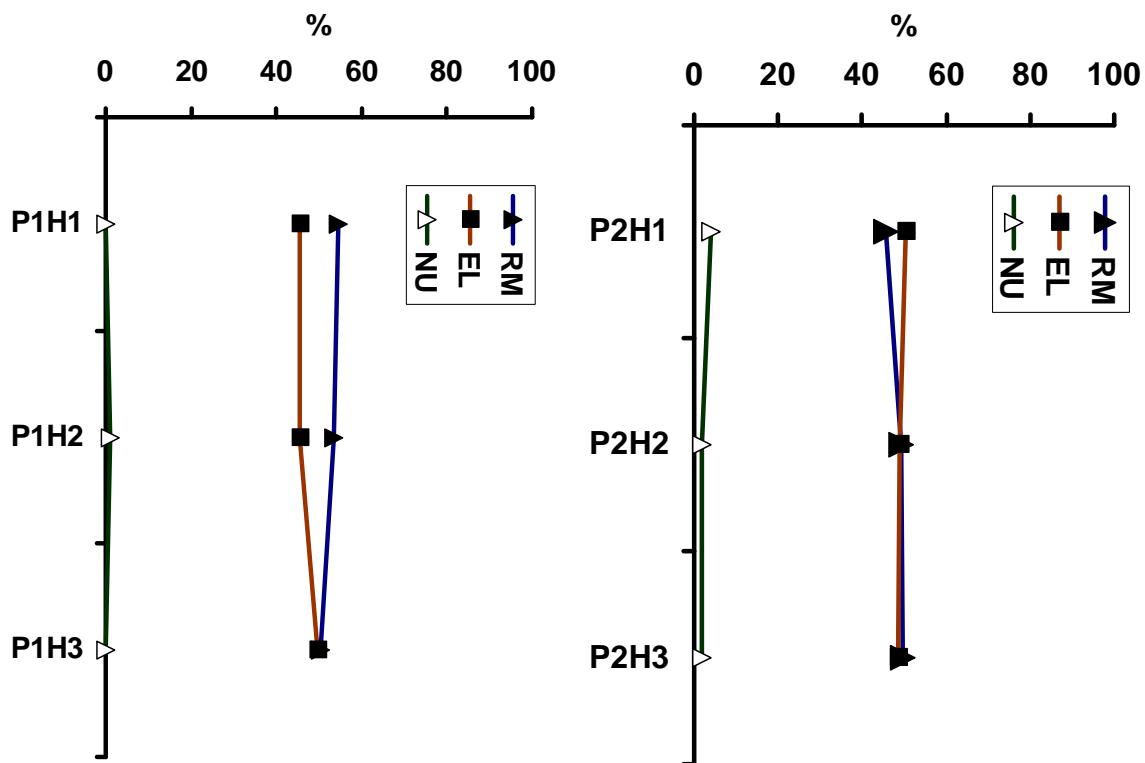


Fig. IV.35 : Morphoscopie des sables.

(P1 : Profil témoin. P2 : Profil irrigué. RM : rond mat, EL émoussé luisant, NU : non usé)

#### 3.5.2- Le site de Mergueb

Les résultats obtenus montre les faits suivants.

Au niveau du profil 1, les émoussés luisants varient de 56 à 84%. Les ronds mats oscillent entre 16 et 42%. Les non usés sont rares. Au niveau du profil 2, les émoussés luisants varient de 36 à 83%. Les ronds mats oscillent entre 16 et 63%. Les non usés sont très faibles.

Selon la figure (IV.36), on peut constater que :

En surface, il y a une abondance des émoussés luisants et des ronds mats. En profondeur, Les émoussés luisants deviennent plus importantes ce qui met en évidence l'influence du transport par l'eau.

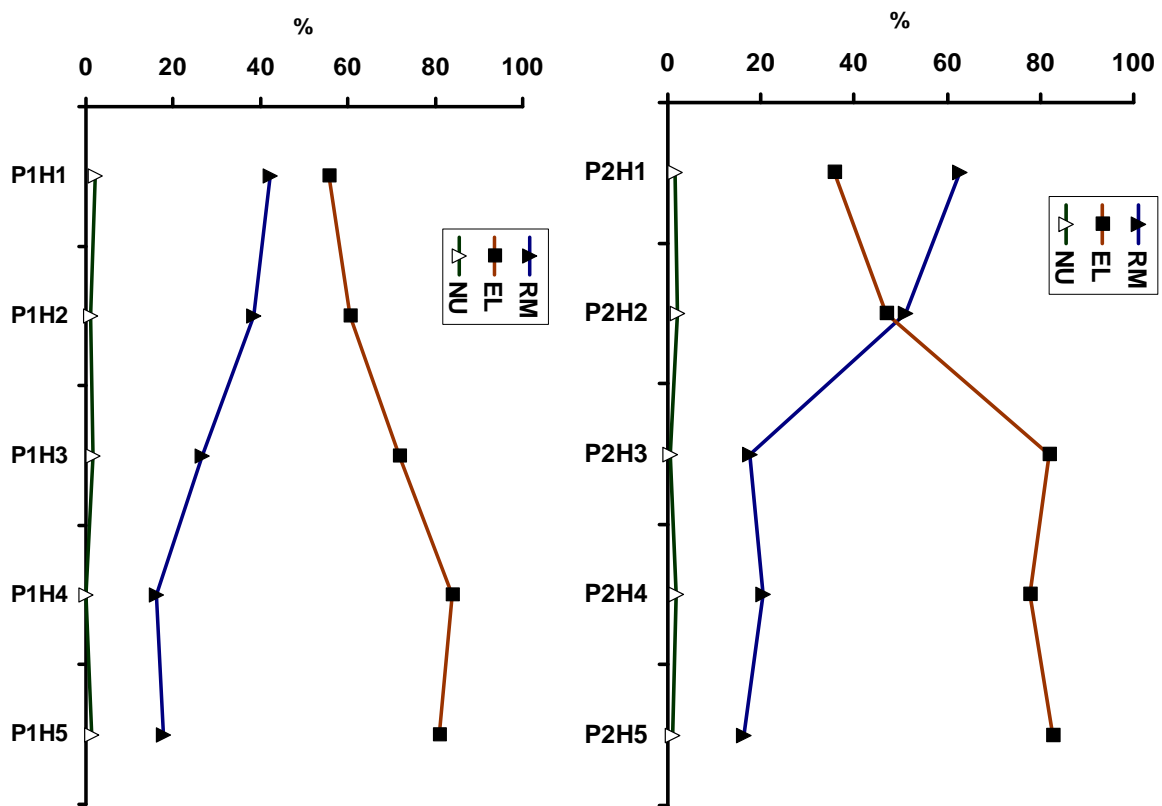


Fig. IV.36 : Morphoscopie des sables

(P1 : Profil irrigué. P2 : Profil témoin. RM : rond mat, EL émoussé luisant, NU : non usé)

### 3.5.3- Dans le site du chott

Au niveau du profil 1, les émoussés luisants sont compris entre 57 et 68%. Les ronds mats varient entre 32 à 43%. Les non usés sont absente. Au niveau du profil 2, les émoussés luisants oscillent entre 51 à 75% et les ronds mats entre 24 à 47%. Les non usés sont très faibles (0-2%).

La figure (IV.37) nous permet de dire que :

En surface, on observe une abondance des émoussés luisants et des ronds mats. En profondeur, on note une augmentation des émoussés luisants contre une baisse des ronds mats ce qui peut être expliqué par une influence du transport par l'eau.

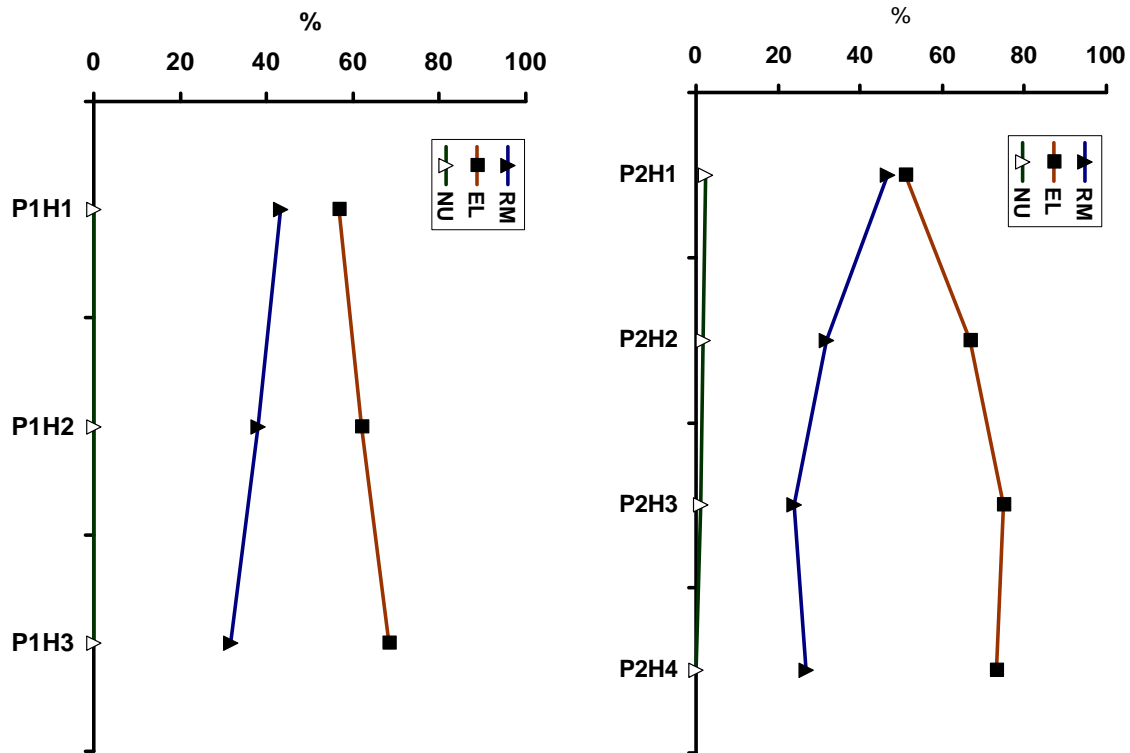


Fig. IV.37 : Morphoscopie des sables.

(P1 : Profil témoin. P2 : Profil irrigué. RM : rond mat, EL émoussé luisant, NU : non usé)

### 3.5.4- Conclusion

Des résultats précédents, on peut faire les commentaires suivants :

- En surface, l'observation morphoscopique des sables révèle la présence des ronds mats et des émoussés luisants témoignant d'une origine mixte éolienne et hydrique. Ces résultats confirment une dynamique fluviatile et une dynamique éolienne dans le sud du Hodna.
- En profondeur, l'observation morphoscopique des sables révèle un accroissement des émoussés luisants dans le site de Mergueb et du Chott ce qui met bien en évidence l'importance du façonnement par l'eau dans ces sites. Dans le site de Memdouda, la présence des ronds mats et des émoussés luisants indiquent un façonnement mixte.
- Les profils témoins et les profils des parcelles irriguées présente une allure générale semblable à l'exception des horizons de surface qui, soumis à un remaniement constant au niveau des parcelles irriguées, ramènent la terre des horizons médians sous l'effet du travail du sol. En surface, les ronds mats deviennent importante ce qui suggère une action éolienne actuelle importante.

### 3.6- AUTRES CARACTERISTIQUES ANALYTIQUES

#### 3.6.1- le gypse

Le gypse dans la zone d'étude est d'origine pédogénétique. Son occurrence est essentiellement en relation avec la présence de la nappe phréatique. Les teneurs varient entre 0,7 et 51,60%.

Au niveau du site de Memdouda, éloigné de la dynamique de la nappe, le gypse est absent. En se dirigeant vers le nord, au niveau du site de Mergueb, le gypse se localise en profondeur avec des teneurs relativement faibles. Près du chott, l'action de la nappe a favorisé l'individualisation d'une croûte gypseuse de nappe.

##### 3.6.1.1- Conclusion

Le gypse est rencontré uniquement dans la zone qui a subi ou qui subit encore l'action de la nappe phréatique. Il s'agit de croûte et encroûtement de nappe dont la genèse est liée à l'action de la nappe phréatique. De telles formations ont été décrites par plusieurs auteurs au Maghreb (Belair, 1954 ; Pouget, 1968 ; Dekkiche, 1974 ; Kulk, 1974 ; Halitim, 1985 ; Abdesselam, 1998 ; Hamdi Aissa, 2001). Enfin, les sables éoliens et les limons calcaires des crues sont pauvres en gypse.

#### 3.6.2- le calcaire total

Les teneurs des sols en calcaire total varient de 0,56 à 47,76%. Dans la zone d'étude le calcaire est en relation avec les crues et les limons calcaires qu'elles transportent.

##### 3.6.2.1- le site de memdouda

Les teneurs en calcaire sont moyennes selon l'échelle d'appréciation (Lozet et Mathieu, 1990). Le profil de variation des teneurs en calcaire de la parcelle irriguée et du témoin présente une onde au centre (fig. IV.38). Ceci pourrait être expliqué par :

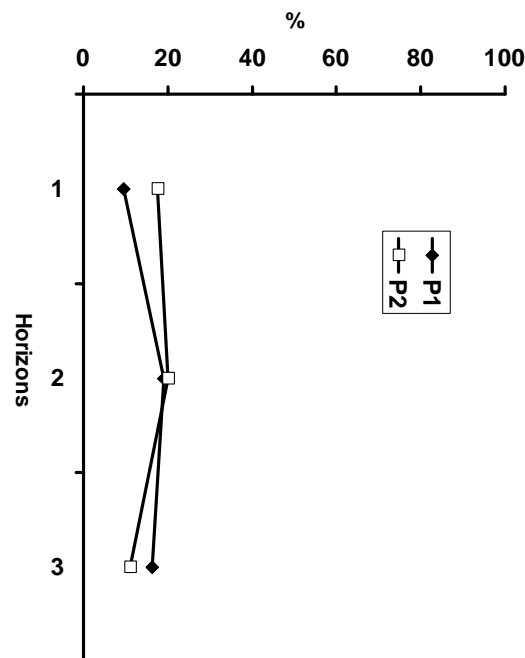


Fig.IV.38 : Variation des teneurs de calcaire (site de Memdouda)  
(P1 profil témoin, P2 profil de la parcelle irriguée)

Dans la parcelle témoin, le calcaire est entraîné par les eaux des crues dans les horizons médians. La texture sableuse favorise ce processus. Le même mécanisme se produit normalement dans la parcelle irriguée ; seulement les labours ramène en surface une partie du calcaire de l'horizon inférieur ce qui explique les teneurs relativement élevée en surface par rapport au témoin.

### 3.6.2.2- le site de Mergueb

Les teneurs en calcaire sont faibles à fortes. Le profil de variation des teneurs en calcaire de la parcelle irriguée et du témoin permet de localiser les fortes teneurs au milieu des profils (fig. IV.39). A ce niveau, les teneurs en calcaire dans les deux parcelles avoisinent les 40%. Juste en dessous de ce niveau, et dans la parcelle irriguée, on a remarqué la présence d'une croûte calcaire très dure de quelques cm d'épaisseur.

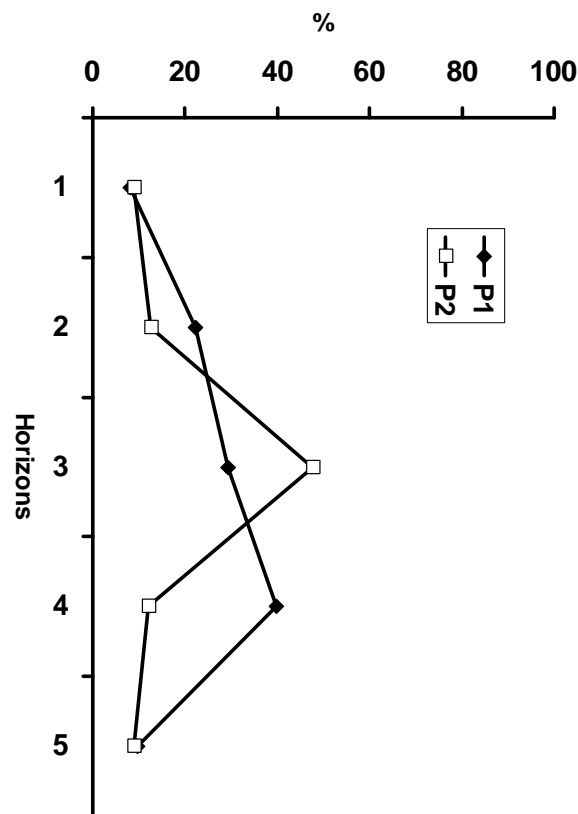


Fig. IV.39 : Variation des teneurs de calcaire (site de Mergueb)  
(P2 profil témoin, P1 profil de la parcelle irriguée)

### 3.6.2.3- le site de chott

Les teneurs en calcaire sont très faibles à fortes. La parcelle témoin est plus calcaire (fig. IV.40) (23,49 à 31,18% avec une médiane de 25,07%) comparé avec la parcelle irriguée (0,56 à 21,32% avec une médiane de 8%). Dans cette dernière, les teneurs en calcaire diminuent en profondeur avec l'augmentation des pourcentages en gypse.

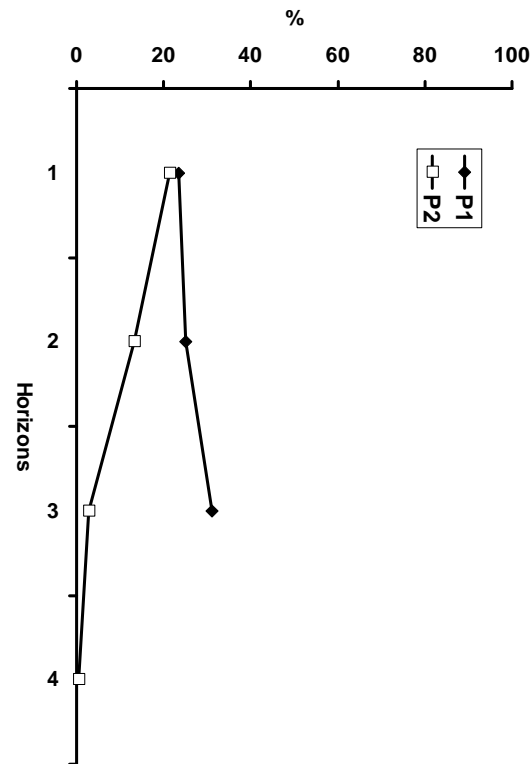


Fig. IV.40 : Variation des teneurs de calcaire (site du Chott).  
(P1 profil témoin, P2 profil de la parcelle irriguée)

### 3.6.2.4- Conclusion

Les sédiments qui ont donné naissance aux sols sont le résultat d'une morphogénèse hydrique et d'une morphogénèse éolienne. Dans ces sédiments perméables, le calcaire semble se concentrer dans les parties médianes du profil pédologique. Favoriser par une texture grossière et un système d'irrigation gravitaire, ces calcaires semblent être entraînés dans les parties médianes du profil où les fortes teneurs ont été enregistrées. Le calcaire est corrélé positivement avec la fraction argile plus limon fin ce qui suggère sa localisation dans la fraction limoneuse.

Dans la zone du chott, la formation des accumulations gypseuses (croûte) coïncide avec une diminution brutale des teneurs en calcaire, résultat couramment signalé dans les études des sols gypseux en milieu aride.

### 3.6.3- La perméabilité des sols

L'évaluation de la perméabilité nous a permis de déterminer le coefficient de perméabilité K. Les valeurs enregistrées variées de 3,18 à 24,46 cm/h. Selon ces résultats, nos échantillons se qualifient de perméables.

Les sols sableux sont caractérisés par des taux d'infiltration élevés variant selon les classes texturales sandy clay à sandy loam de 4 à 25 cm/h respectivement, mais, dans les sols sableux très perméables les valeurs de 100 à 400 cm/h sont facilement atteintes (FAO, 1975).

Les vitesses d'infiltration élevées ont également une action sur la structure de sol. Dans ce cas, souvent les particules d'argile contenues dans les couches supérieures sont transportées en profondeur où elles s'accumulent en formant un horizon moins perméable et un obstacle à la circulation d'eau ce qui exige un drainage (FAO, 1975).



### 3.7- CARACTERISTIQUES MACROMORPHOLOGIQUE, MICROMORPHOLOGIQUES ET MINERALOGIQUES DES SOLS

Le matériau parental des sols étudiés est formé de dépôts du Quaternaire. Il résulte d'une morphogenèse hydrique et d'une morphogenèse éolienne qui affectent la zone d'étude. La fraction grossière est relativement uniforme dans l'ensemble des sols. Elle est constituée de sable quartzeux dominés par la fraction de taille 100-400  $\mu\text{m}$ . Le squelette quartzeux est très abondant partout à l'exception du site du Chott.

#### 3.7.1- Le site de Memdouda .

Il est situé loin du chott, les sols ne sont pas sous l'influence de la nappe phréatique. Ils sont dépourvus de tout encroûtement calcaire ou gypseux. Le profil se présente en trois couches plus apparentes dans le témoin que dans la parcelle irriguée suite au travail du sol. Dans la parcelle irriguée, on constate, en plus, la présence de petites languettes de matériau fin au niveau de la base du deuxième horizon. Elle témoigne ainsi d'un déplacement des éléments fins (argile et limon fin).

Les analyses minéralogiques des échantillons finement broyés, effectuées sur les horizons médians, montrent qu'il n'y a pas de différence notable concernant leur composition minéralogique (Tableau IV.13 et fig. IV.41 et IV.42), qualitativement on peut dire que les sols contiennent :

Du quartz ( $\text{SiO}_2$ ) avec des raies principales à  $4,25\text{A}^\circ$  et  $3,34\text{A}^\circ$  en forte quantité, présent essentiellement dans les fractions grossières.

Des carbonates essentiellement avec des raies principales de calcite à  $3,03\text{A}^\circ$  et  $2,28$  mais aussi des traces de la dolomite  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  avec une raie à  $2,19\text{A}^\circ$ .

Des traces d'argile notamment de la kaolinite, chlorite et palygorskite.

En lame mince, Le matériau grossier est très abondant, il est constitué uniquement de cristaux de quartz (fig. IV. 43a). Le matériau fin est brun jaunâtre, il est formé de limon fin et d'argile enrichis en micrite dont la teneur croit au milieu du profil (Tableau IV.14). A ce niveau, il semble imprégné les particules sableuses (fig. IV.43b). Les traits pédologiques sont presque absents à l'exception de quelques siltanes répartis aléatoirement au niveau du profil (fig. IV.43c). Les vides sont constitués de vides d'entassement qui passent en cavités et chenaux avec l'augmentation du matériau fin.

Le profil de la parcelle irriguée paraît être semblable au témoin à l'exception de la partie supérieure du profil qui a subi des transformations suite au travail du sol durant la période d'exploitation.

Tableau IV.13 : Composition minéralogique des échantillons en poudre du site de Memdouda

	Ech.	quartz	calcite	dolomite	Argiles (traces)
<b>Site Memdouda</b>	P2H2	XXX	XX		chlorite Kaolinite
	P1H2	XXX	XX	X	chlorite Kaolinite palygorskite

X Faible, XX commun, XXX dominant

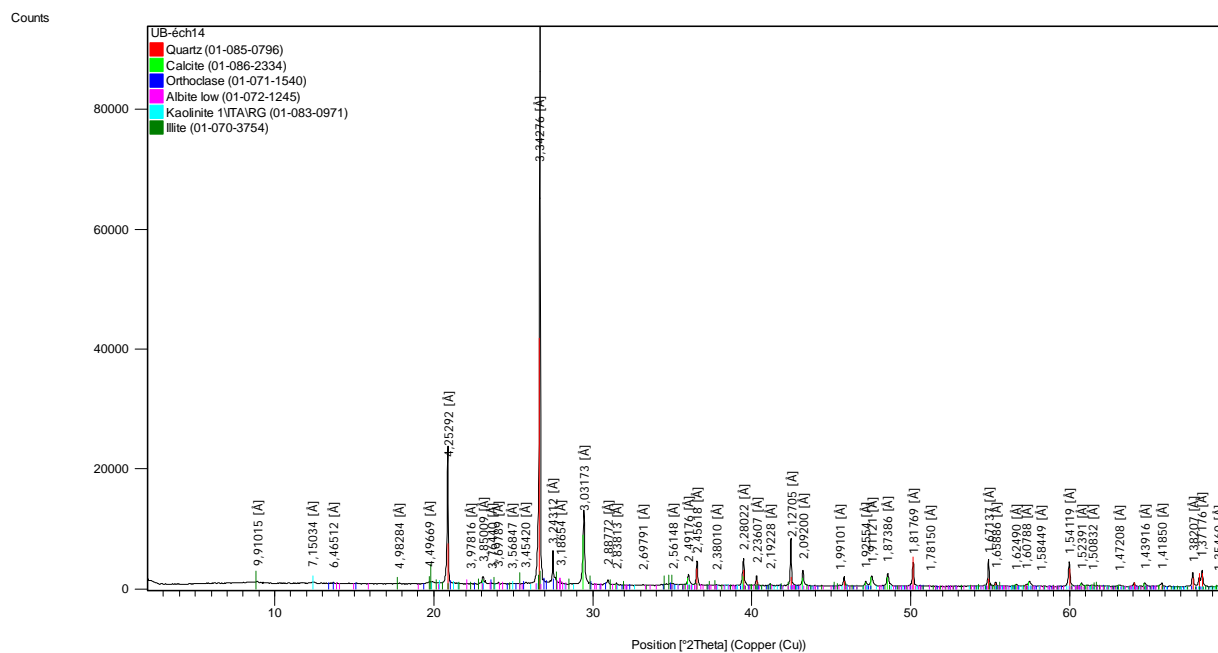


Fig. IV.41 : Diagramme de poudre de l'échantillon P2H2 (Memdouda)

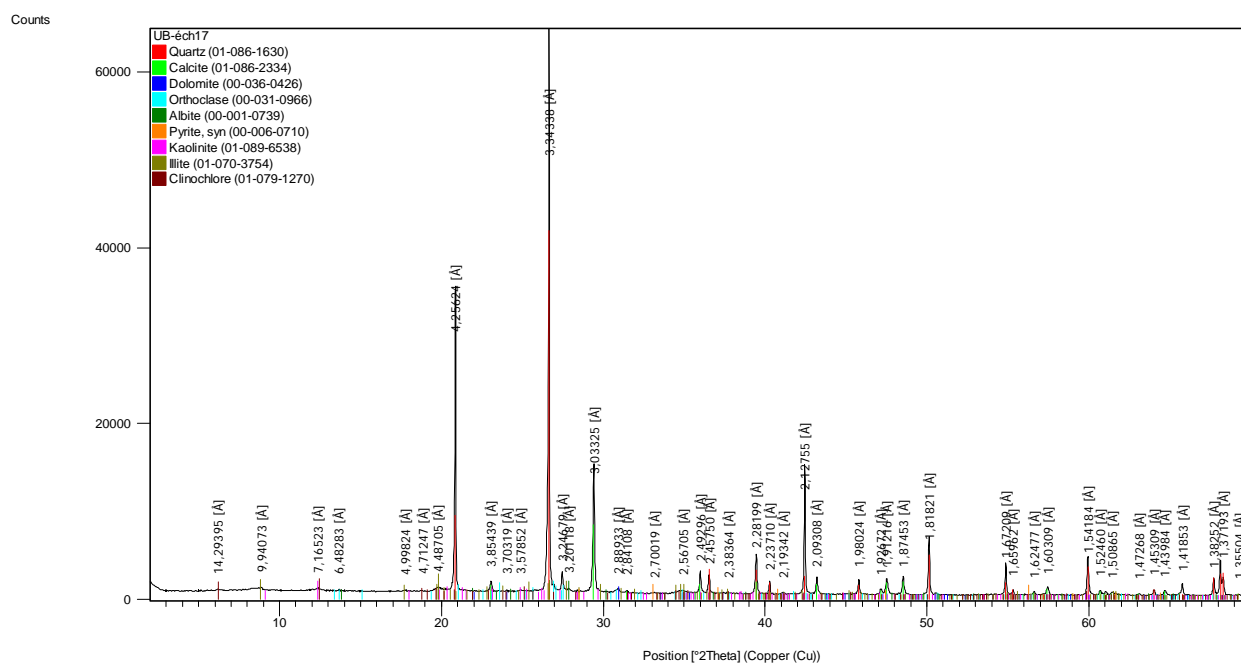


Fig. IV.42 : Diagramme de poudre de l'échantillon P1H2 (Memdouda)

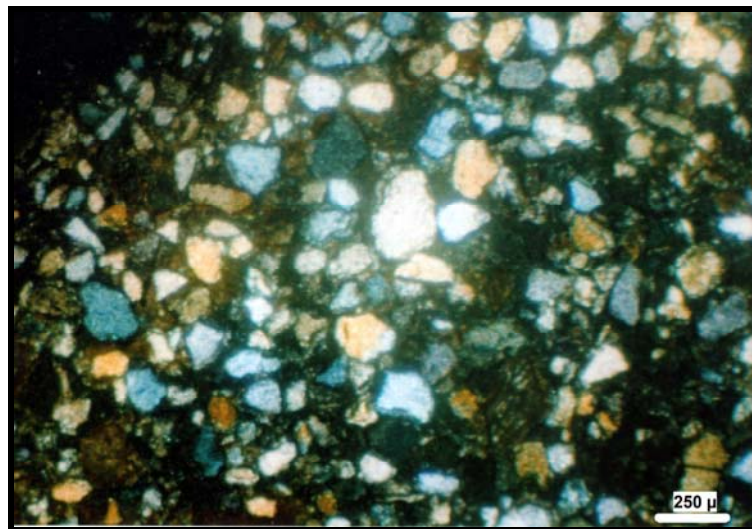
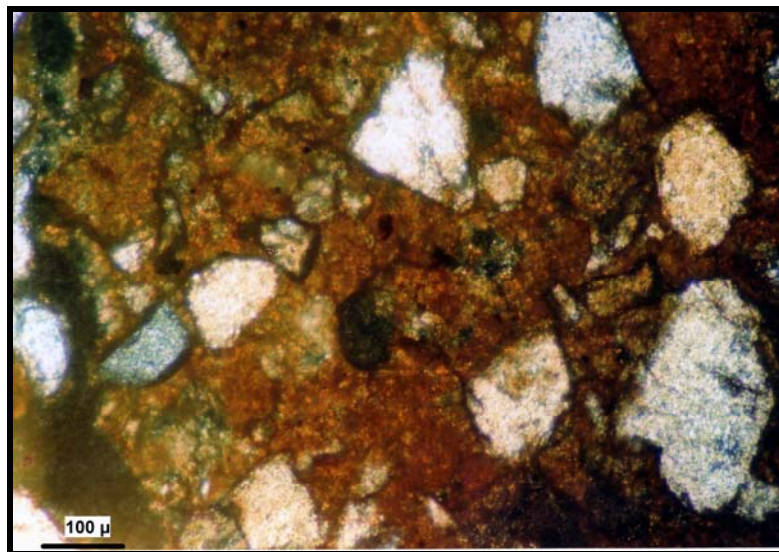
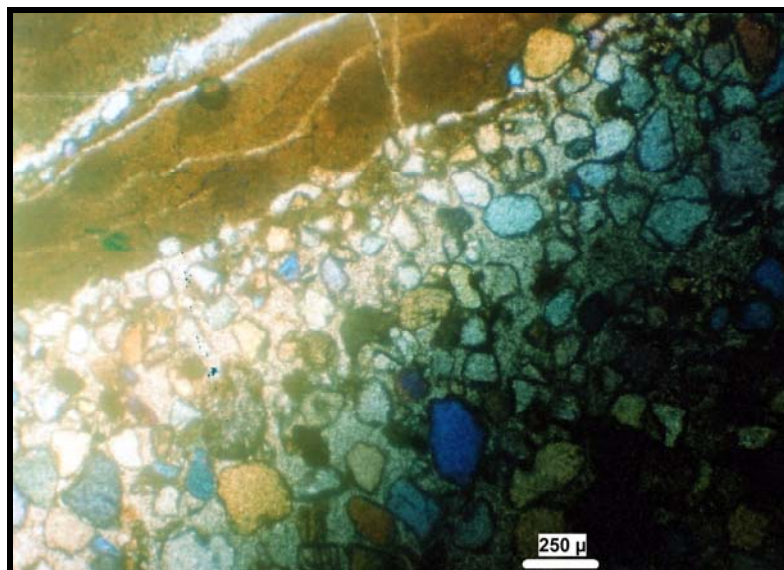
**a****b****c**

Fig. IV. 43 : Planche photographique (site de Memdouda) a) squelette quartzeux P1H1, b) matériau fin (limon calcaire) imprégnant les sables dans les horizons médians P1H2 c) trait pédologique textural (siltane) P1H1.

**Tableau IV.14** : Caractérisation micromorphologique des profils du site de Memdouda

		Profil irrigué			Profil Témoin		
		P2H1	P2H2	P2H3	P1H1	P1H2	P1H3
Microstructure	En grains simples				+++		
	En grains liés				+		++
	En grain pelliculaire						++
	En cavité	++	++	++		++	
	De chenaux	+	++	+		++	
	Spongieuse	++	+	++		+	
Porosité	V. Entassement simple				+++		++
	V. entassement complexe						+
	Cavités	++	++	++		++	+
	Chenaux	+	+	+		++	+
	Total (%)	45	45	45	45	45	45
Distribution relative		chitonic	chitonic	chitonic	monic	chitonic	chitonic
Rapport C/f		40/15	35/20	40/15	45/10	35/20	40/10
Materiau grossier >20µm	Quartz	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Fine material <20µm	Limon calcaire	++	++	++	++	++	++
Pedotraits	Texturaux	+	+	+	+	+	+

+ Faible, ++ commun, +++ dominant

### 3.7.2- Le site de Mergueb

Le profil pédologique est formé d'une succession de couches (5 horizons) comparables aux sols peu évolués d'apport alluvial décrit par Pouget (1980) dans les steppes sud Algéroises. Le matériau fin (argile et limon fin) est concentré dans la partie médiane, ce qui suggère, au moins pour une partie, son déplacement par les eaux des parties amont du profil. La présence d'une croûte calcaire nodulaire à la base de ces couches médianes de la parcelle irriguée renforce cette hypothèse. Les profils salins sont descendants.

Les analyses minéralogiques des échantillons montrent que les sols contiennent (Tableau IV.15 et fig. IV.44, 45 et 46) :

Du quartz ( $\text{SiO}_2$ ) avec des raies principales à  $4,25\text{A}^\circ$  ;  $3,34\text{A}^\circ$  en forte quantité, présent essentiellement dans les fractions grossières.

Des carbonates avec une raie principale de calcite à  $3,03\text{A}^\circ$  et des traces de la dolomite  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  avec une raie à  $2,89\text{A}^\circ$ .

Du gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  avec une raie principale à  $7,59\text{A}^\circ$ .

Des argiles en très faible concentration.

**Tableau IV.15** : Composition minéralogique des échantillons en poudre du site de Mergueb.

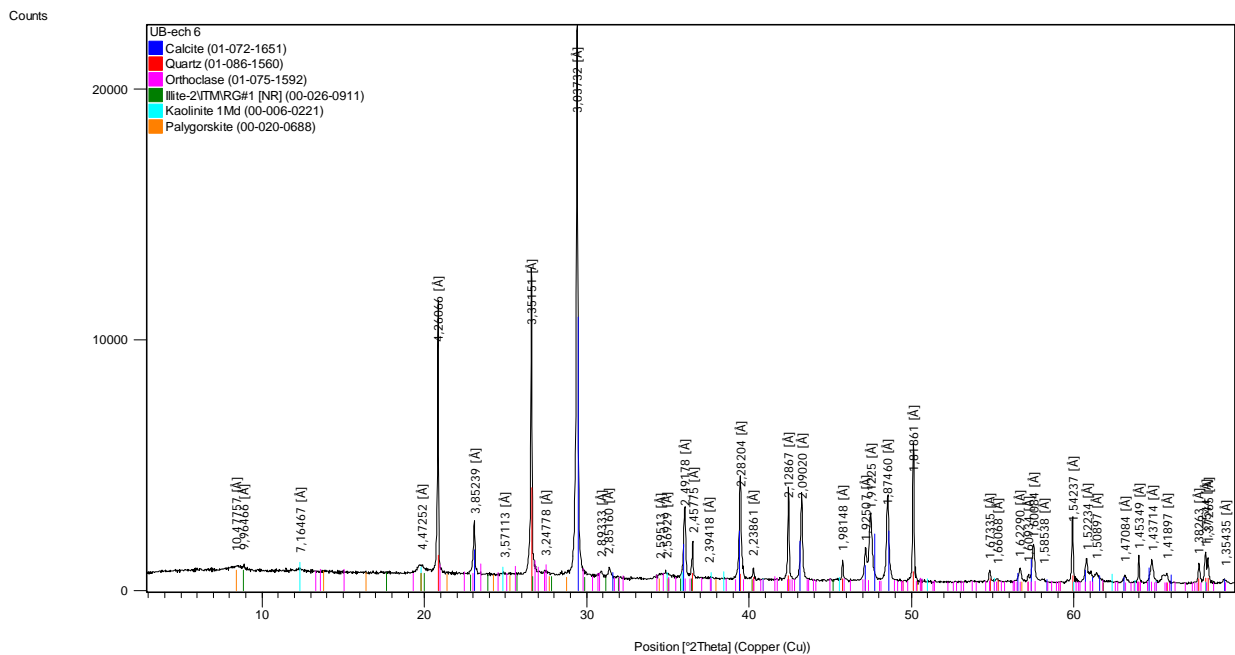
	Ech.	Quartz	calcite	dolomite	gypse	Argiles (traces)
Site Mergueb	P1H2	XXX	XXX	X		Kaolinite
	P1H5	XXX	X		XX	Illite, Kaolinite, Palygorskite.
	P2H3	XX	XXX			Kaolinite

X Faible, XX commun, XXX dominant



profil. Les vides sont constitués de vides d'entassement qui passent en cavités et chenaux avec l'augmentation du matériau fin. Au niveau de la parcelle irriguée, et à la base de l'horizon médian où le matériau fin est plus important s'est développé une croûte calcaire de quelques cm d'épaisseur et dont la teneur en  $\text{CaCO}_3$  est de l'ordre de 80%. La porosité est faible (15%), la croûte est constituée essentiellement de micrite (80% de la lame environ) (fig. IV.47a). Les grains de quartz sont sub-anguleux à sub-arrondis de taille variant de 50 à 250  $\mu\text{m}$ , leur pourcentage est d'environ 10%.

Au dessous de la croûte, l'horizon est sableux, les traits pédologiques observés sont des remplissages denses incomplets de gypse lenticulaire de dimension de sable très fin à grossier (fig. IV.47b).



**Fig. IV.46 :** Diagramme de poudre de l'échantillon P2H3 (Mergueb)

Les différences constatées entre les deux profils (irrigué et témoin) sont localisées à deux niveaux :

1- A la surface du profil, comme le cas de Memdouda, les changements sont dus essentiellement au travail du sol.

2- A la base du profil deux phénomènes ont été observés. D'une part, la présence d'une croûte calcaire et, d'autre part, l'individualisation du gypse dans la parcelle irriguée.

**Tableau IV.16** : Caractérisation micromorphologique des profils du site de Mergueb

		Profil irrigué				Profil Témoin		
		P1H2	P1H3	Croûte calcaire	P1H5	P2H2	P2H3	P2H4
Microstructure	En grains simples			massive		++		+++
	En grains liés					+		
	En grains pelliculaires				++	+		
	En cavité	++	++		+		++	
	De chenaux	+	+		+			
	Spongieuse	+	+					+
Porosité	V. Entassement simple					+++		++
	Cavités	++	++	+	++		+++	+
	Vésicules	+	+					
	Chenaux	+	+	+	++			+
	Totale (%)	45	45	15	40	40	40	45
Distribution relative		chitonic	Chitonic	Porferic fermée	Chitonic	Maunic	Porferic fermée	Maunic
Rapport C/f		40/15	35/20	9/75	42/18	55/5	30/30	45/10
Matériau grossier >20µm	Quartz	+++	+++	+	+++	+++	+++	+++
	Gypse				+			
	Calcite							
Fine material <20µm	Limon calcaire	++	++	+++	++	+	+++	++
Pedotraits	Gypsique				+			

+ Faible, ++ commun, +++ dominant

### a) La présence de la croûte calcaire dans la parcelle irriguée

Une première interrogation soulevée concerne l'origine de cette croûte. Est-elle une formation pédologique ou sédimentaire. Sa genèse est-elle influencée par l'irrigation ?

Tout d'abord, il faut signaler que les sols à fortes accumulations calcaires ont fait l'objet d'un grand nombre d'observation, le plus souvent macroscopique. Ruellan (1970) et Bock (1984) ont fait la synthèse des hypothèses, très diverses, qui sont émises sur leurs genèses.

Dans les sols du Hodna, Dekkiche (1974), indique que l'accumulation et l'individualisation du calcaire passent tout d'abord par le mode d'apport du matériel qui reste en grande partie le ruissellement de boue calcaire provenant des sols de montagne développé sur roche calcaire. Au ruissellement s'ajoute l'apport par le vent notamment au sud. Cependant, Mimoune (1995) rapporte que le sable dunaire du sud du Hodna est pauvre en calcaire (1,12%).

Il faut signaler que les accumulations généralisées de calcaire d'origine pédogénétique se rencontrent, généralement, dans les formations relativement anciennes (Quaternaire ancien et moyen) (Pouget, 1980) et non pas dans les formations récentes comme dans notre cas. De même, ces formations sont localisées dans les positions topographiques hautes (Halitim, 1985). L'observation microscopique de cette croûte n'a pas fait état d'individualisation secondaire de calcite. Partant de ces considérations, nous rejoignons la thèse sédimentaire développée par Vaudour et Clauzon (1976) qui ont identifié des croûtes sédimentaires constituées de micrite argileuses emballant de nombreux grains de quartz plus ou moins fissurés et craquelés.



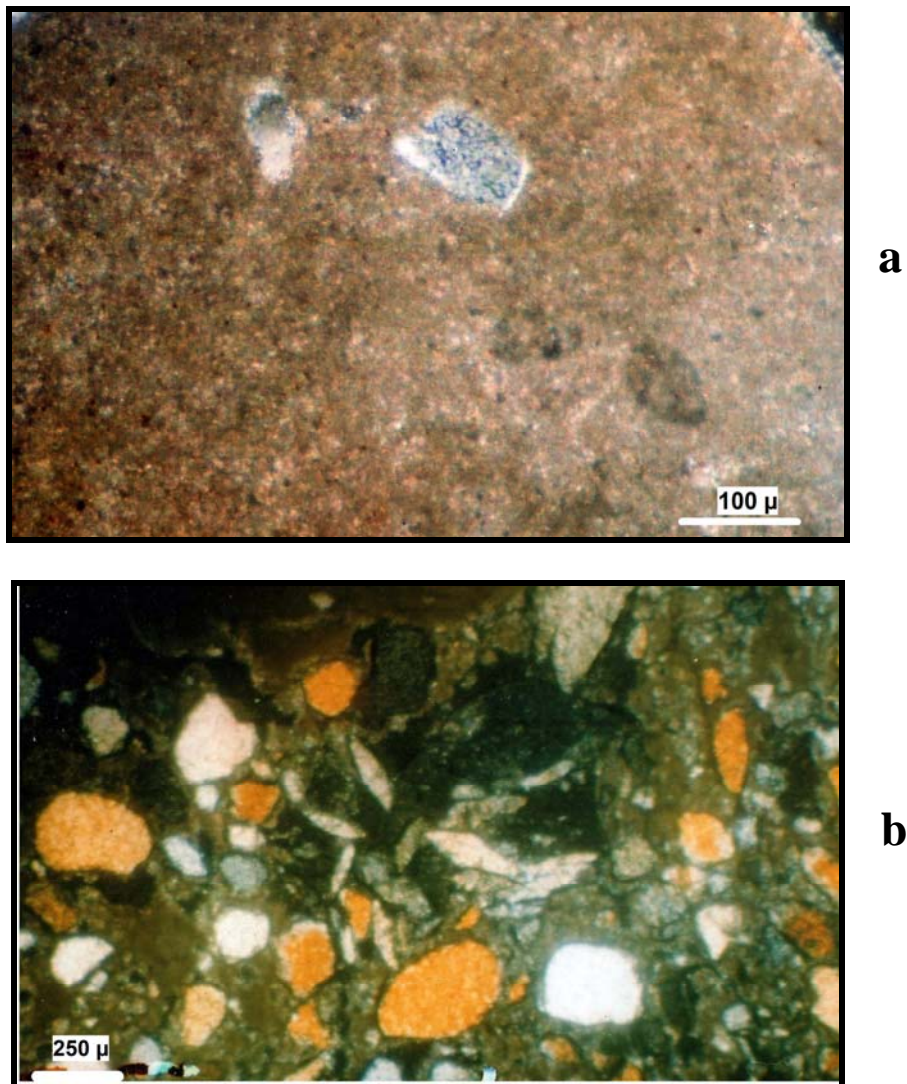


Fig. IV.47 : Planche photographique (site de Mergueb) (a) calcite sous forme de micrite (croûte calcaire), b) remplissage dense incomplet de gypse lenticulaire (P1H5).

Dans ces sols, la présence de la fraction argile plus limon fin dans les horizons médians mérite aussi une attention particulière.

S'agit-il d'un lessivage avec formation d'un horizon argillique?

Les conditions du milieu permettent-elles ce déplacement ?

S'agit-il d'un mécanisme pédologique ou d'un phénomène sédimentaire ?

S'agit-il d'apport éolien ou d'apport fluvial ?

Tout d'abord, il faut signaler que dans notre cas il ne s'agit pas d'une illuviation d'argile aboutissant à la formation d'un horizon argillique tel qu'il est défini par la soil taxonomy (1975), même si Rabie et al., (1990) ont rapporté qu'en Egypte dans les plaines alluviales irriguées en zone aride et sous conditions de pH élevé et de sodicité excessive l'illuviation des argiles est possible sans formation d'horizon argillique. En effet, même si la teneur en argile dans les horizons médians augmente parfois par rapport aux horizons de



surface, la présence d'un horizon argillique exige d'autres conditions non satisfaites comme la présence de revêtements argileux dans les lames minces. Le pH alcalin du sol et la présence de calcaire dans la fraction fine empêchent toute dispersion des argiles, de même l'aridité du climat empêche tout lessivage. Néanmoins, nous pensons que l'irrigation en permanence de ces sols à texture grossière et à forte perméabilité à certainement une influence sur le déplacement des particules fines mais le cadre de cette étude nous nous permet pas d'approfondir ce point dont d'autres travaux pourraient élucider.

### b) l'individualisation du gypse en bas du profil de la parcelle irriguée

Le gypse s'est-il produit dans le sol sous l'effet de l'ancienne nappe phréatique dont témoignent les horizons noircis, ou s'agit-il de l'effet des eaux d'irrigation. L'eau d'irrigation présente un faciès chimique sulfaté calcique mais elle n'est pas saturée par rapport au gypse (test de saturation). Dans ce milieu très évaporant (ETP annuelle= 1400 mm et P annuelle = 170 mm), l'évolution des solutions par concentration pourrait engendrer le dépôt du gypse, de même, l'utilisation de l'eau par les racines favorise cette concentration.

### 3.7.3- Le site du Chott

Dans ce milieu, les sols étaient sous l'influence de la nappe phréatique ce qui est attesté par la présence de drainage et l'individualisation d'une croûte gypseuse de nappe. Le caractère le plus marquant aussi est la présence de limons en forte proportion contrairement aux sables dont les teneurs ont chuté par rapport au deux premiers sites.

Les analyses minéralogiques des échantillons montrent que les sols contiennent (Tableau IV.17 et fig. 48 et 49) :

Du quartz ( $\text{SiO}_2$ ) avec une raie à  $3,34\text{A}^\circ$  présent dans les fractions grossières.

Des carbonates avec des raies principales de calcite avec une à  $3,03\text{A}^\circ$  et une à  $2,28\text{A}^\circ$ , il existe aussi des traces de la dolomite  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  avec une raie à  $1,79\text{A}^\circ$ .

Du gypse  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  avec des raies principales à  $7,59\text{A}^\circ$  et à  $2,87\text{A}^\circ$ .

Des argiles en très faibles concentrations essentiellement de la kaolinite, chlorite et palygorskite.

Tableau : IV. 17 : Composition minéralogique des échantillons en poudre du site de Chott

	Ech.	quartz	calcite	dolomite	gypse	Argiles (trace)
<b>Site Chott</b>	P1H3	X	XXX	X	X	Kaolinite, chlorite, palygorskite
	P2H3	X	X	X	XXX	Kaolinite

X Faible, XX commun, XXX dominant

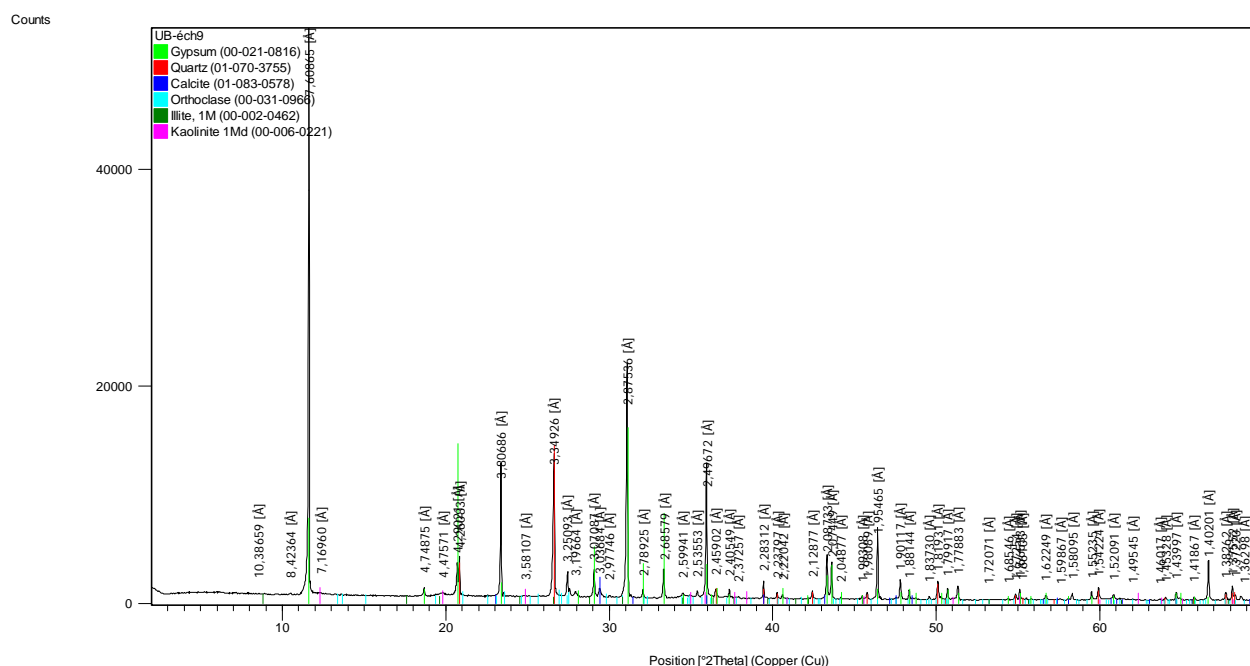


Fig. IV. 48 : Diagramme de poudre de l'échantillon P2H3 (Chott)

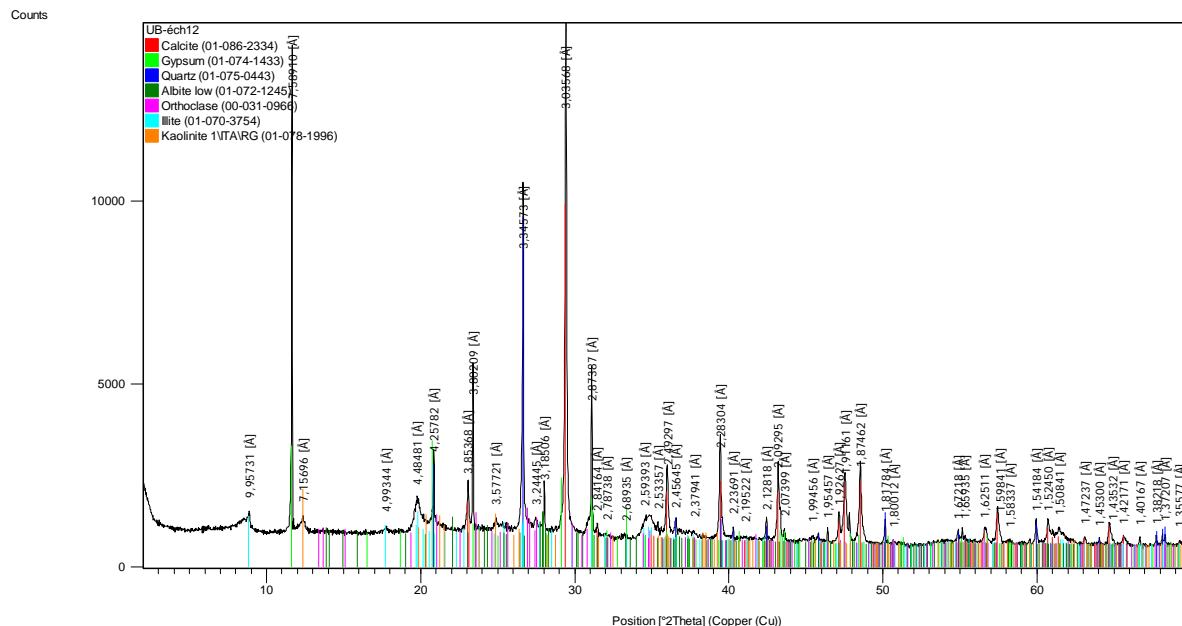


Fig. IV. 49 : Diagramme de poudre de l'échantillon P1H3 (Chott)

En lame mince (Tableau IV.18), le matériau est constitué essentiellement d'une masse basale limoneuse (fig. IV. 50a) dans laquelle se distribuent de façon aléatoire des microcristaux allongés de gypse (fig. IV.50b) avec très peu de grains de sable ( $\varnothing$  100-200  $\mu\text{m}$ ). Dans la parcelle irriguée, la croûte gypseuse de nappe s'est développée en profondeur. A ce

niveau, la masse basale est constituée essentiellement de gypse lenticulaire de dimension de sable très fin à moyen (fig. IV.50c). Les cristaux de quartz sont peu abondants et le matériau fin semble être fragmenté et dilué.

Les processus qui interviennent lors de la formation des horizons gypseux sont le remplissage graduel de la matrice par le gypse, les phénomènes de croissance cristalline dans les vides et les chenaux et la tendance au comblement progressif des vides structuraux.

Dans les milieux arides de l'Algérie, Halitim (1985) a expliqué par plusieurs approches le processus par lequel le gypse envahit les matériaux pédologiques. Selon l'auteur, le mécanisme de gypsification se caractérise par les faits suivants :

1- les cristaux de gypse semblent repousser, fragmenter et diluer le fond matriciel calcitique.

2- l'encroûtement gypseux coïncide avec une forte diminution de la teneur en quartz sans qu'il y ait apparition de figure de dissolution sur les cristaux de quartz. Par conséquent, le processus mis en oeuvre lors de l'accumulation gypseuse serait une action mécanique de dilution de matériau d'accueil.

**Tableau IV. 18 :** Caractérisation micromorphologique des profils du site de Chott

		Profil irrigué		Profil Témoin		
		P1H2	P1H3	P2H2	P2H3	P2H4
Microstructure	En grains simples				++	++
	En grains liés				++	++
	En cavité	++	++	++		
	De chenaux	+	++	++		
	vésicules Spongieuse	++ +	+	+		
Porosité	V. Entassement simple				++	++
	Cavités	++	++	++		
	vésicules	++	+	+	++	++
	Chenaux	+	++	++	++	++
	Totale (%)	45	50	40	50	50
Distribution relative		Porferic fermé	Porferic fermé	chitonic	Porferic fermé	Porferic fermé
Rapport C/f		10/45	5/45	45/15	10/40	10/40
Materiau grossier >20µm	Quartz	++	++	+++	++	++
	Gypse	+			++	++
Fine material <20µm	Limon calcaire	+++	+++	++	+++	+++
Pedotraits	Gypsique	++	++	++		

+ Faible, ++ commun, +++ dominant

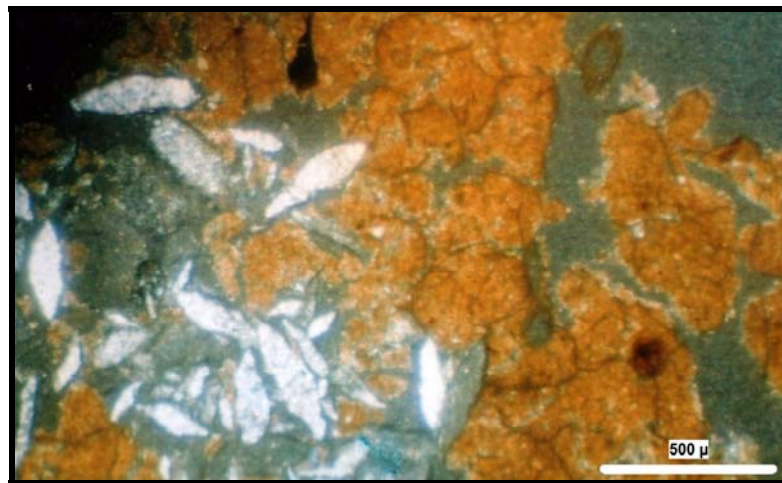
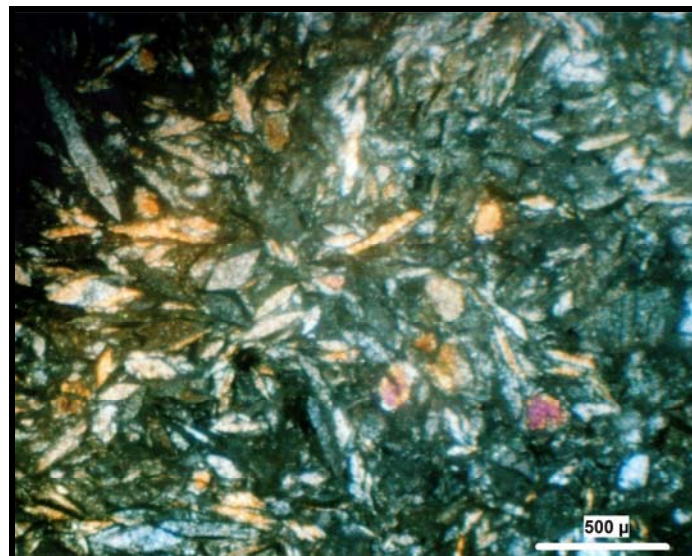
**a****b****c**

Fig. IV.50 : Planche photographique (site du Chott) a) masse basale dominée par la présence de limon. La microstructure est faiblement développée b) remplissage dense complet de gypse lenticulaire dans un matériau d'accueil limoneux c) Gypse lenticulaire dominant dans la masse basale (croûte gypseuse : P1H5).

## 4-CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Cette deuxième partie est consacrée aux changements du sol après leur mise en culture en irrigué. Cet aspect a été abordé par analyse diachronique en utilisant des images satellitaires, par fosses pédologiques, par étude de l'horizon de surface et par un essai sur colonnes de sol. L'approche adoptée est à la fois spatiale (en utilisant plusieurs sites), et temporelle (en utilisant différentes dates ou en comparant des sols exploités pendant une période assez longue avec des témoins non travaillés et non irrigués). Plusieurs outils d'analyse statistique ont été utilisés : statistiques descriptives, comparaison des moyennes et utilisation de l'ANOVA et de l'ACP.

Nous allons maintenant résumer les principaux résultats en considérant deux aspects marquants de la région d'étude :

- L'ensablement
- L'évolution des sols

### 4.1- L'ENSABLEMENT

En Algérie, deux cartes de sensibilité à la désertification de la région steppiques ont été réalisées (Oussedik et al., 2003 ; Benslimane et al., 2008), elles démontrent une évolution phénoménale de ce fléau naturel qui s'accélère selon un rythme d'environ 40 000 ha/an. Les études menées dans la steppe témoignent d'une forte vitesse de dégradation du milieu avec comme conséquences la réduction du couvert végétal, l'ensablement, la désertification et leur impact sur le plan socio-économique de ces régions (MARA, 1974 ; Oussedik, 2003 ; Benslimane et al., 2008 ; Hadouch et al., 2011).

La zone sud du Hodna n'échappe pas à ce problème, elle est confrontée elle aussi à un problème d'ensablement très inquiétant. Les résultats obtenus révèlent une extension très nette des surfaces affectées par l'ensablement qui ont plus que doublé durant la période 1972–2001.

Les causes de cet ensablement sont liées à des périodes de sécheresse parfois prolongées mais surtout à l'action anthropique qui se manifeste dans cette région par le défrichage des terres pour l'agriculture et le surpâturage. En effet, L'extension de l'ensablement au sud du Hodna est en relation directe avec l'extension des surfaces irriguées aux dépens des parcours. Les labours et la jachère prolongée exposent le sol à l'érosion éolienne et la réduction des parcours aux dépens de l'évolution des surfaces irriguées favorise la surexploitation des maigres parcours déjà dégradés dans cette steppe sableuse. A l'état actuel, l'ensablement constitue le principal problème de dégradation rencontré qui menace la durabilité des aménagements hydroagricoles.

La télédétection a permis d'étudier l'extension de l'ensablement au sud du Hodna grâce à l'utilisation des images Landsat anciennes et récentes. L'apport des SIG a permis la réalisation des cartes de l'ensablement. Les produits cartographiques ainsi obtenus constituent des outils précieux de travail permettant de :

- Faire l'état des lieux en ce qui concerne le problème de l'ensablement ;
- Constituer un outil d'aide à la décision dans le cadre de lutte contre l'ensablement.

Bien que le phénomène de l'érosion éolienne prend au fil des années des proportions alarmantes, à ce jour aucune quantification n'a pu être faite en Algérie en vue d'apprécier les pertes en sol engendrées par ce phénomène (Ghazi, 2006). A cet effet, les cartes

d'ensablement réalisées montrent bien l'intérêt de la télédétection spatiale comme outil performant de suivi diachronique de la dégradation du milieu steppique.

#### 4.2- L'EVOLUTION DES SOLS

Les résultats obtenus sur l'étude de l'horizon de surface et sur fosses pédologiques permettent d'avancer que dans la zone sud du Hodna, les sols sont sous la dépendance d'une morphogenèse hydrique et éolienne. Les phénomènes pédogenétiques sont peu marquants.

La morphoscopie des sables confirme ces résultats en mettant en évidence un façonnement mixte fluviatile et éolien. L'observation microscopique montre que les traits pédologiques sont peu abondants. Il s'agit de remplissages et de revêtements de gypse au niveau de la croûte gypseuse et peu de siltanes. La calcite n'a pas été observée dans les traits pédologiques même au niveau de la croûte calcaire ce qui favorise la théorie sédimentaire.

A la surface du sol, l'analyse en composante principale indique clairement que la morphogenèse hydrique et éolienne constitue le principal facteur qui influence les sols de la zone d'étude. La salinité et le gypse sont des facteurs secondaires. En effet, d'une part, les crues enrichissent certains sites par des apports de limons calcaires et entretiennent la fertilité des sols, et d'autre part, l'érosion éolienne contribue à l'amplification des apports de sable en favorisant ainsi la dégradation des sols.

En surface, la comparaison des échantillons de sols irrigués avec des témoins révèle un changement textural. Les résultats obtenus indiquent une augmentation des sables contre une diminution de la fraction argile+limon. Il ressort clairement que les sols où l'intensité de la mise en valeur en irrigué est la plus intense sont soumis au processus d'ensablement. Ce résultat mérite une attention particulière car cet aspect est insuffisamment traité dans la littérature (Ha-Lin Zhao et al., 2006). Néanmoins, les changements des propriétés du sol, dans les milieux steppiques, causés par le surpâturage ont été rapportés dans plusieurs travaux (Shifang Pei et al., 2008 ; Slimani et al., 2010 ; Gan Lei et al., 2012).

La comparaison de sols irrigués avec des témoins sur trois sites différents a permis de faire les constatations suivantes :

en ce qui concerne la salinité, et d'une manière générale, les caractéristiques des sites étudiés, notamment l'éloignement par rapport au chott, la texture du sol, l'occupation du sol et la fréquence des apports d'eau, sont des facteurs qui pourraient influencer la salinisation des sols de cette région. Il y a lieu de noter que l'utilisation des eaux de la nappe profonde semble ne pas provoquer la salinisation des sols lorsque la quantité d'eau d'irrigation permet le lessivage des sels. On a remarqué aussi que dans les sites inondables éloignés du chott, la mise en valeur en irrigué pourrait être rentable à condition de bien lutter contre l'érosion éolienne par des brise vents et par un système de rotation des cultures ne laissant pas trop de temps à la jachère. Néanmoins, si le lessivage des sels n'est pas pris en considération, un problème de salinisation secondaire pourrait se manifester. En effet, l'essai en colonnes de sol a mis en évidence, sur une période très courte, un bilan salin positif même si statistiquement l'augmentation de la salinité globale n'est pas significatif.

En ce qui concerne la texture, on a constaté que, dans les parcelles cultivées, la teneur en éléments fins (argile+limon fin) est toujours supérieure à celle du témoin non cultivé et non irrigué. Ceci est en fait lié au travail du sol qui ramène ces éléments fins en surface.

**Troisième partie**  
**Impact de la mise en culture**  
**en irrigué sur les eaux**

## **TROISIEME PARTIE**

# **IMPACT DE LA MISE EN CULTURE EN IRRIGUE SUR LES EAUX**

### **INTRODUCTION**

En dépit des potentialités hydriques très appréciables, la mise en valeur hydro-agricole en Algérie accuse un immense retard. En effet, les superficies totales irriguées sont faibles ; elles représentent 350000 à 400000 hectares toutes irrigations confondues dans l'ensemble du territoire national et correspondent à moins de 5 % de la surface agricole utile (Benmouffok, 2004). Cependant, la valeur des productions agricoles en système irrigué représente près de 50% de la valeur totale des produits de la terre (Guemraoui et Chabaca, 2005). De ce fait, la pression qui s'exerce sur la mobilisation et l'exploitation de la ressource eau est de plus en plus forte, et est accentuée par les aléas climatiques.

Dans la région du Hodna, les conditions climatiques arides font de l'irrigation un impératif technique incontournable dont les retombées économiques et sociales sont indéniables. Le développement de la mise en valeur des périmètres irrigués dans cette région est en relation avec la mobilisation des ressources hydriques, notamment, souterraines. L'augmentation des prélèvements à partir de la nappe profonde est liée, notamment, aux politiques agricoles adoptées dans cette région depuis l'indépendance d'une part et à la qualité chimique de cette nappe d'autre part.

Dans la région du Hodna, les politiques agricoles ayant été adoptées depuis les années soixante dix ont encouragé les agriculteurs à s'orienter vers la nappe profonde du fait de sa qualité meilleure comparé à celle de la nappe phréatique trop chargée. Le développement socio-économique, l'explosion démographique et les mutations qu'a connues le milieu Hodnéen (Sebhi, 1987) ont fait que les pompages ont augmenté sans cesse. En outre, les caractéristiques du climat dans cette région font que la conduite des cultures n'est pas possible sans irrigation.

Si l'on dispose de nombreuses études sur les ressources en eau, notamment superficielle, au nord du Hodna (Achi, 1970 ; Kebiche, 1986 ; Benabderrahmane, 1988 ; Nemouchi, 2001 ; Bouteldja, 2005), il est par contre à déplorer une certaine carence concernant ces études au sud du Hodna. Ceci s'explique par le fait que le nord est le siège d'une érosion hydrique intense. Cette dernière s'observe dans le paysage par l'importance des lits majeurs des oueds, la présence de glacis minés par l'érosion régressive, de phénomènes de « bad lands » et enfin par la mise à nu des formes structurales. Elle est également particulièrement intense dans les bassins versants des oueds.

Un premier bilan des potentialités a été réalisé grâce à la remarquable étude de la FAO appelée « projet ALGERIE 9 (HODNA) ». Ce projet intitulé « Etude des ressources naturelles et expérimentations, et démonstrations agricoles dans la région du Hodna » avait pour but d'entreprendre les études et inventaires des ressources en terres et en eaux, en vue de leur utilisation optimale pour le développement agricole de la région. A l'époque, l'eau est puisée dans la nappe phréatique grâce aux puits traditionnels éparpillés dans toute la région du Hodna. Pendant cette phase, un certain nombre de forages ont été réalisés dans le but d'étudier le réservoir de la nappe profonde (FAO, 1973).



Par la suite, des campagnes d'inventaire des points d'eau dans la région du Hodna ont été réalisées par divers organismes dont les plus importants sont :

- L'inventaire réalisé en 1982-83 par l'ANRH
- L'inventaire du BIRH d'Alger dont les dates de réalisation sont assez régulièrement étalées entre les années 1950 et les années 1990.
- L'inventaire réalisé en 1996 par l'ANRH.
- Les inventaires de forages publiés par les directions de l'hydraulique des wilaya (DHW) : Msila et Batna.
- L'inventaire le plus récent réalisé en 2005 par l'ANRH de Msila.

Mis à part ces inventaires, on constate une carence en matière d'étude du système aquifère Hodnéen. Après l'étude de base de la FAO des années 1970, le seul travail relatif à la modélisation du système aquifère du Hodna a été réalisé en 2006-2007 par l'ANRH avec l'étude menée par ICOSIUM forage and engineering services (ANRH, 2006 et 2007). Ce travail, fondé sur les études et inventaires cités ci-dessus, s'est heurté lui aussi aux obstacles liés au manque de données notamment sur la présence de séries chronologiques continues de relevés piézométriques, de relevés piézométriques synchrones, des caractéristiques des aquifères et de leur alimentation.

Enfin, on peut dire que l'état actuel des connaissances des ressources en eau du Hodna reste malgré tout insuffisant et fragmentaire par rapport à l'importance du système aquifère Hodnéen et son impact sur le développement régional.

Dans cette partie, après avoir présenté l'hydrosystème du Hodna, l'évolution des prélèvements, on abordera, par la suite, l'aspect qualitatif de l'eau.

## CHAPITRE V

### L'HYDROSISTEME

Les disponibilités en eau au Hodna ne sont pas énormes mais existent. D'une manière générale, on peut distinguer deux ressources en eau :

Les eaux superficielles qui se concentrent notamment dans la partie septentrionale du Hodna et les eaux profondes qui se localisent sur le pourtour du chott.

Dans ce qui suit, il sera question de présenter les caractéristiques de ces deux types de ressources.

#### 1- LES EAUX DE SURFACE

La cuvette du Hodna (8500 km<sup>2</sup>) sert de niveau de base à l'un des bassins versants les plus étendus d'Algérie. D'une superficie de 25000 km<sup>2</sup>, ce bassin mesure 190 km du Nord au Sud et 260 km de l'Est à l'Ouest, selon ses plus grandes dimensions. Il est drainé par un certain nombre d'oueds dont les plus importants s'alimentent dans le cadre montagneux tellien pour venir ensuite s'étaler dans la plaine où l'infiltration et l'évaporation prennent le pas sur le ruissellement (fig. V.1). Excepté en période de crues, leurs eaux ne parviennent généralement pas jusqu'à la sebkha (Sebhi, 1987).

Les eaux des oueds sont utilisées en irrigation des cultures par épandage des crues uniquement au nord du Hodna où les oueds les plus importants sont concentrés (Oued Leham, Ksob, Barika, etc ...). Les eaux des oueds sont faiblement à moyennement salines avec un résidu sec de 0.2 à 1.5 g/L (Boyadgiev, 1975). Le tableau (V.1) suivant présente les caractéristiques principales des sous bassins versants.

Tableau V.1 : Caractéristiques principales des sous bassins versants du Hodna (Sebhi, 1987).

Sous bassins du Hodna	Caractéristiques				Ecoulement (en millions de m <sup>3</sup> )		
	Surface km <sup>2</sup>	Altitude moyenne (m)	Pluviométrie moyennes annuelles (mm)	Température (°C) moyenne annuelle	Ecoulement moyen annuel	Hypothèse d'utilisation agricole	Ecoulement au Chott
1-Leham	6400	710	292	16.2	62.0	34	28
2-Mellah	4200	950	251	14.7	33.0	10	23
3-Maiter	2800	950	300	14.5	33.0	20	13
4-Ksob	2400	870	343	15.8	57.0	47	10
5-Barika	2100	920	345	15.0	54.0	30	24
6-Roumana	1450	670	290	16.5	9.0	6	3
7-Mdoukal	1100	520	180	17.6	1.0	1	0
8-Lougman	1000	650	255	16.7	10.0	3	7
9-Boutaleb	1000	750	320	16.0	17.0	4	13
10-Selmane Berhoum	1000	770	330	15.8	23.0	6	17
11-Bitam	1000	735	245	16.1	12.0	10	2
12-Soubella	400	790	335	15.7	12.0	2	10
Totaux (chott exclu)	24850		250		323.0	173	150

L'apport total, annuel moyen, des oueds hodnéens, est estimé à 323 millions de m<sup>3</sup>, dont presque la moitié se perd dans la sebkha (Boyadgiev, 1975). Seulement 25 millions de m<sup>3</sup>/an sont utilisées (Anonyme, 2006). Ces apports sont cependant extrêmement variables d'une année à l'autre. Le régime annuel des oueds du Hodna correspond en général au régime pluviométrique. A une forte augmentation des précipitations correspond un fort accroissement du débit. La plupart des oueds n'a pas de débit pérenne mais connaît par contre, pendant les mois pluvieux, des crues relativement violentes bien que d'une assez courte période. Depuis des temps très lointains, l'eau de ces crues est valorisée par les habitants du Hodna par immersion des sols pour améliorer leurs récoltes de céréales. Signalant enfin que ces crues occasionnent parfois des dégâts importants.

Au Sud, deux oueds seulement ont des apports appréciables : l'oued Maïter qui débouche dans la plaine de Boussaâda et l'oued M'Cif qui se jette dans la sebkha près de Guellalia. A cela s'ajoutent de petits cours. Les eaux de surface ne sont pas exploitées pour l'irrigation des cultures comme c'est le cas au Nord. Cependant, les crues influencent considérablement les caractéristiques du sol même pour les cours d'eau de moindre importance comme les oueds Defla, Oultem, El Mehakoub, et Roumana. L'occupation du sol montre bien ces larges cônes, ouverts dans le sens de la pente, et portant des cultures qui, sans irrigation, ne rapportent que dans le cas d'un épandage de crue. Ces crues en humidifiant le sol et déposant les alluvions, contribuent aussi au lessivage des sels et à l'enrichissement du sol en éléments minéraux fins.

## **2- LES EAUX SOUTERRAINES**

### **2.1- STRUCTURE ET SCHEMA DU SYSTEME AQUIFERE HODNEEN**

Il est possible d'organiser schématiquement le système aquifère Hodnéen sous forme de bicouche comprenant la nappe phréatique et la nappe profonde (FAO, 1973). La délimitation précise de chacune de ces deux entités n'est jusqu'à présent pas bien précisée (ANRH 2006). Cependant, une première ébauche de l'extension de ce système aquifère Hodnéen a été proposée par l'ANRH (ANRH, 2006) (fig. V.2). Les deux aquifères se présentent ainsi :

- La nappe phréatique dont les contours ne peuvent être délimités avec précision selon des critères géologiques et sur les logs des forages. Il est convenu de délimiter cette entité à la nappe des puits de surface.
- La nappe profonde représentant l'aquifère majeur dont le gisement principal est formé par les formations Mio-Pliocènes sur la majeure partie du bassin, mais qui passe en continuité hydraulique et en profondeur aux formations de l'Albien et du Barrémo-Bédoulien au sud du chott, et aux carbonates Turoniens sur toute la limite orientale du bassin (ANRH, 2006).

### **2.2- LA RECHARGE DU SYSTEME AQUIFERE HODNEEN**

Le système aquifère du Hodna se trouve à la confluence de trois grands systèmes géologiques et hydrogéologiques majeurs : les monts du Hodna au Nord, l'Atlas Saharien au Sud et le massif des Aurès à l'Est.

Cette situation charnière bénéficie de réserves importantes par l'extension et les épaisseurs des aquifères mis en jeu, et de capacités de recharge considérables grâce à l'étendue des bassins versants du SAH (près de 25000 Km<sup>2</sup>), et la pluviosité des massifs septentrionaux.

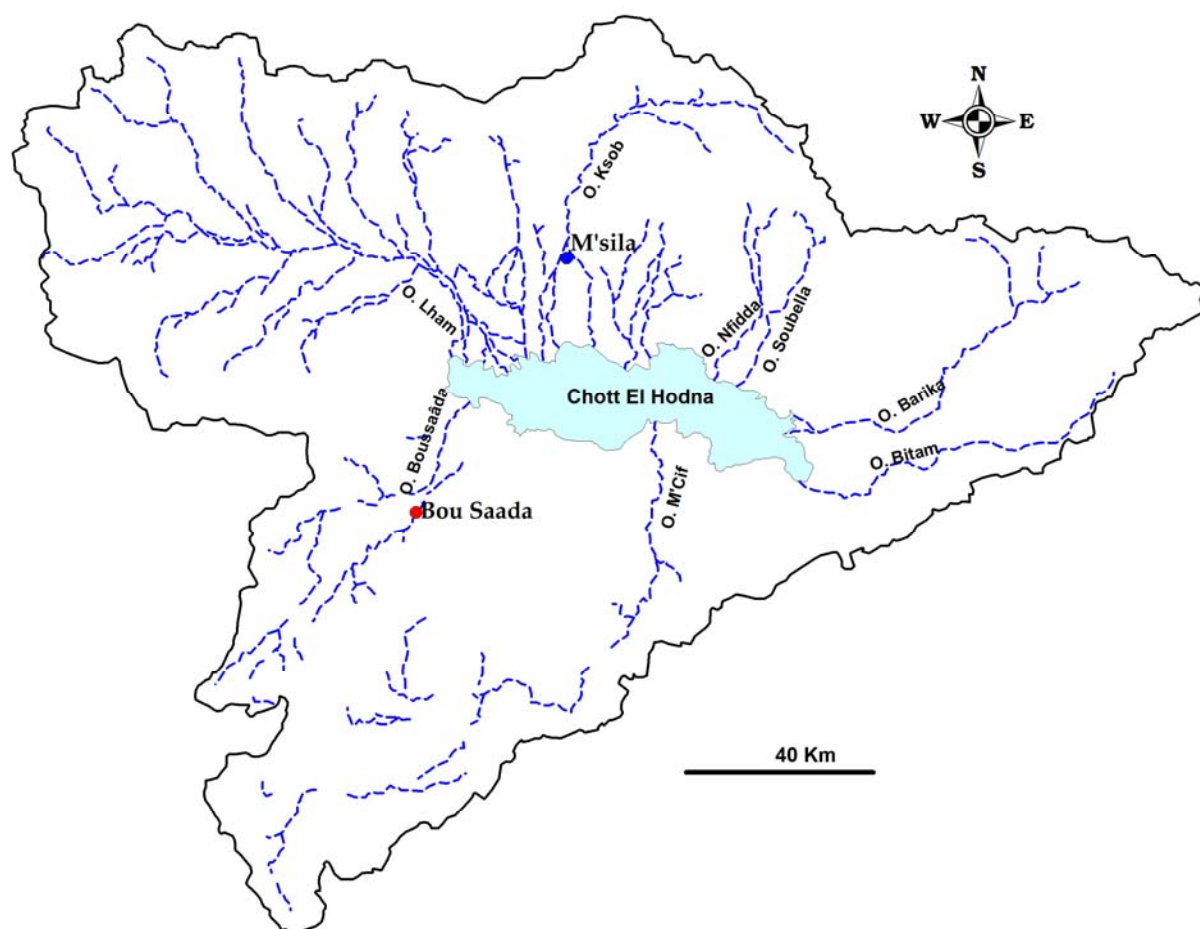


Fig. V.1 : Réseau hydrographique du bassin versant du Hodna

La recharge du système aquifère Hodnéen procède de trois mécanismes complémentaires :

- L'infiltration des crues dans les lits d'oueds.
- L'infiltration directe des précipitations.
- La recharge profonde par les formations aquifères encaissantes.

### 2.2.1- RECHARGE PAR LES CRUES D'OUEDS

Le système aquifère Hodnéen (s.s.) représente une superficie de 8000 Km<sup>2</sup>, représentant la projection en surface de la nappe profonde du Hodna, la plus étendue. A cela s'ajoute les bassins en mesure de contribuer à la recharge du système par infiltration des crues dans les lits perméables des oueds. Ce potentiel se mesure à la superficie des bassins mis en jeu, qui représentent (ANRH, 2006) :

13000 km<sup>2</sup> pour les bassins versants septentrionaux, descendant des monts du Hodna.

Plus de 7000 km<sup>2</sup> pour les bassins de l'Atlas saharien.

4000 km<sup>2</sup> pour les bassins des Aurès (Barika, Bitam).

Le ruissellement total du Hodna est estimé à 150 millions de m<sup>3</sup>/an par Derkoy (FAO, 1973), et que 33% de cet apport de crues s'infiltré dans le lit utile des différents oueds, la recharge du Hodna par les crues pourrait s'établir à près de 50 millions de m<sup>3</sup>/an.

### 2.2.2- INFILTRATION DIRECTE DES PRECIPITATIONS

L'apport par recharge directe aux affleurements du système aquifère du Hodna, appartenant en bonne partie à l'aquifère supérieur c'est à dire la nappe phréatique, représente en première estimation (ANRH, 2006), un volume de 40 à 60 millions de m<sup>3</sup>/an.

### 2.4.3- APPORTS PROFONDS PAR LES AQUIFERES ENCAISSANTS

Il s'agit des formations aquifères encaissantes Gréso-Carbonatées Eocènes et Crétacées autant sur le flanc nord du bassin que sous toute la rive sud du chott. Cependant, les apports à partir de ces formations ne sont pas évalués.

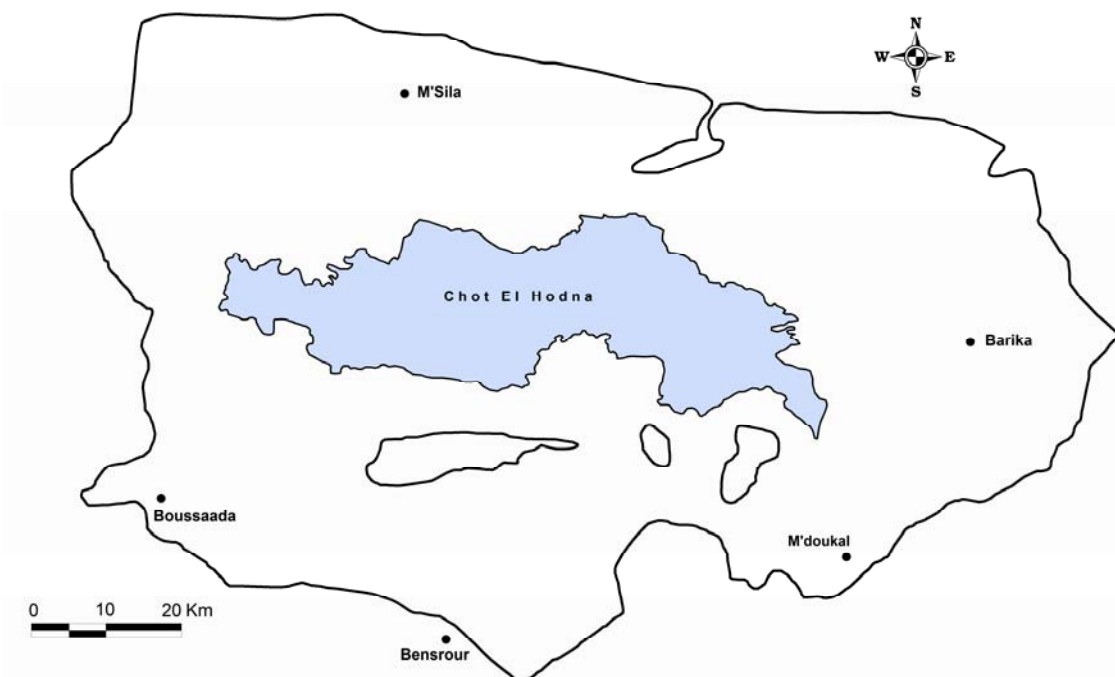


Fig. V.2 : L'extension du système aquifère Hodnéen (ANRH, 2006)

## 2.3- LE PROBLEME DE L'EPUISEMENT DE LA NAPPE

Dans les milieux semi arides à arides, les potentialités hydrauliques sont relativement limitées. Le problème du manque d'eau auquel est confrontée cette zone est en grande partie lié au déficit pluviométrique et à la grande irrégularité spatio-temporelle des précipitations. Aussi, des rabattements parfois importants et généralisés du niveau des nappes sont enregistrés en raison de la faible réalimentation des réserves aquifères d'une part, mais aussi à une excessive sollicitation des réserves d'eau, d'autre part, pour faire face aux besoins sans

cesse croissants (Mauget, 1967 ; Bechar et al., 1993 ; Mamou, 1995, Agoussine et Bouchaou, 2001). Tous ces facteurs combinés au développement socio-économiques ont généré une situation de pressions sur la ressource en eau souterraine, un indicateur incontournable qu'il faut considérer dans les perspectives de développement durable de la région.

Dans la région du Hodna, le problème du rabattement touche les deux aquifères de la région à savoir la nappe phréatique et la nappe profonde.

### **2.3.1- CAS DE LA NAPPE PHREATIQUE**

Les données piézométrique de la nappe phréatique (nappe des puits) provenant des inventaires de 1983 et 1996 ont permis d'estimer les rabattements entre ces deux dates (ANRH, 2007). Les résultats révèlent, qu'au cours de cette période relativement courte, la tendance au rabattement est générale et que ces rabattements varient majoritairement entre 2 et 8 m dans la région du Hodna. Il est par ailleurs significatif que les puits de surface traditionnels aient aujourd'hui complètement disparu du paysage du Hodna.

A l'état actuel, et en raison des baisses de niveau observées un peu partout et depuis quelques années déjà, la nappe phréatique ne présente plus un horizon de captage visé par les agriculteurs et ce niveau ne présente plus d'intérêt pratique. En effet, c'est une donnée constatée par l'inventaire des ressources en eau souterraines le plus récent de 2005 de l'ANRH (ANRH, 2006) et que nous avons vérifié sur le terrain lors des multiples missions de prospection. Les prélèvements dans cet aquifère sont quasiment nuls à l'état actuel, la nappe phréatique ne présente pas d'intérêt dans la mesure où elle a été tarie du fait des importants rabattements régionaux observés.

La conséquence de l'abaissement du niveau des nappes est la transformation des puits en puits forages dès 1993 et transformation en forages de 100 à 150 m de profondeur à partir de 2001 (ANRH, 2006).

### **2.3.2- CAS DE LA NAPPE PROFONDE**

Pour déterminer les rabattements de niveau, et suite à l'inexistence d'aucune série chronologique longue sur des points de référence à l'exception des piézomètres très récents de l'ANRH, la technique des « historiques de groupe de voisinage » a été adoptée par l'ANRH (ANRH, 2006 ; 2007). Les sources d'informations piézométriques sont les données d'inventaires mentionnés ci-dessus composé de 938 mesures (effectuées sur des forages et des puits forages) ainsi qu'aux piézomètres de l'ANRH au nombre de 36 réparties autour du Chott (fig. V.3). Afin de pouvoir constituer les groupes d'historique, l'ensemble des points de mesures piézométriques disponibles, anciens et récents, est reporté sur une même carte avec des figurés différents. Sur la carte, 58 groupes par voisinage géographique ont été établis présentant une évolution des niveaux piézométriques compatibles.

Les rabattements mesurés à partir de l'évolution des niveaux piézométriques dans la nappe profonde, reconstitués sur les groupes d'historiques rassemblés par secteur homogène, sont très importants (fig. V.4). Dans le sud du Hodna, constituant la zone d'étude, les baisses du niveau dans la zone agricole ouest (Maarif, Khoubana, Boussaada et Houamed) peuvent atteindre 35 m ; ils sont moins accentués à l'Est, dans la zone de M'cif, où les rabattements mesurés sont inférieurs à 10 m.

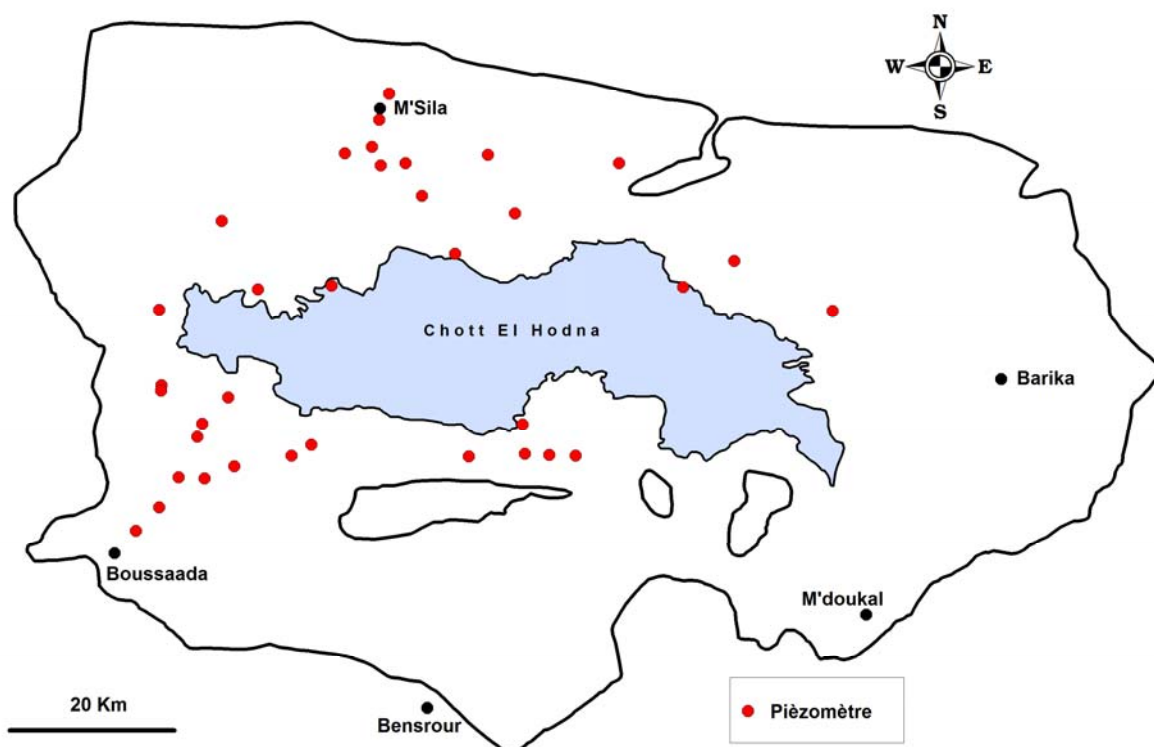


Fig. V.3 : Localisation des piézomètres réalisés par l'ANRH entre 1999 à 2005.

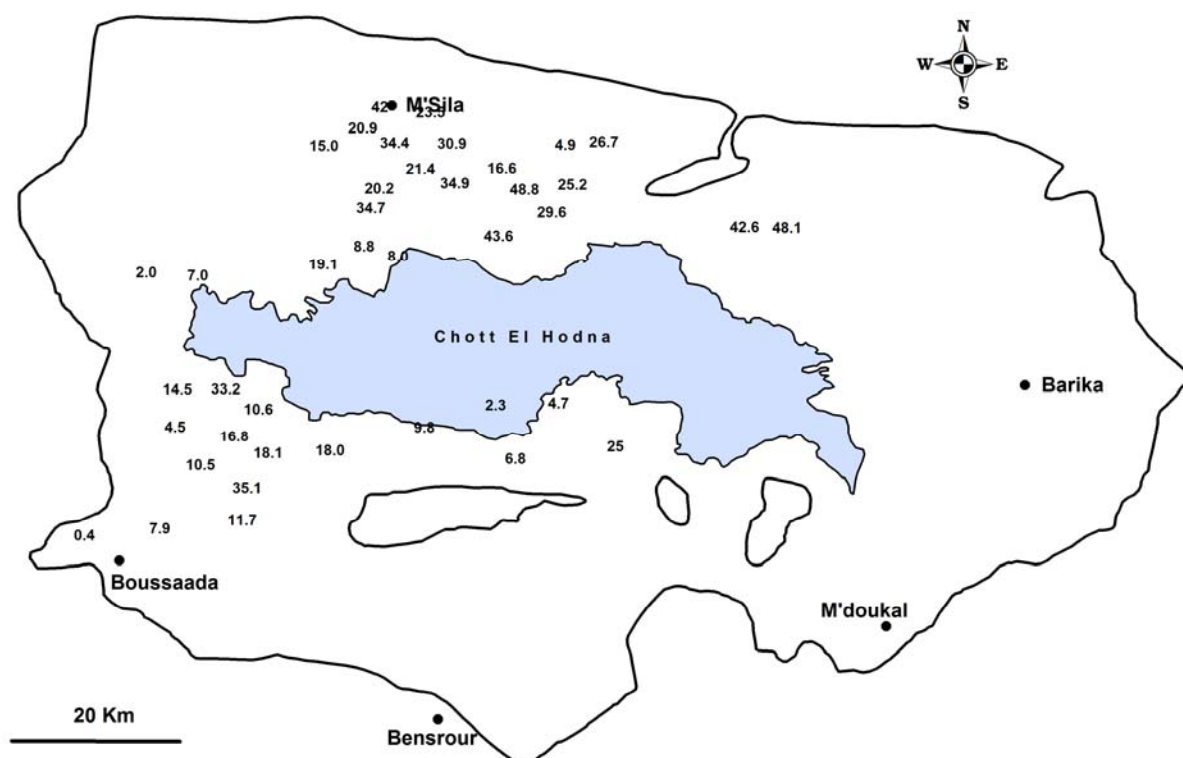


Fig. V.4 : Rabattements totaux en mètres déterminés dans la nappe profonde sur les groupes d'historiques pour la période 1965-2005 (ANRH, 2006).

## **2.4- CONCLUSION**

De cet aperçu sur l'hydrosystème du Hodna, il y a lieu de retenir les faits suivants :

1- Les eaux superficielles sont localisées essentiellement dans la partie nord où elles sont utilisées pour l'irrigation des cultures par épandage des crues. Au sud du Hodna, les cours d'eau sont de moindre importance mais les petits cours d'eau influencent l'évolution des sols par la qualité de leurs eaux et par les limons calcaires qu'ils transportent.

2- suite à la disparition de la nappe phréatique, seule la nappe profonde est en exploitation actuellement pour l'irrigation des cultures et la consommation humaine. Cependant, des rabattements importants et généralisés du niveau de cette nappe ont été enregistrés.



## CHAPITRE VI

### EVOLUTION DES PRELEVEMENTS DES EAUX

#### 1- SYNTHÈSE DES POINTS ET DES PRELEVEMENTS D'EAU

Dans ce qui suit, nous tenterons de faire une analyse de l'historique des prélèvements d'eau dans le système aquifère du Hodna, depuis les années 1970 jusqu'à aujourd'hui, et d'étudier l'impact de cette gestion sur la mobilisation des ressources en eaux. Pour cela, l'archive citée ci dessus (ANRH 2006, 2007) sera d'ailleurs reprise et utilisées dans le développement de ce chapitre.

L'observation de la figure (VI.1) et (VI.2), représentant l'évolution du nombre de puits et forages exploitant le système aquifère Hodnéen depuis les années 1970 jusqu'à aujourd'hui et l'évolution des prélèvements totaux, permis de faire les remarques suivantes :

À partir des années 1970, le sud du Hodna a subi des changements extraordinaires en ce qui concerne l'utilisation des ressources en eau et en sols en relation avec les politiques agricoles adoptées et une croissance démographique galopante. La forte salinité de la nappe phréatique a constitué un handicap au développement agricole de la région. Ceci a incité les agriculteurs à forer plus profondément pour pomper l'eau de la nappe profonde moins salée et de meilleure qualité.

A partir des années 1980 la sollicitation de la nappe profonde a augmenté et celle de la nappe phréatique a diminué. L'application, en 1983, de la loi portant accession à la propriété foncière agricole par la mise en valeur des terres a favorisé l'extension des terres agricoles. Cependant, la crise des années 1990-2000 n'a pas favorisé le développement agricole.

A la fin des années 1990 la situation économique a été améliorée et une nouvelle politique agricole « plan national du développement agricole (PNDA) » a vu le jour. Des aides très conséquentes de l'Etat aux agriculteurs ont contribué à une exploitation excessive de la nappe profonde.

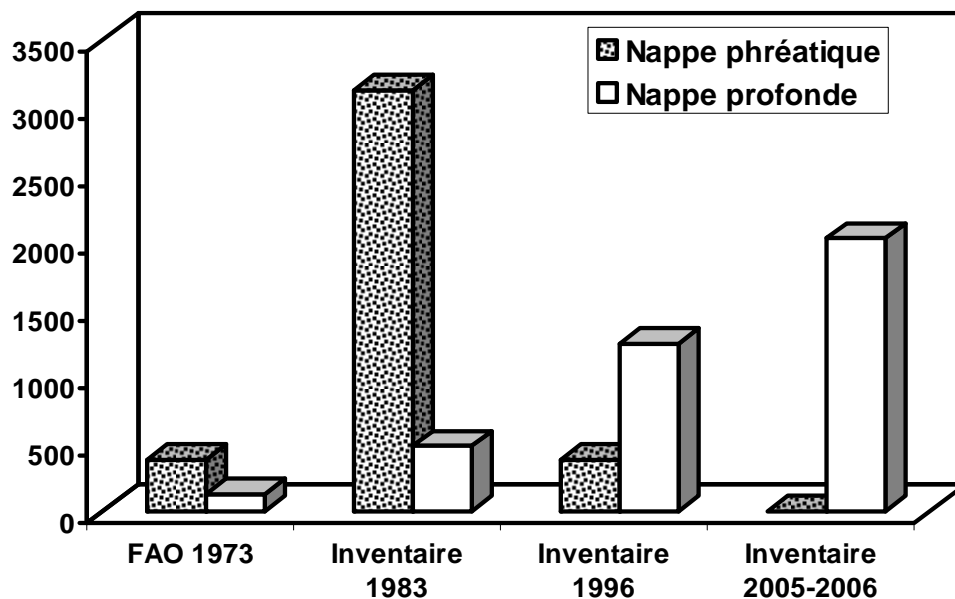


Fig. VI.1 : Evolution du nombre de puits et forages exploitant le système aquifère Hodnéen.

Avec l'augmentation du nombre de puits et forages, les prélèvements totaux du système aquifère Hodnéen ont aussi subi un accroissement abusif. Il sont devenus très importants et ont doublé en dix ans et le prélèvement seuil fixé par l'étude de la FAO (1973) a été dépassé d'un facteur de 2,8.

A l'état actuel, des rabattements très importants dépassant les quinze mètres, au sud du Hodna, ont été enregistrés par rapport aux années 1970 (ANRH, 2006). Dans une étude sur la modélisation du système aquifère du Bassin du Hodna (ANRH, 2007), des simulations de scénarios d'exploitation ont révélé qu'en cas de baisse de la surface piézométrique de la nappe profonde sous le niveau du chott, cas de conditions de prélèvements excessifs, il y aura inversion du sens d'écoulement naturel avec réalimentation éventuelle de cet aquifère par l'eau salée du chott avec tous les impacts en termes de salinité, de durabilité des aménagements hydro-agricoles et du développement socio économique régional.

Certes, les autorités locales ont strictement interdit la réalisation de nouveaux forages, cependant, les populations locales, se sont mises à réaliser, sans normes techniques, des forages illicites et sans tenir compte des disponibilités en eau de la région ou des perspectives de leur évolution future.

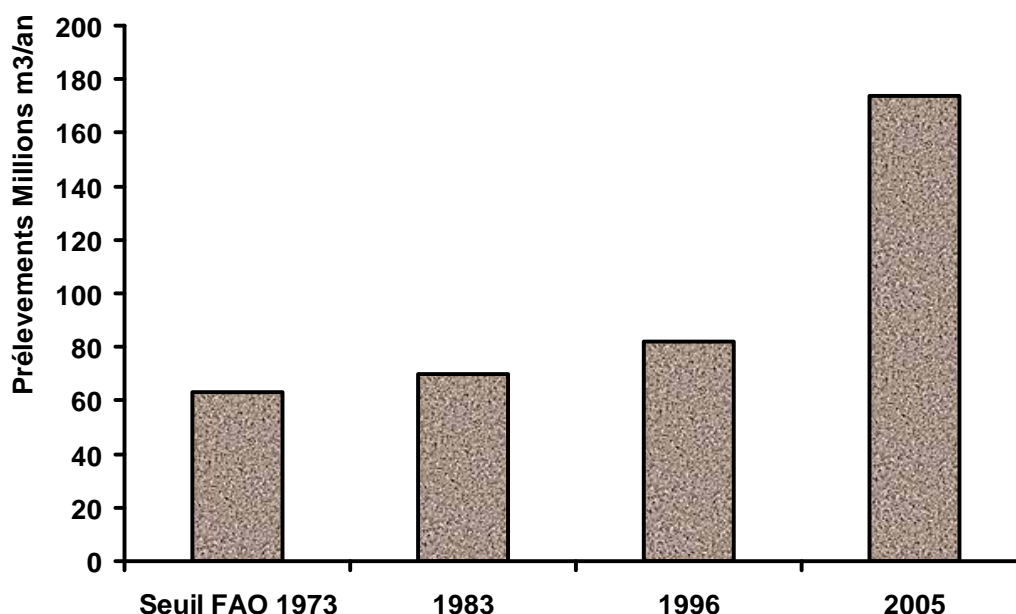


Fig. VI.2 : Evolution des prélèvements totaux exploitant le système aquifère Hodnéen

(Prélèvement seuil fixé par l'étude FAO à ne pas dépasser est de 63000000 m³/an).

## 2- ANALYSE QUANTITATIVE D'UTILISATION DES EAUX DU SYSTEME HODNEEN

### 2.2- les principaux inventaires des points d'eau et leurs détails

#### 2.2.1- Inventaire de Derekoy (FAO, 1973)

Il s'agit de forages réalisés au cours du projet FAO. Il comporte 119 forages, 5 piézomètres, 382 puits et 26 sources.

### 2.2.2- Inventaire de l'ANRH 1983

Réaliser entre 1981 et 1983 et couvrant 37 communes (12 communes de la wilaya de Batna, 2 de la wilaya de Bordj Bouariridj et 23 dans la wilaya de M'sila). Cet inventaire porte sur 3459 puits, 311 forages, 279 puits forages et 92 sources. Soit au total 4221 points d'eau.

Les prélèvements totaux dans le système aquifère Hodnéen s'établi comme l'indique la figure (VI.3). (Inventaire portant sur 37 communes).

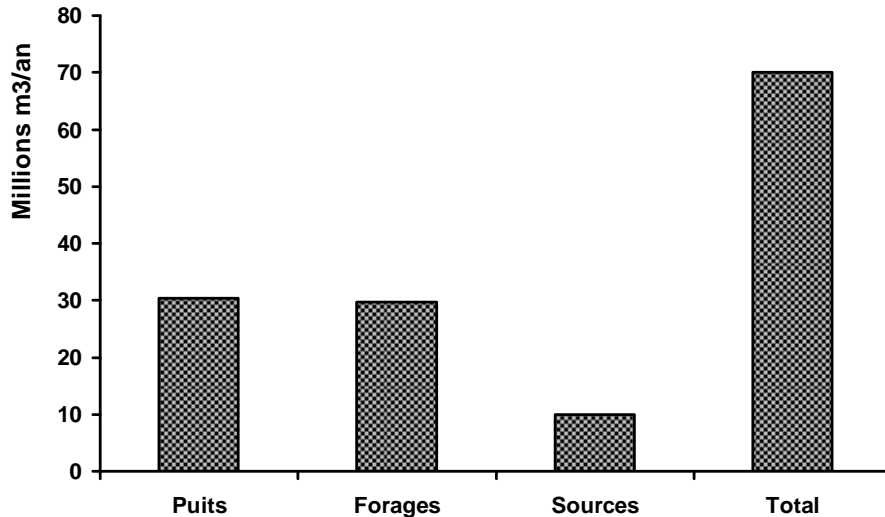


Fig. VI.3 : Prélèvements recensés en 1983 dans le Hodna.

### 2.2.3- Inventaire ANRH de M'Sila 1996

Cet inventaire porte sur 567 puits (dont plus de 150 abandonnés ou inutilisés), 274 puits forages et 1194 forages (dont 100 non utilisés et 132 forages artésiens).

Les prélèvements totaux par puits s'élèvent à 9,3 Millions de m<sup>3</sup>/an, par puits forages à 4,9 Millions de m<sup>3</sup>/an et par forages à 67,6 Millions de m<sup>3</sup>/an (fig. VI.4). Les prélèvements par forages se répartissent par ailleurs à raison de 94% sur les forages privés et 6% pour les forages publics. Les communes couvertes par l'inventaire sont au nombre de 24 dont 3 communes de la wilaya de Batna et 21 communes de la wilaya de M'Sila).

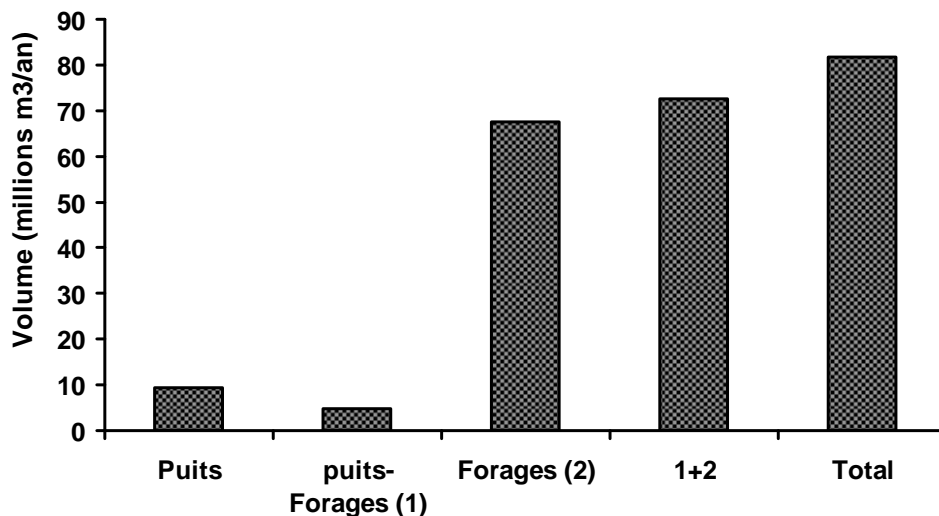


Fig. VI.4 : Prélèvements recensés en 1996 dans le Hodna

### 2.2.4- Inventaire ANRH de M'Sila 2005

Selon l'ANRH (2006), il est constitué de l'inventaire effectué en avril-mai 2005 par l'ANRH de M'Sila, du fichier « forage » de la DHW de M'Sila, des forages du fichier de la DHW de Batna et de l'ensemble des informations récoltées sur les prélèvements actuels dans le système aquifère hodnéen (Wilaya de M'Sila et Batna). C'est l'inventaire le plus récent réalisé dans la région.

L'exploitation totale du système aquifère s'établit à 174 millions de m<sup>3</sup>/an, correspondant à un débit fictif continu de 5,52 m<sup>3</sup>/s. le nombre de forages et les prélèvements recensés sont présents dans le tableau (VI.1) suivant.

Tableau VI.1 : Prélèvements recensés en 2005 (Millions de m<sup>3</sup>/an) dans le Hodna

	Puits	Forages	Sources	Total
Total Hodna	0	2028	/	174

### 2.3- Conclusion

Cette étude révèle les faits suivants :

1- Une augmentation du nombre des forages et des prélèvements depuis les années 1970 jusqu'à aujourd'hui. La nappe phréatique, très chargée, exploitée par des puits a disparu suite aux rabattements régionaux et se limite, à l'état actuel, uniquement aux abords immédiats des berges du chott El Hodna. Les puits sont transformés en puits-forages ou ont disparu.

2- Une surexploitation de la nappe profonde constituant la seule source d'irrigation et de la consommation humaine de la région. Le seuil fixé par la FAO dans les années 1970 a été dépassé d'un facteur de 2.8 sans tenir compte des disponibilités en eau de cette zone ou des perspectives de leur évolution future ce qui peut compromettre le développement durable de la région. Des simulations de scénarios d'exploitation abusive de la nappe profonde ont révélé des risque d'inversion des sens d'écoulement naturel des eaux avec réalimentation éventuelle de cet aquifère par l'eau salée du chott avec tous les impacts en termes de salinité, de durabilité des aménagements hydro-agricoles et du développement socio économique régional.

# CHAPITRE VII

## QUALITE DES EAUX

### 1- INTRODUCTION

Dans les milieux arides, du fait des conditions climatiques caractérisées par un bilan P-ETP déficitaire, le recours à l'irrigation est une nécessité vitale pour accroître et régulariser la production agricole même si l'eau utilisée est souvent chargée en sels.

Comme nous venons de le voir précédemment, au Sud du Hodna, où la mise en valeur en irrigué a été entamée depuis quelques décennies, deux aquifères ont été identifiés. La nappe phréatique et la nappe profonde. La première, fortement minéralisée, a régressé considérablement du fait des importants rabattements régionaux observés (ANRH, 2006). La seconde est peu chargée et de qualité meilleure. Dans cette région, une agriculture intensive s'est développée compte tenu des possibilités en eau, du caractère rural de la région et de la croissance démographique.

Dans ce chapitre, la qualité de l'eau destinée à l'irrigation dans le sud du Hodna est étudiée, en abordant, dans un premier temps, les statistiques et la caractérisation des variables hydrochimiques des eaux, ensuite, nous étudierons successivement, pour les eaux d'origine souterraine :

- La modélisation géochimique des eaux
- La pollution nitrique des eaux.

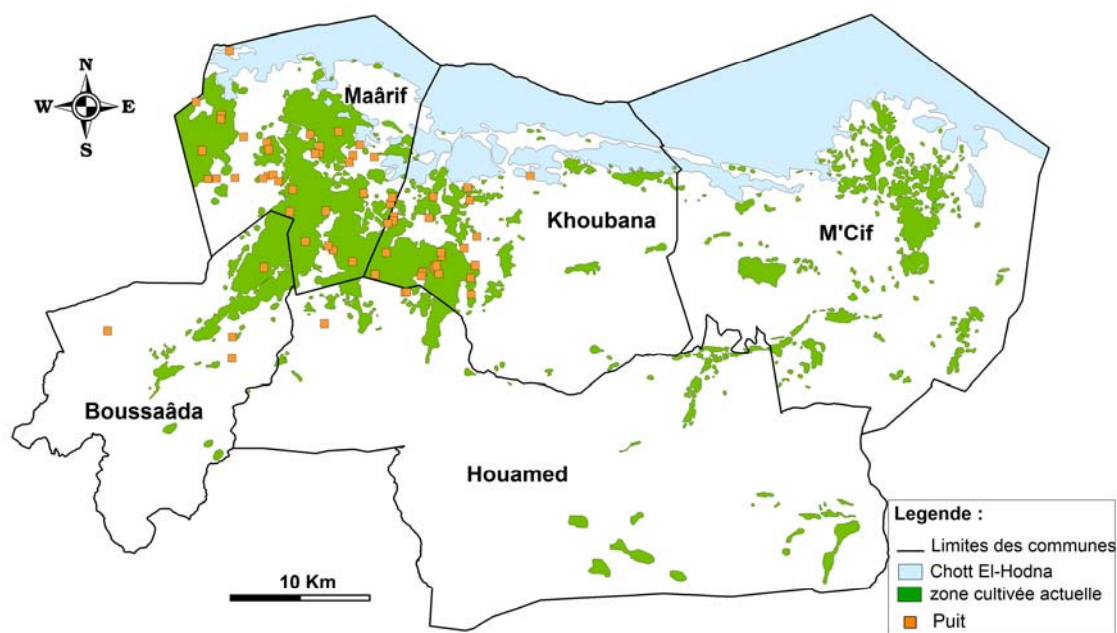
### 2- MATERIEL ET METHODES

Ce travail est fondé sur des données d'archives qui concernent la nappe phréatique et la nappe profonde et sur nos propres résultats qui ne concernent que la nappe profonde.

Des analyses des eaux de surface ont été examinées à titre comparatif. Il s'agit des eaux des Oueds du Hodna les plus importants (Boyadgiev, 1975) et notre analyse de l'eau de la crue de l'Oued Defla de 2008.

#### 2.1- DONNEES D'ARCHIVES

Deux archives ont été utilisées. Elles contiennent les analyses chimiques des eaux souterraines de puits (FAO, 1973) et de forages (ANRH, 1996) localisés dans la zone agricole. Les eaux de 63 puits répartis dans toute la zone agricole Ouest (Maârif-Khoubana, Boussaâda et Houamed) (fig. VII.1) sont des eaux de la nappe phréatique. Les eaux de 50 forages répartis essentiellement dans la zone agricole de l'extrême Ouest (Maârif) (fig. VII.2) sont des eaux de la nappe profonde.



**Fig. VII.1** : Localisation des points d'eau (archive de la nappe phréatique 1973).

## 2.2- ECHANTILLONNAGE SUR LES EAUX DE LA NAPPE PROFONDE

Des échantillons d'eau de forage de la nappe profonde (N = 18) ont été collectés après plus d'une heure de pompage dans des bouteilles en polyéthylène en mai 2008 au niveau de la commune de Khoubana au Sud du Hodna (fig. VII.3). Les sites des points d'eau sont localisés dans les secteurs du Chott, Mergueb, Guebouhia et Memdouda.

## 2.3- ANALYSES DES EAUX AU LABORATOIRE

### 2.3.1- Les analyses disponibles dans les archives (FAO, 1973 ; ANRH, 1996)

Elles concernent les variables suivantes :

pH, conductivité, température, anions et cations majeurs exception faite pour le pH dans l'archive de 1973 et la température dans l'archive de 1996.

Les analyses ont été réalisées au laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources en Hydraulique (ANRH) autrefois appelé DEMRH puis INRH.

### 2.3.2- Les mesures réalisées sur nos propres échantillons

Il s'agit des échantillons de la campagne 2008. Les analyses concernent les variables suivants:

#### 2.3.2.1- Sur le terrain

Les mesures du pH, de la température et de la conductivité électrique ont été réalisées sur le terrain par des sondes de pH mètre et de conductimètre portable type HANNA.

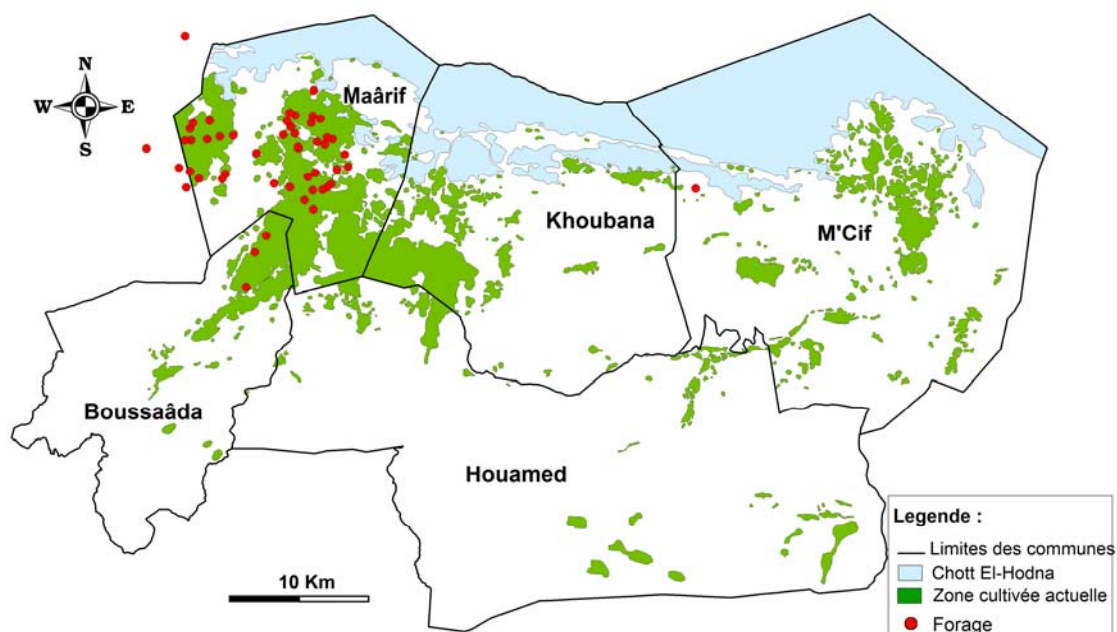


Fig. VII.2 : Localisation des points d'eau (archive de la nappe profonde 1996).

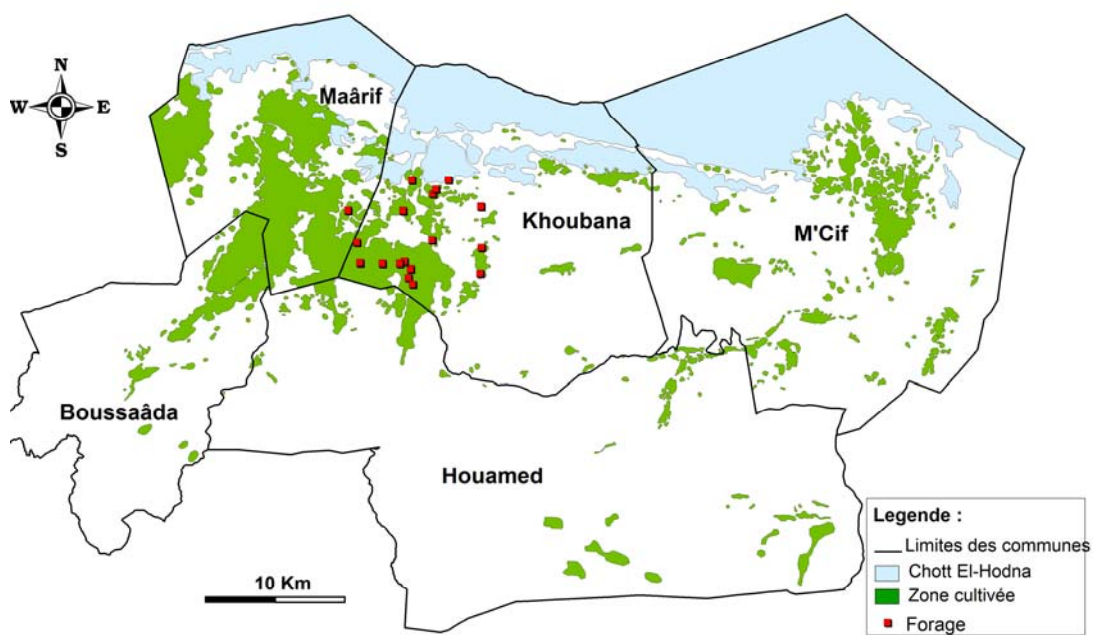


Fig. VII.3 : Localisation des points d'eau de la nappe profonde (échantillons de 2008).

### 2.2.2.2- Au laboratoire

Le bilan ionique a concerné les analyses suivantes :

#### a) Les cations :

-  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  : Les concentrations des ions calcium et magnésium ont été déterminées par analyse à flux continu (appareil SKALAR SAN plus). Après formation d'un complexe coloré, la mesure est réalisée par spectrophotométrie.

-  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  : Les concentrations des ions sodium et potassium ont été mesurées par photométrie à flamme.

#### b) Les anions :

-  $\text{CO}_3^{--}$  et  $\text{HCO}_3^-$  par volumétrie.

-  $\text{Cl}^-$  par dosage colorimétrique.

-  $\text{SO}_4^{--}$  sont dosés par turbidimétrie.

-  $\text{NO}_3^-$  par analyseur à flux continu et dosage spectrophotométrique à une longueur d'onde de 540 nm.

- Le résidu sec (TDS) a été mesuré par évaporation.

## 2.4- TRAITEMENT DES DONNEES

Il s'agit de l'emploi de graphiques et méthodes de classification des eaux, de l'utilisation de logiciels de traitement statistique, géochimique et de variabilité spatiale.

### 2.4.1- Classification de RIVERSIDE

De nombreuses classifications, présentant les catégories d'aptitude des eaux pour l'irrigation, sont proposées dans la littérature. Nous avons retenu celle de RIVERSIDE (United State Salinity Laboratory Staff, 1954), on la trouve aussi sous le nom de classification de "IUSSL" ou "USSLS", qui est le sigle de son laboratoire d'origine (fig. IV.4), car en plus de sa simplicité, elle est la plus répandue et la plus utilisée (Laraque, 1991 ; Gonzalez Barrios, 1992 ; Montoroi, 1995). Elle prend en compte les deux grands dangers que peuvent comporter les eaux utilisées en irrigation : celui de la salinisation et celui de sodisation (ou d'alcalisation) des sols.

Différentes classes d'eau ont été définies sur la base du taux d'adsorption du sodium (SAR) avec  $\text{SAR} = \text{Na} / \sqrt{(\text{Ca} + \text{Mg}) / 2}$ , et sur la concentration de l'eau exprimée sous la forme de la conductivité électrique en micromhos/cm à 25°C (ou  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). La conductivité électrique est représentée en échelle logarithmique en abscisse, alors que le SAR est représenté en ordonnée en échelle arithmétique.

La signification des différentes classes de salinité et de sodicité est la suivante (Laraque, 1991) :

**Classe C<sub>1</sub>** : conductivités inférieures à 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 25°C. Eaux de faible salinité qui peuvent convenir pour la plupart des cultures et des sols.

**Classe C<sub>2</sub>** : conductivités comprises entre 250 et 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 25°C. Eaux moyennement chargées pouvant provoquer, si des précautions ne sont pas prises, une salinisation lente des sols lorsqu'ils sont de faible perméabilité et limiter le rendement d'espèces végétales sensibles au sel.

**Classe C<sub>3</sub>** : conductivités comprises entre 750 et 2250  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 25°C. Eaux fortement salines pouvant provoquer une accumulation de sels solubles dans le sol, diminuant le rendement de



plantes sensibles au sel (agrumes, haricots) et pouvant même limiter, par action au moment de la germination, la croissance d'espèces plus résistantes comme le coton, la betterave, la luzerne. Un mode de culture particulier est nécessaire pour la maîtrise de la salinité et on doit choisir des plantes ayant une bonne tolérance au sel.

**Classe C<sub>4</sub>** : conductivités allant de 2250 à 5000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 25°C. Eaux de salinité très élevée à n'utiliser en irrigation que pour des plantes très résistantes au sel, car ne convient pas à l'irrigation en conditions ordinaires. On peut l'utiliser dans des circonstances très spéciales. Les sols doivent être perméables, le drainage adéquat, l'eau d'irrigation appliquée en excès afin de permettre un lessivage important pour éviter des dépôts salins sur les sols.

Ce diagramme définissant 16 classes d'eau a été complété plus tard par l'adjonction d'une classe de conductivité (classe C<sub>5</sub>) :

**Classe C<sub>5</sub>** : conductivités comprises entre 5000 et 20000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 25°C. Ces eaux sont uniquement acceptables pour irriguer des plantes très tolérantes au sel dans des terrains très perméables, avec un drainage et un lessivage conséquents. Au-delà de 10000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 25°C (soit 7000 mg/l), ces eaux de conductivités exceptionnellement hautes, ne peuvent être utilisées que pour les palmeraies avec un excellent drainage dans des terrains très perméables.

Certains auteurs (Laraque, 1990) ont été amenés à ajouter d'autres classes pour tenir compte des eaux dont la conductivité est inférieure ou supérieure aux limites du diagramme existant comme le cas de la classe C<sub>6</sub>.

**Classe C<sub>6</sub>** : conductivités dépassant 20000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 25°C. Ces eaux sont totalement impropres à tout usage en irrigation.

Pour ce qui est du SAR on a :

**Classe S<sub>1</sub>** : SAR inférieur à 10 pour les eaux peu salées et à 2,5 pour les eaux très salées.

Eaux peu alcalinisantes ne pouvant amener plus de 12% de sodium pour le complexe adsorbant des sols. Certaines plantes sensibles au sodium, telles les arbres à noyaux et les avocats peuvent accumuler des concentrations nuisibles en sodium.

**Classe S<sub>2</sub>** : SAR compris entre 10 et 18 pour les eaux peu salées, entre 2,5 et 7 pour les eaux très salées. Eaux moyennement alcalinisantes pouvant amener jusqu'à 20% de sodium sur le complexe adsorbant des sols (on considère qu'un sol est alcalinisé quand il a plus de 15% de sodium sur son complexe adsorbant). Cette eau est recommandée plutôt pour les sols à texture grossière ou à forte teneur en matière organique et bonne perméabilité. Les sols sensibles sont ceux à texture fine et à capacité d'échange élevée.

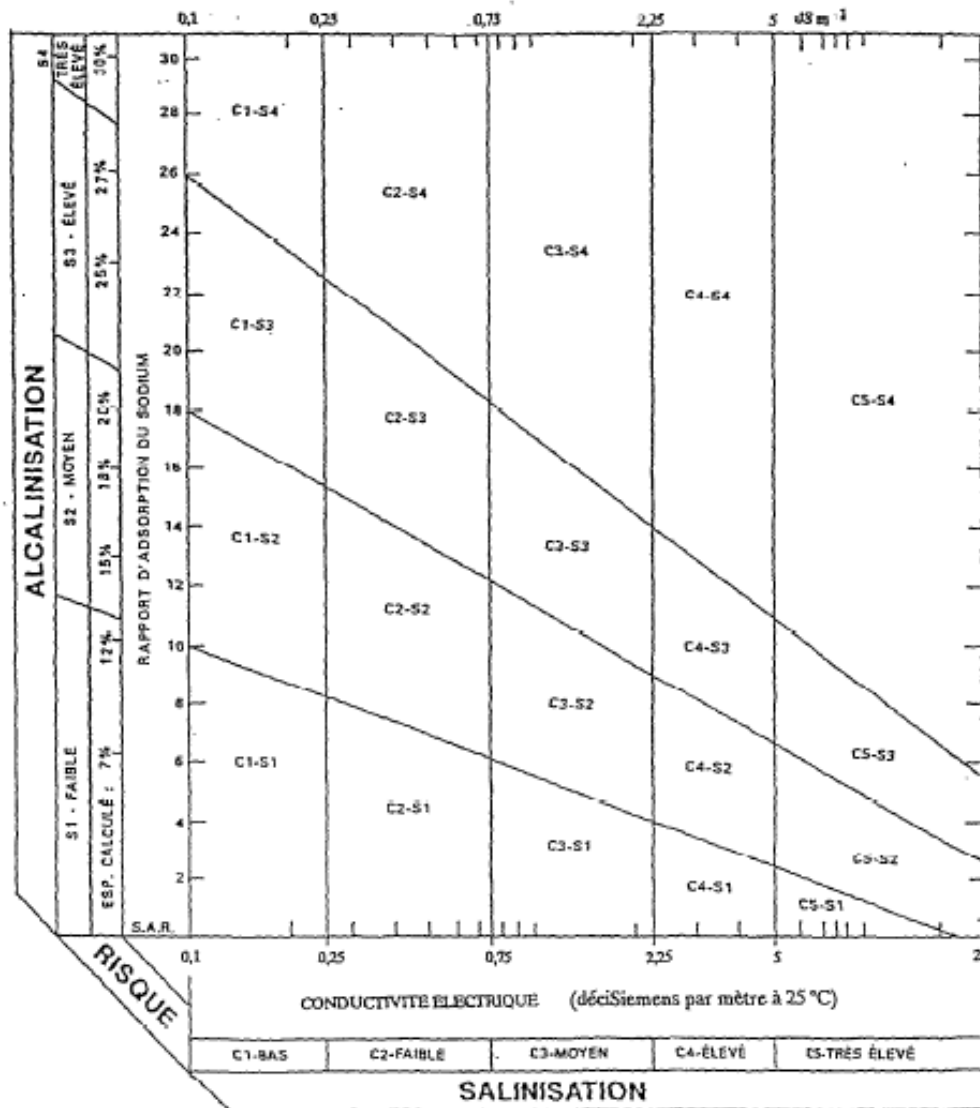


Fig. VII.4 : Diagramme de Riverside (1954) modifié par Durand (1958)

**Classe S<sub>3</sub>** : SAR compris entre 18 et 26 pour les eaux peu salées, 7 et 11 pour les eaux très salées. Eaux fortement alcalinisantes pouvant amener jusqu'à 27% de sodium sur le complexe adsorbant des sols. Pour y éviter des accumulations des quantités nuisibles de sodium échangeable, il faut adopter des méthodes d'exploitation du sol spéciales : bon drainage, lessivage important et apport de matière organique. Les sols gypseux peuvent être exempts de telles accumulations nuisibles. Des amendements chimiques réalisables lorsque les eaux n'ont pas une salinité trop élevée peuvent être nécessaires pour remplacer le sodium échangeable.

**Classe S<sub>4</sub>** : SAR supérieur à 26 pour les eaux peu salées et à 11 pour les eaux très salées.

Eaux très fortement alcalinisantes pouvant amener plus de 27% de sodium sur le complexe adsorbant des sols. Ces eaux ne peuvent généralement pas servir à l'irrigation sauf pour des teneurs en sels solubles basses et à la rigueur moyennes, lorsque la dissolution du calcium des sols ou bien l'utilisation du gypse ou d'autres amendements peuvent alors permettre leurs utilisations. Il est à signaler que ces classes ont été établies de manière empirique d'après les données provenant de la réalisation de projets d'irrigation.

Les équations des trois droites inclinées qui subdivisent ce diagramme sont :

- droite supérieure  $SAR = 43,75 - 8,87 \times \log CE$

- droite médiane  $SAR = 31,31 - 6,66 \times \log CE$
- droite inférieure  $SAR = 18,70 - 4,35 \times \log CE$

### 2.5.2- Diagramme de Piper

En ce qui concerne la représentation graphique des caractéristiques physico-chimiques de l'eau, il existe aussi de nombreuses méthodes. Nous nous limiterons ici essentiellement aux diagrammes de PIPER car ils sont couramment employés dans la littérature et les plus utiles à notre propos.

Le diagramme de Piper (fig. IV.5) permet une représentation des anions et des cations sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives en chacun des ions majeurs par rapport au total de ces ions (cations pour le triangle de gauche, anions pour le triangle de droite).

La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces deux triangles permet de préciser en premier lieu la dominance anionique et cationique.

A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point intersection représente l'analyse globale de l'échantillon, sa position relative permet de préciser le faciès de l'eau minérale concernée :

- sommet du losange = faciès sulfaté/chloruré, calcique/magnésien,
- base du losange = faciès bicarbonaté, sodique,
- pointe droite du losange = faciès sulfaté/chloruré, sodique,
- pointe gauche du losange = faciès bicarbonaté, calcique/magnésien.

Le problème majeur pour ce type de représentation vient du fait que les analyses sont reportées sous forme de pourcentage, ainsi l'effet de dilution (variation de la concentration absolue) n'est pas immédiatement perceptible. Il convient d'être prudent dans la comparaison des qualités physico-chimiques de deux échantillons distincts.

Un avantage du diagramme de Piper est qu'il permet de représenter sur un même graphique de nombreuses analyses autorisant des regroupements par famille présentant des faciès similaires. Ce point peut s'avérer particulièrement intéressant dans le cadre du suivi qualité d'une eau minérale dans le temps, pour lequel on dispose de plusieurs analyses physico-chimiques, ou dans le cadre d'études régionales de comparaison de divers points.

L'utilisation du logiciel (DIAGRAMME V4.0, Simler, 2007) a été utilisée pour la représentation des triangles de Piper.

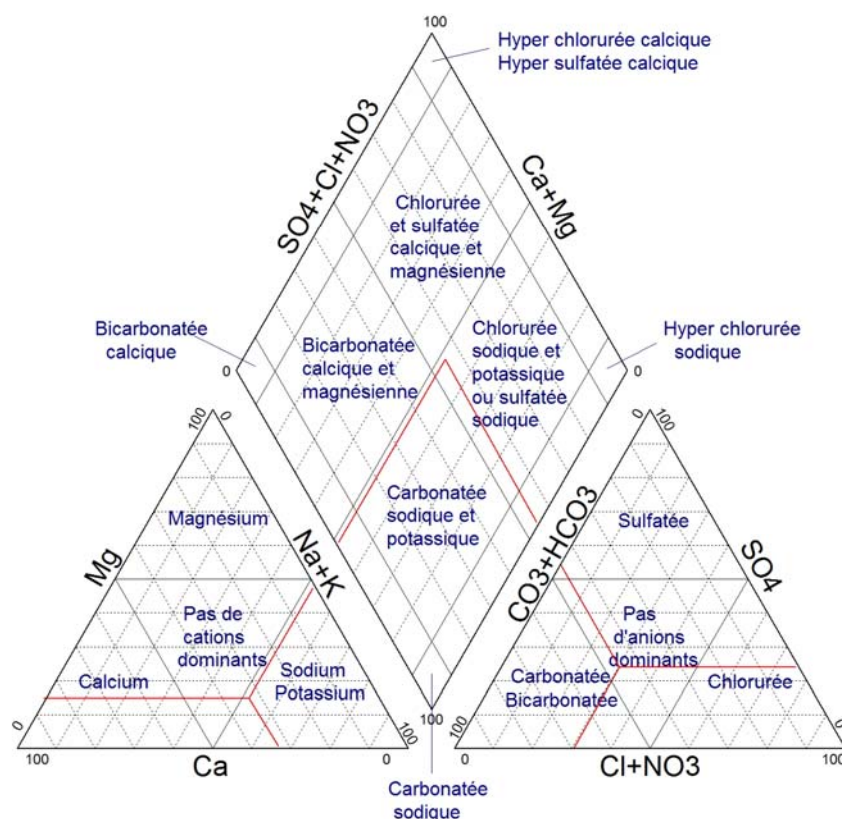


Fig. VII.5 : Diagramme de PIPER

### 2.2.3- CLASSIFICATION FAO (FAO, 1988)

Il s'agit des directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau à l'irrigation. Le tableau détaillé de cette classification est reporté en annexe 5.

### 2.2.4- ANALYSE STATISTIQUE

Il s'agit de statistiques descriptives, des corrélations entre paramètres physico-chimiques et de l'analyse en composantes principales des eaux. Le logiciel Statistica (Statistica version 6.1, Statsoft, Inc, 2003) a été utilisé pour le traitement statistique des données.

### 2.2.5- REPRESENTATION SPATIALE AVEC GOCAD

La variabilité spatiale de certains paramètres chimiques des eaux a été réalisée avec le logiciel Gocad (Mallet, 2002).

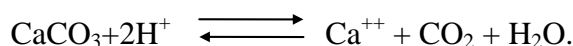
## 2.2.6- ETUDE DES EQUILIBRES DES EAUX PAR RAPPORT A LA CALCITE ET AU GYPSE.

Dans la région aride, l'évaporation est importante, les eaux se concentrent fortement et les sols ont tendance à se saler. La dissolution des minéraux, la précipitation des sels, ainsi que la concentration des solutions par évaporation, sont des phénomènes qui, dans la nature, font intervenir un grand nombre de réactions chimiques. Le développement récent de la géochimie et de l'informatique a ouvert la voie à la modélisation thermodynamique des équilibres minéraux-solutions. Dans ce contexte, de nombreux travaux ont été réalisés (Fritz, 1975 ; Droubi, 1976 ; Dufey et al. 1979 ; Daoud, 1983 ; Halitim, 1985 ; Vallès, 1987 ; Laraqe, 1992 ; Gonzales Barrios, 1992 ; Montoroi, 1994 ; Zougari, 1996 ; Hamdi Aissa, 2001).

### 2.2.6.1- ETAT DE SATURATION DES EAUX

#### a) Saturation vis-à-vis de la calcite

La dissolution de la calcite peut s'écrire :



Le produit de solubilité est alors égal à :  $K_{ps} = (\text{Ca}_2^+).f\text{CO}_2.(\text{H}_2\text{O})/(2\text{H}^+)$ .

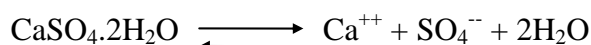
$f\text{CO}_2$  est la fugacité en  $\text{CO}_2$ . On a  $f\text{CO}_2 = p\text{CO}_2$ . A 25°C et 1 atm.  $K_{ps} = 10^{9,76}$  (Droubi, 1976). Si l'activité de l'eau est voisine de 1 on aura :

$$\text{Log} (\text{Ca}^{++}) + 2\text{pH} + \text{Log} (p\text{CO}_2) = 9,76.$$

L'état de la saturation des solutions est apprécié par la position dans le diagramme :  $\text{Log} (\text{Ca}^{++}) + 2\text{pH}$ ,  $\text{Log} (p\text{CO}_2)$  ou sur un diagramme indiquant les indices de saturation.

#### b) Saturation vis-à-vis de gypse

L'équation de la dissolution du gypse s'écrit :



Le produit de solubilité est égal à :  $10^{-4,85}$  à 25°C, 1atm. (Fritz, 1975).

Une solution est en équilibre si :

$$\text{Log} (\text{Ca}^{++}) + \text{Log} (\text{SO}_4^{--}) + 2\text{Log} (\text{H}_2\text{O}) = -4,85.$$

Et si l'activité de l'eau est voisine de 1 on aura :

$$\text{Log} (\text{Ca}^{++}) + \text{Log} (\text{SO}_4^{--}) = -4,85$$

L'état de la saturation des solutions est apprécié par leur position dans le diagramme :

$\text{Log} (\text{SO}_4^{--})$ ,  $\text{Log} (\text{Ca}^{++})$  ou sur un diagramme indiquant les indices de saturation.

#### c) Exploitation du logiciel « Phreeqc »

Pour étudier l'état de saturation des solutions aqueuses, il faut disposer des activités des ions simples et de la pression en  $\text{CO}_2$  ou des indices de saturation. L'utilisation de PHREEQC (Phreeqc version 2, Parkhurst et Appelo, 1999) permet de fournir les données nécessaires à cette étude.

Les résultats sont présentés sous forme de diagramme de saturation des minéraux.

## 2.2.7- EVOLUTION GEOCHIMIQUE DES EAUX

### 2.2.7.1- Rappel

Lorsqu'une solution se concentre, deux cas peuvent avoir lieu, si l'on néglige les réactions d'échange ionique entre la solution et une phase solide en contact avec elle :

a) aucune précipitation saline ne se produit ; les proportions relatives des ions en solution restent constantes et sont multipliées par un même facteur de concentration,

b) il y a précipitation de sels lorsque la saturation avec un minéral est atteinte ; les éléments constituant chaque sel sont soustraits à la solution. La composition de cette dernière se modifie, les proportions des ions en solution changent.

### 2.2.7.2- Choix d'un traceur salin

Le traceur chimique est un indicateur qui doit marquer le phénomène de concentration des solutions sans interagir avec son environnement. C'est à dire qu'il ne doit pas participer à des phénomènes de précipitation ou d'échange avec la phase solide. Ceci peut se traduire par la relation simple de proportionnalité entre la molalité d'un traceur T à l'état initial (indice i) et sa molalité après évaporation d'une fraction d'eau :

$$[T]=FC.[T]_i$$

FC est le facteur de concentration, c'est à dire le rapport du volume d'eau initial sur le volume d'eau final. La source de l'élément traceur doit être la même que la source des éléments dont on étudie le comportement au cours de la concentration, car dans notre cas il s'agit de comparer différents eaux à des gammes de concentration différentes mais ne dérivant pas les unes des autres directement par concentration ou dilution.

Les ions chlorures sont généralement utilisés comme traceur chimique pour déterminer l'état de concentration ou de dilution d'une eau. Cela signifie que pour classer une série de solutions en fonction de leur concentration, on utilise généralement le quotient entre la teneur en ions chlorures de la solution considérée avec la plus petite teneur en ions chlorures observée dans l'ensemble des solutions (Gallali, 1980).

$$FC = [T]/[T]_i$$

Il n'y a pas de traceur universel pour l'étude des milieux évaporatoires. Dans la littérature, une large gamme d'éléments chimiques est utilisée : l'ion Chlorure (Vallès, 1989 ; Barbierro, 1990 ; Laraque, 1991 ; Hamdi Aissa, 2001, Ouardi, 2005), potassium (Gueddari, 1984), force ionique (N'Diaye, 1987), magnésium (Loyer, 1989) et somme des cations (Gonzalez-Barrios, 1992).

## 2.2.8- ETUDE DE L'EVOLUTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX : (Concept d'alcalinité résiduelle généralisée)

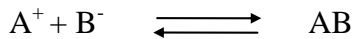
### 2.2.8.1- Introduction

Dans les milieux arides, la solution du sol tend à se concentrer sous l'effet de l'évaporation et du prélèvement d'eau par les plantes. Au cours de cette concentration, la salinité augmente et la composition relative en ions de la solution peut évoluer si des phénomènes de précipitation et d'échange apparaissent.

Le concept d'alcalinité résiduelle est un moyen permettant de prévoir l'évolution de la composition de la solution au cours de la concentration et notamment, l'évolution de son SAR. Ce concept est basé sur la loi dite du T. Il a été développé par Droubi (1976).

### 2.2.8.2- La loi du T

Si l'on considère la réaction de précipitation du minéral AB :



La constante d'équilibre s'écrit :

$$K_s = (A^+)(B^-)$$

$K_s$  : Donnée thermodynamique ; constante à pression et température constantes.

(A) et (B) : Activité des ions en solution.

La loi du T permet de prévoir quel est l'ion dont l'activité croît lors de la concentration.

D'après cette loi, trois cas peuvent se présenter (fig. VII.6) :

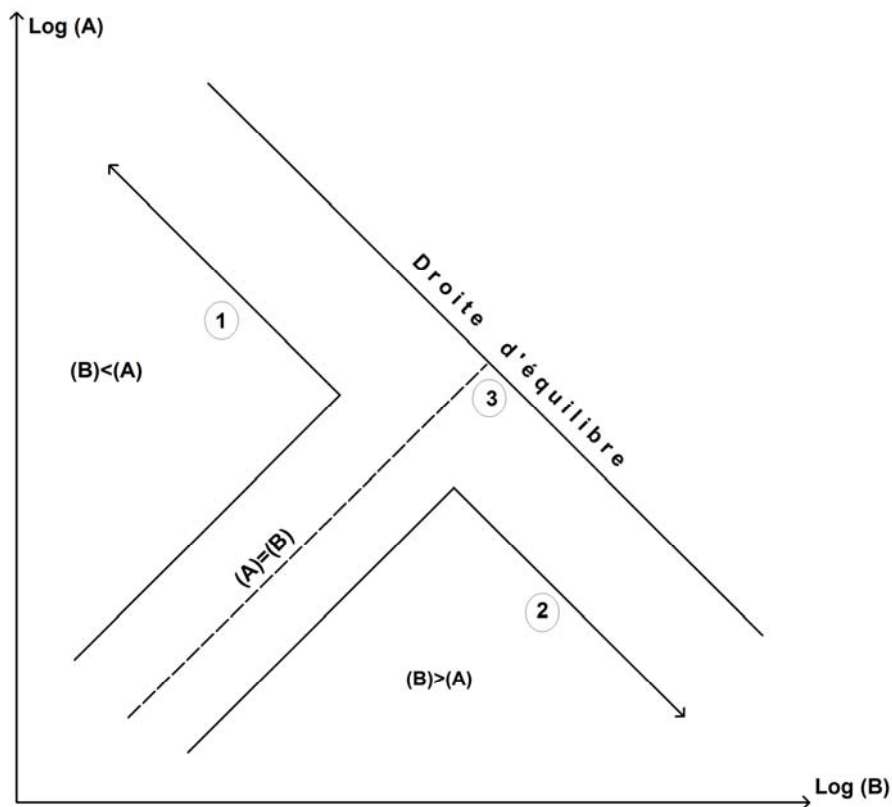


Fig. VII.6 : Illustration de la " loi du T " (Vallès et al., 1989).

(Les différents cheminements de la solution lors de sa concentration suivant sa composition initiale).

- ① - Si le nombre d'équivalents de A est supérieur à celui de B dans la solution de départ, lors de la concentration de la solution, la concentration relative en A augmente et celle de B diminue à partir du moment où la solution précipite le minéral ;
- ② - A l'inverse, si B est supérieur à A en équivalents, la teneur en B continuera à croître lors de la concentration, alors que la teneur en A diminuera ;
- ③ - Si A=B dans la solution de départ, les deux éléments resteront en proportion constante lors de la concentration.

En résumé, la précipitation d'un minéral soustrait des ions à la solution. Cependant, la réduction du volume permet d'augmenter la concentration de l'ion initialement le plus

abondant, à l'opposé de l'ion initialement le plus déficient dont le passage sous forme solide est plus rapide que la réduction de volume de la solution.

### 2.2.8.3- Alcalinité

Bourrie (1976) l'a défini comme "la somme des concentrations des bases faibles multipliée par le nombre de protons que chacune de ces bases peut neutraliser moins la concentration en protons de la solution".

Lorsque l'on combine cette définition avec l'équation de la neutralité électrique au sein de la solution du sol, on obtient la relation suivant :

$$\text{Alc.} = \text{K} + \text{Na} + 2\text{Ca} + 2\text{Mg} - \text{Cl} - 2\text{SO}_4 - \text{NO}_3$$

où K, Na, Ca,... représentent les quantités totales d'éléments en solution, c'est à dire qui sont dosés chimiquement et exprimés en moles/l (Vallès et al., 1989).

### 2.2.8.4- Alcalinité résiduelle

Introduite par Eaton en 1950, l'alcalinité résiduelle représente la part de l'alcalinité totale qui n'est pas équilibrée par les cations divalents. Elle est définie par l'expression :

$$(\text{Alc. Rés.}) = (\text{Alc.}) - 2(\text{Ca}^{2+}) - 2(\text{Mg}^{2+}).$$

$$\text{Où encore : } (\text{Alc. Rés.}) = (\text{Na}^+) + (\text{K}^+) - (\text{Cl}^-) - 2(\text{SO}_4^{2-}).$$

### 2.2.8.5- Alcalinité résiduelle généralisée (précipitation des minéraux)

Cette notion est développée par Droubi (1976). Les sels précipitent selon leur ordre de solubilité croissante, ainsi, les étapes de l'évolution d'une solution peuvent être présentées de la manière suivante :

La calcite comme étant le premier minéral qui précipite dans une solution soumise à l'évaporation, l'alcalinité résiduelle aura pour formule :

$$(\text{Alc. rés.})_c = \text{Alc.} - 2 \text{Ca}^{2+}$$

Ainsi, connaissant la valeur de l'alcalinité résiduelle calcite, il est possible de prévoir le sens d'évolution des solutions dès que la saturation avec ce minéral est atteinte. Deux cas peuvent se présenter alors :

- Si l'alcalinité résiduelle est positive, c'est à dire si l'alcalinité est supérieure au calcium (en mé/l), la teneur en carbonates continuera à croître lors de la concentration des solutions, alors que la teneur en calcium diminuera pendant le même temps. Le sodium qui ne participe à aucune précipitation à ce stade, continue à se concentrer ; le rapport  $Na / \sqrt{(Ca + Mg) / 2}$  (Na, Ca et Mg exprimés en mé/l), ou SAR, atteint alors des valeurs élevées, les argiles se saturent progressivement en sodium, ce qui confère au sol des propriétés défavorables ;
- Si l'alcalinité résiduelle est négative, c'est à dire si l'alcalinité est inférieure au calcium, l'alcalinité décroît et la teneur en calcium augmente lors de la concentration. Le SAR demeure dans des normes acceptables et le sodium est moins gênant que le cas précédent.

Lorsque le gypse précipite à la suite de la calcite, l'alcalinité résiduelle devient :

$$\begin{aligned} (\text{Alc. rés.})_{c+g} &= (\text{Alc. rés.})_c + 2\text{SO}_4 \\ &= (\text{Alc.}) - 2\text{Ca} + 2\text{SO}_4 \end{aligned}$$

Lorsque la concentration de l'eau permet la précipitation de la calcite et du gypse, deux cas peuvent encore se produire :



- Si l'alcalinité résiduelle calcite + gypse est positive, les carbonates et les autres sulfates sont plus abondants que le calcium. Lors de la concentration des eaux, la teneur relative en carbonates et en sulfates augmente alors que celle du calcium décroît ; le SAR atteint des valeurs élevées ;

- Si l'alcalinité résiduelle est négative, carbonates et sulfates se trouvent en quantité moindre que le calcium et la teneur relative de celui-ci augmente malgré la précipitation du gypse et de la calcite.

L'alcalinité devient nulle si après le gypse apparaissent d'autres sels tels que : l'arcanite ( $K_2SO_4$ ), la thénardite ( $NaSO_4$ ), l'héxahydrate ( $MgSO_4 \cdot 10H_2O$ ), la sylvite (KCl), l'halite (NaCl), etc.... Dans tous les cas, si l'alcalinité résiduelle généralisée est positive, l'alcalinité et le pH augmentent, alors que, si elle est négative le cas inverse se produit.

Ce concept d'alcalinité résiduelle généralisée a été appliqué dans de nombreuses régions. La confrontation avec les données de terrain, où l'on a pu observer une évolution des sols vers la voie saline neutre ou vers la voie carbonatée (Droubi, 1976 ; Daoud, 1983 ; Vallès, 1987), a permis d'en vérifier la validité.

#### 2.2.8.6- Classification des eaux d'irrigation basée sur la notion d'alcalinité résiduelle généralisée

Valles et al., (1991) ont proposé quelque paramètres qui sont invariables par rapport aux processus d'évaporation ou de dilution d'une eau, et qui tiennent compte de l'évolution géochimique de l'eau.

Cette méthode est basée sur trois paramètres (Tableau VII.1).

**R1** = Alc - Ca

Ce paramètre correspond à l'alcalinité résiduelle calcite. C'est le premier paramètre, qui ne changera pas au cours de la précipitation du carbonate de calcium (ions et Alc. exprimés en mé/L).

**R2** = Alc - Ca + SO<sub>4</sub>

Ce paramètre correspond à l'alcalinité résiduelle calcite + gypse. C'est le deuxième paramètre, qui ne changera pas au cours de la précipitation du carbonate et du sulfate de calcium.

**R3** = Na - SO<sub>4</sub>

C'est le troisième paramètre à calculer, dont une valeur positive précédé d'une valeur de R1 également positive, traduit la présence de bicarbonate de sodium dans la solution, après précipitation des sels du calcium.

**Tableau VII.1** : Les paramètres de classification et les familles d'eau d'irrigation (Vallès et al., 1991)

Alc < 0	Alc > 0			
groupe acide	R1 < 0		R1 > 0	
	groupe salin		Groupe alcalin	
	R2 < 0	R2 > 0	R3 < 0	R3 > 0
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
famille acide	famille saline calcique	famille saline sulfatée	famille alcaline sulfatée	famille alcaline carbonatée

## 3- RESULTATS ET DISCUSSION

### 3.1- STATISTIQUES DES VARIABLES HYDROCHIMIQUES

Cette étude est basée sur les données hydrochimiques de 131 points d'eau caractérisants les eaux souterraines (nappe phréatique et nappe profonde). Dans cette partie seront abordés les points suivants :

- Statistiques descriptives des eaux ;
- Corrélations et régressions ;
- Analyse en composante principale

#### 3.1.1- STATISTIQUES DESCRIPTIVES

Les données hydrochimiques complètes des eaux sont reportées dans l'annexe 6. Le tableau (VII.2) représente la synthèse des paramètres statistiques pour la composition chimique des eaux souterraines. D'une manière générale, la composition chimique des eaux est très variable. Le coefficient de variation de la plupart des paramètres est importante (37% à 101% pour la nappe profonde et 37% à 114% pour la nappe phréatique) exception faite pour le pH. Ce résultat est relativement fréquent en milieu salé, où la salure et donc la majeure partie des paramètres physico-chimiques présentent une grande variabilité spatiale (Ouardi, 2005).

L'observation des résultats montre que le pH est près de la neutralité (6,8-8) pour la nappe profonde et l'alcalinité est modérée.

En considérant l'écart type des valeurs de la CE et du TDS, on constate que la dispersion des données est la plus faible en 2008. Les valeurs de la CE oscillent entre 644 à 2780  $\mu\text{S}/\text{cm}$  dans les forages en 2008 contre 1500 à 9700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en 1996. Dans les puits de la nappe phréatique, les résultats observés varient de 1011 à 21900  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Ces variations importantes interfèrent avec une quasi stabilité du pH. Ceci implique qu'en dépit de la concentration de la solution par évaporation et transpiration, la précipitation de carbonates règle le pH d'après le concept d'alcalinité résiduelle (Breemen and Wielemaker 1974 ; Al Droubi et al. 1980) et les solutions évoluent vers la voie saline neutre.

#### 3.1.2-CORRELATION ET REGRESSION DES PARAMETRES HYDROCHIMIQUES

En traitant tous les échantillons des eaux souterraines, plusieurs corrélations et régressions ont pu être réalisées, afin d'obtenir les équations qui caractérisent ces eaux. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau (VII.3). Les traitements ont été établis sur la base de l'analyse globale des échantillons d'eau souterraine. On considère donc qu'ils représentent l'ensemble des faciès géochimiques et leurs divers états de concentration.

Il ressort que les teneurs en ions les plus importantes sont étroitement liées à la conductivité électrique. Les coefficients de corrélation calculés sont généralement significatifs. Néanmoins, c'est le coefficient de détermination ( $r^2$ ) qui permettra de noter la pertinence d'une équation de régression ; plus il sera élevé et meilleure sera l'explication de la variable en ordonnée, par le paramètre en abscisse, d'après l'équation.

Dans les traitements, de bonne régression avec la conductivité électrique concernent la plupart des paramètres chimiques exception faite pour les bicarbonates et les nitrates.

La figure (VII.7) présente les observations des paramètres corrélés et la droite de régression calculée.

**Tableau VII. 2 : Synthèse des paramètres chimiques de l'eau**

Paramètres	Unité	année	N	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Ecart type	C.V	
Ca <sup>++</sup>	mg/L	2008	18	184,43	185,66	88,93	321,3	67,83	36,78	
Mg <sup>++</sup>				65,55	61,28	26,89	118,58	26,53	40,47	
Na <sup>+</sup>				107,27	114,6	23,86	232,18	57,86	53,94	
K <sup>+</sup>				0,86	0,76	0,37	1,93	0,41	47,67	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>				192,49	186,05	152,5	244	28,92	15,02	
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>				429,67	488	74	796	229,61	53,44	
Cl <sup>-</sup>				192,78	157,5	70	405	98,97	51,34	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>				76,28	71	6	158	43,39	56,88	
CE				μS/cm	1632,67	1541,5	644	2780	680,2	41,66
TDS				mg/L	1313,56	1257	512	2510	515,89	39,27
pH				7,29	7,29	7,1	7,47	0,1	1,37	
SAR				1,67	1,81	0,57	2,8	0,69	41,32	
T				°C	21,72	21,65	20,7	24,5	0,88	4,05
Ca <sup>++</sup>	mg/L	1996	50	257,54	226	88	758	141,9	55,10	
Mg <sup>++</sup>				141,76	107	54	465	92,31	65,12	
Na <sup>+</sup>				185,9	134	33	750	150,52	80,97	
K <sup>+</sup>				7,58	6	1	23	4,99	65,83	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>				125,72	262,5	51	426	68,59	54,56	
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>				959,8	764	295	2900	587,75	61,24	
Cl <sup>-</sup>				366,88	104	75	1850	313,01	85,32	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>				58,02	41	11	310	58,44	100,72	
CE				μS/cm	3076	2400	1500	9700	1707,67	55,52
TDS				mg/L	2323,56	1872	1066	6608	1355,33	58,33
pH				7,15	7,05	6,8	8	0,25	3,50	
SAR				2,8	2,92	0,72	5	1,15	41,07	
Ca <sup>++</sup>				mg/L	1967	63	411,048	416	30	898
Mg <sup>++</sup>	277,413	219	48				1340	226,548	81,66	
(Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup> )	544,921	306	34				3460	616,602	113,15	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	204,619	206	38				424	74,887	36,60	
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	1882,032	1810	185				7488	1378,042	73,22	
Cl <sup>-</sup>	733,429	426	57				4473	837,412	114,18	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	71,411	51	0				535	79,316	111,07	
CE	μS/cm	5036,548	4025				1011	21900	3793,652	75,32
TDS	mg/L	4572	3924				738	20300	3530,22	77,21
SAR	3,758	2,7	0,33				18,03	3,261	86,77	

Tableau VII. 3 : Relations composition chimique - CE des eaux souterraines (n=131).

Unités des ordonnées	Ions	Equation de régression	r	r <sup>2</sup>
Concentrations ioniques totales (mmol/L)	Cations	Ca = 0,0034+1,207E-6*CE	0,775	0,601
		Mg = -0,0008+2,2964E-6*CE	0,927	0,860
		Na = -0,0088+6,1011E-6*CE	0,938	0,880
		K = -4,2474E-5+1,107E-7*CE	0,597	0,356
	Anions	Cl = -7,0317E-5+3,6974E-6*CE	0,920	0,846
		SO4 = -0,0069+5,7003E-6*CE	0,943	0,889
		HCO3 = 0,0023+9,0848E-8*CE	0,237	0,056
		NO3	non significatif	0,000
mg/L		TDS = -207,1843+0,9079*CE	0,969	0,938
		SAR = 0,2923+0,0007*CE	0,809	0,655

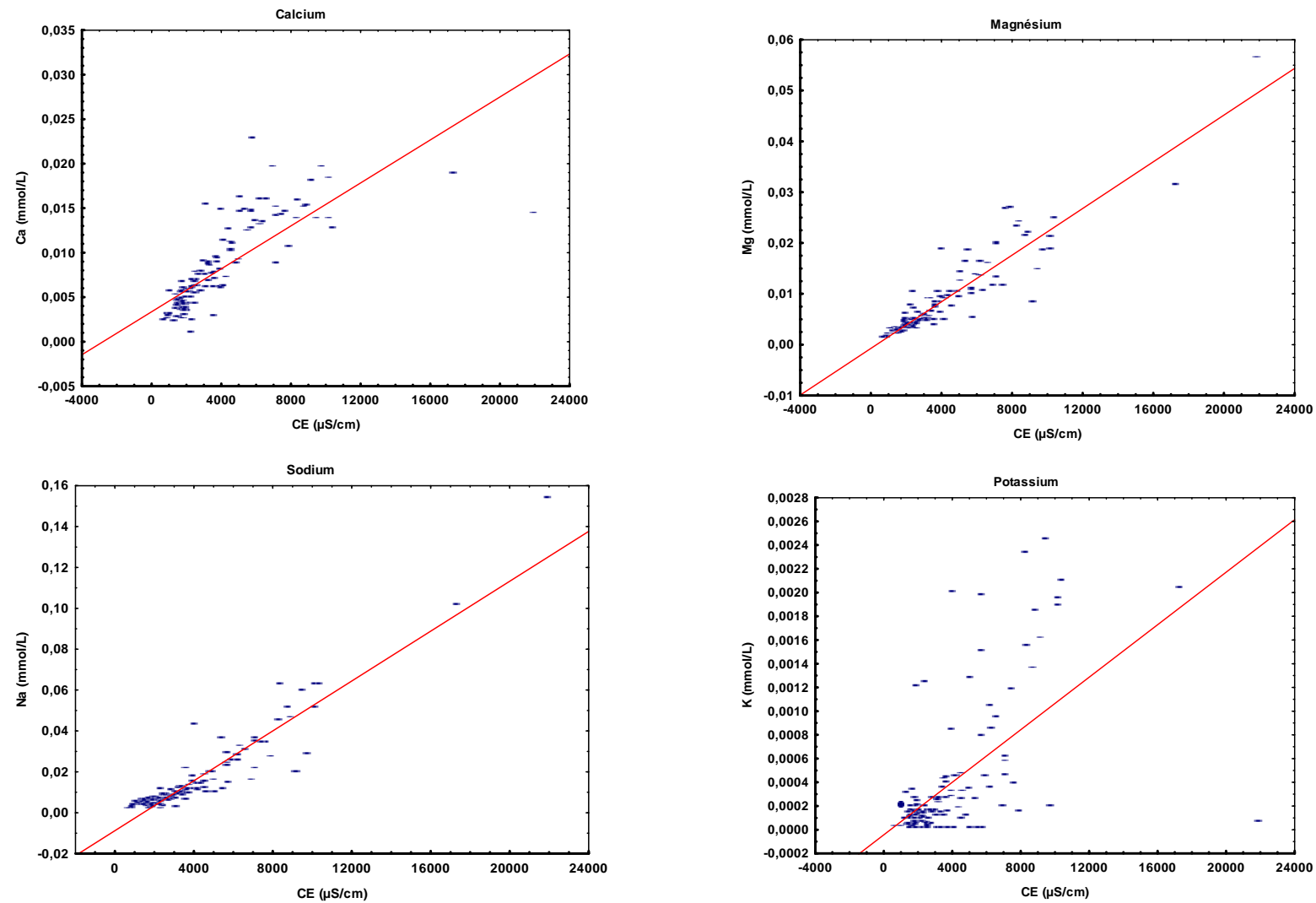


Fig. VII. 7 : Corrélations entre paramètres hydrochimiques observés dans les eaux souterraines

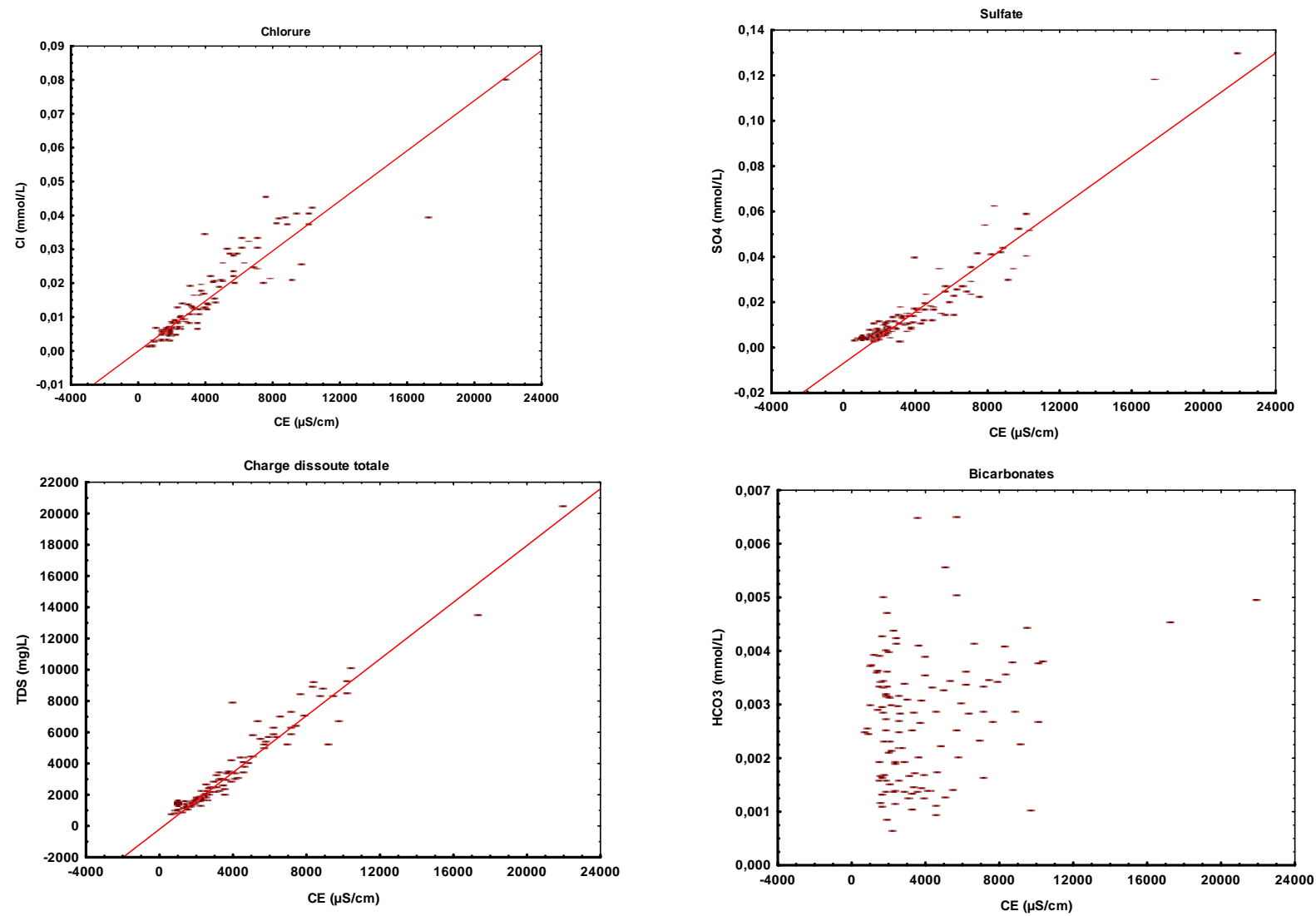


Fig. VII.7 (suite) : Corrélations entre paramètres hydrochimiques observés dans les eaux souterraines.

### 3.1.3- ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

Pour mieux observer les relations entre les différentes variables et la répartition des individus (les différentes eaux) en fonction des variables caractérisant les eaux, nous avons fait appel à l'analyse en composante principale (A.C.P.). L'A.C.P. est une méthode statistique essentiellement descriptive : son objectif est de présenter, sous une forme graphique, le maximum de l'information contenue dans un tableau de données (Philippeau, 1986). Pour effectuer cette analyse, nous avons eu recours au logiciel STATISTICA V.6.

L'objectif est de définir les grands ensembles d'analyse afin de vérifier si certaines d'entre elles se distinguent du reste du groupe. Le but recherché est aussi de hiérarchiser les processus du plus important vers les processus secondaires.

#### 3.1.3.1- A.C.P. globale des eaux

La présente étude portera sur l'ensemble d'échantillons d'eau des deux nappes (archives et analyses récentes). L'étude statistique par l'analyse en composantes principales (A.C.P.) a été effectuée sur un tableau de 124 individus (observations) et 10 variables. Les variables utilisées sont : La conductivité électrique (CE), le taux de sels dissous (TDS) le calcium ( $\text{Ca}^{++}$ ), le magnésium ( $\text{Mg}^{++}$ ), le sodium ( $\text{Na}^+$ ), le potassium ( $\text{K}^+$ ), les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), les sulfates ( $\text{SO}_4^-$ ), les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) et les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ).

Les deux premiers axes expriment 76,22% de la variance totale ce qui est énorme. Le tableau (VII.4) exprime les valeurs propres de la matrice des coefficients de corrélation, le pourcentage de variance expliquée ainsi que celui de la variance cumulée par chacun des axes.

**Tableau VII. 4 :** Distribution des valeurs propres et de la variance selon les différents axes factoriels dans les échantillons d'eau.

Axes	Valeur propre	% variance expliquée	% Variance cumulée
1	7,11	64,66	64,66
2	1,27	11,56	76,22
3	0,94	8,53	84,75
4	0,73	6,61	91,36
5	0,38	3,43	94,79
6	0,27	2,47	97,25
7	0,18	1,65	98,91
8	0,06	0,56	99,47
9	0,05	0,43	99,90
10	0,01	0,06	99,95
11	0,01	0,05	100,00

Tout d'abord, l'observation de la matrice de corrélation (Tableau VII.5) montre que les ions  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^-$  sont interdépendants et présentent des corrélations positives.

Ces ions révèlent aussi une forte corrélation avec la CE. En revanche, l'alcalinité carbonatée et les nitrates ne semble pas suivre la CE.

L'observation du graphe de la figure (VII.8) qui est une représentation formée par les deux premiers axes principaux (plan 1x2) fournit 76,22% de l'information contenue dans le nuage de points.

L'ACP montre que lorsque les échantillons d'eau des deux nappes sont confondus, le premier axe factoriel représente à lui seul presque deux tiers de la variance. Le second 11,56% de la variance et constitue des processus de second ordre. Les axes suivants, avec un pourcentage de variance de l'ordre de 23,78% sont négligeables et portent probablement pour l'essentiel du « bruit » statistique, c'est-à-dire les imprécisions analytiques, mais aussi de la variabilité spatiale de processus.

Dans ce plan (axe1x2), les variables  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ , TDS et la CE se trouvent en abscisses négatives. Les bicarbonates et le pH se trouvent en ordonnées négatives et les nitrates en ordonnées positives.

**Tableau VII. 5** : Matrice de corrélation (n=124, corrélation significatives marquées à  $p < 0,05$ )

	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>	CE	TDS
Ca	1,00									
Mg	<b>0,78</b>	1,00								
Na	<b>0,73</b>	<b>0,88</b>	1,00							
K	<b>0,59</b>	<b>0,70</b>	<b>0,83</b>	1,00						
HCO <sub>3</sub>	0,17	<b>0,28</b>	<b>0,35</b>	<b>0,39</b>	1,00					
SO <sub>4</sub>	<b>0,88</b>	<b>0,93</b>	<b>0,88</b>	<b>0,73</b>	<b>0,24</b>	1,00				
Cl	<b>0,76</b>	<b>0,87</b>	<b>0,93</b>	<b>0,71</b>	<b>0,26</b>	<b>0,79</b>	1,00			
NO <sub>3</sub>	0,11	0,07	-0,07	-0,10	-0,07	-0,03	0,04	1,00		
CE	<b>0,85</b>	<b>0,90</b>	<b>0,92</b>	<b>0,74</b>	<b>0,23</b>	<b>0,90</b>	<b>0,93</b>	0,05	1,00	
TDS	<b>0,87</b>	<b>0,95</b>	<b>0,95</b>	<b>0,78</b>	<b>0,30</b>	<b>0,97</b>	<b>0,91</b>	0,01	<b>0,96</b>	1,00

Le premier axe est l'axe de concentration globale des eaux sous l'effet du climat aride autrement dit un axe de salinité globale. Ainsi, l'ACP montre que le principal moteur du changement de la qualité des eaux est de loin le processus de concentration des eaux sous l'effet de l'aridité. Le second axe oppose l'alcalinité et les nitrates. L'alcalinité est un mauvais indicateur de l'état de concentration globale de l'eau notamment dans les milieux où les eaux évoluent vers la voie saline neutre. Il faut signaler enfin que la contamination des eaux par les nitrates (pollution nitrique) n'est pas liée à la minéralisation des eaux, il semble qu'elle est plutôt d'origine anthropique.



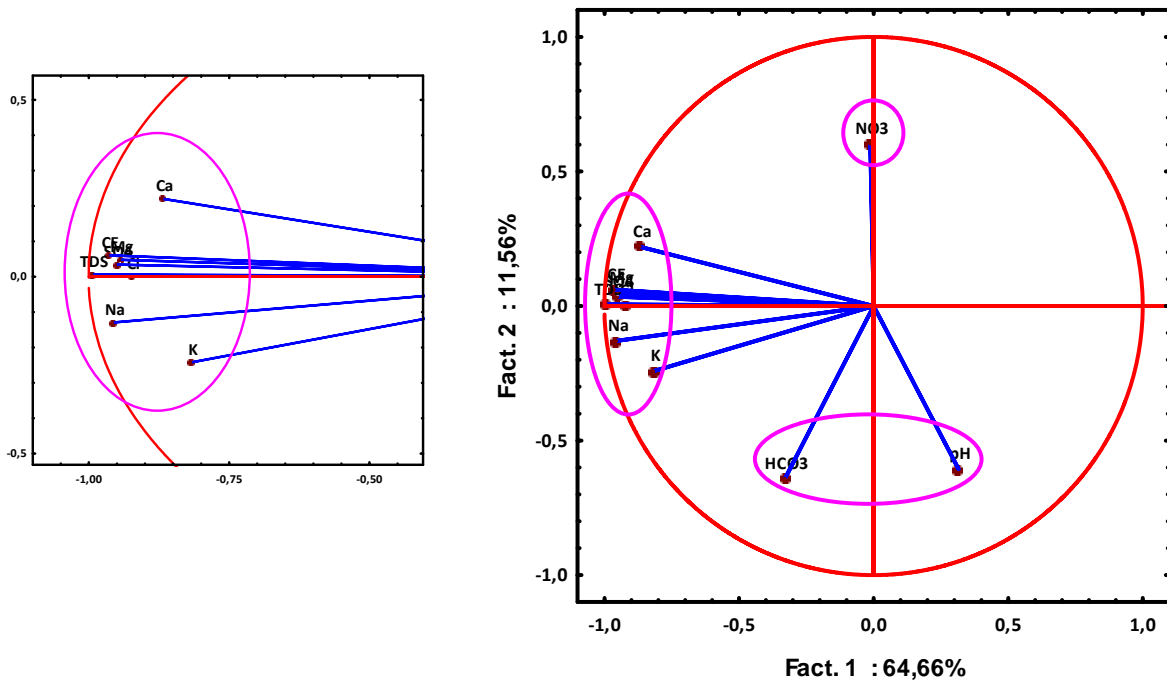


Fig. VII. 8 : Cercle de corrélation

Le tableau (VII.6) indique que le premier axe est expliqué par la CE (cor=-0,96), TDS (cor=-0,99),  $\text{Ca}^{++}$  (cor=-0,87),  $\text{Mg}^{++}$  (cor=-0,94),  $\text{Na}^+$  (cor=-0,96),  $\text{K}^+$  (-0,82),  $\text{Cl}^-$  (cor=-0,92),  $\text{SO}_4^{--}$  (cor=-0,95).

Les variables qui ont une contribution importante à la variance expliquée par le deuxième axe sont les nitrates (cor=0,60), les bicarbonates (cor=-0,64) et le pH (-0,61).

Les variables qui ont une contribution importante à la variance expliquée par le troisième axe sont les nitrates (cor=-0,79).

**Tableau VII. 6 : Corrélations variables/axes principaux**

	Fact. 1	Fact. 2	Fact. 3
Ca	<b>-0,87</b>	0,22	0,01
Mg	<b>-0,94</b>	0,05	0,05
Na	<b>-0,96</b>	-0,13	-0,02
K	<b>-0,82</b>	-0,24	-0,04
HCO3	-0,33	<b>-0,64</b>	0,39
SO4	<b>-0,95</b>	0,03	-0,07
Cl	<b>-0,92</b>	0,00	0,04
NO3	-0,01	<b>0,60</b>	<b>0,79</b>
CE	<b>-0,96</b>	0,06	0,02
TDS	<b>-0,99</b>	0,01	0,00
pH	0,32	<b>-0,61</b>	0,40

Selon la figure (VII.9), les individus sont disposés verticalement selon leur degré de pollution (nitrates croissants). Par ailleurs, si on considère ces individus selon leur agencement horizontal, on remarque que leur arrangement se fait selon leur minéralisation croissante.

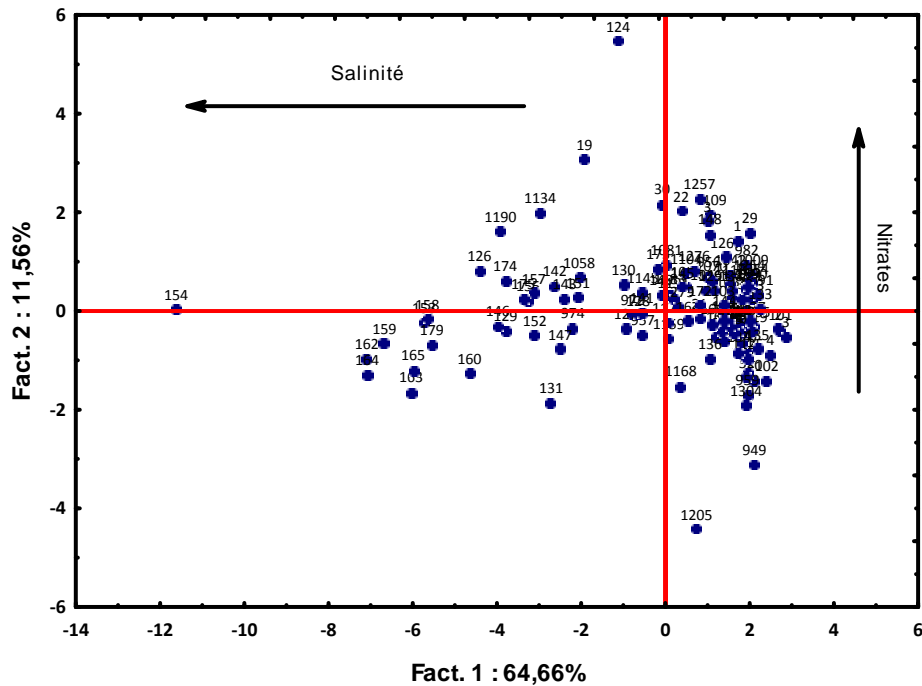


Fig. VII. 9 : Disposition des individus

### 3.1.4- CONCLUSION

D'une manière générale, la composition chimique des eaux est très variable. La dispersion des données est la plus faible en 2008. Les faibles fluctuations du pH en présence d'un milieu fortement évaporatoire suggèrent que la précipitation de carbonate règle le pH d'après le concept d'alcalinité résiduel, par voie de conséquence, les solutions évoluent vers la voie saline neutre. Ceci a été confirmé aussi par les corrélations et régressions trouvées indiquant une forte relation entre les différents paramètres chimiques des eaux et la salinité globale. Exception faite pour les nitrates et les bicarbonates.

L'ACP révèle une opposition entre éléments : Ceux dont l'évolution est liée à la CE, et qui évoluent dans le même sens, ce sont le TDS,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^-$ , l'alcalinité et les nitrates ne semblent pas contrôler l'évolution des eaux. Le premier axe représente la concentration globale des eaux qui est donc le processus principal expliquant l'évolution des concentrations des éléments dissous.

### 3.2- CARACTERISATION DES PARAMETRES HYDROCHIMIQUES

Au sud du Hodna, les eaux souterraines sont utilisées pour la consommation humaine pour l'agriculture et pour l'élevage. Les eaux de surfaces ne sont pas utilisées pour l'irrigation des cultures ; elles ont cependant une influence sur le sol et son développement par les éléments minéraux qu'elles transportent et le lessivage des sels. Dans cette partie, les points suivants seront développés pour la qualité de l'eau destinée à l'irrigation :

- La classification des eaux par la méthode de Riverside.
- La typologie des eaux par l'utilisation du triangle de Piper
- La qualité des eaux pour l'irrigation par la méthode FAO.

### 3.2.1- CLASSIFICATION DES EAUX

En se référant aux classes définies par l'US Salinity Laboratory Staff de Riverside (USSLS, 1954) et modifiées par Durand (1958), les eaux de surface et souterraines ont été classées sur la base du taux d'adsorption du sodium (SAR), et sur la conductivité électrique.

#### 3.2.1.1- Les eaux de surface

Les analyses d'eau de plusieurs Oueds du Hodna (Boyadgiev, 1975) et de la crue de l'Oued Defla de 2008 ont été reportées sur le diagramme de Riverside (fig. VII.10). Les eaux des Oueds Soubella, Magra et M'Cif ont été analysées deux fois : (1) cas où l'eau est la moins chargée et (2) cas où l'eau est chargée. Pour les eaux des Oueds Barika et Defla une seule analyse est présentée.

Les résultats obtenus montrent que les eaux des Oueds du Hodna sont caractérisées par un risque de salinisation faible à moyen et un risque d'alcalinisation faible.

#### 3.2.1.2- Les eaux souterraines

Les échantillons d'eau de la nappe phréatique (archive de 1973) sont très chargés, on constate que pour la conductivité électrique (CE), 25% des eaux appartiennent à la classe C3 (risque moyen), 32% à la classe C4 (risque élevé) et 43% à la classe C5 (risque très élevé) (fig. VII.11).

Quant au SAR les proportions par classe sont les suivantes (fig. VII.12) :

Classe S1 (risque faible) = 52%

Classe S2 (risque moyen) = 25%

Classe S3 (risque élevé) = 16%

Classe S4 (risqué très élevé) = 6%

Les classes C3S1 et C4S1 sont les plus représentatives (fig. VII.13).

D'une manière générale, les eaux de la nappe phréatique sont caractérisées par un risque de salinisation élevé à très élevé et par un risque d'alcalinisation faible pour la moitié des échantillons, mais qui devient de plus en plus contraignant avec l'augmentation des concentrations des solutions.

Pour les échantillons d'archive des eaux de forages (archive de 1996), on note que pour la conductivité électrique (CE), 42% des eaux appartiennent à la classe C3 (risque moyen), 50% à la classe C4 (risque élevé) et 8% seulement à la classe C5 (risque très élevé) (fig. VII.11).

Les pourcentages des classes du SAR se présentent de la manière suivante (Fig. VII.12) :

Classe S1 = 84%

Classe S2 = 12%

Classe S3 = 4%

Les classes C3S1 et C4S1 sont les plus représentatives (fig. VII.13).

On constate que la plupart des eaux de la nappe profonde sont caractérisées par un risque de salinisation moyen à élevé et par un risque d'alcalinisation généralement faible. Néanmoins, des risques d'alcalinisation exceptionnels ont été enregistrés.

Pour les échantillons de 2008, les résultats indiquent que pour la conductivité électrique (CE), 6% des eaux appartiennent à la classe C2 (risque faible) 67% à la classe C3 (risque moyen) qui est la plus représentée et 28% à la classe C4 (risque élevé) (fig. VII.11).

Le SAR est faible pour tout les échantillons, seule la classe S1 subsiste (fig. VII.12).

C'est la classe C3S1 qui est la plus représentative (fig. VII.13).

On constate que la plupart de ces eaux souterraines sont caractérisées par un risque moyen de salinisation et par un risque faible d'alcalinisation.

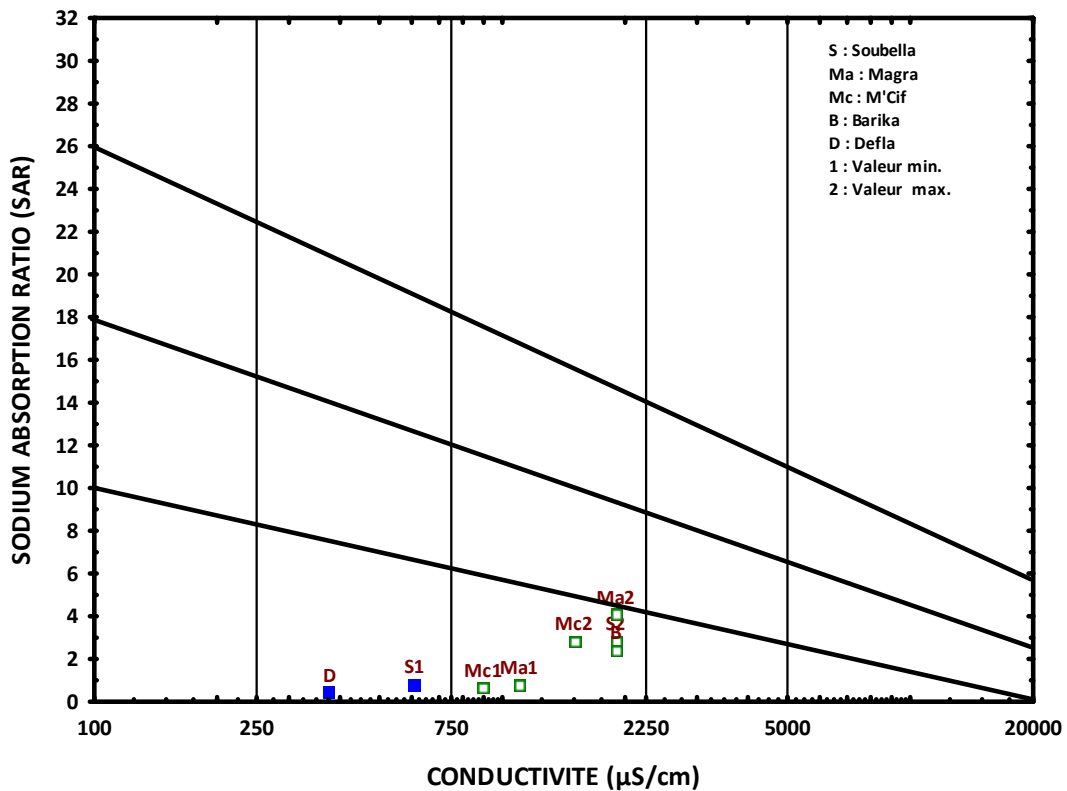
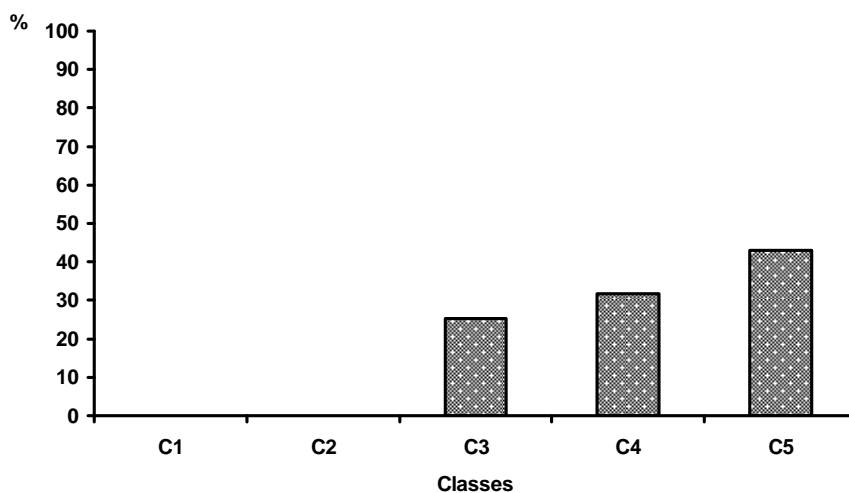
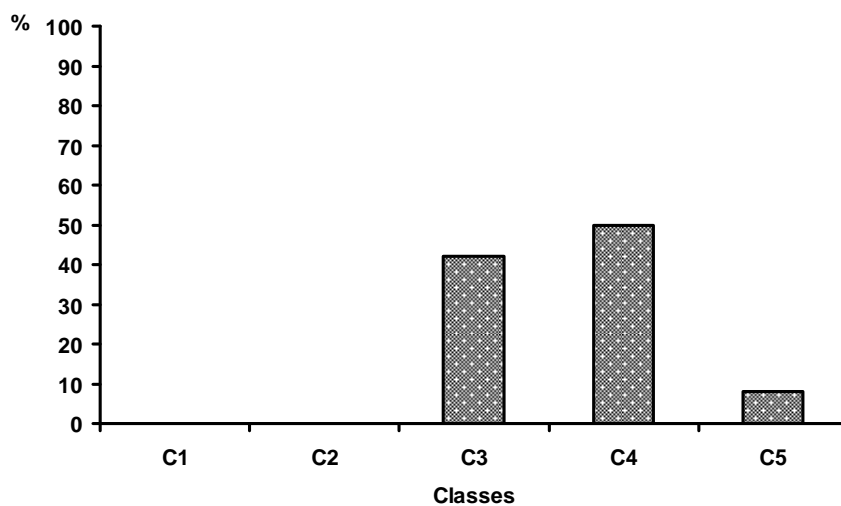


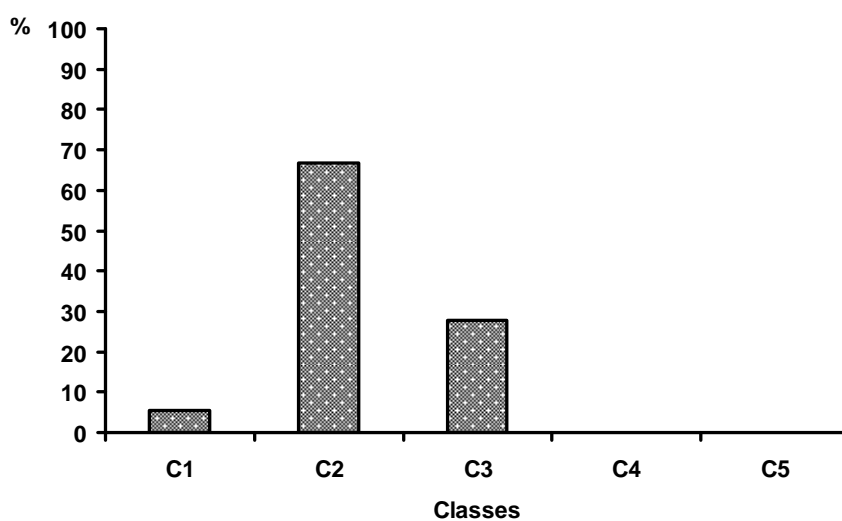
Fig. VII.10 : Les eaux de surface sur le diagramme de RIVERSIDE (1954) modifié par Durand (1958).



a) Eaux de la nappe phréatique au sud du Hodna (cas 1973)

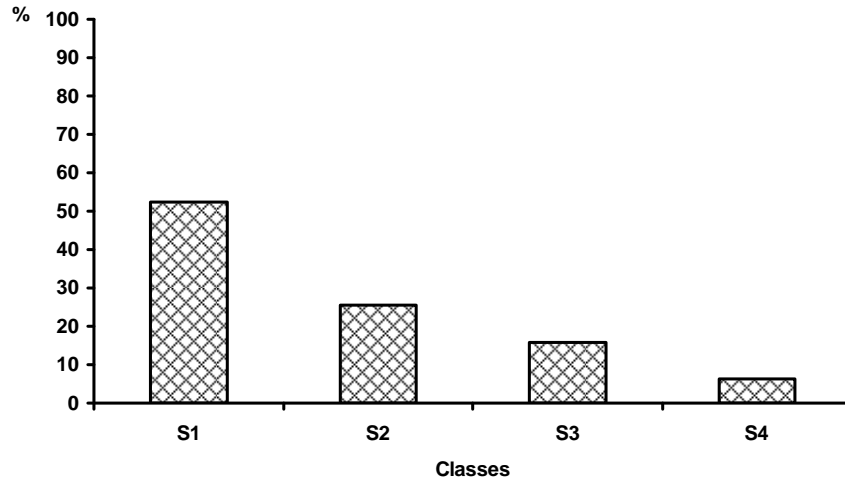


b) Eaux de forage au sud du Hodna (cas 1996)

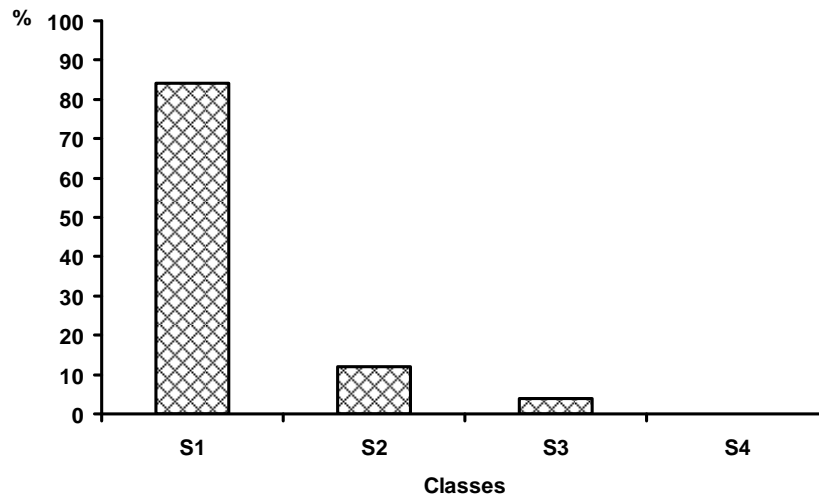


c) Eaux de forage au sud du Hodna (cas 2008)

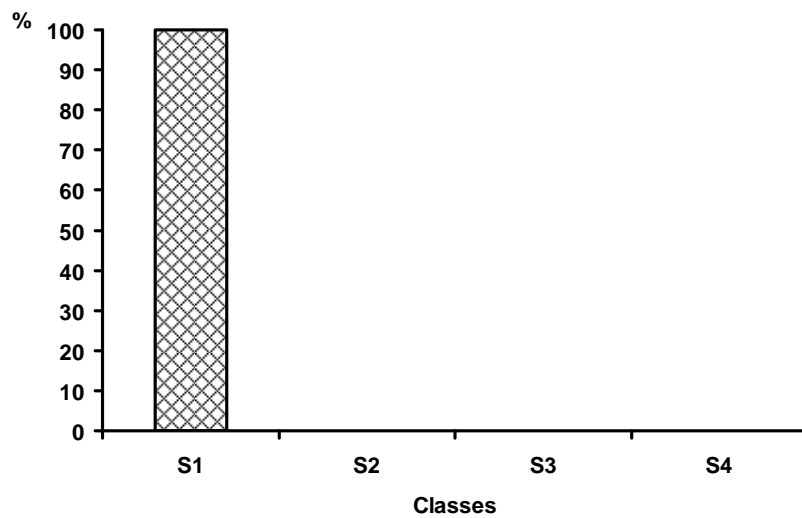
Fig. VII. 11 : Risque de salinisation des eaux selon les critères de Riverside (USSLS, 1954).



a) Eaux de nappe phréatique au sud du Hodna (cas 1973)



b) Eau de forage au sud du Hodna (cas 1996)



c) Eau de forage au sud du Hodna (cas 2008).

Fig. VII.12 : Risque d'alcalinisation des eaux selon les critères de Riverside (USSLS, 1954).

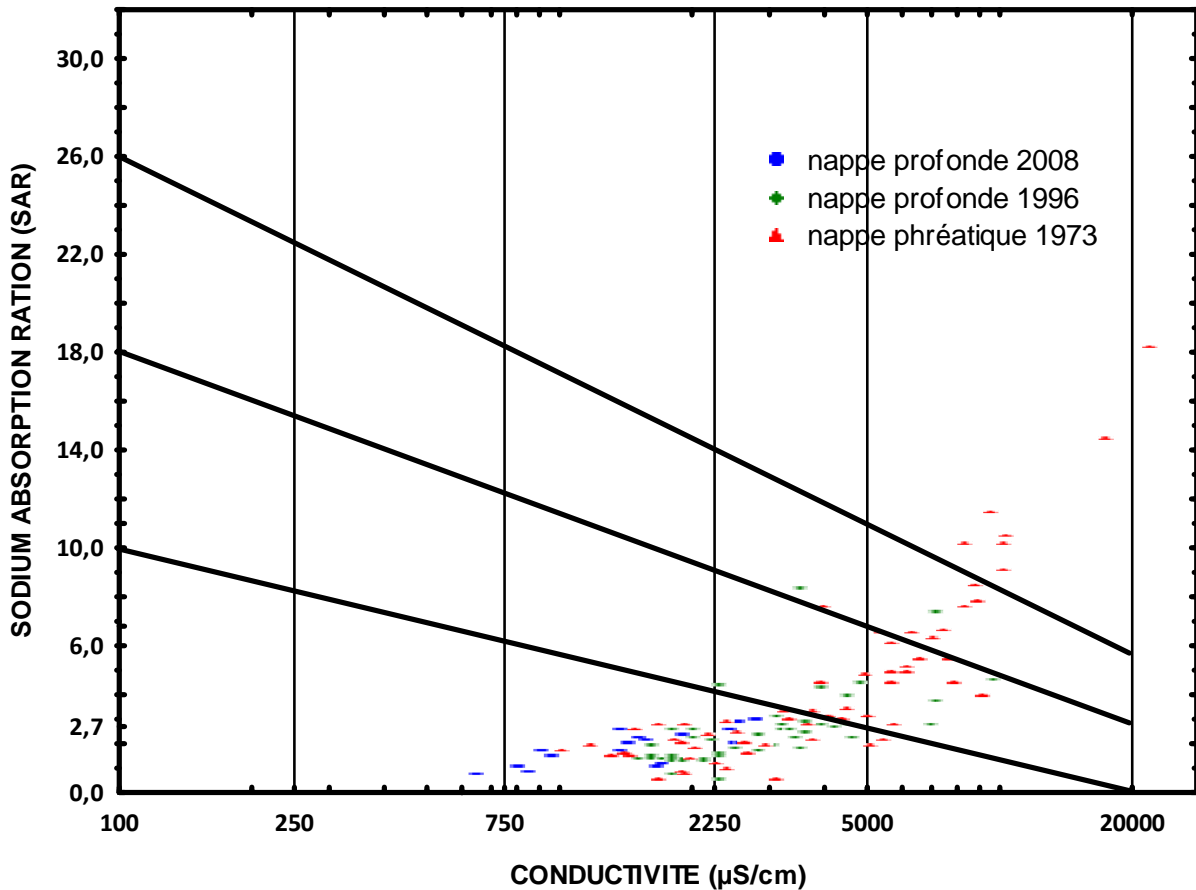


Fig. VII. 13 : Les eaux souterraines sur le diagramme de RIVERSIDE (1954) modifié par Durand (1958).

### 3.2.2- FACIES CHIMIQUE DES EAUX

Les données analytiques ont été portées sur le diagramme de Piper. Ces diagrammes établis par classe de conductivité électrique permettent de situer les faciès géochimiques des eaux souterraines du sud du Hodna. La représentation des eaux montre les faits suivants :

➤ Les 18 échantillons de la nappe profonde (2008), correspondant aux classes de conductivité C2 + C3 et C4, ont été placés sur le diagramme de la figure (VII.14). Le nuage de points des deux triangles fait état d'eaux sulfatées ou chlorurées calciques. Les points du losange montrent une faible dispersion quelque soit la classe de salinité.

➤ Les 50 échantillons de la nappe profonde (1996), correspondant aux classes de conductivité C3 + C4 et C5, ont été reportés sur le diagramme (fig. VII.15). Le nuage des points des deux triangles montre des eaux sulfatées ou chlorurées mixtes. Compte tenu de la concentration des eaux, les points du losange montrent une dispersion visible par rapport à ceux de 2008.

➤ Les 63 échantillons de la nappe phréatique (1973), présentant des classes de conductivité allant C3, C4 à C5 (voir même un échantillon hors échelle avec la classe C6), ont été projeté sur le diagramme de Piper des eaux (fig. VII.16). Le nuage de points des deux

triangles fait état d'eaux sulfatées ou chlorurées mixtes. Les points du losange montrent une dispersion appréciable du faite de la forte salinité des eaux de cette nappe.

Ces résultats indiquent d'une part l'absence de faciès bicarbonaté, ceci est rassurant, en ce qui concerne cette source hydrique, car les problèmes liés à l'alcalinisation des sols sont toujours plus graves et plus difficiles à combattre que ceux liées à la salinisation, et d'autre part, que la concentration des eaux engendre l'évolution du faciès chimique du sulfaté ou chloruré calcique vers le sulfaté ou chloruré mixte. Ceci rend compte de la voie d'évolution géochimique dominante des eaux souterraines du sud du Hodna, la voie saline neutre.

Sur la figure (VII.17) sont reportés les analyses d'eau des Oueds du Hodna. Globalement, le triangle de Piper indique un faciès sulfaté ou carbonaté calcique.

Les points du losange sont dispersés. Les eaux présentant un faciès bicarbonaté sont ceux de la zone sud du Hodna (M'Cif(1) et Oued Defla).

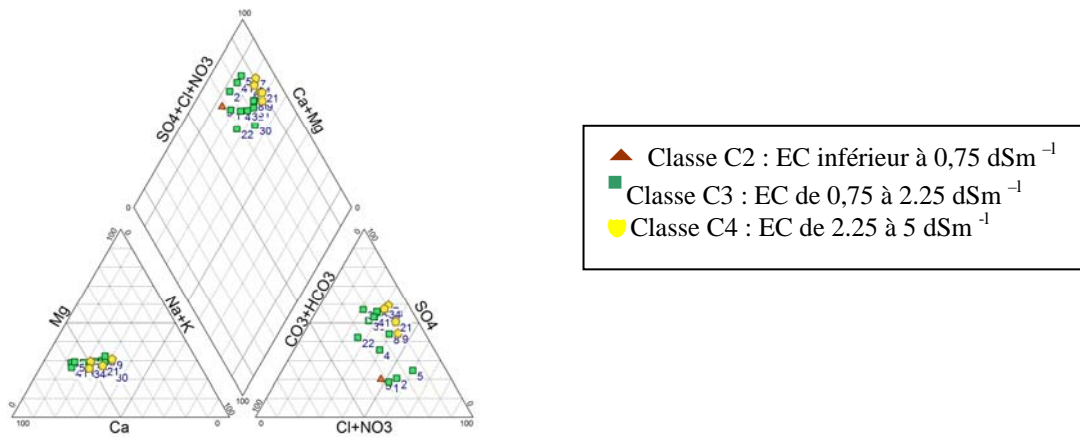


Fig. VII. 14 : Eaux de la nappe profonde (2008) sur diagramme de PIPER. Observations par classe de conductivité électrique de Riverside.

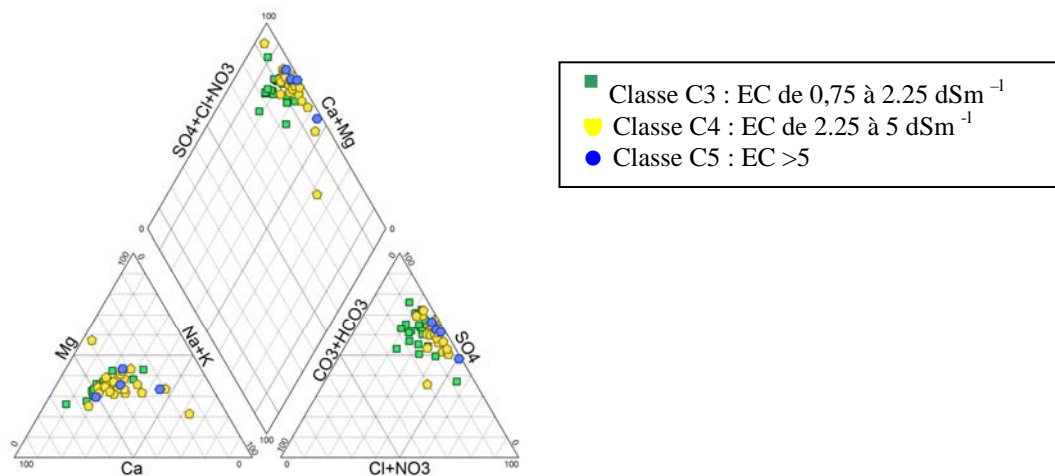


Fig. VII. 15 : Eaux de la nappe profonde (1996) sur diagramme de PIPER. Observations par classe de conductivité électrique de Riverside.



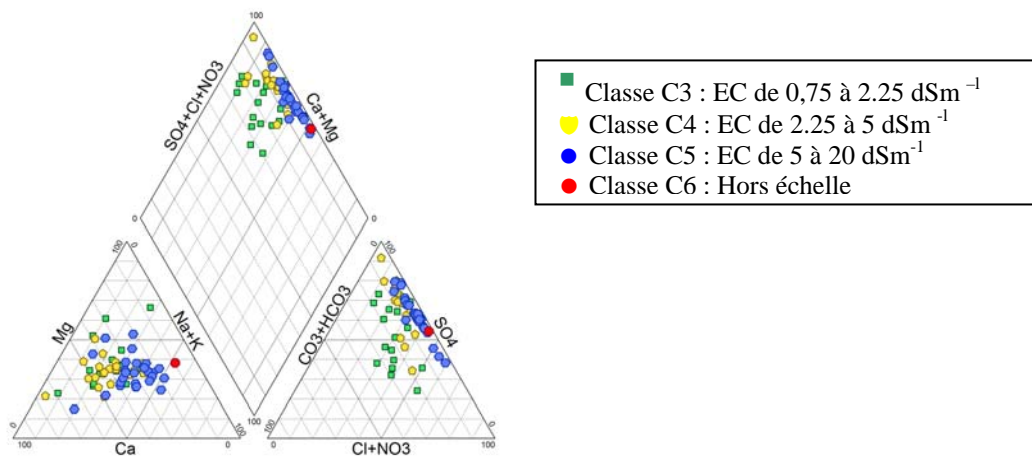


Fig. VII. 16 : Eaux de la nappe phréatique (1973) sur diagramme de PIPER. Observations par classe de conductivité électrique de Riverside.

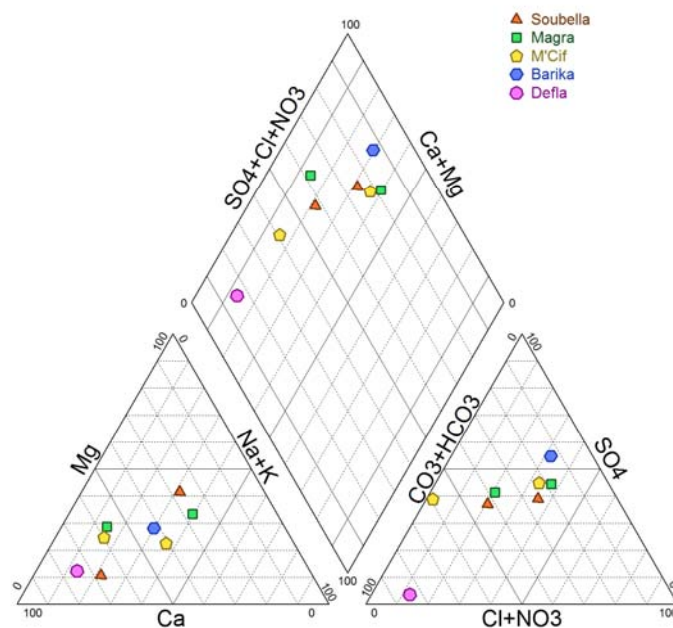


Fig. VII. 17 : Eaux des Oueds du Hodna sur diagramme de PIPER.

### 3.2.3- LA QUALITE DES EAUX D'IRRIGATION

L'utilisation des directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation (FAO, 1988), permet de classer les facteurs limitants en irrigation (Tableau VII.7). A travers ces résultats, on peut faire les remarques suivantes :

Le seuil de salinité pour l'usage de l'eau en agriculture est estimé par la valeur 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 25 C° (FAO, 1988). En 1996, 42 % d'échantillons d'eau de la nappe profonde ont montré des valeurs élevées contre 63 % des eaux de puits de la nappe phréatique. La salinité

de la nappe profonde est acceptable en 2008. Les concentrations en Cl dépassent le seuil de 10 mmole/L dans 63 % d'échantillons de la nappe phréatique. Ces valeurs excessives semblent être responsables de bas rendements en céréales (Mimoun 1995) au moment où les puits sont utilisés pour l'irrigation. La contamination des eaux souterraines par les nitrates se manifeste dans les deux nappes.

Ces résultats permettent de classer par ordre d'importance les paramètres limitants en irrigation définis d'après les directives de la FAO (1988). On a par ordre d'importance décroissant :

La nappe phréatique (1973) : NO<sub>3</sub>->CE>Cl->Na

La nappe profonde (1996) : NO<sub>3</sub>->CE>Cl-

La nappe profonde (2008) : NO<sub>3</sub>->Cl-

Ainsi, il est surtout à craindre actuellement, pour l'irrigation avec les eaux souterraines des forages, une augmentation des problèmes de contamination par les nitrates que celui de la salinité.

**Tableau VII.7** : Facteurs limitants en irrigation dans les eaux étudiées

Facteurs limitants et unités	Valeurs limites	Restriction pour l'irrigation	Nappe phréatique (archive 1973)		Nappe profonde (archive 1996)		Nappe profonde (analyses de 2008)	
			nombre	%	nombre	%	nombre	%
<b>Salinité</b> (influe sur l'eau disponible pour la plante)								
Conductivité électrique (mS/cm à 25 °C)	<0,7	Aucune	0	0	0	0	1	5,56
	0,7 à 3	Légère à modérée	23	36,5	28	56	17	94,44
	>3,0	Forte	40	63,49	22	44	0	0
<b>Infiltration</b> (influe sur la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol)								
SAR	(utiliser à la fois CE <sub>w</sub> et SAR)*	Aucune	63	100	50	100	17	94,44
		Légère à modérée	0	0	0	0	1	5,56
		Forte	0	0	0	0	0	0
<b>Toxicité de certains ions</b> (affectent les cultures sensibles)								
Cl (mé/L) Irrigation de surface	<4	Aucune	10	15,87	11	22	7	38,89
	4 à 10	Légère à modérée	18	28,57	19	38	9	50
	>10	Forte	35	55,56	20	40	2	11,11
Na (mé/L) Irrigation de surface	En fonction du SAR *	Aucune	36	57,14	42	84	18	100
		Légère à modérée	23	36,51	8	16	0	0
		Forte	4	6,35	0	0	0	0
<b>Effets divers</b> (affecte les cultures sensibles)								
HCO <sub>3</sub> (mé/L) Irrigation par aspersion	<1,5	Aucune	5	7,94	20	40	0	0
	1,5 à 8,5	Légère à modérée	58	92,06	30	60	18	100
	>8,5	Forte	0	0	0	0	0	0
Azote (NO <sub>3</sub> -N)	<5	Aucune	6	10,71	0	0	0	0
	5 à 30	Légère à modérée	10	17,86	11	22	1	5,56
	>30	Forte	40	71,43	39	78	17	94,44
pH	6,5-8,4	Pas de problème	/	/	50	100	18	100
	<6,5 et >8,4	problème			0	0	0	0

\* voir tableau complet annexe I

### 3.2.4- CONCLUSION

Dans cette partie, nous avons utilisé les représentations de Riverside et de Piper pour identifier les différentes populations d'eau selon leurs caractéristiques physico-chimiques. Il ressort des résultats précédant ce qui suit :

D'après les critères de Riverside (USSLS, 1954), on constate que les eaux de la nappe phréatique présentent un risque de salinisation élevé à très élevé (classes C3S1 et C4S1) et un risque d'alcalinisation faible pour la moitié des échantillons mais qui devient gênant pour le

reste. Les eaux de la nappe profonde (archive de 1996) sont caractérisés par un risque de salinisation moyen à élevé et par un risque d'alcalinisation généralement faible avec des cas d'alcalinisation exceptionnels. Les eaux de la nappe profonde (cas de 2008) montrent un risque moyen de salinisation et un risque faible d'alcalinisation. Ces résultats révèlent une amélioration de la qualité des eaux utilisées en agriculture au sud du Hodna depuis une dizaine d'années. Ces changements sont en relation avec l'exploitation de la nappe profonde aux dépens des eaux de la nappe phréatique suite aux aides de l'Etat notamment dans le cadre du PNDA.

Ces résultats mettent en évidence deux points importants :

- Une salinisation importante de l'eau de la nappe phréatique ayant contribué, par son utilisation en irrigation, à une salinisation secondaire (Mimoune, 1995). Des parcelles ont été délaissées par leurs propriétaires suite à une dégradation des terres par salinisation.

- Les eaux de la nappe profonde sont habituellement peu minéralisées (FAO, 1970). Les valeurs de salinité relativement élevées enregistrées en 1996 semblent être liées à la profondeur de certains forages qui n'atteignent pas ou n'explorent pas profondément la nappe profonde ou à des problèmes purement techniques lors de la réalisation des forages par une mauvaise cimentation entre le tubage et l'aquifère. En effet, les données hydrogéologiques de la zone (FAO, 1970) révèle que la limite de la nappe phréatique et de la nappe profonde reste toujours imprécise. Car, en réalité, il n'y a pas d'horizon continu imperméable séparant les deux nappes. Ce sont des lentilles plus ou moins imperméables et discontinues qui comblent la zone limitrophe des deux nappes. La possibilité de communication entre les deux nappes pourrait être donc une voie de contamination potentielle.

L'utilisation du diagramme de Riverside (USSLS, 1954) traduit, en effet, les risques de salinisation et d'alcalinisation des sols en fonction de la composition chimique des eaux d'irrigation. Malheureusement cette méthode est statique et ne tient pas compte de l'évolution de la composition chimique des eaux lorsque celle-ci se concentre par évaporation (Vallès et al, 1989). Ceci sera développé plus loin.

L'utilisation des directives pour l'interprétation de l'eau en irrigation (FAO, 1988) révèle d'une part une amélioration de la qualité de l'eau utilisée en irrigation du point de vue salinité et d'autre part une dégradation des eaux souterraines par la pollution nitrique. Ce problème sera abordé dans la suite du travail.

Enfin, le report des données hydrochimiques sur le triangle de Piper établi selon les classes de conductivité électrique indique un faciès chloruré sulfaté calcique qui évolue par concentration à un faciès chloruré sulfaté mixte. Ceci rend compte de la voie neutre de salinité comme cela est toujours avancé dans les pays du Maghreb (Vallès, 1987 ; Halitim et Daoud, 1996 ; Abdesselam, 1998 ; Hamdi Aissa, 2001).

### 3.3- EVOLUTION GEOCHIMIQUE DES EAUX

Cette partie est consacrée à l'étude des variations hydrochimiques observées dans les eaux souterraines. A la lumière des observations présentées dans les paragraphes précédents nous essayerons de mieux comprendre le comportement des eaux souterraines. Le travail consiste à présenter les grandes tendances décelées en s'appuyant sur trois approches méthodologiques :

- l'étude du comportement des ions en solution en fonction d'un facteur de concentration,
- l'étude de l'équilibre des eaux par rapport à deux minéraux qui semblent marquer le comportement géochimique des eaux (la calcite et le gypse),
- l'étude de l'alcalinité résiduelle généralisée et son intérêt comme critère pour juger la qualité des eaux d'irrigation.

#### 3.3.1- Choix d'un traceur chimique

Le traceur chimique est un outil qui doit suivre de manière proportionnelle le phénomène étudié. Dans nos échantillons, on a constaté que la plupart des éléments solubles évoluent dans le même sens que la CE. Les sulfates et le magnésium n'ont pas été retenus dans le choix du traceur chimique car ils participent dans la précipitation des sels peu solubles (carbonate de magnésium, gypse). Les ions chlorures traduisent généralement de manière proportionnelle les phénomènes de concentration des solutions qui engendrent les problèmes de salinisation des sols. Cet ion très soluble entre rarement dans des précipitations salines, la saturation par rapport à la halite par exemple n'est atteinte qu'à des concentrations ioniques très élevées. Il n'intervient pas non plus dans les phénomènes de régulation biologique ou géochimique à l'inverse du calcium et du sodium.

Le chlorure peut donc être considéré comme un élément conservateur et servir de traceur lors des phénomènes évaporatoires. Cependant, à faibles concentration (inférieure à 5mg/L), c'est le sodium qui est préféré comme traceur ; les dosages à faibles teneurs de ce dernier étant plus précis (Laraque, 1991).

La figure (VII.18) montre les compositions chimiques des différents stades de concentration atteints par les eaux, exprimées en concentration ionique totale, classées arbitrairement en fonction du facteur de concentration chlorure. Les concentrations des différents ions ont été reportées en fonction des teneurs en chlorures des eaux sur le diagramme log (molalité) versus log (facteur de concentration). Les concentrations des différents éléments forment des nuages de points faiblement dispersés qui définissent une évolution en fonction du facteur de concentration.

#### **On peut tirer de la lecture de ce diagramme que :**

Les solutions se concentrent jusqu'à un facteur de concentration  $FC=79$  correspondant à  $\log FC=1,9$ . À ce stade de concentration les ions sodium, magnésium et calcium, en ce qui concerne les cations, évoluent proportionnellement au facteur de concentration des solutions notamment pour les deux premiers cations. Le potassium augmente dans le même sens mais le nuage de points est plus dispersé.

Les sulfates évoluent proportionnellement au facteur de concentration des solutions tandis que l'alcalinité carbonatée et les nitrates ne suivent pas de la même manière le FC.

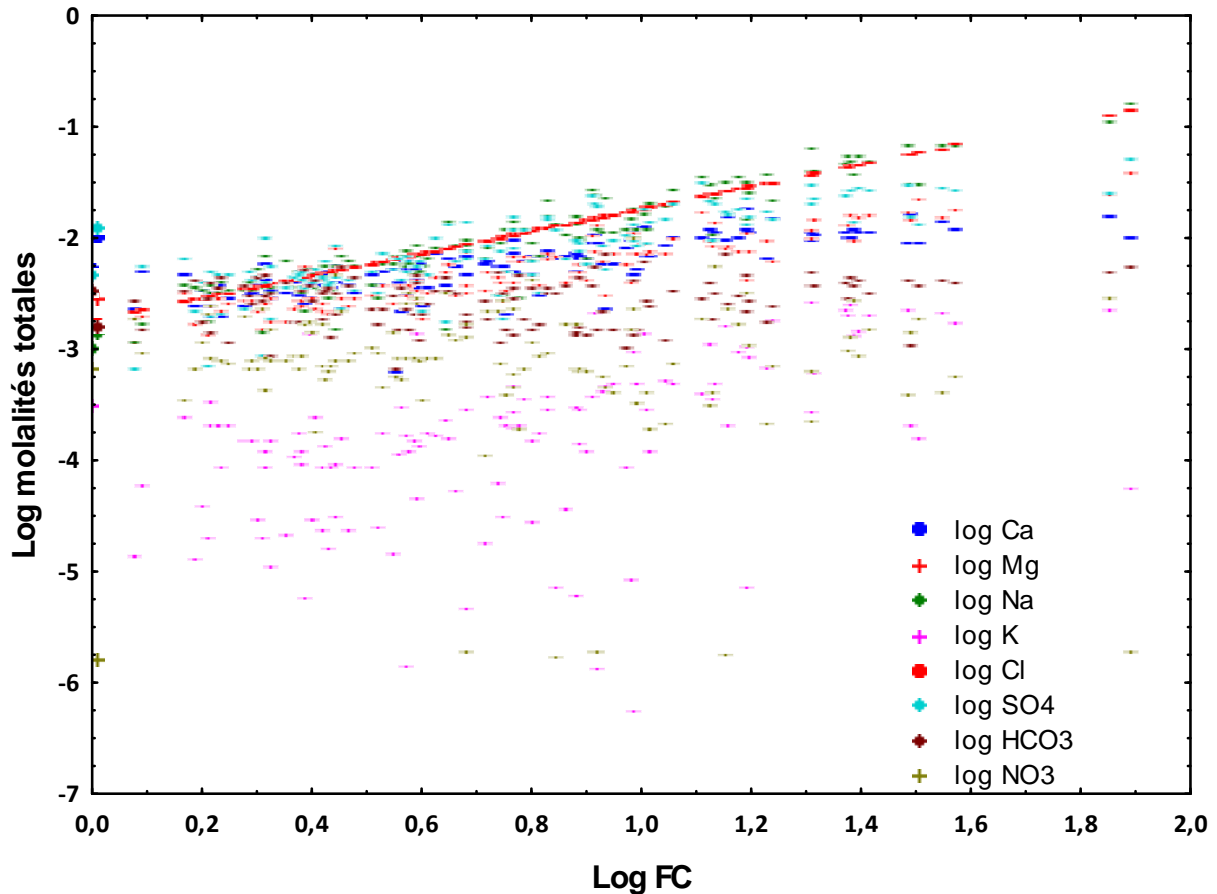


Fig. VII.18 : Composition chimique des eaux souterraines en fonction du facteur de concentration chlorure. Les concentrations ioniques sont exprimées en mol/L

L'observation de la figure (VII.19) montre l'évolution du calcium des bicarbonates et des sulfates en fonction du facteur de concentration des eaux. Ces ions composent les sels peu solubles (calcite et gypse) qui précipitent les premiers. Le nuage de point ne semble pas évolué d'une manière très nette avec le facteur de concentration ce qui se traduit par des contrôles en solution.

Au début de concentration ( $\log FC < 0,3$ ) les solutions sont déjà en équilibre avec la calcite. Au fur et à mesure que les solutions se concentrent, les ions calcium et l'alcalinité seront soustraits à la solution suite à leur participation à la précipitation de la calcite. A des  $FC > 0,5$  la molalité en  $SO_4^{--}$  plus alcalinité devient supérieure à celle du  $Ca^{++}$ . L'alcalinité calcite plus gypse est positive pour l'ensemble des échantillons d'eau. Lorsque les solutions se concentrent d'avantage, le gypse se précipite, la molalité en  $SO_4^{--}$  augmente de même que l'alcalinité alors que la molalité en  $Ca^{++}$  évolue moins vite et se stabilise. La molalité en  $SO_4^{--}$  augmente moins vite que celle du  $Cl^-$  et l'écart molal croit entre  $SO_4^{--}$  et  $Ca^{++}$  tant que les eaux se concentrent.

Certains éléments présents dans les solutions sont contrôlés par des phénomènes de précipitation (notamment calcite et gypse). Il faut tester l'état de saturation par rapport aux minéraux susceptible de précipiter. D'autres éléments peuvent subir un contrôle en solution sous l'effet des phénomènes d'échange avec le complexe adsorbant du sol. Néanmoins, ces derniers peuvent être négligés dans un tel milieu où la fraction grossière du sol domine.

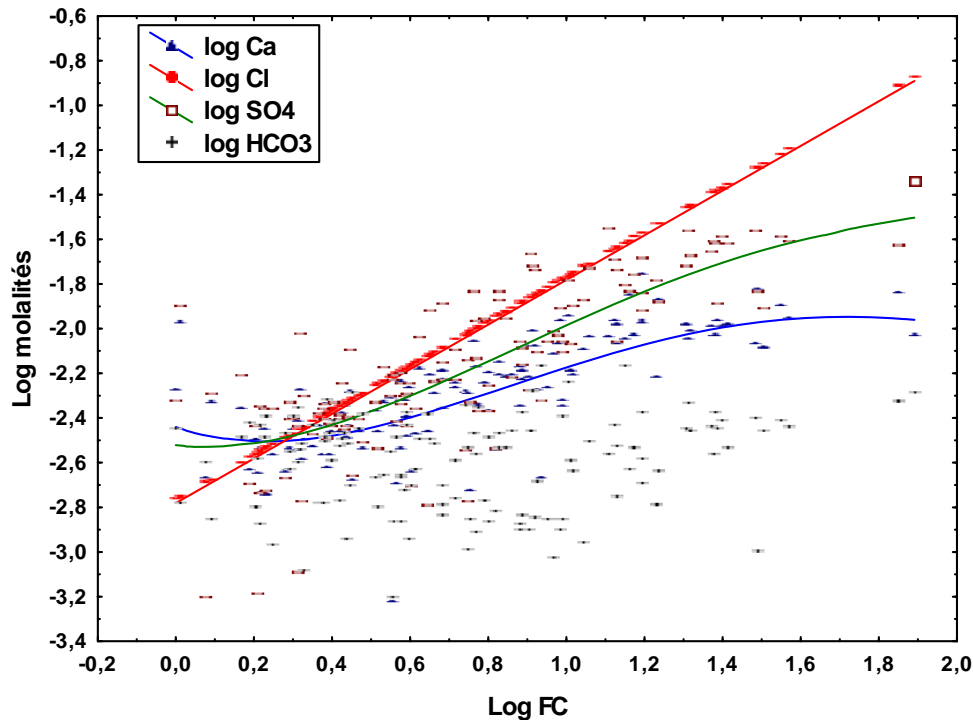


Fig. VII.19 : Evolution des molalités en calcium, sulfates et alcalinité en fonction du facteur de concentration chlorure.

### 3.3.2- ETAT D'EQUILIBRES DES EAUX

#### 3.3.2.1- CALCUL D'EQUILIBRES MINERAUX-SOLUTIONS

Le calcul des concentrations et des activités des espèces a été réalisé par le logiciel PHREEQC V1.2.3 (Parkhurst et Appelo, 1999).

Les données requises pour l'exécution du calcul sont :

**La température** : elle est disponible pour les échantillons d'eau de 2008 et la plupart des échantillons d'eau de 1973. On a utilisé la moyenne lorsque cette donnée manque. Pour les échantillons d'archive de la nappe profonde (1996), la température n'a pas été relevée. La température moyenne de la même nappe, mesurée en 2008, a été utilisée pour les calculs.

**La densité** : lorsqu'elle n'est pas indiquée, le logiciel l'estime égale à 1. C'est le cas de tous les échantillons d'eau.

**Les concentrations initiales des ions solubles**, il s'agit de  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{NO}_3^-$ .

**Le pH** : il est mesuré sur le terrain. Toutefois, le pH des données d'archive de la nappe phréatique (1973) manque. Il a été calculé à partir de la  $\text{pCO}_2$  et de la concentration en  $\text{HCO}_3^-$  par la formule :

$$\text{pH} = \log(\text{HCO}_3^-) - \log \text{pCO}_2 + 7,81 \text{ où}$$

$(\text{HCO}_3^-)$  représente l'activité de l'ion bicarbonate et  $\text{CO}_2(\text{g})$  est exprimé en atm. La  $\text{pCO}_2$  est calculé par la même formule en utilisant les résultats analytiques de 2008 d'une eau de la nappe phréatique.

**L'alcalinité** : les  $\text{HCO}_3^-$  ont été mesurés au laboratoire. Dans le cas des eaux étudiées, le pH est  $< 8$ . Dans cette situation, les espèces carbonatées sont représentées par  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{H}_2\text{CO}_3^0$  (BOURRIE, 1976). Les bicarbonates représentent ainsi l'alcalinité totale.

### 3.3.2.2- SATURATION DES EAUX

#### a) Saturation par rapport à la calcite

La figure (VII.20a, c, e) correspond à l'indice de saturation des eaux de la nappe profonde (2008 et 1996) et de la nappe phréatique (1973) respectivement. On peut faire les commentaires suivants :

Les eaux de la nappe profonde de 2008 sont saturés par rapport à la calcite (indice de saturation  $>0$ ), contrairement les eaux de la nappe phréatique très chargées sont dans leur majorité sous saturée par rapport à la calcite. Les eaux de la nappe profonde de 1996 sont intermédiaires. Donc les eaux les moins chargées sont les plus saturées par rapport à ce minéral.

#### b) Saturation par rapport au gypse

La figure (VII.20b, d, f) correspond à l'indice de saturation des eaux de la nappe profonde (2008 et 1996) et de la nappe phréatique (1973) respectivement. On peut faire les remarques suivantes :

Les eaux de la nappe profonde de 2008 sont sous saturé par rapport au gypse (indice de saturation  $<0$ ), contrairement les eaux de la nappe phréatique très chargées sont, pour un bon nombre d'échantillons, saturées par rapport au gypse. Les eaux de la nappe profonde de 1996 sont intermédiaires. Donc les eaux les plus chargées sont les plus saturées.

La figure VII.21, représentant l'évolution de l'indice de saturation de la calcite et du gypse par rapport au FC, confirme les observations déjà faites. C'est-à-dire que la calcite se précipite au départ et le gypse se dépose par la suite à des FC plus élevés.

### 3.3.3- UTILISATION D'UNE APPROCHE DYNAMIQUE : L'ALCALINITE RESIDUELLE GENERALISEE

Dans le but de mieux caractériser la qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation dans le sud du Hodna, les deux grands critères suivants ont été utilisés :

La salinité globale (Classes de conductivité électrique de RIVERSIDE : USSLS, 1954).

La famille d'évolution géochimique (basée sur la notion d'alcalinité résiduelle généralisée proposée par (VALLES et al., 1991).

On a classé dans le tableau (VII.8) la totalité des observations sur les eaux souterraines, en fonction des deux critères ci-dessus mentionnés. Nous pouvons constater que :

- dans les eaux du sud du Hodna, l'alcalinité est toujours positive et la situation où R1 est négative est la règle. Cette situation indique la dominance très marquée du groupe salin quelque soit la classe de conductivité électrique.

- dans la totalité des eaux, R2 est positive quelque soit la classe de conductivité électrique. Par voie de conséquence, c'est le faciès FSSU qui marque l'évolution des eaux.

- la situation où R2 est négative est minoritaire et concerne particulièrement les classes de conductivité C2 et C3.

- l'éventualité où R1 est positive est rare avec R1 proche de zéro (un échantillon avec  $R1=1,78$  et un autre échantillon avec  $R1=0,58$ ) ce qui laisse supposer une surestimation des bicarbonates lors des analyses des eaux.

- ces résultats révèlent que la diversité de familles est très réduite dans les eaux du sud du Hodna.

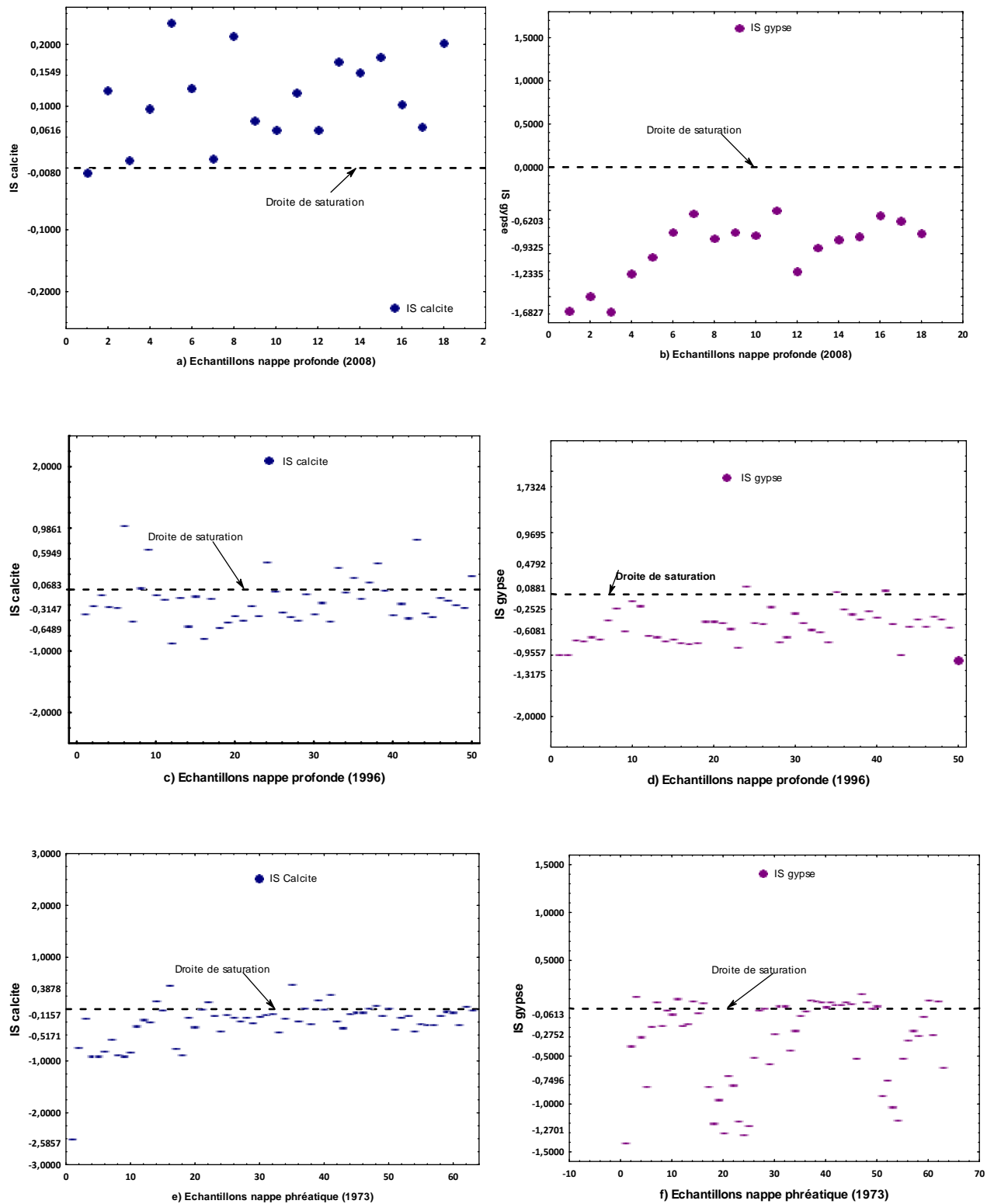


Fig. VII.20 : Etat de saturation des eaux par rapport à la calcite et du gypse

La figure VII.22 illustre la différenciation des groupes salin et alcalin en fonction du paramètre géochimique R1 (soit l'alcalinité résiduelle - calcite) et de la conductivité électrique (CE).



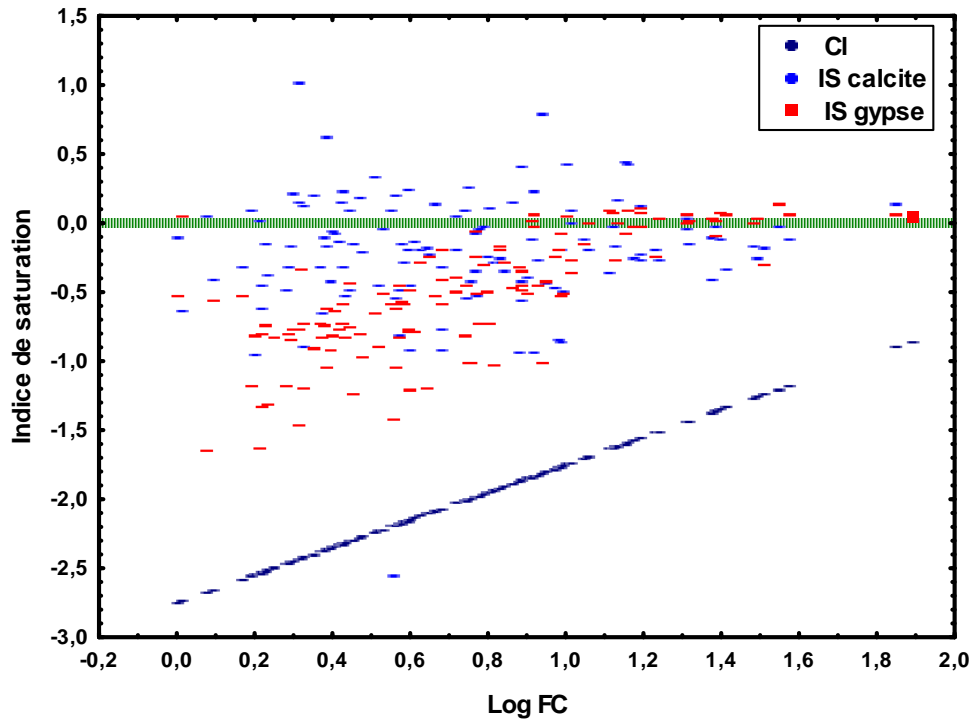


Fig. VII.21 : Evolution des indices de saturation de la calcite et du gypse en fonction du facteur de concentration chlorure.

Nous constatons que plus les eaux sont chargées en sels et plus nettement elles se séparent vers le groupe salin.

Si l'on analyse maintenant les observations des eaux du groupe salin (fig. VII.23) et leur séparation en fonction du paramètre géochimique  $R_2$  (soit l'alcalinité résiduelle - calcite + gypse) et de la conductivité électrique, on constate que les eaux se différencient d'autant plus nettement qu'elles sont concentrées en sels. Les eaux de la famille saline sulfatée (FSSU) sont très dominantes au sein du groupe salin. Ceci veut dire qu'au fur et à mesure que les eaux se concentrent, le rapport  $Ca/SO_4$  diminue.

Tableau VII.8 : Classement des eaux souterraines, en fonction des critères de salinité globale (USSLS, 1954) et de la famille d'évolution géochimique (VALLES et al., 1991).

Classes EC	Alc>0				Total d'obs.
	$R_1 < 0$ groupe salin		$R_1 > 0$ Groupe alcalin		
	$R_2 < 0$ FSCA	$R_2 > 0$ FSSU	$R_3 < 0$ FASU	$R_3 > 0$ FACO	
C2	1	0	0	0	1
C3	6	43	0	1	50
C4	0	48	0	1	49
C5	1	29	0	0	30
C6	0	1	0	0	1
Total d'obs.	8	123	0	2	131
<b>Notes</b> FSCA : famille saline calcique FSSU : famille saline sulfatée Obs. =Observations FASU : famille alcaline sulfatée FACO : famille alcaline carbonatée Alc. Alcalinité. rés : résiduelle $R_1$ =Alc rés. Calcite $R_2$ =Alc rés. Calcite +gypse $R_3$ = Na-SO4					

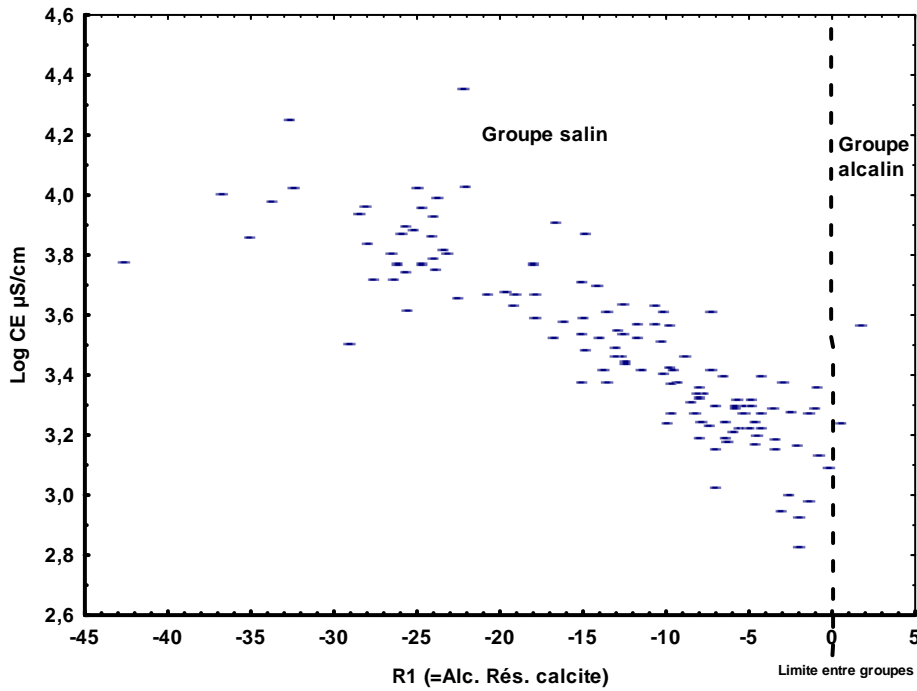


Fig. VII. 22 : Différenciation des groupes salin et alcalin, au sein des eaux à alcalinité positive, en fonction du paramètre géochimique R1 (= ALC rés. calcite) et de la salinité totale (conductivité électrique) dans les eaux souterraines du sud du Hodna.

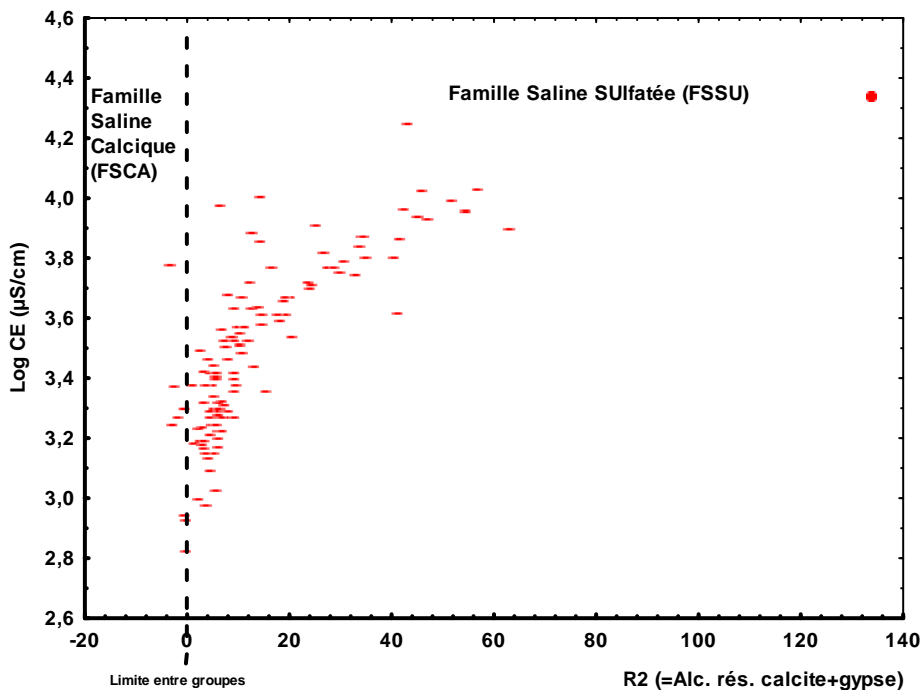


Fig. VII.23 : Différenciation des familles saline calcique et saline sulfatée, au sein du groupe d'évolution géochimique saline, en fonction du paramètre géochimique R2 (= ALC rés. calcite + gypse) et de la salinité totale (conductivité électrique) dans les eaux souterraines du sud du Hodna.

### 3.3.4- CONCLUSION

Les résultats de l'évolution des eau par l'utilisation d'un traceur chimique (les chlorures) suggère un contrôle des eaux lors de la concentration par la précipitation de la calcite et du gypse.

L'étude de l'état de saturation des eaux montre que la saturation en calcite augmente dans les eaux les moins chargées et la saturation en gypse croit dans les eaux les plus chargées. Ceci implique que l'utilisation des eaux de la nappe profonde à la place des eaux de la nappe phréatique pour l'irrigation au sud du Hodna pourrait avoir des conséquences directes sur le sol et son évolution. Si la présence de la nappe phréatique a engendré la formation de la croûte gypseuse de nappe, l'utilisation des eaux de la nappe profonde moins chargée et saturée par rapport à la calcite aura des répercussions sur la pédogenèse dans cette région.

L'application de l'alcalinité résiduelle généralisée pour l'étude de la famille d'évolution géochimique (Vallès et al., 1991) révèle que 94% des échantillons d'eau évoluent vers la famille saline sulfatée (FSSU). La diversité des familles est alors bien réduite et la dominante du groupe salin devient très nette. C'est ainsi que la famille saline sulfatée (FSSU) domine l'ensemble des eaux souterraines étudiées. Plus les eaux sont concentrées et plus nettement elles évoluent vers cette famille qui traduit les caractéristiques climatiques (aridité) et géologiques (richesse en formations calcaires et gypseuses) de la région.

Ces résultats confirment les conclusions déjà avancées sur la voie d'évolution des eaux dans ce milieu : la voie saline neutre.

### 3.4- LA POLLUTION NITRIQUE

Dans cette partie sera abordée la contamination par les nitrates des eaux souterraines.

Ce travail a fait l'objet d'un article dans la revue **environmental earth sciences** (annexe 6).

#### 3.4.1- Introduction

Dans les milieux ruraux, la gestion des ressources en eau nécessite la prise en compte des activités agricoles qui s'y développent. L'intensification de la mise en valeur agricole des sols, dans les périmètres irrigués, s'accompagne le plus souvent d'une irrigation non maîtrisée et d'une fertilisation minérale excessive pouvant avoir un impact négatif sur la qualité des ressources en eaux qui se traduit essentiellement par la pollution nitrique diffuse des eaux souterraines (Aghzar et al., 2002 ; Berdai et al., 2004 ; Idrissi alami et al., 2007). La nature du climat et la sécheresse, par les faibles apports d'eau et un pouvoir évaporant élevé, accentuent la détérioration de la qualité des ressources en eau et concentrent les espèces azotées dans les eaux. En outre, le développement de l'irrigation, s'il constitue un espoir pour les régions arides, se traduit souvent par une remontée du niveau de la nappe superficielle, par une augmentation de la salinité des sols (Daoud et Halitim, 1994 ; Mimoune, 1996 ; Djili et al., 2003) et une pollution des eaux souterraines (Rouabhia et al., 2004 ; Baali et al., 2007 ; Abdesselam et al., 2012).

La présence de nappes souterraines autour du Chott El-Hodna a permis l'extension des zones agricoles. Dans ce milieu, (mis à part l'épandage des crues au nord du Chott), les eaux souterraines constituent la seule source d'irrigation des cultures et de la consommation humaine.

#### 3.4.2- Effets d'une contamination par les nitrates pour les végétaux

L'azote est un nutriment indispensable à la croissance végétale. L'augmentation de la production végétale agricole passe par une fertilisation azotée, minérale ou organique. Les effluents d'élevage, riches en azote, sont utilisés en partie comme fertilisants et en partie épandus sur le sol pour en écouler les excédents. L'azote est absorbé par la majorité des plantes sous sa forme  $\text{NO}_3^-$ . Or dans le sol, s'il n'est pas rapidement prélevé par les racines,  $\text{NO}_3^-$  est facilement lessivé par les eaux qui s'infiltrent, d'où des pertes importantes de cet anion entraîné vers les eaux de nappe et le réseau hydrographique.

Si des quantités sont présentes ou appliquées en excès, les cultures, exploitées de façon habituelle, pourraient être perturbées en raison d'une stimulation excessive de la croissance, d'un retard dans la maturité ou d'une baisse de qualité des produits récoltés. L'azote contenu dans l'eau d'irrigation a pratiquement le même impact que celui appliqué au sol avec les fertilisants, et un excès causera les mêmes problèmes que les excédents d'engrais (FAO, 1988).

Selon Ayers et Westcot (FAO, 1988), les plantes sensibles seront affectées par des concentrations en azote supérieure à 5 mg/L. la plupart des autres cultures seront peu affectées tant que l'azote ne dépasse pas 30 mg/L. La maturité de fruits comme l'abricot, les agrumes et l'avocat peut être retardée ; les fruits peuvent, en outre, être de qualité moindre, réduisant ainsi la valeur commerciale et la durée de conservation des produits. Un excès de croissance végétative, chez de nombreuses céréales, produit des tiges faibles, incapables de supporter le poids des épis, provoquant une forte verse et des difficultés lors de la moisson. Les ruminants sont sensibles à l'azote et de fortes applications sur les pâturages, utilisés pour l'alimentation directe ou indirecte du bétail, peuvent apporter dans le fourrage des quantités excessives d'azote et nuire éventuellement à la santé animale. Le tableau (VII.9) présente les degrés de

restriction pour l'irrigation en fonction des teneurs en nitrates.

Tableau VII.9 : Directive pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation pour les nitrates (FAO, 1988)

	Unité	Restriction pour l'irrigation		
		Aucune	Légère à modéré	Forte
Azote (NO <sub>3</sub> -N)	mg/L	<5	5-30	>30

### 3.4.3- Effets d'une contamination par les nitrates pour la consommation humaine

Les eaux souterraines provenant des aquifères profonds et confinés sont habituellement saines sur le plan microbien et chimiquement stable en l'absence de contamination directe. Par contre, les aquifères peu profonds ou non confinés peuvent être contaminés par des rejets ou des suintements dus aux pratiques agricoles (agents pathogènes, nitrates ou pesticides, par exemple), aux installations d'assainissement ou aux réseaux d'égout présents sur le site (agents pathogènes et nitrates) et aux déchets industriels (OMS, 2004).

Les effets des nitrates sur la santé sont liés à leur transformation en nitrites et éventuellement en nitrosamines au niveau du tube digestif. Chez l'Homme, les nitrites sont responsables des risques de méthémoglobinémie aiguë (inhibition du transfert de l'oxygène vers les cellules) qui s'observe principalement chez le nourrisson. De plus, les composés N-nitrosés (nitrosamines et nitrosamides) sont des cancérigènes connus et des expérimentations par injection de nitrites et d'amines ont provoqués des cancers chez l'animal (Payment et Hartmann, 1998).

L'OMS recommande des teneurs en nitrates ne dépassant pas 50 mg/L dans les eaux potables (WHO, 2008).

### 3.4.5- Contamination des eaux souterraines du sud du Hodna par les nitrates

#### 3.4.5.1- Cas de la nappe phréatique

Les valeurs en nitrates trouvées dans les eaux souterraines sont élevées. Une classification de ces teneurs est adoptée et fondée sur quatre classes (Tableau VII.10).

La distribution des 56 puits en fonction des classes de concentration en nitrates des eaux de la nappe phréatique (archive de 1973) montre que plus de la moitié des puits dépasse le seuil de 50 mg/L (fig. VII.24).

Tableau VII.10 : Distribution des puits en classes de concentration

Classes de concentration en nitrates mg/L	Pourcentage de puits
0-50	48,21
50-100	25,00
100-150	19,64
>150	7,14

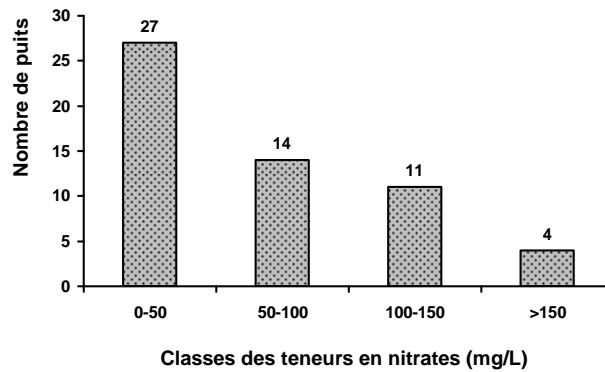


Fig. VII.24 : Distribution des puits en fonction des classes de concentration

### 3.4.5.2- Cas de la nappe profonde

La distribution des 50 forages en fonction des classes de concentration en nitrates des eaux de nappe profonde (archive de 1996) est présentée dans la figure (VII.25) et au tableau (VII.11). Environ 25% des forages dépassés 50 mg/L ; ils se situent dans la classe 50- 100 mg/L (6 forages), 100-150 mg/L (2 forages) et plus de 150 mg/L (4 forages). 76 % des forages se rangent dans la classe 0-50 mg/L (38 forages).

Tableau VII.11 : Distribution des forages en classes de concentration

Classes de concentration en nitrates mg/L	Pourcentage de puits
0-50	76
50-100	12
100-150	4
>150	8

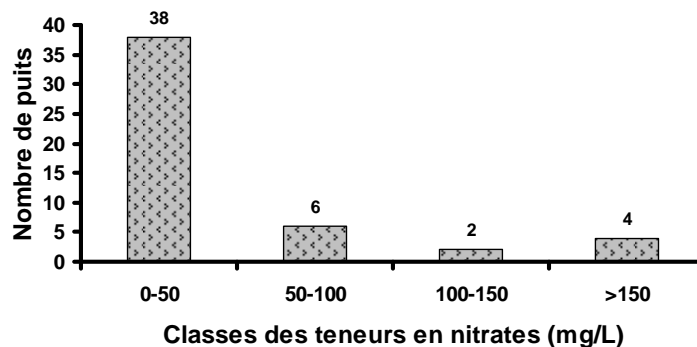
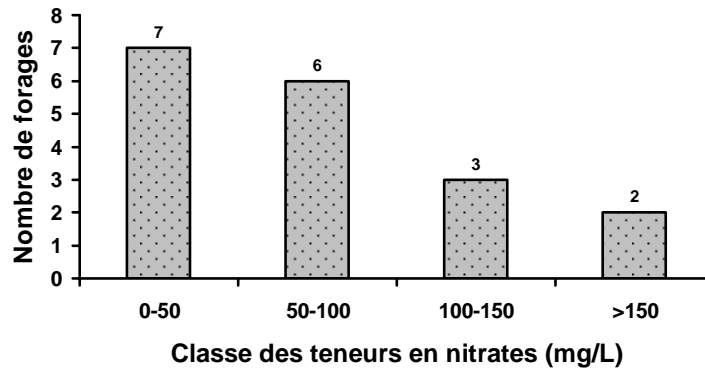


Fig. VII.25 : distribution des forages en classes de concentration (archive de 1996).

### 3.4.5.3- Situation actuelle de la pollution nitrique dans la nappe profonde

Le niveau de pollution nitrique des eaux souterraines dans le périmètre irrigué du sud du Hodna commence à devenir de plus en plus alarmant. Dans cette région, les eaux souterraines constituent la seule source d'eau pour l'irrigation des cultures et les consommations humaine et animale. Or les teneurs en nitrates, dans les eaux testées (forages 2008), sont variables d'un forage à l'autre. Elles se situent entre 6 et 158 mgNO<sub>3</sub>/L. La distribution des 18 forages en fonction des classes de concentrations en nitrates des eaux de nappe profonde montre que

61% des forages ont des eaux qui dépassent le seuil de 50 mg/L (fig. VII.26 et Tableau VII.12).



**Fig. VII.26** : distribution des forages en classes de concentration (cas de 2008)

**Tableau VII.12** : distribution des forages en classes de concentration

Classes de concentration en nitrates mg/L	Pourcentage de puits	
0-50	38,89	38.89
50-100	33,33	61.11
100-150	16,67	
>150	11,11	

En guise de conclusion, et selon la figure VII.27, nous pouvons dire que :

- Pour la nappe phréatique, la pollution nitrique est évidente, et elle est ancienne au sud du Hodna.
- Pour les eaux de la nappe profonde, les résultats de l'archive de 1996 comparé aux données récentes révèlent que le pourcentage des forages dont la teneur dépassent 50 mg/L est passé de 20 % à 61 % (fig. VII.27). Ceci témoigne d'une situation alarmante et d'une dégradation de la qualité des eaux souterraines de cette région. La comparaison des fréquences cumulées des concentrations en nitrate pour ces deux périodes (fig. VII.28) montre clairement un décalage vers des valeurs plus élevées de 1996 à 2008.

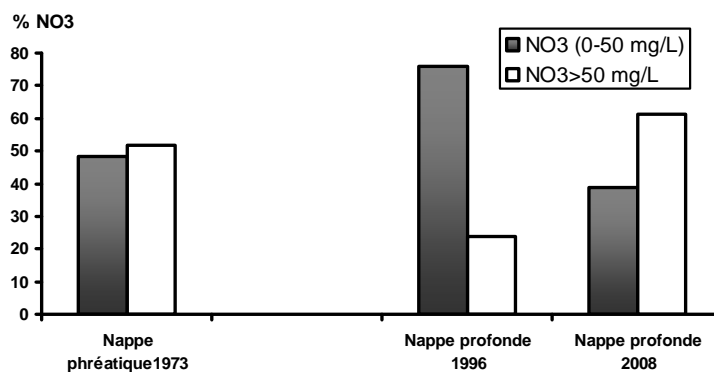


Fig. VII.27 : Concentration seuil des nitrates dans les eaux souterraines.

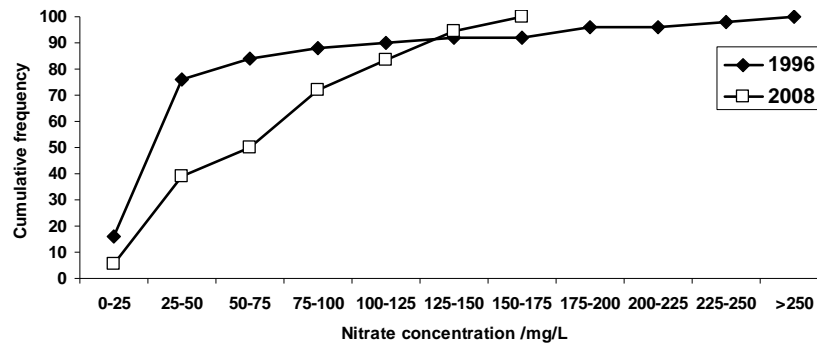


Fig. VII.28 : Distribution de la fréquence cumulée des concentrations des nitrates en 1996 et 2008.

### 3.4.6- Répartition spatiale des zones polluées

Nous avons utilisé le logiciel gOcad (Mallet, 2002) pour élaborer des cartes de la concentration des nitrates. L'analyse des figures VII.29 et VII.30 permet d'avancer les constatations suivantes :

L'examen de la carte de la distribution spatiale de la teneur en nitrates des eaux de la nappe phréatique au sud du Hodna met en évidence des sites nettement pollués par les nitrates au voisinage des lieux de concentration de la population rurale à Maarif et Khoubana (Fig. VII.29). Des teneurs de plus en plus élevées sont aussi observées plus au Sud et au Sud-Ouest, près des zones urbaines. A cette époque, la pollution pouvait être attribuée essentiellement à l'élevage (car la zone était essentiellement à vocation pastorale) et aux rejets domestiques dans les fosses septiques.

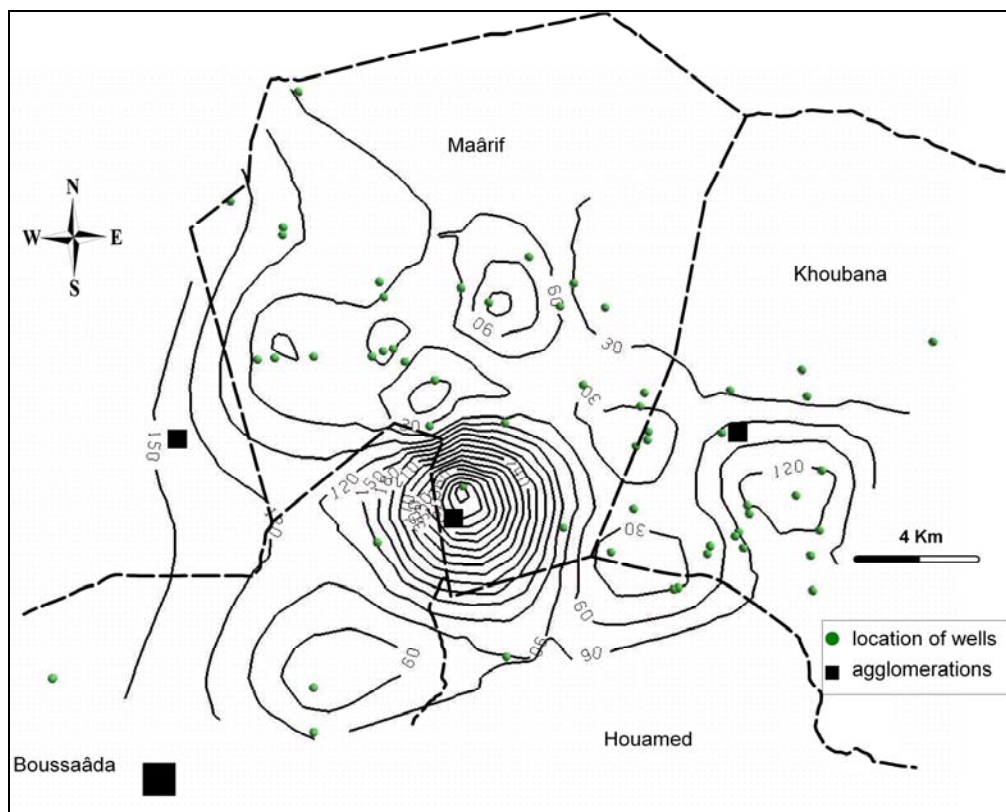




Fig. VII.29 : Localisation des puits et variabilité spatiale des nitrates (archive 1973).

De même, les résultats des forages de 1996 montrent une contamination des eaux souterraines (Fig. VII.30) et probablement de la nappe profonde avec 20 % des échantillons qui dépassent 50 mg/L. Ceci peut être lié au développement qu'avait subi cette région depuis la mise en culture en irrigué dans les années 1970 (Sebhi, 1987 ; Mimoune, 1995 ; Abdesselam et al., 2007). La croissance démographique, le changement d'occupation des terres, l'extension des zones agricoles et l'exploitation de plus en plus forte des ressources en eau souterraine semblent être à l'origine de cette pollution.

Même en l'absence de données sur le type d'aquifère exploité par ces forages, on remarque que les concentrations en nitrates sont élevées même au delà de 50 m de profondeur (Fig. VII.31) ce qui dénote la dégradation de la qualité des eaux de la nappe profonde car l'azote ne peut être que d'origine superficielle et anthropique.

La carte de variabilité spatiale des nitrates en 1996 (Fig. VII.30), caractérisant essentiellement la zone agricole de Maârif, permet de constater une augmentation des teneurs en nitrates dans les zones agricoles. Le fait le plus marquant est la coïncidence de cette zone contaminée aux deux périodes (1973-1996), ce qui suggère une possibilité de communication entre les deux aquifères. En effet, l'étude FAO (1970) a mis en évidence une possibilité de communication entre les deux nappes, qui pourrait être une voie de contamination potentielle.

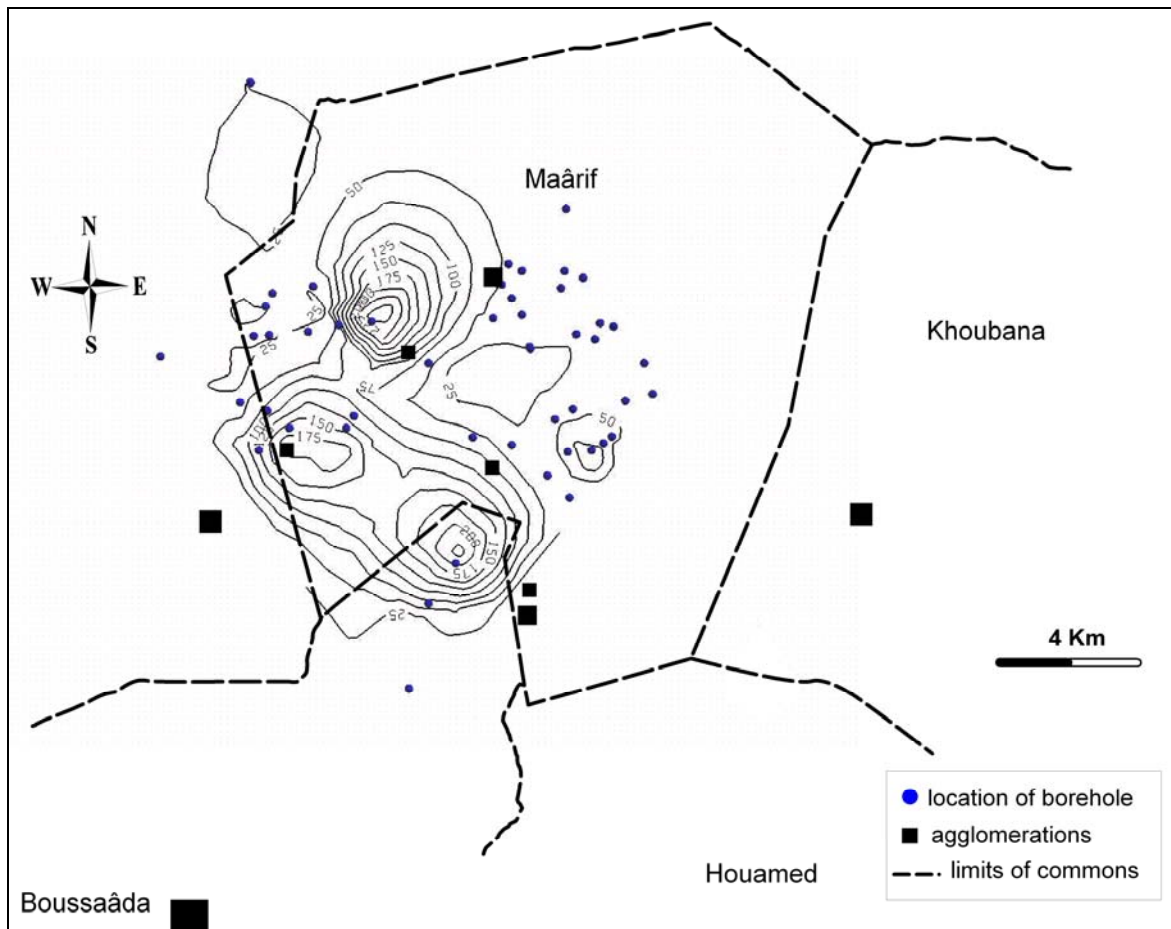


Fig. VII.30 : Localisation des forages et variabilité spatiale des nitrates (archive 1996).

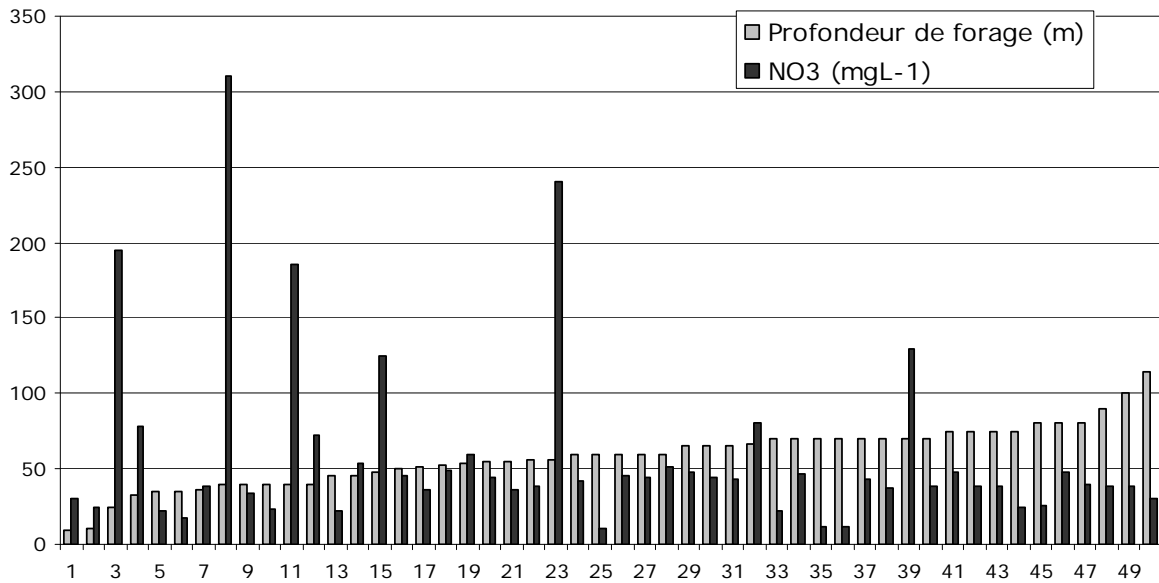


Fig. VII.31 : Teneurs des nitrates dans les forages classées par ordre de profondeurs croissantes (forage 1996)

Dans certaines localités, les teneurs en nitrates des eaux de forages récents, comparées aux analyses de 1996, révèlent une dégradation plus forte de la qualité de ces eaux et mettent en jeu la durabilité du développement de ces régions qui dépend essentiellement de la ressource en eau profonde. Ces résultats révèlent une pollution nitrique qui constitue une contrainte sérieuse pour le développement agricole et la santé publique.

L'origine de cette contamination est anthropique, elle pourrait être liée, d'une part, aux pratiques agricoles, c'est-à-dire aux apports d'engrais et à l'élevage et, d'autre part, aux eaux usées des fosses septiques. La texture sableuse des sols et l'irrigation gravitaire par planche largement adoptée dans cette zone aggravent ce risque (Fig. VII.32). Les doses d'eau apportées sont toujours excédentaires par rapport à la réserve utile en eau du sol et aux besoins des plantes.



Fig. VII.32 : Irrigation par planche largement adoptée au sud du Hodna.

### **Recommandations**

Les mesures suivantes peuvent être prises dans un premier temps dans le système actuel d'irrigation et de culture pour remédier à cette contamination :

- (1) Un control de l'eau devrait éviter de dépasser la capacité de rétention de l'eau, tout en considérant la nécessité du lessivage des sels ;
- (2) les engrais azotés devraient être fractionnés et apportés selon les besoins des végétaux et les analyses de sol ;
- (3) la surface de sol devrait être couverte le long de l'année.

Comme deuxième étape, de nouvelles techniques d'irrigation, plus efficaces comme l'irrigation localisée, devraient être adoptées pour réduire au minimum les quantités d'eau utilisées et préserver la qualité de l'eau. Ceci implique la formation des agriculteurs, qui sont nombreux dans la région sud de Hodna (environ 5000), avec des programmes de moyenne et de longue termes. Des recherches devraient être menées sur le cycle de l'azote et la fertilisation azoté, tenant compte des spécificités des conditions arides, pour obtenir des références agronomiques locales.

### **3.4.7- Conclusion**

Les résultats obtenus montrent que la contamination par les nitrates des eaux souterraines est évidente et elle n'est pas récente. Environ la moitié des eaux de la nappe phréatique est affecté selon les données d'archives de 1973, période pendant laquelle le pastoralisme dominait. L'intensification agricole a eu comme conséquence une augmentation de la contamination par les nitrates de la couche aquifère profonde, ce qui a été vérifié dans l'archive de 1996 et dans nos propres analyses de 2008. Les eaux de la nappe profonde constituent la seule ressource d'irrigation et de consommation humaine et animal et sa dégradation peut compromettre le développement de la région.

## CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE

Dans cette partie, on a étudié les ressources en eaux du sud du Hodna. A travers les résultats obtenus un certains nombres de faits méritent d'être soulevés. Il s'agit de :

L'aspect quantitatif des eaux ;

L'aspect qualitatif des eaux ;

### 1- L'aspect quantitatif des eaux

-au sud du Hodna, les eaux utilisées en irrigation et dans la consommation humaine et animale sont d'origine souterraine. Les eaux superficielles ne se sont pas utilisées mais ont une influence très marquée sur l'évolution des sols.

-l'irrigation a été entamée depuis les années 1970 puis, avec l'afflux des population les surfaces irriguées ont été multipliées. Or, les eaux de la nappe phréatique très chargées ont constitué un handicap au développement agricole dans la région. La recherche d'eau souterraine est peu à peu apparue comme une nécessité, dans le double but d'assurer l'alimentation de la population et de compléter l'apport d'eau aux cultures. Ainsi, l'irrigation effectuée depuis quelques dizaines d'années avec les eaux souterraines, pose actuellement des problèmes accrus :

- Multiplication du nombre de forages ;
- Surexploitation de la nappe profonde ;
- Baisse du niveau piézométrique ;
- Dépassement du seuil des prélèvements fixer par la FAO dans les années 1970 ;
- Disparition de la nappe phréatique qui se limite uniquement au alentour du chott.

Les politiques agricoles, notamment Les aides de l'Etat dans le cadre du PNDA, d'une part et l'accroissement démographique et les problèmes socio-économiques d'autre part ont favorisé cette anthropisation inquiétante. Des simulations de scénarios d'exploitation abusive de la nappe profonde (ANRH, 2007) ont révélé des risques d'inversion des sens d'écoulement naturel des eaux avec réalimentation éventuelle de l'aquifère profond par l'eau salée du chott. Ce qui peut compromettre la durabilité de ces aménagements hydro-agricoles.

### 2- L'aspect qualitatif des eaux

Au sud du Hodna, la mise en culture en irrigué a été entamée par les eaux de la nappe phréatique. Par la suite, on a commencé à forer plus profondément pour utiliser l'eau de la nappe profonde. La qualité de l'eau a été abordée en utilisant les analyses de l'eau de la nappe phréatique (archive de 1973), ceux des eaux de la nappe profonde (archive de 1996) et nos propre analyses (2008). En prenant comme référence ces trois dates, on constate que la qualité de l'eau s'est amélioré. D'abord parce qu'on a commencé à utiliser les eaux de la nappe profonde de meilleure qualité, puis on a amélioré l'état des forages suite aux aides de l'Etat (PNDA) ce qui a été observé en comparant les analyses de 1996 et ceux de 2008 de la nappe profonde. Plusieurs approches ont été utilisées pour étudier la qualité des eaux :

- Analyses statistiques.
- Utilisation du diagramme de Riverside (USSLS, 1954), de Piper et des directives d'interprétation des eaux de la FAO.
- Modélisation géochimique.
- Variabilité spatiale.

Les résultats indiquent que la salinité globale et les éléments solubles représentent le principal moteur du changement de la qualité des eaux et constituent le processus de concentration des eaux sous l'effet de l'aridité. Les faibles fluctuations du pH en présence d'un milieu fortement évaporatoire suggèrent que la précipitation de carbonates règle le pH d'après le concept d'alcalinité résiduel, par voie de conséquence, les solutions évoluent vers la voie saline neutre.

Les résultats de l'évolution des eaux par l'utilisation d'un traceur chimique (les chlorures) suggèrent un contrôle des eaux lors de la concentration par la précipitation de la calcite et du gypse. L'étude de l'état de saturation des eaux montre que la saturation en calcite augmente dans les eaux les moins chargées et la saturation en gypse croît dans les eaux les plus chargées ce qui implique un comportement des eaux différentes dans le cas d'utilisation des eaux de la nappe phréatique ou de la nappe profonde. En utilisant le principe d'alcalinité résiduelle généralisée, on a constaté que 94% des échantillons d'eau évoluent vers la famille saline sulfatée (FSSU). Ce qui confirme l'évolution des eaux du Hodna vers la voie saline neutre.

Les résultats obtenus montrent que la contamination par les nitrates des eaux souterraines est évidente et elle n'est pas récente. Les eaux de la nappe profonde constituent la seule ressource d'irrigation et de consommation humaine et animal, sa dégradation peut compromettre le développement de la région.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

L'objet de ce travail était d'étudier l'impact de la mise en culture en irriguée sur les sols et les eaux dans une région aride de l'Algérie. Pour cela, le cadre défini est celui de la zone sud du Hodna. Cette région a connu des changements d'usage des terres en relation d'une part avec des considérations historiques et d'autre part aux politiques agricoles qui se sont succédées depuis l'indépendance.

L'étude du sol, a concerné la cartographie de l'ensablement par télédétection, l'étude des caractéristiques du sol au niveau de l'horizon de surface, sur fosses pédologiques et sur un essai en colonne de sol. L'étude des eaux a comporté l'aspect quantitatif et qualitatif. Le travail est réalisé sur des archives de nappe phréatique et de nappe profonde et sur nos propres analyses. L'approche adoptée est à la fois spatiale et temporelle.

A travers les résultats obtenus, un certain nombre de conclusions peuvent être dégagées.

En premier lieu, les conditions du milieu physique exposées présentent la zone d'étude comme une région endoréique, d'altitude moyenne, fortement marquée par son histoire géologique et régie actuellement par son climat aride continental, qui limite particulièrement l'évolution des sols et favorise par contre la concentration des sels.

L'étude du climat montre que la zone d'étude correspond à une région aride très sèche avec des hivers relativement froids et une période estivale très chaude. Dans la perspective des activités agricoles et notamment des pratiques culturales intensives, seule l'agriculture irriguée est donc envisageable. Mais en raison d'un déficit hydrique très marqué, l'évaporation des eaux d'irrigation pourra entraîner leur concentration et le dépôt de sels dans les sols.

Dans un deuxième temps, l'étude de l'impact de la mise en culture en irriguée sur les sols a porté sur plusieurs volets. Il ressort des résultats obtenus :

Tout d'abord, l'étude diachronique par télédétection a révélé que la zone sud du Hodna est confrontée à un problème d'ensablement très inquiétant. Les résultats obtenus montrent une extension très nette des surfaces affectées par l'ensablement entre 1972 et 2001. L'extension de l'ensablement au sud du Hodna est en relation d'une part avec l'augmentation des surfaces irriguées aux dépens des parcours ; les labours et la jachère exposent le sol à l'érosion ; et d'autre part, il est aussi lié à une surexploitation des parcours déjà dégradé. A l'état actuel, l'ensablement constitue le principal problème de dégradation rencontré qui menace la durabilité des aménagements hydroagricoles.

En second lieu, les résultats mettent en évidence deux processus qui marquent les sols au sud du Hodna. Il s'agit d'une morphogénèse hydrique et d'une morphogénèse éolienne qui constitue le principal facteur qui influence les sols de la zone d'étude. La morphoscopie des sables confirme ces résultats en mettant en évidence un façonnement mixte fluvial et éolien. La salinité et le gypse sont des facteurs secondaires.

Les crues enrichissent certains sites par des apports de limons calcaires et entretiennent la fertilité des sols, et d'autre part, l'érosion éolienne contribue à l'amplification des apports de sable en favorisant ainsi la dégradation des sols.

En ce qui concerne l'étude des horizons de surface, il ressort clairement que les sols où l'intensité de la mise en culture en irriguée est la plus ancienne sont soumis au processus d'ensablement. Le fait le plus frappant est qu'en comparant les échantillons de sols avec leur témoin, il ressort une augmentation des sables et une diminution de la fraction argile+limon fin.

Quant à la salinité, et d'une manière générale, les caractéristiques des sites étudiés, notamment l'éloignement par rapport au chott, la texture du sol, l'occupation du sol et la fréquence des apports d'eau, sont des facteurs qui pourraient influencer la salinisation des sols de cette région. L'utilisation des eaux de la nappe profonde semble ne pas provoquer la salinisation des sols lorsque la quantité d'eau d'irrigation permet le lessivage des sels contrairement à l'eau de la nappe phréatique. L'étude révèle des sites inondables relativement fertiles localisés loin du chott. Dans ces milieux, la mise en valeur en irrigué pourrait être rentable à condition de bien lutter contre l'érosion éolienne par des brise vents et par un système de rotation des cultures ne laissant pas trop de temps à la jachère. Néanmoins, le lessivage des sels doit être pris en considération pour éviter des problèmes de salinisation secondaire. L'essai en colonnes de sol a mis en évidence, sur une période très courte, un bilan salin positif, même si, statistiquement l'augmentation de la salinité globale n'est pas significative.

Dans la dernière partie, l'étude de l'impact de la mise en culture en irrigué sur les eaux a permis d'aborder deux aspects : l'aspect quantitatif et qualitatif.

Au Sud du Hodna, l'irrigation se fait à partir des eaux souterraines. Au départ, on a commencé à exploiter par puits les eaux de la nappe phréatique très chargées. Or, ces eaux ont constitué un handicap au développement agricole dans la région. La recherche d'eau souterraine est peu à peu apparue comme une nécessité, dans le double but d'assurer l'alimentation de la population et de compléter l'apport d'eau aux cultures. On a ainsi multiplié le nombre de forages dans toute la zone du Hodna et par voie de conséquence une baisse très considérable du niveau piézométrique. C'est ainsi que le seuil de prélèvement fixé par la FAO dans les années 1970 a été largement dépassé ce qui a provoqué une surexploitation de la nappe profonde. Les politiques agricoles, notamment Les aides de l'Etat dans le cadre du PNDA, d'une part, et l'accroissement démographique et les problèmes socio-économiques, d'autre part, ont favorisé cette anthropisation inquiétante. Certes, à l'état actuel on a interdit la réalisation de nouveaux forages, cependant, des risques d'inversion des sens d'écoulement naturel des eaux avec réalimentation éventuelle de l'aquifère profond par l'eau salée du chott a été révélé par des simulations de scénario d'une forte exploitation de la nappe profonde.

Dans un autre volet, la qualité de l'eau a été abordée en utilisant deux archives et des données récentes. En prenant comme référence ces trois dates, on constate que la qualité de l'eau s'est améliorée. D'abord parce qu'on a commencé à utiliser les eaux de la nappe profonde de meilleure qualité, puis on a amélioré l'état des forages (transformation des puits en puits-forages) suite aux aides de l'Etat (PNDA) ce qui a été observé en comparant les analyses de 1996 et ceux de 2008 de la nappe profonde.

Les résultats montrent que le processus de concentration des eaux est expliqué par la salinité globale et les éléments solubles. Les faibles fluctuations de pH suggèrent que la précipitation de carbonates stabilise relativement la réaction des solutions selon le concept d'alcalinité résiduelle.

L'utilisation de traceurs chimique a permis l'étude de l'évolution des eaux et les résultats suggèrent un contrôle par la précipitation de la calcite et du gypse. Les tests de saturation indiquent que la saturation en calcite augmente dans les eaux les moins chargées et la saturation en gypse croit dans les eaux les plus chargées. L'utilisation du principe d'alcalinité résiduelle généralisée, montre que la quasi-totalité des eaux évoluent vers la famille saline sulfatée (FSSU), ce qui a mis en évidence une évolution vers la voie saline neutre.

Le fait le plus marquant est la contamination par les nitrates des eaux souterraines. Les eaux de la nappe profonde constituent la seule ressource d'irrigation et de consommation humaine et animal dans cette région, sa dégradation peut compromettre le développement régional.



En définitive, ce travail consacré à l'action anthropique au sud du Hodna et son impact sur les sols et les eaux avait permis d'aborder les éléments déterminants qui caractérisent les changements, de dégager les principales conclusions en relation avec leur évolution. Il n'en reste pas moins que, d'autres aspects qui n'ont pas fait l'objet dans ce travail permettent d'apporter de nouveaux résultats qui contribuent certainement à une meilleure utilisation de ce milieu dans le cadre d'un développement durable.

Enfin, plusieurs voies de recherches fondamentales et de développement peuvent être proposées pour améliorer les connaissances sur les sols et les eaux au sud du Hodna et l'impact de l'anthropisation sur ce milieu. A ce propos nous proposons ce qui suit :

### **Recherches fondamentales**

Il s'agit d'approfondir certains points qui ont été signalés dans ce travail mais qui n'ont pas fait l'objet d'approfondissement, il s'agit de :

- l'étude de la genèse de la croûte calcaire en bas du profil dans la zone de Mergueb.
- L'étude des individualisations de gypse dans la même zone, en étudiant la part de la genèse lié à l'eau d'irrigation et celle due à la nappe phréatique. A ce sujet, un travail expérimental et par modélisation serait intéressant.
- Affiner l'étude des déplacements du matériau fin en utilisant des techniques microscopiques, minéralogiques et par modélisation.
- Pour les ressources en eaux, l'étude d'autres polluants autre que les nitrates serait important dans cette zone fortement anthropisée (forte intensification agricole).

### **Recherches développement**

Tout d'abord, la lutte contre l'ensablement devrait être la première prérogative de toute intervention pour sauvegarder les aménagements hydro agricoles au sud du Hodna.

La cartographie par télédétection de l'ensablement et des formes de dépôts de sable en réalisant des cartes à grande échelle, d'une part, et la cartographie de la salinité en utilisant des techniques nouvelles tel que l'EM38, d'autre part, mérite aussi un grand intérêt et constituent des outils d'aide à la décision pour les décideurs.

Enfin, l'évaluation de l'efficacité des aménagements hydro agricoles exige ici plus qu'ailleurs la mise en place d'un système expert de suivi de la qualité des eaux et des sols d'une part et une amélioration des techniques agronomiques, notamment, une maîtrise de l'irrigation, de la fertilisation et des traitements phytosanitaires, d'autre part. Ceci implique la formation des agriculteurs, qui sont nombreux dans la région sud de Hodna (environ 5000), avec des programmes à moyens et longs termes. Des recherches devraient être menées sur le cycle des éléments nutritifs et notamment l'azote et la fertilisation azoté, tenant compte des spécificités des conditions arides, pour obtenir des références agronomiques locales.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



**ABDESSELAM S. (1998)**

Contribution à l'étude des sols gypseux au Nord-Est du Sahara Algérien. Caractérisation et genèse. Cas des Oasis de Tolga (région des Ziban). Mém. Magister INA El-Harrach, 147 p.

**ABDESSELAM S., MERABET Y. et HALITIM A. (2007)**

Vulnérabilité du fonctionnement d'un écosystème agro-pastoral face aux changements climatiques (Cas du Sud du Hodna). Journées internationales organisée par le CRSTRA (l'impact des changements climatiques sur les régions arides et semi arides). Biskra du 15 au 17 décembre.

**ABDESSELAM S, MERABET Y, et HALITIM A. (2008a)**

Cartographie de la sensibilité à la désertification au sud du Hodna (Algérie). Séminaire International « Situation et valorisation de la steppe en Algérie » 11-12 novembre, Université de Tiaret (Algérie), 2008.

**ABDESSELAM S, et HALITIM A. (2008b)**

La qualité des eaux souterraines du Sud Hodna et leur impact sur la mise en culture. Colloque international « aridoculture » 13-14 décembre, CRSTRA Biskra (Algérie), 2008.

**ABDESSELAM S, AMOR Z, et HALOUAN R. (2009)**

Dynamique de l'occupation des sols en milieu aride. cas du sud du Hodna. Séminaire international sur "La protection et préservation des écosystèmes sahariens". Université Kasdi Merbah Ouargla 13, 14 et 15 Décembre 2009.

**ABDESSELAM S. et HALITIM A. (2010a)**

Les sols du sud du Hodna. Caractérisation et contraintes de mise en valeur. Séminaire International sur "La Préservation et la Mise en Valeur de l'Ecosystème Steppique". Université Mohamed Boudiaf de M'sila. 14-16 mars.

**ABDESSELAM S. et HALITIM A. (2010b)**

Anthropisation et dégradation des ressources naturelles en milieu aride. Cas du sud du Hodna, Algérie. World Congress for Middle Eastern Studies, Barcelona, July 19th – 24th.

**ABDESSELAM S., HALITIM A., JAN A., TROLARD F and BOURRIE G (2012)**

Anthropogenic contamination of groundwater with nitrate in arid region: case study of southern Hodna (Algeria). Environ Earth Sci. DOI 10.1007/s12665-012-1834-5.

**ACHI K. (1970)**

Etude hydrogéologique de la zone Nord occidentale du bassin du Hodna. Thèse de Doctorat, Univ. d'Alger.

**AL DROUBI A, FRITZ B, GAC JY and TARDY Y (1980)**

Generalized residual alkalinity concept; application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. Am. J. Sci., 280 : 560–572

**ANONYME (1995)**

M'SILA par les chiffres. Wilaya de M'sila. 144 p.

**ANONYME (2006)**

Annuaire statistique de la wilaya de M'sila. Direction de la planification et de l'aménagement du territoire. 136 p.

**AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDRAULIQUES (ANRH) (1996)**

Inventaire et débits extraits des points d'eau du Chott El-Hodna. Rapport de synthèse. Algérie

**AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDRAULIQUES (ANRH) (2006)**

Modélisation du système aquifère du Hodna. Mission I : Collecte, analyse et synthèse des données. Icosium forage et engineering services. 54 p.

**AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDRAULIQUES (ANRH) (2007)**

Modélisation du système aquifère du Hodna. Mission III exploitation du modèle. Sous mission III 2 mise en œuvre des simulations prévisionnelles et proposition de schémas de gestion optimum des ressources en eau des systèmes. Icosium forage et engineering

services. 18 p.

**AGHZAR N., BERDAI H., BELLOUTI A., et SOUDI B. (2002)**

Pollution nitrique des eaux souterraines au Tadla (Maroc). Rev. Sci. Eau 15(2), pp : 459-492

**AGOSSINE M. et BOUCHAOU L. (2001)**

Les problèmes majeurs de la gestion de l'eau au Maroc. Sécheresse. Vol.15, n° 2, 187-94

**AL DROUBI A. (1976)**

Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés de Tchad. Thèse Doc. Ing. Strasbourg et Mém. Sc. Géol., 46, 177 p

**AL DROUBI A., FRITZ B., GAC J. Y., and TARDY Y. (1980)**

Generalized residual alkalinity concept: Application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. American Journal of Science 280, pp : 560-572.

**ANAT (1993a)**

PAW M'sila. Plan d'aménagement par zone. 1<sup>ère</sup> priorité. 203 p.

**ANAT (1993b)**

PAW M'sila. Plan d'aménagement par zone. 2<sup>ème</sup> priorité. 182 p.

**AUBERT G. (1975)**

Les sols sodiques en Algérie du Nord. Ann. INA (Alger), (VI) : 185-195.

**BAALI F, ROUABHIA A, KHERICI N, DJABRI L, BOUCHAOU L et HANI A. (2007)**

Qualité des eaux souterraines et risque de pollution en milieu semi-aride. Cas de la cuvette de Chéria (NE Algerien). Estudios Geológicos ; 63 (2) : 127-133

**BACI L. (1984).**

Contribution à l'étude de la salinisation des sols du Hodna (M'sila). Mém. Ing. INA 98 p

**BACI L. (1999)**

Politiques foncières et aménagement des structures agricoles dans les pays méditerranéens : à la mémoire de Pierre Coulomb. In Jouve A.-M. (ed.), Bouderbala N. (ed.) . Montpellier : CIHEAM-IAMM. Cahiers Options Méditerranéennes V. 36. pp : 285-291.

**BARBIERO L. (1995)**

Les sols alcalinisés sur socle dans la vallée du fleuve niger. Origines de l'alcalinisation et évolution des sols sous irrigation. Thèse de Doctorat de L'ENSA de Rennes. France, 209 p+annexes.

**BECHAR M. T., HAMEL A. et AZABOU R. (1990)**

Essai de synthèse de la carte hydrogéologique du sous bassin de Tolga et sa notice explicative. Mém. Ing. Hydrogéol. Univ. Annaba, 127 p

**BEDRANI, S. et BENSOUIAH, R., (2000)**

La relation homme - environnement dans la steppe algérienne : cas de la région de Djebel Amour. Communication au séminaire international *MEDENPOP 2000*. Jerba, Tunisie du 25 au 28 octobre.

**BELLAIR P. (1954)**

Sur l'origine des dépôts de sulfate de calcium actuels et anciens. C. R. Acad. SC., 239 : 1059-1061

**BELOUAM (1976)**

Caractéristiques macromorphologiques et micromorphologiques de quelques sols à accumulation calcaire du Hodna. Annales de l'INA El Harrach Vol. 1, pp 47-53

**BENABDERRAHMANE A. (1988)**

Simulation numérique de la pollution saline d'un système aquifère dans une région semi-aride à aride : exemple du bassin de M'Sila (Hodna, Algérie). Thèse de Doc. Ing. Université de Franche-comté, France, 277 p.

**BENCHERIF S. (2011)**

L'élevage pastoral et la céréaliculture dans la steppe algérienne. Évolution et possibilités de développement. Th. Doc. Agro ParisTech. France. 292 p.

- BENMESSAOUD H., KALLA M. et DRIDDI H. (2009)**  
Evolution de l'occupation du sol et désertification dans le Sud des Aurès. Mappmonde 94. pp : 1-11.
- BENMOUFFOK B. (2004)**  
Efforts de l'Algérie en matière d'économie de l'eau et de modernisation de l'irrigation. Projet INCO-WADEMED. Actes du Séminaire Modernisation de l'Agriculture Irriguée. Rabat, du 19 au 23 avril.
- BENSAID A. (2006)**  
SIG et télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride : le cas de la wilaya de Naâma (Algérie). Université Joseph Fourier-Grenoble 1, thèse de Doctorat en géographie, 325 p.
- BENSAID A., BARKI M., TALBI O, BENHANIFIA Kh., et MENDAS A. (2007)**  
L'analyse multicritère comme outil d'aide à la décision pour la localisation spatiale des zones à forte pression anthropique : le cas du département de Naâma en Algérie. *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, : 359-371
- BENSLIMANE, M., HAMIMED A., EL ZEREY W., KHALDI A. et MEDERBAL KH. (2008)**  
Analyse et suivi du phénomène de la désertification en Algérie du nord. *VertigO*, Vol.8, n°3 : 1-9.
- BERDAÏ H., SOUDI B. ET BELLOUTI A. (2004)**  
Contribution à l'étude de la pollution nitrique des eaux souterraines en zones irriguées : Cas du Tadla. Projet INCO-WADEMED Actes du Séminaire Modernisation de l'Agriculture Irriguée Rabat, du 19 au 23 avril.
- BERTHOIS L. ET CROSNIER A. (1966)**  
Étude dynamique de la sédimentation au large de l'estuaire de la Betsiboka. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. IV, n° 2 : 49-130
- BOCK L. (1984)**  
L'intégration chronospaciale des accumulations calcaires. Approche morphopédologique et géochimique dans un paysage semi-aride de l'Atlas tellien (Algérie). Thèse de Doctorat Univ. de Gembloux (Belgique) 447 p.
- BOUAHMED A. et ABDESSELAM S. (2010)**  
Contribution à la création d'une banque de données sur les sols du Hodna à l'aide d'un SIG. Séminaire International sur "La préservation et la Mise en Valeur de l'Ecosystème Steppique". Université Mohamed Boudiaf de M'sila du 14 au 16 mars.
- BOUAHMED A. et ABDESSELAM S. (2011)**  
Utilisation d'un système d'information géographique pour la caractérisation des ressources en sols en milieu steppique. Cas de la région du Hodna. 1<sup>er</sup> séminaire international sur les forêts et les steppes des milieux semi arides. Université de Djelfa, 28-30 novembre.
- BOUCHETATA T. B. et BOUCHETATA A. A. (2011)**  
Dégradation des écosystèmes steppiques et stratégie de développement durable. Mise au point méthodologique appliquée à la Wilaya de Nâama (Algérie). Développement durable et territoires. *Varia.*, : 1-17.
- BOULAINÉ J., (1957)**  
Etude des sols des plaines du Cheliff. Thèse d'Etat de l'Université d'Alger, 582 p.
- BOURRIE G. (1976)**  
Relation entre le pH, l'alcalinité, le pouvoir tampon et les équilibres de CO<sub>2</sub> dans les eaux naturelles. *Science du sol*, 3 : 141-159
- BOUTELDJA N. (2005)**  
Contribution à la modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant du Hodna "sous bassins versants du Ksob et de Soubella" (Algérie). Thèse de Doctorat, Université d'Aix Marseille 1, France.
- BOYADGIEV T. G. (1974)**  
Contribution à la connaissance des sols gypseux. The Euphrates pilot irrigation project. F.A.O., Raqqa. 22 p

- BOYADGIEV T. G. (1975)**  
Les sols du Hodna. Rapport FAO. Algérie 9, Rome 141 p
- BREEMEN N.V. and WIELEMAKER W. (1974)**  
Buffer intensities and equilibrium pH of minerals and soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 38 : 55-66
- BRUZZI C. et PRONE A. (2000)**  
Une méthode d'identification sédimentologique des dépôts de tempête et de tsunami : l'exoscopie des quartz, résultats préliminaires. Quaternaire, Vol. 11, n°3-4, pp. 167-177.
- BULLOCK P., FEDOROFF N., JONGERIUS A., STOOPS G., TURSINA T. et BABLEU (1985)**  
Handbook for soil thin section description. Waine Research Pub., Wolverhampton, 152 p
- CAPOLINI J. et SARI M. (1969)**  
Etude géomorphologique du chott El-Hodna. Zone nord et zone sud. *Etude S.E.S. Alger.*
- CHEVERRY CL. et ROBERT M. (1998)**  
La dégradation des sols irrigués et de la ressource en eau : une menace pour l'avenir de l'agriculture et pour l'environnement des pays au sud de la Méditerranée? *Étude et Gestion des Sols*, 5, 4 : 217 - 226
- CLAUDIN J., LE HOUEROU H.N. et HAYWOOD M. (1975)**  
Etude phytoécologique du Hodna *Publ. FAO, Rome, 154 p. et 2 cartes.*
- CPCS (1967)**  
Classification des sols. Association Française pour l'étude du sol. I.N.A.P.G., 96 p
- DAGNELIE P. (1975)**  
Théorie et méthodes statistiques : applications agronomiques. vol. II, les méthodes de l'inférence statistique, 2<sup>ème</sup> édition, les presses agronomiques de Gembloux, Belgique, 463 p.
- DAOUD Y. (1983)**  
Contribution à l'étude de la dynamique des sels dans un sol irrigué du périmètre du haut-Cheliff (Algérie). Thèse doc. Ing. ENSA, Rennes, 193 p
- DAOUD Y et DOGAR A.M. (1985)**  
Le régime du potassium dans quelques types de sol du Hodna (Algérie). *Revue de la Potasse*, section 4, n°6 : 1-7.
- DAOUD Y. et HALITIM A. (1994)**  
Irrigation et salinisation au Sahara Algérien. *Secheresse*. 5 (3) : 151-160
- DEKKICHE B (1974)**  
Contribution à l'étude des sols du Hodna et corrélation géochimique des eaux de la nappe. Thèse Univ. Gand, Belgique, 210 p.
- DEKKICHE B, (1976 a)**  
Les sols à accumulation et individualisation de calcaire dans le Hodna. *Sém. Sciences du sol, connaissance des sols du Maghreb* 21-26 Avril 1975. Ann. I.N.A. Vol. VI, n° 1. Alger, : 47-52.
- DEKKICHE B, (1976 b)**  
Sur quelques sols à accumulation de gypse dans le Hodna. *Sém. Sciences du sol, connaissance des sols du Maghreb* 21-26 Avril 1975. Ann. I.N.A. Vol. VI, n° 1. Alger, : 139-148.
- DIOP S. (1990)**  
La côte Ouest-Africaine. Du Saloum (Sénégal) à la Mellacorée (Rép. De Guinée). Collection Etudes et Thèses. Ed. ORSTOM. Paris. 379 p.
- DIRECTION GENERALE DES FORETS (DGF) (1999)**  
Rapport national relatif a la mise en oeuvre de la Convention des Nations Unies sur la Lutte Contre la Désertification. DGF, 22 p.
- DIRECTION GENERALE DES FORETS (DGF) (2004)**  
Rapport national de l'Algérie sur la mise en oeuvre de la Convention des Nations Unies sur la Lutte Contre la Désertification. DGF, 34 p.
- DJILI K, DAOUD Y, GAOUAR A et BELDJOUDI Z. (2003)**  
La salinisation secondaire des sols au Sahara: Conséquences sur la durabilité de

l'agriculture dans les nouveaux périmètres de mise en valeur. *Sécheresse* ; 14(4) : 241-246.

**DOUAOUI A. (2005)**

Variabilité spatiale de la salinité et sa relation avec certaines caractéristiques des sols de la plaine du bas-Cheliff. Thèse doc. Etat, INA El Harrach, 261 p.

**DUFEY J. E., PETIT C. M., GOBLET Y. et LAUDELOUT H. (1979)**

Modélisation des équilibres physico-chimiques d'échanges et de précipitations dans les systèmes sol-eau-électrolyte. *Ann. Agrono.*, 30 : 53-62

**DURAND J. H. (1958)**

Les sols irrigables. Alger : SES, 198 p.

**EMBERGER L. (1964)**

Notice explicative de la carte géologique au 1/200.000° de Boussaâda. (feuille n°36) Serv., *Géol. de l'Algérie*. Alger.

**EL ZEREY W., BACHIR BOUIADJRA S. B., BENSLIMANE M. et MEDERBAL KH. (2009)**

L'écosystème steppique face à la désertification : Cas de la région d'El Bayadh, Algérie. *VertigO*. Vol. 9 n° 2.

**FALISSARD B. (1998)**

Comprendre et utiliser les statistiques dans les sciences de la vie. Collection Evaluation et Statistique. Masson (ed.), Paris, 332 p.

**FAO (1968)**

Études géophysiques dans le bassin du Chott El Hodna. Tech. rep., FAO

**FAO (1970)**

Etudes des ressources naturelles, expérimentations et démonstrations agricoles dans la région du Hodna, Algérie. (Projet ALG9). FAO, Rome.

**FAO (1972)**

Projet d'études de mise en valeur du Hodna, Algérie. Rapport final sur les études isotopiques appliquées à l'hydrogéologie du bassin du Hodna, Algérie. Projet ALG9, FAO, Rome. 21 p + annexes.

**FAO (1973)**

Etudes hydrogéologiques dans le Bassin du Chott El Hodna. Vol. II-Annexes Algérie, ALG/9, FAO, Rome (Italy)

**FAO (1975)**

Sandy Soils. Report of the FAO/UNDP Seminar on Reclamation and Management of Sandy Soils in the Near East and North Africa. FAO Soils Bulletin 25, first printing FAO, Rome.

**FAO (1988)**

La qualité de l'eau en agriculture. Bulletin FAO d'irrigation et drainage n°29, 180 p.

**FRITZ B. (1975)**

Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. Th. doc. Ing. Strasbourg et Sci. Géol. Mém. 41, 152 p

**GALLALI T. (1980)**

Transferts sels-matière organique en zones arides méditerranéennes. Thèse Doc. Sc. Université de Nancy1, 202 p.

**GAN LEI, PENG XIN-HUA, PETH S. and HORN R. (2012)**

Effects of Grazing Intensity on Soil Water Regime and Flux in Inner Mongolia Grassland, China. *Pedosphere* 22(2) pp : 165-177.

**GHAZI A. (2006)**

Problématique de la désertification en Algérie: état et mesures de lutte pour la protection des ressources naturelles. In *Desertification in the Mediterranean Region : A Security Issue. PART II Mediterranean Regional Perspective on Assessment and Condition « the country reports »* William G. Kepner, Jose L. Rubio, David A. Mouat & Fausto Pedrazzini, eds. springer. pp : 169-185.

**GONZALEZ BARRIOS J. L. (1992)**

Eaux d'irrigation et salinité des sols en zone aride mexicaine : exemple dans

- la « Comarca Lagunera ». Thèse de Doctorat. Univ. Montpellier II. 316 p.
- GUEDDARI M. (1984)**  
Géochimie et thermodynamique des évaporites continentales. Etude du lac Natron en Tanzanie et du Chott El Jerid en Tunisie. Mémoire des Sciences Géologique n°76, 143 p.
- GUEMRAOUI M, et CHABACA M.N, (2005)**  
Gestion des grands périmètres d'irrigation : L'expérience algérienne. Actes du séminaire Euro Méditerranéen « Les instruments économiques et la modernisation des périmètres irrigués », M.S. Bachta (éd. sci.). Séance 1. Politiques hydrauliques : expériences passées et perspectives 21-22 novembre 2005, Sousse, Tunisie.
- GUIRAUD R. (1966)**  
Géologie et hydrogéologie du bassin versant du chott El-Hodna. Travaux des collaborateurs 96 p 6 pl.
- GUIRAUD R. (1971)**  
Carte géologique de Souk Ouled Nadja. 1/50 000.
- GUIRAUD R. (1973)**  
Evolution post-Triasique de l'avant pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse Sciences, Université de Nice, 270 p, 114 fig., 12 pl. h.t.
- GUIRAUD R (1990)**  
Evolution post-triasique de l'avant pays de la chaîne alpine en Algérie (d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines). Mémoire des publications de l'ONIG . 257 p. 115 fig., 12 pl. h.t.
- HADDOUCHE I., SAIDI S., and MEDERBAL KH. (2011)**  
Remote sensing and dynamic landscapes in arid and semi arid area in Algeria: Cases of the region of Nâama. FIG Working Week. Bridging the Gap between Cultures. TS08D - Regional and Local Structure Planning. Marrakech, Morocco, 18-22 May.
- HADEID M. (2008)**  
«Approche anthropique du phénomène de désertification dans un espace steppique : le cas des hautes plaines occidentales algériennes., VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement Volume 8 n° 1.
- HADJAB M. (1998)**  
Aménagement et protection des milieux naturels dans la cuvette du Hona (Algérie). Thèse de Doctorat, Université d'Aix Marseille 1, France.
- HADJAB M. (2010)**  
Impact de la mise en valeur et désertification dans la zone sud du Hodna « le Rmel ». Séminaire International sur "La Préservation et la Mise en Valeur de l'Ecosystème Steppique". Université Mohamed Boudiaf de M'sila. 14-16 mars 2010.
- HALIMI A. (1980)**  
L'atlas Blidéen. Climats et étages végétaux. O.P.U., Alger, 523 p.
- HA-LIN ZHAO, RUI-LIAN ZHOU, TONG-HUI ZHANG, XUE-YONG ZHAO (2006)**  
Effects of desertification on soil and crop growth properties in Horqin sandy cropland of Inner Mongolia, north China. Soil & Tillage Research 87 : 175–185.
- HALITIM A. (1985)**  
Contribution à l'étude des sols arides (Hautes Plaines Steppique de l'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols. Thèse Univ. Rennes, 384 p
- HALITIM A. et DAOUD Y. (1996)**  
La salure des sols Algérien. Evolution et effets sur les propriétés des sols. Groupe de recherche agronomique méditerranéen. Qualité des sols et des eaux. 10-11 decembre.
- HAMDI AISSA B. (2001)**  
Le fonctionnement actuel et passé de sols du Nord Sahara (Cuvette de Ouargla). Approches micromorphologique, géochimique, minéralogique et variabilité spatiale. Thèse doc. INA Paris-Grignon. 314 p.
- HAZELTON P. and MURPHY B. (2007)**

- Interpreting Soil Test Results: What Do All the Numbers Mean? Ed. CSIRO PUBLISHING. 160 p.
- IDRISSI ALAMI I., ZEROUALI M., ADDOU M., MOKHTARI A. et SOULAYMANI A. (2007)**  
Évaluation de la pollution nitrique de la nappe phréatique de la zone côtière du Gharb (M'nasra) au Maroc entre 1993 et 2003. *Afrique SCIENCE* 03(3) : 378 – 390.
- KEBICHE M. (1986)**  
Le bassin versant du Hodna, Algérie : ressources en eau et possibilités d'aménagement. Thèse Université de Nancy 2, France, 278 p.
- KIEKEN M (1975)**  
Etude géologique du Hodna, du Titteri et de la partie occidentale des Bibans (Algérie). T1 217p. t2 298 p. 232 fig. 20 pl. H.t
- KIEKEN M et DAME R (1962)**  
Carte géologique de M'Sila 1/50 000.
- KULKE H. (1974)**  
Zur geologie und mineralogie der kalk-und gipskrusten Algeriens. *Geologische Rundschau* 63 : 970-998
- LARAQUE A. (1991)**  
Comportements hydrochimiques des « Açudes » du nordeste Brésilien semi-aride. Evolutions et prévisions pour un usage en irrigation. Thèse de Doctorat. Univ. Montpellier II. 325 p + annexes.
- LOYER J. Y. (1989)**  
Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal. Caractérisation, distribution et évolution sous culture. Collection Etude et thèses, ORSTOM. 137 p.
- LOZET J. et MATHIEU C. (1990)**  
Dictionnaire de Science du Sol (2° Ed.). Ed. Tec & Doc. Lavoisier, 384 p.
- MALLET JL (2002)**  
Geomodeling. Applied geostatistics series. Oxford, University Press, New York
- MAMOU A. (1995)**  
Incidence de l'exploitation des nappes du sud tunisien dans les oasis sur la qualité chimique de leurs eaux. In *Sols de Tunisie. Bulletin de la Direction des sols* n°16 « La salinisation des sols et la gestion des eaux dans les Oasis » : 30-43.
- MARA (1974)**  
La steppe Algérienne. Statistique agricole n°14, Ministère de l'Agriculture et de la Révolution Agraire, 383 p.
- MARLET S. (2004)**  
Évolution des systèmes d'irrigation et gestion de la salinité des terres irriguées. *Revue H.T.E. N° 130* : 32-38
- MASSOUMI A. M. (1968)**  
Etude expérimentale sur le mécanisme du mouvement capillaire de l'eau et des sels solubles dans le sol (processus d'alcalinisation). Thèse Doc. Ing. Univ. Paris, 120 p + annexes.
- MAUGET G. (1967)**  
Etude de la nappe de Tolga. Etude S.E.S n° 25.25/DH.1, G.R.H.A. Constantine 40 p
- MICHEL J.-P. (1969)**  
Présence d'interstades dans les alluvions quaternaires de la seine en aval de Paris. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire* (2) : 163-171
- MIMOUNE S. (1995)**  
Gestion des sols salés et désertification dans une cuvette endoréique d'Algérie (Sud du Chott El Hodna) - Thèse Doctorat, Université Aix-Marseille I, France, 209 p
- MONTOROI J-P (1995)**  
Dynamique de l'eau et géochimie des sels d'un bassin versant aménagé de Basse-Casamance (Sénégal). Conséquences sur la gestion durable de l'écosystème de mangrove en période de sécheresse. Thèse de Dctorat, Université de Nancy I, France. 349 p.



- MOUHOUS A. (2005)**  
Les causes de la dégradation des parcours steppiques. Thèse de Magister, INA El-Harrach 126 p.
- N'DIAYE M.K. (1987)**  
Evaluation de la fertilité des sols à l'office du Niger (Mali) – Contribution à la recherche des causes et origines de la dégradation des sols dans le Kouroumari. Th. Doc. Ing. INP Toulouse, 133 p.
- NEDJRAOUI D. et BEDRANI S. (2008)**  
La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte, VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement Volume 8 Numéro 1
- NEMOUCHI A. (2001)**  
Géographie hydrologique du bassin versant endoréique du chott el Hodna. Thèse de Doctorat, université de Constantine, 292 p.
- ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ (OMS) (2004)**  
Directives de qualité pour l'eau de boisson. Troisième édition, vol. 1 recommandations. Genève, 110 p.
- OUARDI J. (2005)**  
Dégradation des sols et de la nappe des périmètres irrigués du Tadla Marocain par salinisation et sodisation. Thèse Doc., Univ.Cadi Ayyad Marrakech, Maroc, 154 p.
- OUSSEDIK A., IFTÈNE T., et ZEGRAR A. (2003)**  
Réalisation par télédétection de la carte d'Algérie de sensibilité à la désertification. Sécheresse. Vol.14, n°3 : 195-201.
- PARKHURST, D.L., and APPELO, C.A.L. (1999)**  
User's guide to PHREEQC (ver. 2). A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. USGeol. Surv. Water-Resources Invest. Report 99-4259, Denver, Colorado.
- PAYMENT et HARTMANN, (1998)**  
Les contaminants de l'eau et leurs effets sur la santé. Revue des sciences de l'eau, numéro spécial, : 199-210.
- PHILIPPEAU G. (1986)**  
Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales. Service des études statistiques I.T.C.F. 53 p
- POUGET M. (1968)**  
Contribution à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le Sud Tunisien. Cah. ORSTOM. Sér. Pédol. 6 : 309-365
- POUGET (1980)**  
Les relations sol-végétation dans les steppes Sud Algéroises. Trav. et Doc. ORSTOM, 116, 555 p.
- RABIE F.H., SHETA A.S., EL-ARABY A.E., and ABBAS M.E. (1990)**  
Formation and designation of clay layers in some soils of Egypt. In Soil micromorphology : A Basic and applied science. L.A. Douglas Editor. International Working-Meeting on Soil Micromorphology (8<sup>th</sup> : 1988 San Antonio, Texas). Developments in soil science 19. Elsevier 1990 : 71-79
- RITCHOT G. et CAILLEUX A. (1971)**  
Taxonomie, géomorphologie et morphoscopie de sables au Québec méridional. Cahiers de géographie du Québec, vol. 15, n° 36 : 423-438.
- ROCHELEAU M. (1997)**  
Sédimentologie des paléoplages de la plaine d'Old Crow, territoire du Yukon, Canada. Thèse (M. A), Univ. d'Ottawa. 168 p.
- ROUABHIA A, BAALI F, KHERICI N et DJABRI L. (2004)**  
Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod (Algérie). Sécheresse ; 15(4) : 347-352.
- RUELLAN A. (1970)**  
Contribution à la connaissance des sols des régions méditerranéennes. Les sols à profil calcaire différencié des plaines de la Basse Moulouya (Maroc Oriental). Thèse Univ.

- Strasbourg, Mém. ORSTOM, 54, 302 p.
- SAVORNIN J (1920)**  
Etude géologique de la région du Hodna et du plateau Sétifien. 502p. 94 fig. 1 carte orotecto. H t 1/800 000.
- SEBHI S. (1987)**  
Mutation du monde rural Algérien. Le Hodna. (Algérie) Ed. OPU Alger. 252 p.
- SERVANT J. M. (1976)**  
La salinité dans le sol et les eaux. Caraceterisation et problèmes d'irrigation-drainage. S.E.S. n° 310. INRA Montpellier, 27 p.
- SHIFANG PEI, HUA FU, and CHANGGUI WAN (2008)**  
Changes in soil properties and vegetation following exclosure and grazing in degraded Alxa desert steppe of Inner Mongolia, China Agriculture, Ecosystems and Environment 124, : 33–39
- SIMLER R. (2010)**  
DIAGRAMME : Logiciel d'hydrochimie multilingage en distribution libre. Laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon, France.
- SKOURI M. (1993)**  
La désertification dans le bassin méditerranéen : état actuel et tendance. In : État de l'Agriculture en Méditerranée. Les sols dans la région méditerranéenne : utilisation, gestion et perspectives d'évolution. Zaragoza (Ciheam-IAMZ), Cahiers Options Méditerranéennes ; V. 1(2) pp : 23-37
- SLIMANI H., AIDOU D A., and ROZE F. (2010)**  
30 Years of protection and monitoring of a steppic rangeland undergoing desertification. Journal of Arid Environments 74, pp : 685–691.
- SSS, SOIL SURVEY STAFF (1975)**  
Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for marking and interpreting soil survey. Agriculture handbook n°436. Soil Consevation Service, USDA. 754 p
- STATISTICA (2003)**  
STATISTICA V. 6.1 Statsoft, Inc., logiciel d'analyse des données.
- STOOPS G. (1986)**  
Multilingual translation of the terminology used in the "Handbook for soil thin section description". Pédologie XXXVI, (3) : 337-348
- TERS M. et FARA A. (1968)**  
Sur quelques gisements de haut niveau marin entre la Loire et la Sevre niortaise. Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire. Vol. 5, n°1, pp :19-43
- U.S.SALINITY LABORATORY STAFF (1954)**  
Diagnosis and improvement of salin and alkali soils. USDA handbook n°60, 160 p
- VAUDOUR J. et CLAUZON G. (1976)**  
Les croûtes calcaires ont-elles toutes une origine pédologique ?. Méditerranée, Deuxième série, Tome 24 : 71-81.
- VALLES V. (1987)**  
Modélisation des transfèress d'eau et des sels dans un sol argileux. Application au calcul des doses d'irrigation. Thèse doc. Ing. Sci. Géol. Mém., 79, 148 p
- VALLES V. BERTRAND R. BOURGEAT F. et N'DIAYE M. (1989)**  
Le concept d'alcalinité résiduelle généralisée et l'irrigation des sols sodiques. Application aux sols du Karoumari (Mali) et de la Vallée de l'Oued Medjerdah (Tunisie). Agronomie Tropicale 44, (3) : 157-163
- VALLES V., PACHEPSKY YA., and PONIZOVSKY AA. (1991)**  
Invariant criteria for irrigation water quality assessment in arid and semi arid regions. In : Genesis and control of fertility of salt-affected soils. ISSS Subcommission on Salt Affected soils, Ah-Union Society of Soil Science, USSR, V.V. Dokuchaev Soil Institute. Moscow : 330-333
- VESSEREAU A. (1960)**  
Recherche et experimentation en agriculture. Tome II : Méthodes statistiques en biologie et en agronomie. Ed. J-B BAILLIERE et fils, Paris, 538 p.

**VIEILLEFON J. (1979)**

Contribution à l'amélioration de l'étude analytique des sols gypseux. Cah. ORSTOM. Sér. Pédol. Vol. XVII, 3 : 195-223

**WORLD HEALTH ORGANISATION (WHO) (2008)**

Guidelines for Drinking-water Quality. Third Ed. Incorporating the first and second addenda. Vol. 1 Recommendations. Geneva. 515 p.

**WRB (2006)**

World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication. World soil resources reports 103, FAO, Roma

**ZOUGGARI H. (1996)**

Modélisation des interactions ioniques dans les solutions concentrées d'électrolytes à partir de l'étude expérimentale de la solubilité des sulfates de sodium et de magnésium. Application aux saumures et aux sols salés en zone aride. Thèse Doc. ENSA, Rennes, 189 p.

## LISTES DES TABLEAUX PAR CHAPITRE

### Chapitre I

Tableau I.1 : Pourcentage de pluie durant les quatre saisons de l'année .....	13
Tableau.I.2 : L'ETP mensuelle calculée pour la région sud du Hodna (méthode Turc).....	15
Tableau I.3 : Correspondances entre sols, les substrats et les morphologies.....	23
Tableau I.4 : Les types de sols et leur localisation au Sud du Hodna.....	27
Tableau I.5 : Bilan des attributions des terres. Superficiés attribuées par commune à l'initiative locale.....	31
Tableau I.6 : Bilan comparatif de quelques actions menées dans le cadre du PNDA dans la commune de M'Cif.....	32

### Chapitre III

Tableau III.1 : Appréciation de salinité du sol sur rapport 1/5 (Mathieu et Pieltain, 2003) .....	43
Tableau III.2 : Appréciation de salinité du sol sur extrait saturé (Mathieu et Pieltain, 2003).....	43
Tableau III.3 : Appréciation du coefficient de perméabilité. (Lozet et Mathieu, 1990).....	45
Tableau III.4 : Evaluation des pourcentages des classes de calcaire.....	45
Tableau III.5 : Appréciation des valeurs des classes de CEC.....	45

### Chapitre IV

Tableau IV.1. Nombre d'exploitations au sud du Hodna en 2007.....	53
Tableau IV.2 : Distribution des valeurs propres et de la variance selon les différents axes factoriels dans les échantillons de surface.....	64
Tableau IV.3 : Matrice de corrélation .....	65
Tableau IV.4 : Corrélations variables/axes principaux.....	65
Tableau IV.5 : Test statistique de la comparaison d'une moyenne avec un témoin.....	70
Tableau IV.6 : Valeurs des caractéristiques physico-chimiques des eaux d'irrigation.....	72
Tableau IV.7 : Caractéristiques analytiques de l'eau de crue dans le site de Memdouda.....	73
Tableau IV.8 : Valeurs des caractéristiques physico-chimiques des eaux d'irrigation.....	74
Tableau IV.9 : Valeurs des caractéristiques physico-chimiques des eaux d'irrigation.....	75
Tableau IV.10 : bilan de la salinité globale au niveau des colonnes.....	80
Tableau IV.11 : Statistiques descriptives des valeurs des fractions granulométriques.....	82
Tableau IV.12 : Matrice de corrélation des fractions granulométriques.....	83
Tableau IV.13 : Composition minéralogique des échantillons en poudre du site de Memdouda.....	93
Tableau IV.14 : Caractérisation micromorphologique des profils du site de Memdouda....	96
Tableau IV.15 : Composition minéralogique des échantillons en poudre du site de Mergueb.....	96
Tableau IV.16 : Caractérisation micromorphologique des profils du site de Mergueb.....	99
Tableau : IV. 17 : Composition minéralogique des échantillons en poudre du site de Chott.....	101
Tableau IV. 18 : Caractérisation micromorphologique des profils du site de Chott.....	103

### CHAPITRE V

Tableau V.1 : Caractéristiques principales des sous bassins versants du Hodna.....	109
--	-----

## CHAPITRE VI

Tableau VI.1 : Prélèvement recensés en 2005 (Millions de m <sup>3</sup> /an) dans le Hodna.....	119
---	-----

## CHAPITRE VII

Tableau VII.1 : Les paramètres de classification et les familles d'eau d'irrigation .....	132
Tableau VII. 2 : Synthèse des paramètres chimiques de l'eau.....	134
Tableau VII. 3 : Relations composition chimique - CE des eaux souterraines .....	135
Tableau VII. 4 : Distribution des valeurs propres et de la variance selon les différents axes factoriels dans les échantillons d'eau .....	138
Tableau VII. 5 : Matrice de corrélation (n=124, corrélation significatives marquées à p<0,05).....	139
Tableau VII. 6 : Corrélations variables/axes principaux .....	140
Tableau VII.7 : Facteurs limitants en irrigation dans les eaux étudiées.....	149
Tableau VII.8 : Classement des eaux souterraines, en fonction des critères de salinité globale et de la famille d'évolution géochimique .....	156
Tableau VII.9 : Directive pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation pour les nitrates (FAO, 1988).....	160
Tableau VII.10 : Distribution des puits en classes de concentration.....	160
Tableau VII.11 : Distribution des forages en classes de concentration.....	161
Tableau VII.12 : Distribution des forages en classes de concentration.....	162

# LISTES DES FIGURES PAR CHAPITRE

## Chapitre I

Fig. I.1 : Localisation du Bassin du Hodna.....	8
Fig. I.2 : Le Hodna : Une variété de paysages (Sebhi, 1987).....	10
Fig.I.3 : Les zones climatiques du Hodna.....	12
Fig. I.4 : Moyennes mensuelles des précipitations (station de Ain Diss).....	13
Fig. I.5 : Moyennes mensuelles des températures.....	14
Fig.I.6 : Diagramme ombrothermique de la zone d'étude.....	15
Fig.I.7 : Diagramme pluviothermique de la zone d'étude.....	16
Fig. I.8 : Stratigraphie du Hodna (Guiraud, 1973).....	17
Fig. I.9 : Coupe schématique du bassin de chott El Hodna.....	19
Fig.I.10 : Carte phyto-écologique du Hodna.....	25
Fig. I. 11 : Planche photographique représentant la mise en valeur des terres au sud du Hodna.....	32

## Chapitre II

Fig. II.1 : Localisation des échantillons de sol.....	35
Photo II.1 : Essai expérimental en colonne .....	36
Fig. II.2 : Localisation des profils étudiés.....	37

## Chapitre III

Fig. III.1 : Limites de la zone étudiée.....	40
Fig. III.2 : Triangle textural Américain.....	44

## Chapitre IV

Fig. IV.1 : Carte d'ensablement du sud du Hodna. (Période 1972).....	47
Fig. IV.2 : Carte d'ensablement du sud du Hodna. (Période 1986).....	48
Fig. IV.3 : Carte d'ensablement du sud du Hodna. (Période 2001).....	49
Fig. IV.4 : Variabilité interannuelle des pluies au sud du Hodna.....	50
Fig. IV.5 : Schéma d'aménagement rural intégré au sud du Hodna dans les années 1970.....	52
Fig. IV.6 : L'accroissement démographique au sud du Hodna.....	53
Fig. IV.7 : Défrichement des terres au piedmont nord du Djebel Meharga.....	54
Fig. IV.8 : Parcours dégradé.....	54
Fig. IV.9 : Pourcentage des classes de calcaire des échantillons de surface .....	56
Fig. IV.10 : Valeur moyenne de calcaire par site. ....	57
Fig. IV.11 : pourcentage des classes texturales.....	57
Fig. IV.12 : Report des pourcentages des différentes fractions sur le triangle textural.....	58
Fig. IV.13 : Valeur moyenne des éléments fins (argile+limon fin) par site. ....	58
Fig. IV.14 : Valeur moyenne des éléments grossiers (sable fin+sable grossier) par site. ....	59
Fig. IV.15 : Répartition des classes de CEC par site.....	60
Fig. IV.16 : Valeur moyenne de $\text{Log}_{10}$ CEC par site.....	60
Fig. IV.17 : Valeur moyenne de perméabilité ( $\text{Log}_{10}K$ ) par site. ....	61
Fig. IV.18 : Répartition des échantillons de sol par classe de salinité.....	61
Fig. IV.19 : Distribution des échantillons sales ( $\text{CE}_{1:5} > 1\text{ds/m}$ ) au niveau des sites d'étude.....	62
Fig. IV.20 : Pourcentage des classes de pH des échantillons de surface.....	62
Fig. IV.21 : ACP des sols en surface, représentation des variables dans le plan 1x2.....	67
Fig. IV.22 : ACP des sols en surface, représentation des variables dans le plan 1x3.....	67
Fig. IV.23 : ACP des sols en surface, représentation des individus dans le plan 1x2.....	68
Fig.IV.24 : ACP des sols en surface, représentation des individus dans le plan 1x3.....	68

Fig. IV.25 : Profils salins.....	72
Fig.IV.26 : Profils salins.....	74
Fig.IV.27 : Profils salins.....	75
Fig.IV.28 : Triangle de Piper des solutions de sol .....	77
Fig. IV.29 : Evolution de la densité apparente au cours des cycles.....	78
Fig. IV.30 : Profils salins.....	79
Fig.IV.31 : Evolution de la salinité globale au cours des cycles.....	80
Fig. IV.32 : Variation des fractions granulométriques (cas de Memdouda).....	85
Fig. IV.33 : Variation des fractions granulométriques (cas de Mergueb).....	85
Fig. IV.34 : Variation des fractions granulométriques (cas du Chott).....	86
Fig. IV.35 : Morphoscopie des sables .....	87
Fig. IV.36 : Morphoscopie des sables .....	88
Fig. IV.37 : Morphoscopie des sables .....	89
Fig.IV.38 : Variation des teneurs de calcaire.....	90
Fig. IV.39 : Variation des teneurs de calcaire.....	91
Fig. IV.40 : Variation des teneurs de calcaire.....	92
Fig. IV.41 : Diagramme de poudre de l'échantillon P2H2 (Memdouda) .....	94
Fig. IV.42 : Diagramme de poudre de l'échantillon P1H2 (Memdouda) .....	94
Fig. IV. 43 : Planche photographique (site de Memdouda) .....	95
Fig.IV.44 : Diagramme de poudre de l'échantillon P1H2 (Mergueb) .....	97
Fig. IV.45 : Diagramme de poudre de l'échantillon P1H5 (Mergueb) .....	97
Fig. IV.46 : Diagramme de poudre de l'échantillon P2H3 (Mergueb) .....	98
Fig. IV.47 : Planche photographique (site de Mergueb) .....	100
Fig. IV. 48 : Diagramme de poudre de l'échantillon P2H3 (Chott) .....	102
Fig. IV. 49 : Diagramme de poudre de l'échantillon P1H3 (Chott) .....	102
Fig. IV.50 : Planche photographique (site du Chott) .....	104

## CHAPITRE V

Fig. V.1 : Réseau hydrographique du bassin versant du Hodna .....	111
Fig. V.2 : L'extension du système aquifère Hodnéen (ANRH, 2006) .....	112
Fig. V.3 : Localisation des piézomètres réalisés par l'ANRH entre 1999 à 2005.....	114
Fig. V.4 : Rabattements totaux en mètres déterminés dans la nappe profonde sur les groupes d'historiques pour la période 1965-2005 (ANRH, 2006).....	114

## CHAPITRE VI

Fig. VI.1 : Evolution des nombres de puits et forages exploitant le système aquifère Hodnéen.....	116
Fig. VI.2 : Evolution des prélèvements totaux exploitant le système aquifère Hodnéen.....	117
Fig. VI.3 : Prélèvements recensés en 1983 dans le Hodna.....	118
Fig. VI.4 : Prélèvements recensés en 1996 dans le Hodna.....	118

## CHAPITRE VII

Fig. VII.1 : Localisation des points d'eau archive nappe phréatique 1973.....	121
Fig. VII.2 : Localisation des points d'eau archive nappe profonde 1996.....	122
Fig. VII.3 : Localisation des points d'eau nappe profonde (échantillons de 2008) .....	122
Fig. VII.4 : Diagramme de Riverside (1954) modifié par Durand (1958) .....	125
Fig. VII.5 : Diagramme de PIPER .....	127
Fig. VII.6 : Illustration de la " loi du T " (Vallès et al., 1989).....	130
Fig. VII. 7 : Corrélations entre paramètres hydrochimiques observés dans les eaux souterraines .....	136
Fig. VII. 8 : Cercle de corrélation .....	140

Fig. VII. 9 : Disposition des individus .....	141
Fig. VII.10 : Les eaux de surface sur le diagramme de RIVERSIDE (1954) modifié par Durand (1958) .....	143
Fig. VII. 11 : Risque de salinisation des eaux (critères Riverside, 1954) .....	144
Fig. VII.12 : Risque d'alcalinisation des eaux (critères Riverside, 1954) .....	145
Fig. VII. 13 : Les eaux souterraine sur le diagramme de RIVERSIDE (1954) modifié par Durand (1958) .....	146
Fig. VII. 14 : Eaux de la nappe profonde (2008) sur diagramme de PIPER. Observations par classe de conductivité électrique Riverside .....	147
Fig. VII. 15 : Eaux de la nappe profonde (1996) sur diagramme de PIPER. Observations par classe de conductivité électrique Riverside .....	147
Fig. VII. 16 : Eaux de la nappe phréatique (1973) sur diagramme de PIPER. Observations par classe de conductivité électrique Riverside .....	148
Fig. VII. 17 : Eaux des Oueds du Hodna sur diagramme de PIPER .....	148
Fig. VII.18 : Composition chimique des eaux souterraines en fonction du facteur de concentration chlorure. Les concentrations ioniques sont exprimées en mol/L .....	152
Fig. VII.19 : Evolution des molalités en calcium, sulfates et alcalinité en fonction du facteur de concentration chlorure .....	153
Fig. VII.20 : Etat de saturation des eaux par rapport à la calcite et du gypse .....	155
Fig. VII.21 : Evolution des indices de saturation de la calcite et du gypse en fonction du facteur de concentration chlorure .....	156
Fig. VII. 22 : Différenciation des groupes salin et alcalin, au sein des eaux à alcalinité positive .....	157
Fig. VII.23 : Différenciation des familles saline calcique et saline sulfatée, au sein du groupe d'évolution géochimique saline .....	157
Fig. VII.24 : Distribution des puits en fonction des classes de concentration .....	161
Fig. VII.25 : Distribution des forages en classes de concentration (archive de 1996) .....	161
Fig. VII.26 : Distribution des forages en classes de concentration (cas de 2008) .....	162
Fig. VII.27 : Concentration seuil des nitrates dans les eaux souterraines .....	162
Fig. VII.28 : Distribution de la fréquence cumulée des concentrations des nitrates en 1996 et 2008 .....	163
Fig. VII.29 : Localisation des puits et variabilité spatiale des nitrates (archive 1973) .....	163
Fig. VII.30 : Localisation des forages et variabilité spatiale des nitrates (archive 1996) .....	164
Fig. VII.31 : Teneurs des nitrates dans les forages classées par ordre de profondeurs croissantes (forage 1996) .....	165
Fig. VII.32 : Irrigation par planche largement adoptée au sud du Hodna .....	166



# TABLE DES MATIERES

AVANT PROPOS .....	1
SOMMAIRE .....	2
RESUME .....	3
INTRODUCTION GENERALE .....	6

## PREMIERE PARTIE : LE MILIEU PHYSIQUE

### Chapitre I : Le cadre de l'étude

1- LE CADRE GEOGRAPHIQUE.....	8
1.1- La zone montagneuse .....	8
1.2- La cuvette .....	9
2- LE CLIMAT .....	11
2.1- Les précipitations .....	11
2.2- Les températures.....	13
2.3- Le vent.....	14
2.4- L'humidité .....	14
2.5-L'insolation.....	14
2.6- Evaluation de l'évapotranspiration par la méthode de turc .....	14
2.7- Synthèse climatique.....	15
3- GEOLOGIE .....	17
3.1- Eléments de stratigraphie.....	17
3.2- Tectonique.....	20
4- GEOMORPHOLOGIE.....	21
4.1- Le relief.....	21
4.2- Les héritages morpho-pedologiques .....	22
4.3- Les niveaux du quaternaire.....	22
4.4- L'érosion.....	22
5- LES RESSOURCES EN EAU.....	24
5.1- Les eaux superficielles.....	24
5.2- Les eaux souterraines .....	24
6- VEGETATION NATURELLE .....	24
7- LES SOLS.....	26
8- APERÇU HISTORIQUE SUR L'UTILISATION DES TERRES.....	29
8.1- La société pastorale précoloniale.....	29
8.2-La colonisation et la destruction des fondements de l'agropastoralisme traditionnel.....	30
8.3- Période après l'indépendance .....	30

## DEUXIEME PARTIE : IMPACT DE LA MISE EN CULTURE EN IRRIGUE SUR LES SOLS

### Chapitre II : Matériel

1- UTILISATION DES IMAGES SATELLITAIRES .....	34
2- ETUDE DE L'HORIZON DE SURFACE .....	34
2.1- Le site de Guebouhia .....	34
2.2- Le site de Defla .....	34
2.3- Le site de Chott .....	34
2.4- Le site de Mergueb .....	35
3- ETUDE EXPERIMENTALE SUR COLONNES .....	35

3.1- Remplissage des colonnes .....	35
4- ETUDE SUR DES FOSSES PEDOLOGIQUES .....	36

### Chapitre III : LES METHODES

1- CARTOGRAPHIE DIACHRONIQUE DE L'ENSABLEMENT .....	38
1.1- Zone concernée par l'étude.....	38
1.2- Méthodologie.....	38
2- ANALYSE DES SOLS ET TRAITEMENT DES ECHANTILLONS.....	38
2.1- Analyses physiques.....	38
2.1.1- Granulométrie.....	38
2.2.2- Perméabilité .....	38
2.2.3- Calcaire total.....	38
2.2.4- Gypse.....	38
2.2- Analyses physico-chimiques et chimiques .....	39
2.2.1- Capacité d'échange cationique (CEC) .....	39
2.2.2- Conductivité électrique (CE) .....	39
2.2.3- Carbone organique.....	39
2.2.4- pH <sub>eau</sub> .....	39
2.3-Methode de suivi des colonnes de sol.....	39
3- ANALYSES GEOCHIMIQUE MICROMORPHOLOGIQUE ET MINERALOGIQUE SUR FOSSES PEDOLOGIQUES .....	41
3.1- La solution du sol.....	41
3.2- Etude micromorphologique .....	41
3.3- Analyse minéralogique .....	41
3.4- Morphoscopie des sables .....	42
4- TRAITEMENT DES DONNEES .....	42
4.1- Analyse de la variance .....	42
4.2-Analyse en composantes principales .....	42
4.3- Test de conformité d'une moyenne .....	43
5- UTILISATION DES ECHELLES D'APRECIATION DES ANALYSES DU SOL.....	43
5.1- La conductivité électrique .....	43
5.2- La texture du sol .....	43
5.3- La perméabilité .....	44
5.4- Le calcaire total .....	45
5.5- La capacité d'échange cationique (CEC) .....	45

### Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSION

1- EVOLUTION DE L'ENSABLEMENT AU SUD DU HODNA.....	46
1.1-Introduction.....	46
1.2- Dynamique globale de l'ensablement au sud du Hodna.....	46
1.3- Les facteurs influençant la dynamique de l'ensablement.....	50
1.3.1- Causes naturelles.....	50
1.3.2- Causes anthropiques.....	51
1.4- Conclusion .....	55
2- ETUDE DE L'HORIZON DE SURFACE .....	56
2.1- Analyse globale des échantillons de surface.....	56
2.1.1- Le calcaire .....	56
2.1.2- La texture .....	57
2.1.3-La CEC .....	59
2.1.4- Le gypse .....	60
2.1.5- La perméabilité .....	60
2.1.6- La salinité globale .....	61

2.1.7- Le pH .....	62
2.1.8- La matière organique .....	62
2.1.9- Conclusion .....	63
<b>2.2- Analyse en composante principale (ACP) .....</b>	<b>64</b>
<b>2.3- Evolution des paramètres pédologiques .....</b>	<b>69</b>
<b>3- VARIATION VERTICALE DES PROPRIETES DU SOL .....</b>	<b>71</b>
<b>3.1- La salinisation des sols .....</b>	<b>71</b>
3.1.1- Situation loin du chott (le site de Memdouda) .....	71
3.1.2- Situation près du chott (le site de Mergueb) .....	73
3.1.3- Situation au niveau du chott (le site de Chott) .....	74
3.1.4- Conclusion .....	75
<b>3.2- Faciès chimique des solutions du sol .....</b>	<b>76</b>
<b>3.3- Essai expérimentale sur colonnes.....</b>	<b>77</b>
<b>3.4- Les profils texturaux .....</b>	<b>82</b>
<b>3.5- Origine des matériaux du sol (morphoscopie des sables) .....</b>	<b>87</b>
<b>3.6- Autres caractéristiques analytiques .....</b>	<b>90</b>
3.6.1- Le gypse .....	90
3.6.2- Le calcaire total .....	90
3.6.3- La perméabilité des sols .....	92
<b>3.7- Caractéristiques macromorphologique, micromorphologiques et minéralogiques des sols .....</b>	<b>93</b>
3.7.1- Le site de Memdouda. ....	93
3.7.2- Le site de Mergueb .....	96
3.7.3- Le site du Chott .....	101
<b>CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE .....</b>	<b>105</b>

## **TROISIEME PARTIE : IMPACT DE LA MISE EN CULTURE EN IRRIGUE SUR LES EAUX**

### **Chapitre V : L'HYDROSYSTEME**

<b>1- LES EAUX DE SURFACE .....</b>	<b>109</b>
<b>2- LES EAUX SOUTERRAINES .....</b>	<b>110</b>
<b>2.1- Structure et schéma du système aquifère Hodneen .....</b>	<b>110</b>
<b>2.2- La recharge du système aquifère Hodneen .....</b>	<b>110</b>
2.2.1- Recharge par les crues d'oueds .....	111
2.2.2- Infiltration directe des précipitations .....	112
2.2.3- Apports profonds par les aquifères encaissants .....	112
<b>2.3- Le problème de l'épuisement de la nappe .....</b>	<b>112</b>
2.3.1- Cas de la nappe phréatique .....	113
2.3.2- Cas de la nappe profonde .....	113
<b>2.4- Conclusion .....</b>	<b>115</b>

### **Chapitre V : EVOLUTION DES PRELEVEMENTS DES EAUX**

<b>1- SYNTHESE DES POINTS ET DES PRELEVEMENTS D'EAU .....</b>	<b>116</b>
<b>2- ANALYSE QUANTITATIVE D'UTILISATION DES EAUX DU SYSTEME HODNEEN .....</b>	<b>117</b>
<b>2.2- les principaux inventaires des points d'eau et leurs détails .....</b>	<b>117</b>
2.2.1- Inventaire de Derekoy (FAO, 1973) .....	117
2.2.2- Inventaire de l'ANRH 1983 .....	118
2.2.3- Inventaire de l'ANRH de M'Sila 1996 .....	118

2.2.4- Inventaire de l'ANRH de M'Sila 2005 .....	119
<b>2.3- Conclusion</b> .....	119

## **Chapitre VI : QUALITE DES EAUX**

<b>1- INTRODUCTION</b> .....	120
<b>2- MATERIEL ET METHODES</b> .....	120
<b>2.1- Données d'archives</b> .....	121
<b>2.2-Echantillonnage sur les eaux de la nappe profonde</b> .....	121
<b>2.3- Analyses des eaux au laboratoire</b> .....	121
2.3.1- Les analyses disponibles dans les archives (FAO, 1973 ; ANRH, 1996) .....	121
2.3.2- Les mesures réalisées sur nos propres échantillons.....	121
<b>2.4- Traitement des données</b> .....	123
2.4.1- Classification de Riverside .....	123
2.5.2- Diagramme de Piper .....	126
2.2.3- Classification FAO (FAO, 1988) .....	127
2.2.4- Analyse statistique .....	127
2.2.5- Représentation spatiale avec gOcad .....	127
2.2.6- Etude des équilibres des eaux par rapport a la calcite et au gypse.....	128
2.2.7- Evolution géochimique des eaux .....	129
2.2.8- Etude de l'évolution de la composition chimique des eaux : (Concept d'alcalinité résiduelle généralisée) .....	129
<b>3- RESULTATS ET DISCUSSION</b> .....	133
<b>3.1- Statistiques des variables hydrochimiques</b> .....	133
3.1.1- Statistiques descriptives .....	133
3.1.2-Correlation et régression des paramètres hydrochimiques .....	133
3.1.3- Analyse en composantes principales .....	138
3.1.4- Conclusion .....	141
<b>3.2- Caractérisation des paramètres hydrochimiques</b> .....	141
3.2.1- Classification des eaux .....	142
3.2.2- Faciès chimique des eaux .....	146
3.2.3- La qualité des eaux d'irrigation .....	148
3.2.4- Conclusion .....	149
<b>3.3- Evolution géochimique des eaux</b> .....	151
3.3.1- Choix d'un traceur chimique .....	151
3.3.2- Etat d'équilibres des eaux .....	153
3.3.3- Utilisation d'une approche dynamique : l'alcalinité résiduelle généralisée .....	154
3.3.4- Conclusion .....	158
<b>3.4- La pollution nitrique</b> .....	157
3.4.1- Introduction .....	159
3.4.2- Effets d'une contamination par les nitrates pour les végétaux .....	159
3.4.3- Effets d'une contamination par les nitrates pour la consommation humaine .....	160
3.4.5- Contamination des eaux souterraines du sud du Hodna par les nitrates .....	160
3.4.6- Répartition spatiale des zones polluées .....	163
3.4.7- Conclusion .....	166
<b>CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE</b> .....	167
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	169
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	172
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	182
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	184
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	186
<b>ANNEXES</b> .....	191

# **ANNEXES**

## ANNEXE 1

### Données de l'ONM Station de Ain Diss (1984-2006)

	Janv	Fevr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nove	Dece	Annuel
<b>Evaporation</b>	95,2	124,4	180,5	237,8	291,2	358,5	437,9	385,6	266,8	191,2	124	93,2	2752,2
<b>Humidité relative moyenne</b>	70	61	54	47	44	36	31	33	47	55	65	72	51
<b>moyenne mensuelle des vitesses des vents m/s</b>	3,5	3,8	3,7	4,4	3,7	3,4	3,1	2,7	2,5	2,3	2,9	3,0	3,3
<b>pluviometrie mm</b>	13,2	9,5	13,4	13,4	25,1	10,6	5,8	10,8	23,2	16,9	17,2	14,5	171,8
<b>nombre de jours de pluie moyen</b>	5,5	4,6	5	4,6	5,2	3,4	2,4	3,8	6	4,9	5,6	6,8	57
<b>Moyenne mensuelle des temperatures moyennes en °C</b>	8,7	10,7	14,1	17,3	22,5	27,9	31,3	30,8	25,6	20,4	13,8	9,9	19,4
<b>Moyenne mensuelle des temperature minimales en °C</b>	3,6	4,9	7,8	10,8	15,7	20,7	23,7	23,3	19,1	14,2	8,5	4,9	13,1
<b>Moyenne mensuelle des temperatures maximales en °C</b>	13,8	16,6	20,4	23,8	29,3	35,1	39	38,2	32,1	26,5	19	14,8	25,7
<b>Insolation</b>	188,5	204	242,2	261	287,8	301,1	320,5	296	244,5	229,4	193,1	171,1	2775,4

## ANNEXES 2

### Description morphologique et analyses des sols (Site de MEMDOUDA)

#### Profil n°01 : Sol non irrigué (témoin)

##### Information concernant la station et le sol

Date de description : 10/07/2008

Coordonnées : Nord 35°17.422` Est 4°23.957` Altitude : 451 m.

Physiographie : plaine

Topographie : plate, pente 0-2%.

Drainage : légèrement excessif

Végétation : naturelle

**Horizon A<sub>1</sub> 0 – 15 cm :** Light yellowish brown 10YR 6/4 sec, brown 10YR 4/3 humide, sandy loam, massive, tendre, peu nombreux pores fins, continues, quelconques, effervescence visible, très peu nombreuses racines fines, transition abrupte et régulière.

**Horizon C<sub>1</sub> 15 - 60 cm :** Light yellowish brown 10YR 6/4 sec, dark yellowish brown 10YR 4/4 humide, sandy clay loam, massive, friable, peu nombreux pores très fins à fins, forte effervescence, très peu nombreuses racines très fines, transition abrupte et régulière.

**Horizon C<sub>2</sub> 60 - 125 cm et plus :** Light yellowish brown 10YR 6/4 sec, dark yellowish brown 10YR 4/6 humide, sandy loam, massive, très friable, peu nombreux pores fins, quelconques, forte effervescence, très peu nombreuses racines très fines à fines.

**Tableau 1 :** Résultats analytiques des sols

Profil 1	Horizons	Granulométrie (%)					Matière organique (%)	CEC Mé/100g sol	K cm/h	CaCO <sub>3</sub> (%)	Gypse (%)	pH	CE dS/m
		A	LF	LG	SF	SG							
Memdouda	P1H1	11	8	6	48	22	0,19	5,4	2,79	9,47	0	7,8	1,1
	P1H2	22	17	6	34	16	0,38	7,95	3,52	18,95	0	7,8	0,7
	P1H3	7	7	5	54	22	0,19	6,39	3,36	16,18	0	8	0,5

**Tableau 2 :** Analyse de la solution du sol

N°	Profil	Horizon	pH	CE µS/cm	Bilan ionique mmoles/L						
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
10	Memdouda	P1H1	7,8	1100	1,27E-01	2,77E-02	1,63E-02	1,91E-03	1,15E-01	1,02E-01	7,43E-03
11	Memdouda	P1H2	7,8	700	6,62E-02	1,56E-02	7,58E-02	0,00E+00	9,94E-02	6,88E-02	2,41E-03
12	Memdouda	P1H3	8	500	5,16E-02	9,12E-03	3,21E-02	1,89E-03	6,98E-02	4,03E-02	5,07E-03

## Profil n°02 : Sol irrigué (cultivé depuis 1978)

### Information concernant la station et le sol

Date de description : 10/07/2008

Coordonnées : Nord 35°17.445` Est 4°23.929` Altitude : 452 m.

Physiographie : plaine

Topographie : plate, pente 0-2%.

Drainage : légèrement excessif.

Végétation : Jachère (précédent culturale de la parcelle : céréales et maraîchage).

**Horizon A<sub>1</sub> 0 – 36 cm** : Light yellowish brown 10YR 6/4 sec, dark yellowish brown 10YR 4/4 humide, sandy loam, massive, peu dur, peu nombreux pores fins à très fines, continues, forte effervescence, très peu nombreuses racines fines, transition distincte et régulière.

**Horizon C<sub>1</sub> 36 - 88 cm** : Light yellowish brown 10YR 6/4 sec, dark yellowish brown 10YR 4/4 humide, sandy loam, massive, très friable, peu nombreux pores très fins à fins, quelconques, forte effervescence, présence de coquilles d'escargot et pellette de verres de terre, très peu nombreuses racines fines, transition graduelle et régulière.

**Horizon C<sub>2</sub> 88 – 138 + cm** : Light yellowish brown 10YR 6/4 sec, dark yellowish brown 10YR 4/6 humide, sand, massive, très friable à meuble, peu nombreux pores fins à très fines, forte effervescence, présence de coquilles d'escargot, très peu nombreuses racines fines à fines.

Tableau 3 : Résultats analytiques des sols

Profil 2	Horizons	Granulométrie (%)					Matière organique (%)	CEC Mé/100g sol	K cm/h	CaCO <sub>3</sub> (%)	Gypse (%)	pH	CE dS/m
		A	LF	LG	SF	SG							
Memdouda	P2H1	17	18	6	38	16	0,55	7,43	2,76	17,57	0	8	1,3
	P2H2	10	17	7	41	27	0,09	9,37	2,54	20,13	0	8	0,8
	P2H3	2	2	5	26	66	0,33	5,37	2,81	10,95	0	8	0,5

Tableau 4 : Analyse de la solution du sol

N°	Profil	Horizon	pH	CE µS/cm	Bilan ionique mmoles/L						
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
16	Memdouda	P2H1	8	1300	8,74E-02	1,41E-01	8,79E-03	0,00E+00	2,03E-01	1,25E-01	1,27E-02
17	Memdouda	P2H2	8	800	8,31E-02	1,34E-01	1,79E-01	1,81E-03	1,68E-01	2,21E-01	5,57E-03
18	Memdouda	P2H3	8	500	4,31E-02	1,42E-01	5,41E-02	0,00E+00	1,13E-01	1,53E-01	5,94E-03



## Description morphologique et analyses des sols (Site de MERGUEB)

### Profil n°2 : Sol non irrigué (témoin)

#### Information concernant la station et le sol

Date de description : 05/07/2008

Coordonnées : Nord 35°19.431' Est 4°21.496' Altitude : 432 m.

Physiographie : plaine

Topographie : plate, pente 0-2%.

Drainage : modéré

Végétation : naturelle

**Horizon A<sub>1</sub> 0 – 11 cm :** Light yellowish brown 10YR 6/4 sec, dark yellowish brown 10YR 4/4 humide, loamy sand, particulaire, meuble, peu nombreux pores très fins à moyens, continus, quelconques, effervescence visible, très fines à grosses racines nombreuses, transition distincte et régulière.

**Horizon C<sub>1</sub> 11 - 50 cm :** Light yellowish brown 10YR 6/4 sec, dark yellowish brown 10YR 4/4 humide, sandy loam, massive, tendre, peu nombreux pores très fins à fins, quelconques, présence de coquilles, effervescence visible, fines racines très peu nombreuses, transition graduelle à distincte et régulière.

**Horizon C<sub>2</sub> 50 - 82 cm :** couleur dominante gray 10YR 5/1 sec, dark gray 10YR 4/1 humide, taches dominantes light gray 5Y 7/2 sec, light olive gray 5Y 6/2 humide contraste peu net, peu de tâche white 10YR 8/1 sec, peu de tâche terreuse gray 10YR 6/1 sec, sandy loam, massive, tendre, peu nombreux pores très fins à fins, présence de coquilles, forte effervescence, très fines racines très peu à peu nombreuses, transition graduelle à distincte et régulière.

**Horizon C<sub>3</sub> 82 - 110 cm :** couleur dominante light gray 5Y 7/2 sec, light olive gray 5Y 6/2 humide, taches dominantes gray 10YR 5/1 sec, dark gray 10YR 4/1 humide, peu de taches terreuse gray 10YR 6/1 sec, et blanchâtre white 10YR 8/1 sec, sandy loam, massive, très friable, peu nombreux pores fins, quelconques, effervescence visible, très fines racines très peu nombreuses, transition abrupte et régulière.

**Horizon C<sub>4</sub> 110 - 142 cm et plus :** white 10YR 8/1 sec, light gray 10YR 7/2 humide, peu de taches Gray 10YR 6/1 sec, dark gray 10YR 4/1 humide, et blanchâtres white 10YR 8/1 sec, loamy sand, massive, dur, peu nombreux pores très fins, quelconques, effervescence visible, très fines racines peu nombreuses.

Tableau 5 : Résultats analytiques des sols

Profil 2	Horizons	Granulométrie (%)					Matière organique (%)	CEC Mé/100g sol	K cm/h	CaCO <sub>3</sub> (%)	Gypse (%)	pH	CE dS/m
		A	LF	LG	SF	SG							
Mergueb	P2H1	5	5	5	44	38	0,33	4,64	10,25	8,88	0	8	0,9
	P2H2	6	8	8	40	33	0,19	4,53	7,99	12,63	0	8	0,4
	P2H3	17	17	12	23	30	0,62	6,16	4,73	47,76	0	7,9	1
	P2H4	12	7	2	35	41	0,33	4,67	6,86	12,14	0	7,9	1,5
	P2H5	7	0	7	43	44	0,10	4	5,83	8,78	0	7,7	3,3

Tableau 6 : Analyse de la solution du sol

N°	Profil	Horizon	pH	CE µS/cm	Bilan ionique mmoles/L						
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
19	Megueb	P2H1	8	900	1,22E-01	1,08E-02	1,17E-01	1,67E-03	8,99E-02	1,44E-01	6,97E-03
20	Megueb	P2H2	8	400	7,30E-02	1,09E-02	5,79E-03	1,70E-03	6,82E-02	5,03E-02	6,60E-03
21	Megueb	P2H3	7,9	1000	8,12E-02	1,26E-01	1,42E-02	0,00E+00	2,01E-01	1,10E-01	7,08E-03
22	Megueb	P2H4	7,9	1500	9,84E-02	1,74E-01	2,37E-02	1,74E-03	2,02E-01	1,79E-01	9,28E-03
23	Megueb	P2H5	7,7	3300	3,49E-01	5,59E-01	1,91E-01	3,56E-03	8,29E-01	5,75E-01	3,19E-02

## Profil P1 : Sol irrigué

### Information concernant la station et le sol

Date de description : 05/07/2008

Coordonnées : Nord 35°19.449` Est 4°21.421` Altitude : 437 m.

Physiographie : plaine

Topographie : plate, pente 0-2%.

Drainage : modéré à imparfait

Végétation : Verger

**Horizon A<sub>1</sub> 0 – 17 cm** : Light yellowish brown 10YR 6/4 sec, dark yellowish brown 10YR 4/4 humide, sandy loam, particulaire, meuble, peu nombreux pores très fins à fins continus quelconques, tubulaires, effervescence visible, très fines à fines racines très peu nombreuses, transition abrupte et régulière.

**Horizon C<sub>1</sub> 17 – 62 cm** : Light yellowish brown 10YR 6/4 sec, brown 10YR 4/3 humide, sandy loam, masive, peu à très dur, peu nombreux pores très fins à fins, continus quelconques, tubulaires, présence de coquilles, forte effervescence, très fines à grosses racines assez nombreuses, transition distincte et régulière.

**Horizon C<sub>2</sub> 62 – 86 cm** : couleur dominante Gray 10YR 6/1 sec, dark gray 10YR 4/1 humide, tâches à la base de l'horizon, peu nombreuses, fines à moyennes, contraste distinct, tâches dominantes light yellowish brown 10YR 6/4 sec, dark yellowish brown 10YR 4/4 humide. Peu de tâches, white 10YR 8/1 sec, light gray 10YR 7/2 humide, contraste net. Peu de tâches d'oxydation brownish yellow 10YR 6/8 sec, yellowish brown 10YR 5/8 humide, sandy loam, massive, très friable, forte effervescence, très fines à grosse racines nombreuses, transition distincte et régulière.

**Horizon C<sub>3</sub> 86 – 102 cm** : couleur dominante white 10YR 8/1 sec, light gray 10YR 7/2 humide, tâches terreuses gray 10YR 6/1 sec, dark gray 10YR 4/1 humide, sandy loam, massive, très friable à friable, peu nombreux pores fins à moyens, quelconques, forte effervescence, très fines à grosses racines très nombreuses, gros nodules calcaires en bas de l'horizon, très dur, quelconques parfois en plaquettes de 4 cm d'épaisseur environ, transition distincte et régulière.

**Horizon C<sub>4y</sub> 102 – 122 cm et plus** : couleur dominante light gray 5Y 7/2 sec, light olive gray 5Y 6/2 humide, peu de tâches terreuse gray 10YR 6/1 sec et peu de tâches blanchâtres white 10YR 8/1 sec, sandy loam, massive, très friable, peu nombreux pores fins, quelconques, effervescence visible, racines absentes.

Tableau 7 : Résultats analytiques des sols

Profil 1	Horizons	Granulométrie (%)					Matière organique (%)	CEC Mé/100g sol	K cm/h	CaCO <sub>3</sub> (%)	Gypse (%)	pH	CE dS/m
		A	LF	LG	SF	SG							
Mergueb	P1H1	12	5	5	41	34	0,24	5,69	4,05	8,19	0	7,8	0,9
	P1H2	15	15	5	42	22	0,57	5,96	6,06	22,34	0	7,8	1,9
	P1H3	17	20	7	26	26	0,72	7,69	5,35	29,31	0	7,8	2,1
	P1H4	17	17	7	28	28	0,22	6,59	2,7	39,87	0,70	7,7	3,3
	P1H5	5		32	23	35	0,05	4,84	5,36	9,67	18,23	7,7	3,3

Tableau 8 : Analyse de la solution du sol

N°	Profil	Horizon	pH	CE µS/cm	Bilan ionique mmoles/L						
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
1	Mergueb	P1H1	7,8	900	9,50E-02	7,54E-02	5,83E-02	0,00E+00	2,04E-01	9,49E-02	5,64E-03
2	Mergueb	P1H2	7,8	1900	1,92E-01	1,20E-01	1,05E-01	0,00E+00	2,80E-01	2,20E-01	8,26E-03
3	Mergueb	P1H3	7,8	2100	2,38E-01	1,53E-01	7,61E-02	0,00E+00	4,44E-01	2,02E-01	8,60E-03
4	Mergueb	P1H4	7,7	3300	4,87E-01	2,75E-01	1,29E-01	0,00E+00	6,13E-01	5,14E-01	1,13E-02
5	Mergueb	P1H5	7,7	3300	5,13E-01	2,50E-01	2,18E-02	0,00E+00	6,39E-01	4,48E-01	1,37E-02

## Description morphologique et analyses des sols (Site de CHOTT)

### Profil n°1 : Sol non irrigué

#### Information concernant la station et le sol

Coordonnées : Nord 35°20.756` Est 4°24.255` Altitude : 410 m.

Physiographie : plaine

Topographie : plate, pente 0-2%.

Drainage : Modéré

Végétation : naturelle

**Horizon A<sub>1</sub> 0 – 15 cm** : Light yellowish brown 10YR 6/4 sec, dark yellowish brown 10YR 4/4 humide, silt loam, massive, peu dur à dur, assez nombreux pores fins à moyens, forte effervescence, très nombreuses racines fines à grosses, transition distincte et régulière.

**Horizon (B)<sub>y</sub> 15 - 40 cm** : Light yellowish brown 10YR 6/4 sec, dark yellowish brown 10YR 4/4 humide, silt loam, colonnaire, très dur, assez nombreux pores très fins à fins, quelconques, forte effervescence, fines racines peu nombreuses, transition distincte et régulière.

**Horizon C<sub>y</sub> 40 - 128 + cm** : Light yellowish brown 10YR 6/4 sec, dark yellowish brown 10YR 4/4 humide, silt loam, massive, très ferme, assez nombreux pores fins à très fines, quelconques, forte effervescence.

Tableau 9 : Résultats analytiques des sols

Profil 1	Horizons	Granulométrie (%)					Matière organique (%)	CEC Mé/100g sol	K cm/h	CaCO <sub>3</sub> (%)	Gypse (%)	pH	CE dS/m
		A	LF	LG	SF	SG							
Chott	PIH1	0	27	56	19	2	1,479	11,97	15,75	23,49	2,41	7,7	3
	PIH2	2	67	10	19	1	1,032	16,25	5,62	25,07	5,02	7,7	3,7
	PIH3	0	47	32	20	1	0,636	16,9	1,81	31,18	5,17	7,8	7,8

Tableau 10 : Analyse de la solution du sol

N°	Profil	Horizon	pH	CE µS/cm	Bilan ionique mmoles/L						
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
13	Chott	PIH1	7,7	3000	4,46E-01	4,69E-01	1,23E-01	1,72E-03	7,38E-01	6,01E-01	1,27E-02
14	Chott	PIH2	7,7	3700	5,23E-01	3,79E-01	1,67E-01	1,76E-03	5,28E-01	7,18E-01	9,02E-03
15	Chott	PIH3	7,8	7800	4,43E-01	7,87E-01	1,82E+00	3,71E-03	1,76E+00	1,26E+00	7,93E-03

## Profil n°2 : Sol irrigué

### Information concernant la station et le sol

Coordonnées : Nord 35°20.674` Est 4°24.301` Altitude : 402 m.

Physiographie : plaine

Topographie : plate, pente 0-2%.

Drainage : Modéré à imparfait

Végétation : céréales

**Horizon A<sub>1</sub> 0 – 13 cm** : Light yellowish brown 10YR 6/4 sec, dark yellowish brown 10YR 4/4 humide, silt loam, massive, dur, peu nombreux pores très fins à moyens, forte effervescence, très nombreuses racines très fines à grosses, transition distincte et régulière.

**Horizon C<sub>1y</sub> 13 - 73 cm** : pale brown 10YR 6/3 sec, dark yellowish brown 10YR 4/4 humide, assez nombreuses taches blanchâtre (amas), fines, distinctes, silt loam, massive, friable à très friable, peu nombreux pores fins, effervescence visible, très peu nombreuses fines racines, transition abrupte et régulière.

**Horizon C<sub>21my</sub> 73 - 98 cm** : Light gray 10YR 7/2 sec, grayish brown 10YR 5/2 humide, horizon avec noircissement, nombreuses tâches blanchâtres (amas), moyennes à fines parfois grandes, distinctes, loamy sand, massive, très friable, très peu nombreux pores fins, effervescence nulle, assez nombreuses grosse racines, transition abrupte et régulière.

**Horizon C<sub>22my</sub> 98 – 123+ cm** : very pale brown 10YR 8/2 sec, pale brown 10YR 6/3 humide, loamy sand, massive, effervescence nulle, encroûtement très friable.

Tableau 11 : Résultats analytiques des sols

Profil 2	Horizons	Granulométrie (%)					Matière organique (%)	CEC Mé/100g sol	K cm/h	CaCO <sub>3</sub> (%)	Gypse (%)	pH	CE dS/m
		A	LF	LG	SF	SG							
Chott	P2H1	5	37	35	21	3	1,531	19,56	14,08	21,32	1,63	7,7	5,5
	P2H2	0	52	7	28	8	0,55	18,35	4,11	13,13	6,30	7,8	3,5
	P2H3	12		0	43	40	0,155	9	3,59	2,88	51,60	7,8	3,1
	P2H4	4	12	44	35	0,086	8,44	3,06	0,56	48,50	7,7	3,3	

Tableau 12 : Analyse de la solution du sol

N°	Profil	Horizon	pH	CE µS/cm	Bilan ionique mmol/L						
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
6	Chott	P2H1	7,7	5500	7,34E-01	5,04E-01	4,96E-01	1,82E-03	9,21E-01	1,02E+00	1,37E-02
7	Chott	P2H2	7,8	3500	5,21E-01	3,54E-01	3,32E-02	1,77E-03	5,11E-01	6,31E-01	1,18E-02
8	Chott	P2H3	7,8	3100	4,88E-01	3,56E-01	1,13E-01	1,80E-03	4,43E-01	6,78E-01	5,65E-03
9	Chott	P2H4	7,7	3300	4,75E-01	3,47E-01	1,44E-01	1,84E-03	4,79E-01	6,53E-01	5,35E-03

## ANNEXE 3

### Caractéristiques analytiques de l'horizon de surface

Tableau 13 : Caractéristiques analytiques de l'horizon de surface (site de Chott).

A+LF (%)	Matière organique (%)	CEC Mé/100g sol	CaCO <sub>3</sub> (%)	Gypse (%)	CE μS/cm	LG (%)	K cm/h	Sables (%)	pH
30	0,76	6,11	12,04	0	1298	12	4,36	53	7,28
10	0,10	4,78	8,44	0	329	22	9,48	66	7,06
7	0,28	3	3,22	0	180,6	5	10,06	85	7,79
2	0,28	3,1	1,49	0	9770	5	35,30	98	8,32
10	0,50	4,18	0,99	22,15	130	37	4,08	48	7,83

A+LF : argile+limon fin

Tableau 14 : Caractéristiques analytiques de l'horizon de surface (site de Guebouhia).

A+LF (%)	Matière organique (%)	CEC Mé/100g sol	CaCO <sub>3</sub> (%)	Gypse (%)	CE μS/cm	LG (%)	K cm/h	Sables (%)	pH
20	0,74	3,2	8,98	0	408	7	10,56	75	7,59
7	0,17	4,34	4,48	0	302	2	15,67	73	7,86
7	0,07	3	3,45	0	1672	0	17,64	98	7,98
2	0,55	4,81	15,39	1,05	2710	27	8,89	72	7,36
12	0,38	4,24	14,95	0	398	3	5,60	80	7,87
4	0,10	3,1	5,97	0	203	2	15,98	89	8,41

A+LF : argile+limon fin

Tableau 15 : Caractéristiques analytiques de l'horizon de surface (site de Defla)

A+LF (%)	Matière organique (%)	CEC Mé/100g sol	CaCO <sub>3</sub> (%)	Gypse (%)	CE μS/cm	LG (%)	K cm/h	Sables (%)	pH
37	0,89	17,05	20,23	0	392	5	4,77	55	7,5
32	0,53	16,29	18,65	0	417	5	6,48	62	7,81
15	0,26	5,69	15,10	0	737	2	6,92	86	8,16
34	0,55	12,87	29,11	0	303	17	3,72	44	7,82
22	0,40	6,18	16,38	0	197,1	10	4,64	65	7,93
29	0,43	8,12	23,78	0	245	29	8,79	46	7,96
44	0,79	6,32	24,47	0	274	10	5,40	49	7,79
32	0,48	8,65	15,39	0	709	5	4,84	64	7,58
44	0,53	8	23,19	0	807	5	1,43	46	7,72
52	0,69	12,98	27,83	0	213	17	3,77	26	7,8

A+LF : argile+limon fin

Tableau 16 : Caractéristiques analytiques de l'horizon de surface (site de Mergueb).

A+LF (%)	Matière organique (%)	CEC Mé/100g sol	CaCO <sub>3</sub> (%)	Gypse (%)	CE $\mu$ S/cm	LG (%)	K cm/h	Sables (%)	pH
17	0,17	6,51	9,38	0	256	7	5,79	78	8,07
30	0,38	10,77	14,41	0	255	8	3,92	57	8,01
11	0,26	4,64	10,12	0	2440	12	8,72	72	7,96
0	0,09	4,69	5,33	5,34	410	27	9,18	68	7,49
17	0,19	4,15	7,65	0	428	2	4,60	77	7,8
7	0,38	6,47	10,07	0	236	35	5,91	61	7,72
17	0,48	7,31	7,70	0	237	25	8,33	53	7,88
19	0,43	8,21	10,07	0	2190	10	1,87	70	8,05
17	0,69	9,31	15,59	0	378	10	4,43	75	7,53
27	0,74	9,96	18,26	0	2230	30	2,95	39	7,82
2	0,33	11,07	12,34	1,96	452	35	2,44	68	7,54
22	0,45	9,31	13,22	0	1390	25	5,07	58	7,7
39	0,71	12,18	19,14	0	236	15	1,49	47	7,5
36	0,65	13,79	16,92	0	592	1	4,01	59	7,89
39	0,69	12,08	18,75	0	754	0	2,44	57	7,68
27	0,48	8,95	14,21	0	157,2	2	5,63	70	7,68
14	0,26	6,13	7,75	0	180,7	2	6,18	73	8,3
25	0,43	10,25	11,05	0	336	0	4,31	70	8,08
37	0,40	12,8	16,68	0	3080	10	2,54	48	8,4

A+LF : argile+limon fin

## ANNEXE 4

### Essai en colonnes de sol

Tableau 17 : Evolution de la conductivité électrique (CE  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) selon les cycles humectation-dessication.

	sol	cycle1	cycle2	cycle3	cycle4	cycle5
CE1	270	484,33	346	504,67	406,33	469,33
CE2	270	416,33	322,67	291	359,67	297
CE3	270	447,67	399,33	302,33	304,67	301,67

Tableau 18 : Evolution de la densité apparente selon les cycles humectation-dessication.

	Cycle1	Cycle2	Cycle3	Cycle4	Cycle5
Couche 1	1,78	1,78	1,85	1,77	1,73
Couche 2	1,80	1,85	1,88	1,87	1,82
Couche 3	1,84	1,88	1,88	1,87	1,84

## Annexe 5

Tableau 19 : Directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation (FAO, 1988).

Nature des problèmes	Unite	Restriction pour l'irrigation		
		Aucune	Légère à modérée	Forte
<b>Salinité</b> ( <i>influe sur l'eau disponible pour la plante</i> )				
EC <sub>w</sub>	dS/m	<0,7	0,7-3,0	>3,0
TDS	mg/l	<450	450-2000	>2000
<b>Infiltration</b> ( <i>influe sur la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol : utiliser à la fois EC<sub>w</sub> et SAR</i> )				
SAR = 0-3	et EC <sub>w</sub> =	>0,7	0,7-0,2	<0,2
SAR = 3-6	et EC <sub>w</sub> =	>1,2	1,2-0,3	<0,3
SAR = 6-12	et EC <sub>w</sub> =	>1,9	1,9-0,5	<0,5
SAR = 12-20	et EC <sub>w</sub> =	>2,9	2,9-1,3	<1,3
SAR = 20-40	et EC <sub>w</sub> =	>5,0	5,0-2,9	<2,9
<b>Toxicité de certains ions</b> ( <i>affectent les cultures sensibles</i> )				
<b>Sodium (Na)</b>				
Irrigation de surface	SAR	<3	3-9	>9
Irrigation par aspersion	méq/l	<3	>3	
<b>Chlore (Cl)</b>				
Irrigation de surface	méq/l	<4	4-10	>10
Irrigation par aspersion	méq/l	<3	>3	
<b>Bore (B)</b>	mg/l	<0,7	0,7-3,0	>3,0
<b>Effets divers</b> ( <i>affecte les cultures sensibles</i> )				
Azote (NO <sub>3</sub> -N)	mg/l	<5	5-30	>30
Bicarbonate (HCO <sub>3</sub> ) ( <i>seulement pour l'aspersion sur frondaison</i> )	méq/l	<1,5	1,5-8,5	>8,5
pH		Zone normale : 6,5-8,4		



## **ANNEXE 6 :**

Article publié dans la revue : **Environmental earth sciences 2012**

**Anthropogenic contamination of groundwater with nitrate in arid region: case study of southern Hodna (Algeria)**

Salah Abdesselam, Amor Halitim, Anthony Jan, Fabienne Trolard and Guilhem Bourrie

**Open access**

<http://link.springer.com/article/10.1007/s12665-012-1834-5>