



HAL
open science

Contribution des SIG et de la modélisation volumique à la caractérisation géomorphologique et géologique de la région des Doukkala “ Meseta côtière, Maroc ” - Implication sur les effondrements karstiques

Youness Ahmed Laaziz

► **To cite this version:**

Youness Ahmed Laaziz. Contribution des SIG et de la modélisation volumique à la caractérisation géomorphologique et géologique de la région des Doukkala “ Meseta côtière, Maroc ” - Implication sur les effondrements karstiques. Sciences de la Terre. université chouaib doukkali, 2021. Français. NNT: . tel-03418524

HAL Id: tel-03418524

<https://theses.hal.science/tel-03418524>

Submitted on 7 Nov 2021

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

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

Copyright



**UNIVERSITE CHOUAÏB DOUKKALI
FACULTE DES SCIENCES
EL JADIDA**

UFR : Géosciences et Environnement.

THESE

Présentée pour obtenir le grade de

Docteur

Spécialité : Géomorphologie, Géoinformatique et Risques naturels.

Par

Youness AHMED LAAZIZ

***Contribution des SIG et de la modélisation volumique à la caractérisation
géomorphologique et géologique de la région des Doukkala
« Meseta côtière, Maroc » - Implication sur les effondrements karstiques***

Soutenu le 23/01/2021 devant la commission d'examen :

OUADIA mohammed	Faculté des Sciences El Jadida	Président
FEKKAK Abdelilah	Faculté des Sciences El Jadida	Rapporteur
RAHIMI Abdelmajid	Faculté des Sciences El Jadida	Rapporteur
JARAR OULIDI Hassane	Professeur, E. H.T.P, Casablanca	Rapporteur
ELACHHEB Abderrahim	Faculté des Sciences El Jadida	Examineur
BACHIR ALAMI Omar	Professeur, E. H.T.P, Casablanca	Examineur
ELBCHARI Fatima	Faculté polydisciplinaire de Safi	Examineur
SOUHEL Abdellatif,	Faculté des Sciences El Jadida	Directeur de Thèse

*Ce qui est simple est faux,
ce qui est compliqué est inutilisable*

FICHE PRESENTATIVE DE LA THESE

- Nom et Prénom de l'auteur :

AHMED LAAZIZ Youness

- Intitulé du travail :

Contribution des SIG et de la modélisation volumique à la caractérisation géomorphologique et géologique de la région des Doukkala « Meseta côtière, Maroc » Implication sur les effondrements karstiques

- Encadrant :

Nom et prénom et grade : **Pr SOUHEL Abdellatif,**

- **Laboratoire des Géosciences et Techniques de l'Environnement, département de géologie,** Faculté des Sciences EL Jadida

- **Rapporteurs autres que l'encadrant :**

Rapporteur 1 : **Pr FEKKAK Abdelilah**

Département de géologie Faculté des Sciences
Université Chouaib Doukkali - El Jadida.

Rapporteur 2 : **Pr RAHIMI Abdelmajid**

Département de géologie Faculté des Sciences
Université Chouaib Doukkali - El Jadida.

Rapporteur 3 : **Pr JARAR OULIDI Hassane**

Départements mathématiques informatiques & géomatique
Ecole Hassania des Travaux Publics – Casablanca.

- **Lieux de réalisation des travaux :**

- ❖ Université Chouaib Doukkali UCD faculté des sciences El-Jadida. Maroc
Département de géologie
Laboratoire géosciences et environnement.
Sous la direction de Monsieur : Professeur **Abdellatif Souhel.**
- ❖ Université Technique de Berlin TU Berlin. Allemand
Laboratoire de géo-informatique :
Sous la direction des Messieurs : Professeur **Wilhelm Dominik,**
Professeur **Ralf Löwner.**

Ce travail a donné lieu aux résultats suivants :

Publications:

- **Ahmed Laaziz youness**, Souhel Abdellatif, Elbchari fatima, Mdiker nabil & El achheb abderahim. « **Contribution of 3D modeling to the geometry of geological structures of the Doukkala region «Coastal Meseta, Morocco»**. Bulletin of Engineering Geology and the Environment Vol.3 (2020) - Issue.
- **Ahmed Laaziz youness**, Souhel Abdellatif, Mohamed laylman, laabasi Mohammed & Fatima Elbchari. « **Geospatial Modeling for Karstic Collapse Probability Map In The Doukkala Basin (Morocco)** ». **Arabian Journal of Earth Sciences**, Vol.3 (2016) - Issue 2: 6-16.

Communications scientifiques orales:

- **Ahmed laaziz youness**, Souhel Abdellatif, Abouchouiab belahmira, Laylman mohamed & Laabasi mohammed. "**Sinkholes collapse mapping in Doukkala ; Morocco**". *2^{ème} Congrès international sur la Télédétection et les SIG (CITS)* Casablanca Juin 2014.

Communications scientifiques par affiche:

- **Ahmed laaziz youness**, Abdellatif Souhel, Fatima Elbchari, Abouchouiab Belahmira, Mohammed Laabasi. Amina Tajdi. "**Apport des SIG à la géomorphologie de la région Sahel Doukkala, Meseta côtière, Maroc**". *1^{ère} Rencontre Nationale des Jeunes Géologues « Géosciences au Service de la Société »El-Jadida. 23 Mai 2016.*
- **Ahmed laaziz youness**, Souhel Abdellatif & Abouchouiab belahmira. "**Apport de la modélisation géologique 3D à l'hydrogéologie de la région des Doukkala. Maroc**". *Les Systèmes d'Informations de l'Eau dans la Région Méditerranéenne* » organise par (AMJG), Rabat – Maroc, Mars 2014.

Remerciements

Avant tout développement sur cette expérience scientifique, il apparaît opportun de commencer ce manuscrit par des remerciements, à ceux qui m'ont beaucoup appris au cours de cette aventure, et à ceux qui ont eu la gentillesse de faire de ces années de recherche un moment très profitable.

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à Monsieur le professeur Abdellatif SOUHEL le directeur de ma thèse de m'avoir confié ce sujet très intéressant et très passionnant et pour tout ce qu'il a fait pour moi, son soutien et ses conseils m'ont permis de vivre cette expérience dans de bonnes conditions.

Mes remerciements vont également à tous les membres du jury, pour avoir accepté d'examiner ce travail malgré leurs nombreuses responsabilités

C'est pour moi un grand honneur que le jury de cette thèse soit présidé par Monsieur le Professeur Mohamed OUADIA. Je le remercie vivement pour sa disponibilité et sa gentillesse, et aussi pour l'aide essentielle qu'il m'a accordé, ses précieuses remarques et ses conseils judicieux m'ont permis de mener à bien ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de mon plus profond respect et le témoignage de ma sincère reconnaissance.

Je remercie Messieurs les professeurs, Abdelilah FEKKAK, Abdelmadjid RAHIMI et Hassane JARAR OULIDI pour avoir accepté de juger ce travail dont ils sont rapporteurs et pour l'intérêt qu'ils lui ont porté. Je tiens à leur exprimer toute ma gratitude.

Mes remerciements vont aussi à Mme et Mrs les professeurs Fatima EL BCHARI, Abderrahim ELACHHEB et Omar BACHIR ALAMI qui ont accepté d'examiner ce travail.,

Professeur Fatima EL BCHARI, je vous remercie pour m'avoir prodigué vos conseils et suggestions, avec une constance et des qualités humaines et professionnelles exceptionnelles, j'ai tout particulièrement apprécié votre entière disponibilité, veuillez trouver ici toute ma gratitude.

Je remercie le DAAD - Office allemand d'échanges universitaires qui m'a accordé une bourse de recherche à l'Université de Technologie de Berlin.

Je tiens tout particulièrement à remercier les professeurs; Monsieur Wilhelm DOMINIK professeur de géologie et d'exploration pétrolière et Monsieur Ralf LÖWNER de l'Université de technologie de Berlin, J'ai eu l'honneur de faire leur connaissance et je les remercie pour leur gentillesse et leur aide, sans oublier leurs nombreuses invitations et disponibilité au cours de mon séjour à Berlin.

Je remercie Monsieur le professeur Abderahim ELACHHEB et Monsieur le professeur El Mostapha ETTACHFINI, pour les précieux conseils très constructifs qu'ils m'avaient prodigués avec une serviabilité et une générosité inégalables. Je suis profondément touché par leur aide très précieuse.

Je tiens à remercier tout particulièrement et à témoigner toute ma reconnaissance à l'ensemble du personnel du laboratoire LGTE pour leur contribution, leur collaboration, et le temps qu'ils m'ont consacré.

Je remercie aussi tous mes collègues et amis du département de géologie, pour leur collaboration, leur sympathie, leur aide et aussi les bons moments que nous avons partagés ensemble spécialement ELkhaldi khalid, Belhamira Chouaïb, Adnan Habib, Abdelouahed Lagnaoui, Choukri Abdelouahhab, el minoubi Abdelmounaim, Nabil mdiker, Ilham bouimetarhan, Tajdi Amina, Elabbasi Mohamed...

Enfin, J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et camarades et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

A tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, et que je n'ai pas cités.

Résumé

Ce travail associe plusieurs techniques relevant principalement des domaines de la géomorphologie, la géologie et les approches spatiales. L'objectif principal est de réaliser une étude géomorphologique et géologique détaillée de la région des Doukkala, en se basant sur le dépouillement de données géologiques de surface et de subsurface et de la reconstitution et l'interprétation de modèles géologiques 3D et de modèles numériques du terrain.

Les deux aspects suivants sont particulièrement développés :

L'analyse et l'interprétation de données des sondages hydrogéologiques, données de terrain, coupes géologiques et de rapports. Un accent particulier est mis sur les techniques de corrélations géologiques pouvant aboutir à la caractérisation de l'architecture des formations.

Le recours aux techniques liés à l'utilisation du modèle numérique du terrain et du modèle géologique tridimensionnel, afin d'affiner la cartographie et l'identification de l'architecture des entités géologiques de la région et de décrire, en détail, les différentes unités géomorphologiques.

De point de vue géomorphologique, cette étude basée principalement sur la vue synoptique et les différents produits du modèle numérique du terrain a révélé que :

- L'architecture des dunes n'est pas homogène par rapport au tracé actuel de la côte dans l'ensemble de la région. Des irrégularités ont été mises en évidence, surtout à l'arrière du plateau de Mazagan.
- Le couloir d'El-Jadida présente une ampleur plus grande que celle décrite par nos prédécesseurs. Sa genèse sera liée à la double action fluviale et marine.
- La cartographie des zones karstiques conduisant aux multiples effondrements dans la région a montré le rôle joué par les gypses crétacés ainsi que la relation étroite existant entre les karsts et les flexures tectoniques ce qui explique l'alignement géographique des dolines.
- Les stationnements marins se manifestent différemment le long du littoral :
 - Au Sud et au Nord de la zone d'étude la géomorphologie et la géologie ainsi que les interactions de l'eau de mer et des vents ont permis l'installation des cordons dunaires.
 - Au niveau du plateau de Mazagan, les stationnements marins sont enregistrés sous forme d'une succession de falaises.
 - Le couloir d'El-Jadida a enregistré une succession de plates-formes marines. La corrélation de ces différentes formes de stationnements marins nous a permis de mieux préciser le rôle des variations eustatiques pendant le Quaternaire.

Finalement, l'exploitation des données des sondages stockées dans la base de données SaDIN et celles issues des synthèses bibliographiques nous a permis, à travers une approche basée sur la modélisation 3D, pour la première fois dans la région, de :

- Approcher la géométrie en subsurface des diverses formations géologiques méso-cénozoïque,
- Dresser des cartes d'isopaches et d'iso-profondeur pour ces formations.

Cette démarche a permis ainsi de mieux appréhender la structure et la profondeur des principales unités méso-cénozoïque de la région.

Les résultats de cette étude couplés à d'autres données lithologiques (principalement la présence du gypse) seront de grande utilité surtout dans les domaines des risques naturels (affaissement de terrains) que connaît la région.

Mots clés : Doukkala, Meseta côtière, couloir d'El-Jadida, Méso-Cénozoïque, Sondages hydrogéologiques, SIG, Modèles géologiques 3D, paléogéographie, dunes plioquaternaires, effondrement karstique, risques géologiques.

Abstract

This work combines several techniques mainly in the fields of geomorphology, geology and spatial approaches. The main objective this study is to carry out a detailed geomorphological and geological study of the Doukkala region, based on the analysis of surface and subsurface geological data and the reconstruction and interpretation of 3D geological models and field numerical models.

In order to develop this study, we focused on the two following aspects:

Analysis and interpretation of data from hydrogeological surveys, field data, geological sections and reports. Particular emphasis is placed on geological correlation techniques that can lead to the characterization of the nature and the shape of the formations.

The use of digital model techniques related to the field itself and the three-dimensional geological model, in order to refine the mapping and the identification of the regional geological entities and to describe, in detail, the different geomorphological units.

From a geomorphological point of view, this study revealed, based mainly on the synoptic view and the different products of the digital model of the field that:

The dunes formation is not homogeneous compared to the current route of the coast in the whole region. Irregularities have been highlighted, especially at the back of the Mazagan plateau.

The El-Jadida corridor is larger than what was described by previous studies. Its genesis will be linked to the double action of fluvial and marine mechanisms.

The cartography of the karstic area leading to the multiple collapses in the region showed the role played by the Cretaceous gypsum as well as the close relationship existing between the karsts and the tectonic flexures which explains the geographical alignment of the dolines.

Marine sites are different along the coast:

In the South and North of the study area, geomorphology and geology as well as the interactions of seawater and winds allowed the installation of dune cords.

At the Mazagan plateau, the marine sites recorded as a succession of cliffs.

The El-Jadida corridor has recorded a succession of marine platforms. The correlation of these different formations allowed us to better define the role of eustatic variations during the Quaternary period.

Finally the exploitation of the survey data in the SaDIN database and those resulting from the bibliographic syntheses enabled us, through a 3D modeling approach, for the first time in the region, to :

Approach the subsurface geometry of the various Meso-Cenozoic geological formations,

Establish isopach and isodepth maps for these formations.

This approach helped to better understand the structure and depth of the main Meso-Cenozoic units in the region.

The results of this study coupled with other lithological data (mainly the presence of gypsum) will be very useful especially in the areas of natural risks (land subsidence) that the region is experiencing.

Keywords: Doukkala, coastal Meseta, El-Jadida corridor, Meso-Cenozoic, Hydrogeological surveys, GIS, 3D geological models, paleogeography, plioquaternary dunes, karst collapse, geological hazards.

Zusammenfassung

Diese Arbeit kombiniert verschiedene Techniken hauptsächlich in den Bereichen Geomorphologie, Geologie und räumliche Ansätze. Das Hauptziel dieser Studie ist die Durchführung einer detaillierten geomorphologischen und geologischen Untersuchung der Region Doukkala, basierend auf der Analyse von geologischen Daten auf und unter der Oberfläche sowie der Rekonstruktion und Interpretation von geologischen 3D-Modellen und feldbezogenen numerischen Modellen. Um diese Studie zu entwickeln, haben wir uns auf die beiden folgenden Aspekte konzentriert:

Analyse und Interpretation von Daten aus hydrogeologischen Untersuchungen, Felddaten, geologischen Schnitten und Berichten. Besonderes Augenmerk wird auf geologische Korrelationstechniken gelegt, die zur Charakterisierung der Natur und der Form der Formationen führen können.

Einsatz feldbezogener digitaler Modelltechniken und des dreidimensionalen geologischen Modells, um die Kartierung und Identifizierung der regionalen geologischen Einheiten zu verfeinern und die verschiedenen geomorphologischen Einheiten detailliert zu beschreiben.

Aus geomorphologischer Sicht ergab diese Studie, die hauptsächlich auf der synoptischen Sicht und den verschiedenen Produkten des digitalen Modells des Feldes basierte, dass:

Die Dünenformation ist im Vergleich zur aktuellen Küstenroute in der gesamten Region nicht homogen. Insbesondere auf der Rückseite des Mazagan-Plateaus wurden Unregelmäßigkeiten festgestellt.

Der El-Jadida-Korridor ist größer als in früheren Studien beschrieben. Seine Entstehung wird mit der doppelten Wirkung von fluviatilen und marinen Mechanismen verbunden sein.

Meeresstandorte sind entlang der Küste unterschiedlich:

Im Süden und Norden des Untersuchungsgebiets ermöglichten Geomorphologie und Geologie sowie die Wechselwirkungen von Meerwasser und Wind die Installation von Dünenschnüren.

Auf dem Mazagan-Plateau wurden die Meeresgebiete als eine Abfolge von Klippen registriert.

Der El-Jadida-Korridor hat eine Folge von Meeresplattformen aufgezeichnet.

Die Korrelation dieser verschiedenen Formationen ermöglichte es uns, die Rolle eustatischer Variationen während der Quartärperiode besser zu definieren.

Endlich, die Auswertung der Umfragedaten in der SaDIN-Datenbank und der aus den bibliografischen Synthesen resultierenden Daten ermöglichte es uns, durch einen 3D-Modellierungsansatz zum ersten Mal in der Region:

Annäherung an die unterirdische Geometrie der verschiedenen meso-Kenozoischen geologischen Formationen, Erstellen Sie Isopache- und Isotiefen Karten für diese Formationen.

Dieser Ansatz trug dazu bei, die Struktur und Tiefe der wichtigsten meso-Kenozoischen Einheiten in der Region besser zu verstehen.

Die Ergebnisse dieser Studie in Verbindung mit anderen lithologischen Daten (hauptsächlich das Vorhandensein von Gips) werden insbesondere in den Gebieten mit natürlichen Risiken (Bodensenkungen), denen die Region ausgesetzt ist, von großem Nutzen sein.

Schlüsselwörter: Doukkala, Meseta an der Küste, El-Jadida-Korridor, Meso-Känozoikum, hydrogeologische Untersuchungen, GIS, geologische 3D-Modelle, Paläogeographie, plioquaternäre Dünen, Karstkollaps, geologische Gefahren.

يجمع هذا العمل بين العديد من التقنيات من عدة تخصصات خاصة e، الجيولوجيا والمناخ المكانية. المدفوع الرئيسي من هذا البحث هو إنجاز دراسة تفصيلية تمه بالأساس جيومورفولوجية وبيولوجية منطقة دكالة ، وذلك بالاعتماد على تحليل المعطيات الجيولوجية وتفسير النموذج الجيولوجي ثلاثي الأبعاد والنماذج الرقمية للأرض.

النقاط التالية تم تطويرها

معالجة وتحليل بيانات التنقيب الميروجيولوجي والمعطيات الميدانية والمقاطع الجيولوجية بالإضافة الى التقارير المنجزة في هذه المنطقة. كما تم التركيز بشكل خاص على تطبيقات الجيولوجي التي تمكن من وصف بنية وشكل الطبقات تحت أرضية.

التقنيات المتعلقة باستخدام نموذج التضاريس الرقمي والنموذج الجيولوجي ثلاثي الأبعاد استغلته، من أجل رسم وتحديد شكل الطبقات الجيولوجية للمنطقة وإعطاء وصف دقيق ومفصل للبيانات الجيومورفولوجية المختلفة.

من الناحية الجيومورفولوجية، وبالاعتماد أساسا على النظرة الشمولية التي يقدمها النموذج الرقمي للتضاريس ومختلفه الخرائط المنبثقة منه، استخلصنا مايلي :

- الكثبان الرملية المتحجرة ليست متجانسة على طول الساحل. حيث وقفنا على عدة تغييرات ، خاصة في الجزء الخلفي من هضبة مازانان.
- خليج الجديدة أكبر مما وصف به في أعمال سابقة، و نشأته مرتبطة بعاملين مزدوجين أولوي نصري والثاني بحري.
- أظهر رسم الخرائط للمناطق الكارستية التي أدت إلى الانهيارات المتعددة في المنطقة الدور الذي لعبه الجبس الطباشيري وكذلك العلاقة القائمة بين الكارست والانهيارات التكتونية
- تظهر المحطات البحرية بشكل مختلف على طول الساحل:

- إلى الجنوب والشمال من منطقة المدروسة ، سمحت الجيومورفولوجيا والجيولوجيا وكذلك تفاعلات

مياه البحر والرياح بتوزيع حوافه الكثبان الرملية.

- على مستوى هضبة مازانان ، المحطات البحرية على شكل سلسلة من المنحدرات.

- على مستوى خليج الجديدة تعاقب المنصات البحرية.

أخيرا مكننا الربط بين بيانات التنقيب الميروجيولوجي المأخوذة من قاعدة معطيات الشبكة الساحلية للدكالة، من خلال نمج قائم على النمذجة ثلاثية الأبعاد ، لأول مرة في المنطقة ، من:

- الاقتراب من الشكل العام للتكوينات الجيولوجية تحت الارضية المختلفة لحقبة ميزوسينوزويك ،
- رسم خرائط السمنك و العمق لهذه التكوينات.

هذا النمج مكننا من فهم بنية وعمق الوحدات الرئيسية لحقبة ميزوسينوزويك في المنطقة.

نتائج هذه الدراسة إلى جانب التحليل الصخرية (بشكل أساسي وجود الجبس) ذات فائدة كبيرة ، خاصة في المناطق المعرضة للأخطار الطبيعية (الانهيارات الكارستية) التي تعاني منها المنطقة.

الكلمات المفتاحية : دكالة ، خليج الجديدة ، ميزوسينوزوي، بيانات التنقيب الميروجيولوجي، نظم المعلومات الجغرافية ، نماذج جيولوجية ثلاثية الأبعاد ، الجغرافيا القديمة ، الكثبان الرملية، الانهيارات الكارستية، الأخطار الجيولوجية

Sommaire

FICHE PRÉSENTATIVE DE LA THÈSE	II
REMERCIEMENT	IV
RESUME - ABSTRACT- ZUSAMMENFASSUNG - ملخص.....	VI
SOMMAIRE	X
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES PLANCHES.....	XVII
LISTE DES TABLEAUX	XVIII
ABREVIATIONS	XIX
INTRODUCTION GENERALE	1
Première Partie : Généralités	5
I : Cadre Géographique	6
I.1 Situation.....	6
I.2 Aspects humain et administratif.....	6
I.3 Aménagements hydro-agricoles	7
I.4 Traits morphologiques	9
I.5 Climat	10
I.6 Hydrologie	11
II : Cadre géologique	14
II.1 Rétrospective des travaux antérie	14
II.2 Cadre structural	17
II.2.a Tectonique hercynienne	17
II.2.b Tectonique post-hercynienne	17
II.2.c Structure de la couverture plio-quadernaire.....	19
II.3 Découpage litho-stratigraphique	19
II.3.a Paléozoïque :.....	22
II.3.b Méso-cénozoïque :.....	22
II.3.c Plio-quadernaire :.....	22
II.4 Cadre hydrogéologique	23
II.4.a Les différentes nappes du bassin :	23
II.4.b Comportement hydrogéologique des terrains :.....	26
III : Généralités sur la modélisation géologique 3D	30
III.1 Définitions	30
III.2 Logiciels de la modélisation géologique 3D	31

DEUXIEME PARTIE : Apport de la modélisation 3D à la géologie de la région	32
I Objectif	33
II Moyens et méthodes.....	33
II.1 Données utilisées :	33
II.2 Outils de traitement :	39
II.3 Conception du modèle géologique 3D :	39
II.2.a Préparation des données :	39
II.2.b Importation des données :	42
II.2.c Méthode d'interpolation :	44
III Resultats	45
III.1 Crétacé inférieur "CI" Valanginien	48
III.2 Crétacé inférieur "CI" Hauterivien	51
III.3 Cénomaniens "Cm"	54
III.4 Miocène "M"	57
III.5 Plio-quaternaire "Pq"	61
IV Contrôles et validation du modèle.....	65
V Conclusion	66
TROISIEME PARTIE : Apport des SIG à la caractérisation géomorphologique de la région étudiée et à l'identification des risques géologiques.	67
I : Objectif :.....	68
II : Caractéristique géomorphologique	69
II.1. Oulja	69
II.2. Sahel	73
II.3. Plaine des Doukkala	86
III : Cordons dunaires littoraux	88
III.1.Méthodologie du travail et produits dérivés :	88
III.2.Etude des cordons dunaires :	94
III.2.a Zone Sud entre Oualidia et Had Oulad Aissa:.....	94
III.2.b Partie du Sahel entre Had-Oulad-Aissa et la ville d'El-Jadida :.....	101
III.2.c Arrière-pays de la baie de l'Haouzia :.....	105
III.3.Conclusion	110
IV : Couloir d' d'El Jadida	112
IV.1 Objectifs	112

IV.2	Méthodologie du travail.....	112
	V.1.a Ampleur et les limites du couloir d'El-Jadida	112
	V.1.b Origine du couloir d'El-Jadida	113
IV.3	Interprétation.....	115
V : Délimitation des zones à risques effondrements liés aux évaporites		117
V.1	Introduction	117
	V.1.a Inventaire des formes karstiques de la région	117
	❖ Dolines	118
	❖ Lapiez	119
	❖ Ouvalas ou dolines coalescentes	120
	❖ Grottes ou gouffres	122
	❖ Effondrements	124
V.2	Méthodologie	131
	V.3.a Principe de détermination du niveau d'aléa karstique	131
	V.3.b Détection des dépressions	132
V.3	Résultats	137
	V.3.a Contexte hydrogéologique et hydrologique	139
	V.3.b Prédisposition géologique	141
V.4	conclusion	140
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES		149
REFERENCES		153

LISTE DES FIGURES

Figure 1:	Situation géographique de la région étudiée.(d'après frizon de lamotte et al 2004)	6
Figure 2:	Carte du perimetre de l'ormvad. En vert le bas service et en rouge plein le haut service ormvad (1988).	8
Figure 3:	Unites geomorphologiques de la region des doukkala.	9
Figure 4:	Réseau hydrographique de la région des Doukkala. D'après Ferre et Ruhahrd (1975)	12
Figure 5:	Carte géologique simplifiée du bassin Abda-Doukkala (d'après la carte géologique 1/1000000 du Maroc).	21
Figure 6:	Schema hydrogeologique du sahel (D.R.H.T. 1994).	25
Figure 7:	Coupe hydrogeologique dans le plateau d'el jadida (Souhel et al., 2000).	25
Figure 8:	Extension des principales formations aquiferes de sahel doukkala (Belahmira et al., 2010).	29
Figure 9:	Repartition des sondages disponibles (Souhel et al., 2005).	34
Figure 10:	Coupe geologique a travers la plaine des doukkala (Ferre et Ruhard., 1975).	35
Figure 11:	Coupes geologiques a travers le sahel (Ferre et Ruhard, 1975).	35
Figure 12:	Coupes geologiques interpretatives de la structure de sub-surface de la region des doukkala (Souhel et al., 2005).	46
Figure 13:	Organigramme de la methodologie adoptee pour la creation du modele geologique 3D.	40
Figure 14:	Presentation de l'ensemble des sondages issus de la base de donnees SaDIN.	43
Figure 15:	Presentation de l'ensemble des sondages utilises pour la creation du modele geologique 3D.	43
Figure 16:	Modele geologique 3D de la region des doukkala (vue sud-est).	46
Figure 17:	Representation des coupes croisees (fence) de la region des doukkala (vue ouest-sud).	47
Figure 18:	Geometrie du toit du cretace inferieur « valanginien » au niveau de la region des doukkala (vue sud).	50
Figure 19:	Geometrie du cenomanien sur cretace inferieur au niveau de la region des doukkala (vue sud).	52
Figure 20:	Representation des coupes (fence) de la region des doukkala (vue ouest-sud).	53
Figure 21:	Geometrie du cenomanien sur cretace inferieur au niveau de la region des doukkala (vue sud).	55
Figure 22:	Geometrie du cenomanien au niveau de la region des doukkala (vue sud-ouest).	56
Figure 23:	Repartition des forages qui contiennent le miocene.	58

Figure 24:	Geometrie du miocene sur le cenomanien et le cretace inferieur au niveau de la region des doukkala (vue sud-est).	59
Figure 25:	Geometrie du miocene au niveau de la region des doukkala (vue sud-est).	60
Figure 26:	Geometrie du plio-quatenaire sur le miocene, le cenomanien et le cretace inferieur au niveau de la region des doukkala (vue sud-est).	62
Figure 27:	Geometrie du plio-quatenaire au niveau de la region des doukkala (vue sud-est).	63
Figure 28:	Modele numerique du terrain de la region des doukkala (Aster GDEM).	68
Figure 29:	Bloc-diagramme de l'oulja (me: mesozoïque. Mo: moghrebien) (Weisrock,1991).	70
Figure 30:	Morphologie de la lagune d'oualidia (Hilmi et al., 2005).	72
Figure 31:	Les differentes sous unites geomorphologiques du sahel des doukkala.	74
Figure 32:	Carte geomorphologique de la region nord des doukkala et son proche plateau continental.	76
Figure 33:	Profil des surfaces des points hauts a l'arriere-pays de l'haouzia (Akil, 1990).	78
Figure 34:	Representation en 2.5d du couloir d'el-jadida avec sa limite est (Laaziz, 2005)	79
Figure 35:	Golfe quaternaire de mazagan « couloir d'El-Jadida » (d'après Gigout, 1951).	80
Figure 36:	Vue en 2.5 d du plateau d'el-jadida avec les quatre falaises; (Laaziz, 2005)	84
Figure 37:	Carte de la repartition des falaises mortes (Gigout, 1951), modifie par Akil (1990).	85
Figure 38:	Modele numerique de terrain en 2,5D.	88
Figure 39:	Disposition des cretes dunaires.	89
Figure 40:	Carte d'ombrage "hillshade".	90
Figure 41:	Combinaison de la carte d'ombrage et le mnt.	91
Figure 42:	Localisation des 12 profils topographiques effectues.	92
Figure 43:	Methodologie adoptee pour etudier la geomorphologie de la region.	93
Figure 44:	Localisation des trois zones geomorphologique du sahel-doukkala.	94
Figure 45:	Organisation des cordons dunaires au sud-ouest du sahel.	95
Figure 46:	Digramme de repartition des directions des cordons dunaires au sud du sahel.	96
Figure 47:	Profil n°1 (exageration est de 10 fois).	97
Figure 48:	Profil topographique n°2.	98

Figure 49:	Profil topographique n°3.	99
Figure 50:	Profil topographique n°4.	99
Figure 51:	Profil topographique n°5.	100
Figure 52:	Profil topographique n°6.	100
Figure 53:	Geomorphologie de la partie du sahel entre had-oulad-aissa et la ville d'el-jadida.	101
Figure 54:	Digramme de repartition des directions des cordons dunaires dans la zone littorale comprise entre had-oulad-aissa et la ville d'el-jadida.	102
Figure 55:	Localisation des profils n°7, n°8 et n°9.	102
Figure 56:	Profil topographique n°7.	103
Figure 57:	Profil topographique n°8.	104
Figure 58:	Profil topographique n°9.	104
Figure 59:	MNT du plateau d'el-jadida, (f1 : falaise ouljienne, f2 : falaise haronienne, f3: falaise anfatienne, f4 : falaise maarifienne).	105
Figure 60:	Digramme de repartition des directions des cordons dunaires dans la zone littorale comprise entre Had-Oulad-Aissa et la ville d'el-jadida.	106
Figure 61:	Carte d'ombrage presentant les six ondulations de l'arriere-pays de l'haouzia.	107
Figure 62:	Localisation des profils 7, 8 et 9.	108
Figure 63:	Profil topographique n°10.	109
Figure 64:	Profil topographique n°11.	109
Figure 65:	Profil topographique n°12.	109
Figure 66:	Representation des limites du couloir d'el-jadida.	113
Figure 67:	Localisation des forages existant au niveau du couloir d'el-jadida.	114
Figure 68:	Ouvalas ou dolines coalescentes dans la zone de larbaa de mogress.	120
Figure 69:	Localisation de la grande dépression de bled serssif (source de l'image google earth).	122
Figure 70:	Schéma de la grotte de Takkout selon l'inventaire spéléologique du maroc (Ministère de l'équipement, Direction de l'hydraulique, 1981).	124
Figure 71:	Carte piézométrique avec localisons la zone d'effondrement de sebt-saïss.	126
Figure 72:	Localisation de l'effondrement (x :219404,329 ; y :248027,115).	127
Figure 73:	Lithologie et stratigraphie du sondage 2911/27 (x : 219000 ; y : 248250).	128
Figure 74:	Esquisse structurale de la région (Ferre et Ruhard, 1979) localisation de l'effondrement.	129
Figure 75:	Carte piézométrique des Doukkala (El achheb., 1993).	130
Figure 76:	Approche méthodologique général.	131

Figure 77:	Représentation de la méthodologie adoptée pour déterminer les dépressions.	133
Figure 78:	Courbes de niveau générées automatiquement à partir du mnt. (équidistance 5m).	134
Figure 79:	Représentation de la carte d'ombrage avec les courbes de niveau (équidistance 1m). (région de l'Oualidia).	135
Figure 80:	Extrait de la carte des dépressions avec des courbes de niveau.	136
Figure 81:	Exemple de dépression digitalisée sur l'image satellitaire (région oualidia).	137
Figure 82:	Répartition des dépressions détectées au niveau de la région des Doukkala.	138
Figure 83:	Drapage des dépressions sur l'assemblage de la carte d'ombrage et le MNT colore.	139
Figure 84:	le réseau des talwegs généré à partir du MNT.	140
Figure 85:	Drapage de la couche les dépressions et le réseau des talwegs généré sur le MNT.	141
Figure 86:	Répartition des forages contenant les gypses au niveau de la région des Doukkala.	142
Figure 87:	Répartition géographique des forages qui contiennent le gypse.	143
Figure 88:	Répartition spatiale des gypses dans la région des doukkala. (vue en 3D du sud-ouest).	143
Figure 89:	Répartition spatiale des gypses dans la région des doukkala. (vue en 3D du sud).	144
Figure 90:	Situation des sections lithologiques effectuées au niveau de la région.	145
Figure 91:	Section AA'. Direction nord-sud. A:(x: 204 477, y:292 337); A':(x: 211 081, y: 240 481).	146
Figure 92:	Section bb'. Direction est-ouest. B:(x: 194 687, y: 251 321); B':(x: 245 816, y: 254 456).	146

LISTE DES PLANCHES :

Planche 1:	Photo d'une doline en cuvette aux environs d'oualidia (32°43'53''n; 9°01'26''w).	118
Planche 2:	Photo d'une doline en baquet aux environs d'oualidia (32°44'06''n; 8°59'52''w).	119
Planche 3:	Photos des lapiez du sahel (region de l'oualidia) (32°44'25''n; 8°59'37''w).	119
Planche 4:	Photo d'une grande depression a larbaa de mogress (32°56'09''n 8°27'05''w).	121
Planche 5:	Photo de l'entree principale de la grotte takkout. (x : 163500 ; y : 242000).	123
Planche 6:	Photo de l'effondrement sebt-saiss (x : 245.694 ; y : 200.700).	125
Planche 7:	Photo de l'effondrement de beni-hellal. (El achheb et al., 2016).	128

Liste des Tableaux :

Tableau 1	Organisation administrative de la région Doukkala. (Annuaire statistique du Maroc 2018)	7
Tableau 2	Les principaux équipements hydro-agricoles réalisés dans le périmètre irrigué	8
Tableau 3	Stratigraphie du Quaternaire marin du littoral atlantique marocain (Beaudet et al., 1967).	15
Tableau 4	Tableau récapitulatif des différentes formations géologiques	20
Tableau 5	Exemple des données de forage	41
Tableau 6	Tableau récapitulatif des sondages utilisés	42
Tableau 7	<i>Direction des cordons dunaires située à l'arrière-pays de l'Haouzia (Akil, 1990).</i>	78
Tableau 8	Tableau 8: Base des falaises mortes au SW d'El-Jadida (Akil, 1990)	83
Tableau 9	Comparaison des altitudes et des largeurs pour chaque ondulation rencontrée au niveau du profil n°1	98
Tableau 10	Comparaison des altitudes et des largeurs pour chaque ondulation rencontrée au niveau du profil n°2	98
Tableau 11	Comparaison des altitudes et des largeurs pour chaque ondulation rencontrée au niveau du profil n°3	99
Tableau 12	Comparaison des altitudes et des largeurs pour chaque ondulation rencontrée au niveau du profil n°4	99
Tableau 13	Comparaison des altitudes et des largeurs pour chaque ondulation rencontrée au niveau du profil n°5	100
Tableau 14	Comparaison des altitudes et des largeurs pour chaque ondulation rencontrée au niveau du profil n°6	100
Tableau 15	Comparaison des altitudes et des largeurs pour chaque ondulation rencontrée au niveau du profil n°7	103
Tableau 16	Tableau récapitulatif des cordons dunaires de la région des Doukkala.	109
Tableau 17	Forages situés (35 forages) au niveau du couloir d'El-Jadida.	114
Tableau 18	Grottes de la région des Doukkala d'après l'inventaire des clubs spéléologiques du Maroc, (Ministère de l'équipement, direction de l'hydraulique 1981)	123

Liste des abréviations :

ORMVAD :	Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Doukkala.
SaDIN :	Sahel-Doukkala Scientific Information Network.
DRHT :	Direction de la Région Hydraulique du Tensift, Marrakech.
DPE :	Direction Provinciale d'Equipement d'El-Jadida.
DPA :	Direction Provinciale Agricole d'El-Jadida.
DRH :	Direction Régionale de l'Hydraulique.
ASTER-GDEM :	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer - Global DEM
RADAR :	RADio Detection And Ranging
LiDAR :	Light Detection and Ranging
NASA :	National Aeronitcs and Space Administartion

Introduction Générale

La région des Doukkala, dont fait partie Sahel-Doukkala, dispose d'un potentiel naturel et économique de développement important. La connaissance des ressources naturelles et les richesses du sous-sol ainsi que la mise en disponibilité d'une information scientifique structurée contribueront, certainement, à une meilleure émergence de cette région.

Pour le traitement des données, il est nécessaire d'utiliser les nouvelles technologies et les outils capables de :

- Traiter et gérer, aisément et efficacement le flux de données et d'informations, de plus en plus, produites surtout dans les secteurs de géologie, d'hydrogéologie et risque naturel,
- Créer un modèle ayant la capacité d'analyser et d'interpréter rapidement les données existantes pour générer des nouvelles informations.

Le présent travail nous amènera à mettre à jour les diverses données et connaissances en géomorphologie (surface), en géologie (sub-surface), ensuite à les présenter d'une façon complète, pratique et facilement abordable et utilisable par les scientifiques et les décideurs, ce qui aide absolument à l'émergence économique de la région.

La gestion des ressources en eau et la protection des populations et de l'environnement contre les risques naturels, sont des enjeux qui nécessitent de fournir aux scientifiques, aux collectivités territoriales et aux décideurs, une mine d'informations sur les ressources géologiques, géomorphologique et hydrogéologique.

L'objectif de cette étude est de combiner entre les données de surface et de sub-surface, disponibles, afin de proposer une nouvelle représentation géomorphologique et géologique de la région. Cela permettra d'approfondir nos connaissances scientifiques et de mettre à la disposition des décideurs, une description aussi bien complète que possible de la structure du sol et du sous-sol.

Pour atteindre cet objectif on a eu recours aux :

- Systèmes d'Informations Géographiques "SIG" et aux Modèles Numérique du Terrain "MNT" pour donner plus de précision à la géomorphologie en surface.
- Modèles géologiques tridimensionnels qui représentent une approche intéressante pour visualiser, comprendre et analyser les formations géologiques en sub-surface.

La modélisation géologique 3D est une nouvelle méthode de travail dynamique qui s'adapte aux obligations spécifiques de la région, à savoir la morphologie relativement tabulaire et le caractère peu

accidenté des terrains en surface.

Le Modèle Numérique du Terrain et les modèles tridimensionnels représentent une source d'information géologique, un espace de partage des données et un outil d'aide à la décision. Ils permettront aux différents acteurs d'exploiter, facilement, les données afin de résoudre les problèmes de recherches et de gestion des ressources naturelles et de prévention des risques naturels (inondations, effondrements...).

Les résultats de cette étude seront d'une grande importance surtout pour les hydrogéologues qui peuvent en déduire le volume réel des nappes phréatiques et le sens d'écoulement des eaux et aussi pour les études des risques naturels surtout les effondrements liés aux gypses que connaît la région de temps en temps.

Le temps représente une quatrième dimension qui sera intégrée pour essayer d'approcher l'évolution paléogéographique des Doukkala depuis le Crétacé jusqu'à l'Actuel.

Composition du manuscrit :

- i.** Première partie (Généralités) est constituée de trois chapitres :
 - Premier chapitre : est une description géographique de la zone d'étude,
 - Deuxième chapitre : présente le cadre géologique de la région,
 - Troisième chapitre : traite des rappels sur l'importance et l'utilisation de la modélisation géologique 3D.

- ii.** Deuxième partie est réservée à l'apport de la modélisation géologique 3D. Elle s'articule comme suit :
 - Premier chapitre : relatif au cadre géologique général de cette partie de la Meseta côtière marocaine.
 - Deuxième chapitre : illustre la méthodologie et la représentation de l'architecture des formations géologiques en sub-surface.
 - Troisième chapitre : porte sur la description et l'interprétation de l'architecture de diverses unités géologiques de la série méso-cénozoïque.

- iii.** Troisième partie concerne l'apport des SIG à l'étude géomorphologique, elle est composée de quatre chapitres :
 - Premier chapitre : traite les diverses formations géomorphologiques représentatives de la région.
 - Deuxième chapitre : est réservé aux variations morphologiques et à l'organisation des cordons dunaires en se basant sur le modèle numérique du terrain.
 - Troisième chapitre : on y dresse de répondre à une question encore d'actualité, celle de l'origine du couloir d'El-Jadida à travers l'analyse du MNT et les données de forages.
 - Quatrième chapitre : Est un essai de faire ressortir les principaux facteurs qui déterminent le risque d'effondrements liés aux gypses à travers la détermination des zones de présence de ces facteurs et des études de cas.

- iv.** Conclusion générale et perspectives à la fin de cette étude permettant de rappeler les principaux résultats et de proposer des recommandations.

Première Partie

Généralités

I : Cadre Géographique

I.1. Situation

La région des Doukkala, l'objet de cette étude, constitue la partie sud de la Meseta côtière marocaine. Elle s'étend sur une superficie de 7700 km². Elle est comprise entre les latitudes 32°15 N et 33°15 N et les longitudes 7°15 W et 9°15W. Elle est bordée à l'Ouest, sur plusieurs dizaines de kilomètres, par l'Océan Atlantique, au Nord et à l'Est par l'un des grands fleuves au Maroc « l'Oued Oum Rabia » et au Sud par les collines des Mouissates.

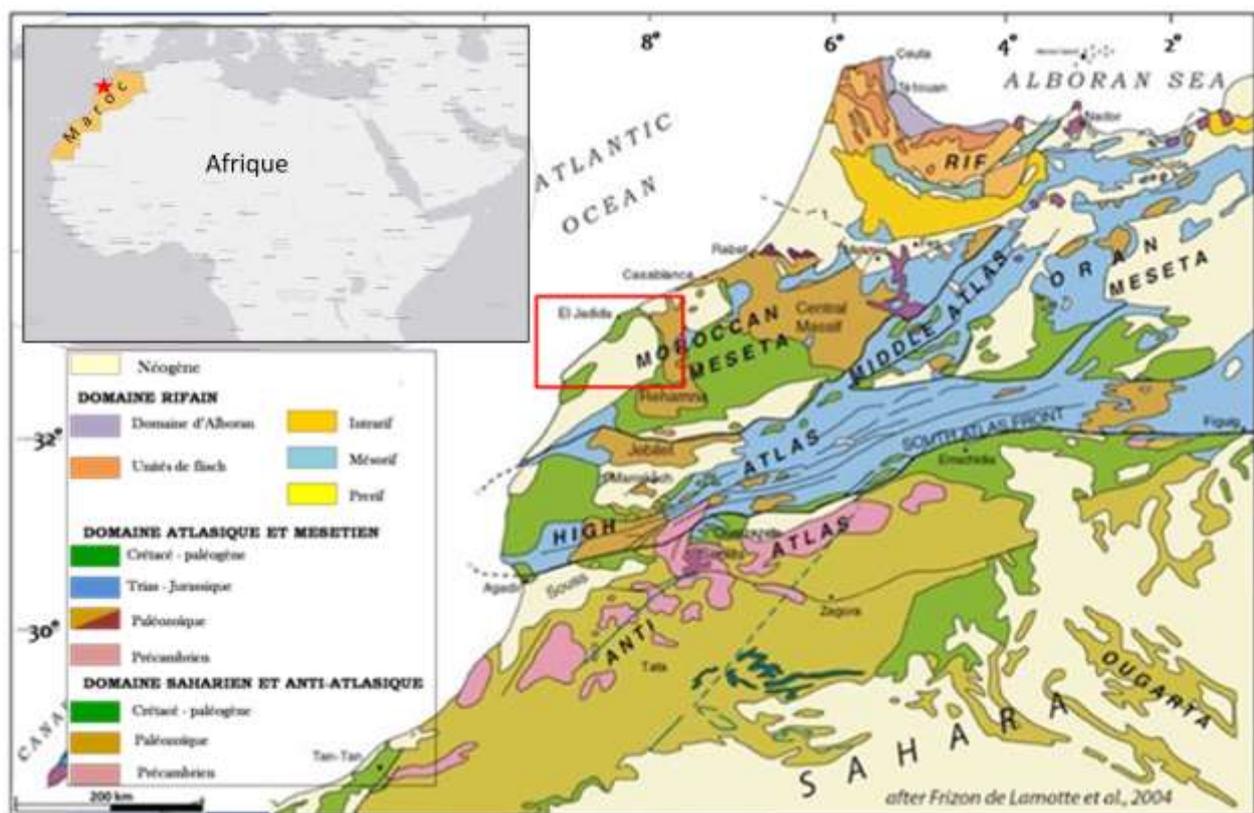


Figure 1: Situation géographique de la région étudiée. (d'après Frizon de Lamotte et al 2004).

I.2. Aspects humain et administratif

En vertu du dernier découpage administratif, la zone d'étude fait partie de la grande région Casablanca-Settat et est constituée de deux provinces : El-Jadida au Nord et Sidi Bennour au Sud, L'encadrement territorial de la région est assuré par une armature administrative se composant de cinq communes urbaines et quarante-sept communes rurales (Tableau 1).

Tableau 1: Organisation administrative de la région Doukkala. (Annuaire Statistique du Maroc 2018)

Provinces	Nombre de communes urbaines	Nombre de communes rurales	Population	Superficie Ha
El-Jadida	3	24	786 716.00	551 483.24
Sidi Bennour	2	23	452 448.00	462 998.44

I.3. Aménagements hydro-agricoles

L'aménagement hydro-agricole de la plaine des Doukkala est basé surtout sur les eaux de l'Oued Oum Rabia, second fleuve au Maroc par l'importance de son bassin versant, et de ses apports en eau. Plusieurs barrages ont été construits sur cet oued parmi lesquels on note :

- Le barrage d'Imfout construit en 1935-1945, avec une capacité de 85 millions de m³, réduite aujourd'hui à 20 millions de m³ suite à l'envasement.

- Le barrage d'Al-Massira construit en 1980, pour répondre aux besoins de l'irrigation (1100 millions de m³) et ceux du complexe industriel de Jorf-Lasfar. Après la construction de ce barrage celui d'Imfout ne joue plus qu'un rôle de dérivation.

Selon des données de l'ORMVAD (1988) l'aménagement des plaines des Doukkala-Abda a permis d'assurer l'irrigation de 96.000 ha répartis entre deux périmètres (fig.2) et (Tableau 2) :

⊙ **Périmètre Bas Service : 61.000 ha**

⊙ **Périmètre Haut Service : 35.000 ha (1^{ère} et 2^{ème} tranches)**

L'irrigation est assurée par la mobilisation des eaux superficielles à partir de l'Oued Oum Rabia, régularisées par le barrage AL-Massira et dérivées par le barrage Imfout.

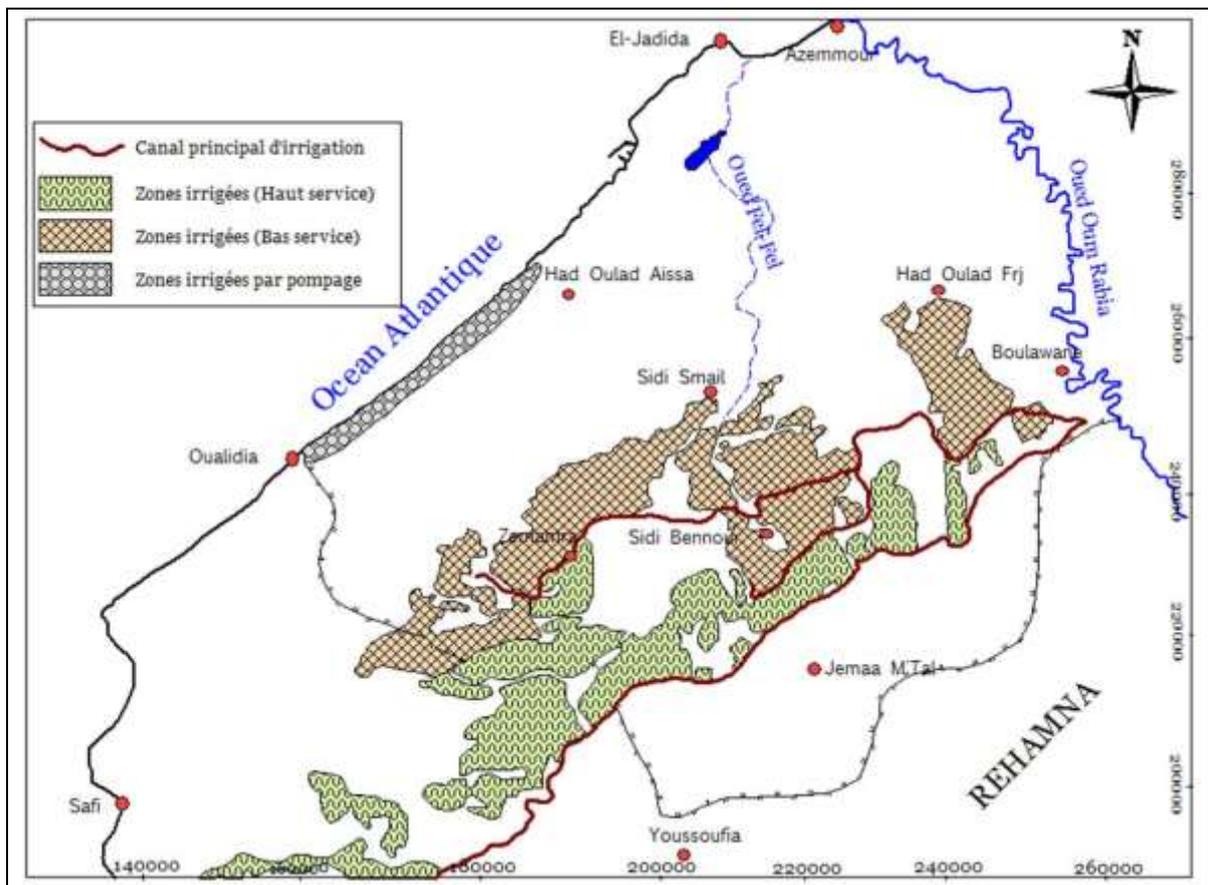


Figure 2: Carte du périmètre de l'ORMVAD. En vert le Bas Service et en rouge plein le Haut Service O.R.M.V.A.D (1988)

Tableau 2 : Les principaux équipements hydro-agricole réalisés dans le périmètre irrigué

Les principaux ouvrages hydrauliques	Périmètre Bas service	Périmètre Haut service
Galerie IMFOUT		
- Mise en service	1952	1999
- Longueur (Km)	16,7	13
- Diamètre intérieur (m)	5,3	6,4
- Débit (m ³ /s)	36	38
Canal Principal		
- Longueur (Km)	111	78
- Débit en tête (m ³ /s)	42	38
Canal Intermédiaire		
- Longueur revêtue (Km)	24	--
- Débit en tête (m ³ /s)	7,2	--
Stations de pompage		
- Stations de relevage	2	1
- Station de mise en pression	1	-
- Puissance totale installée (MW)	40	24
Réseau d'irrigation		
- Longueur(Km)	2034	880
Réseau de piste		
- Longueur totale (Km)	3500	1650
- Longueur revêtue (Km)	350	350
Réseau d'assainissement		
- Longueur totale (Km)	1800	1550

I.4. Traits morphologiques

Du point de vue morphologique, on distingue de l'Ouest à l'Est trois régions naturelles :

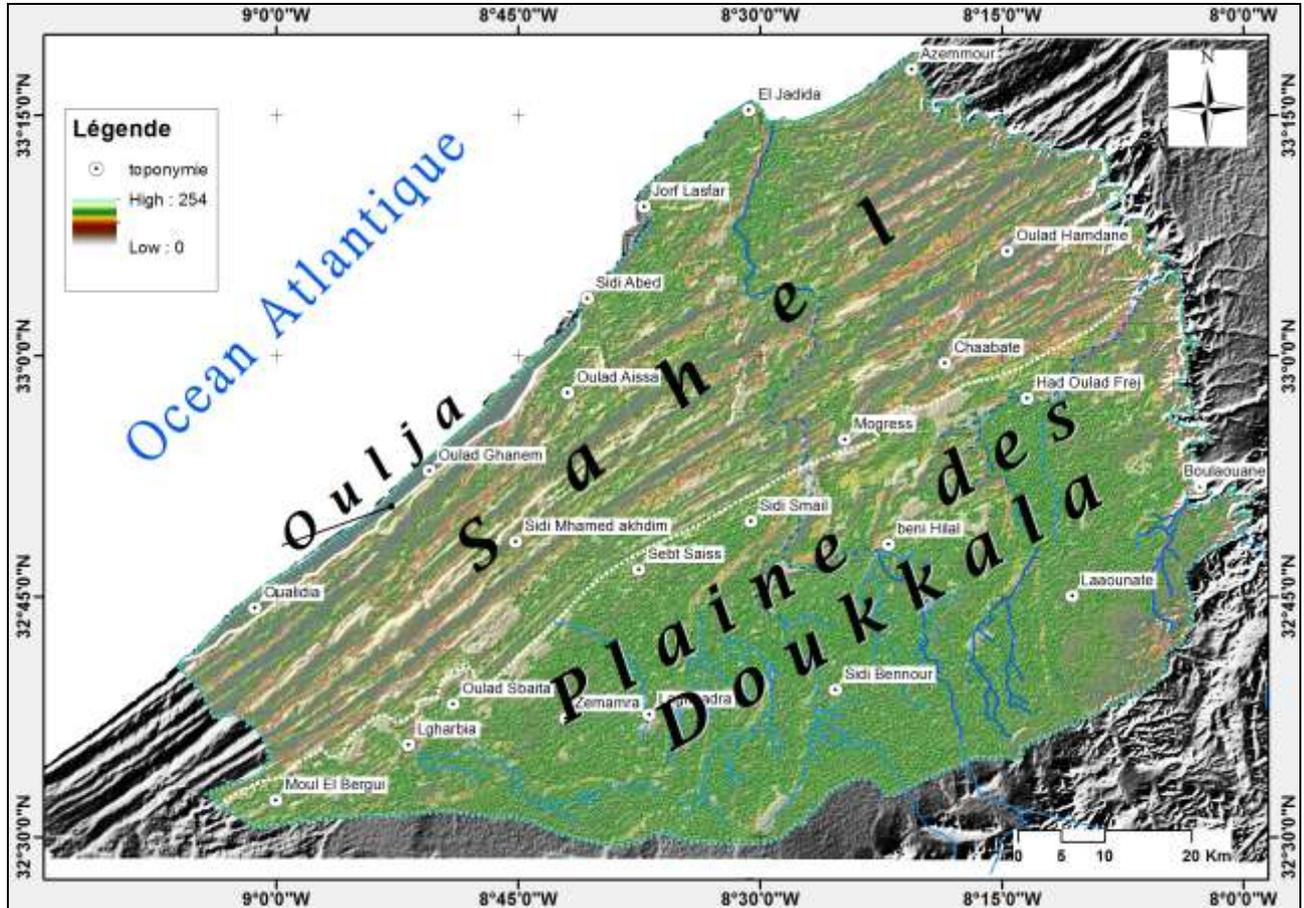


Figure 3: Unités géomorphologiques de la région des Doukkala

I.4.a Oulja

C'est une étroite frange côtière sous forme de gouttière de quelques kilomètres de large. Elle est bordée à l'Est par une importante falaise morte et protégée de l'Océan par un cordon dunaire. Une partie de cette zone est envahie par les eaux marines qui forment les lagunes d'Oualidia et de Sidi Moussa.

I.4.b Sahel

C'est une bande côtière entre l'Oulja et la plaine des Doukkala, elle s'étend sur une superficie de 4000 km² avec une largeur de 30 à 50 km et une longueur de 150 km (depuis l'embouchure de l'Oued Oum Rabia jusqu'à Safi). Cette zone est constituée de dunes consolidées disposées parallèlement à la ligne de rivage.

I.4.c Plaine des Doukkala

Elle est située entre le Sahel et le massif des Rehamna et des Mouissates sur une superficie de 3500 km². Il s'agit d'une vaste zone de bas plateaux inclinés régulièrement de 2 à 3 % du Sud-Est au Nord-Ouest. Les altitudes ne dépassent les 300 m que dans la partie la plus interne en bordure des Rehamna. Les paysages sont monotones et les plateaux sont souvent parsemés des dayas. Cette zone, de faibles reliefs, est formée de dépôts limoneux quaternaires.

I.5. Climat

Le climat est de type méditerranéen, aride à semi-aride. En raison de la proximité de l'océan et de l'absence d'obstacles naturels, les températures sont modérées sur la côte, plus contrastées à l'intérieur (Ouada, 1998).

I.5.a Pluviométrie

Les précipitations sont très irrégulières d'une année à l'autre. Leur répartition au cours de l'année n'est pas homogène, elle dépend de plusieurs facteurs qui sont la latitude, la continentalité et l'exposition des versants au voisinage du massif des Rehamna (Ouada, 1998).

La saison pluvieuse couvre en moyenne la période allant d'octobre à mars. Les pluies tombent régulièrement en automne et en hiver.

D'après les observations et les calculs effectués sur plusieurs années, la moyenne des pluies dans le bassin Sahel-Doukkala est de l'ordre de 334 mm. Les valeurs moyennes annuelles varient d'une station à une autre indiquant un gradient pluviométrique croissant du Sud vers le Nord. (El Achheb, 2002).

I.5.b Température

Dans le bassin Sahel-Doukkala, la température semble être un facteur climatique beaucoup plus régulier que les précipitations. (Ouada, 1998).

Les températures sont modérées dans les zones proches de l'océan et plus contrastées à l'intérieur. Ce paramètre présente une variabilité inter-annuelle, mais reste peu variable d'une année à l'autre. Au cours d'une année, on trouve deux périodes, une période à temps chaud allant de mai - juin à septembre-octobre, l'autre à temps doux et froid allant de novembre à mars-avril. (El Achheb, 2002).

Les mois les plus chauds sont juillet et août avec des maxima moyens de 28 à 30°C sur la côte et de 30 à 35°C entre le massif des Rehamna et l'Océan. Les mois les plus froids sont décembre, janvier et février où la moyenne annuelle est de 6 à 8°C sur la côte et de 2 à 6°C entre les

reliefs des Rehamna et l'Océan. Des maxima absolus journaliers supérieurs à 45°C peuvent s'observer dans toute la région lorsque le vent chaud appelé "chergui" souffle (El-Jadida 40°C, Safi 50°C et Sidi Bennour 51°C) valeurs qui sont comparables à celle des stations présahariennes du Maroc. Quant aux minima, on observe quelques gelées exceptionnelles à l'intérieur, mais jamais en bordure Océanique. (Ouadia, 1998).

I.5.c Vent

Avec seulement 2,2 % de temps calme, les vents sont très fréquents et proviennent principalement du Nord - Nord-Est et de l'Ouest. Leur vitesse est modérée et oscille généralement entre 3 et 6m/s.

Les vents, à dominance nord-ouest, sont fréquents vers la fin de l'après-midi. Les cherguis (vent chaud) sont parfois enregistrés en avril et mai.

I.6. Hydrologie :

En dehors de l'Oued Oum Rabia, dont le cours inférieur traverse la région (fig.4) dans son secteur SSE au NNW, il n'existe pas dans cette région de cours d'eau pérenne. (Gigout, 1951 ; Ferre, 1969 ; Ouadia 1998 ; El Achheb, 2000).

Le bassin Sahel-Doukkala est mal drainé naturellement. Le Sahel présente un alignement très régulier de crêtes dunaires d'orientation SW-NE, parallèle à la côte. Il constitue une barrière naturelle qui empêche tout écoulement superficiel vers l'Océan.

Les eaux de pluie sont collectées dans des dépressions topographiques « dayas », qui sont nombreuses dans les Doukkala.

Le réseau hydrographique est bien organisé en amont hydraulique, à l'arrivée dans la plaine il devient perturbé et anarchique. Ce réseau draine les reliefs des Rehamna où affleurent des formations imperméables et présentes des crues violentes et de courte durée. Les eaux de ruissellement atteignant la plaine des Doukkala et celles générées localement sont impérativement drainées par l'Oued Fel-Fel (Ouadia, 2000 ; El Achheb, 2002).

Les oueds les plus importants sont ceux qui drainent le massif des Rehamna et viennent déverser leurs crues dans la plaine des Doukkala. D'autres petits oueds, drainent la plaine, tel que Oued M'Tal et Oued Guerrandou.

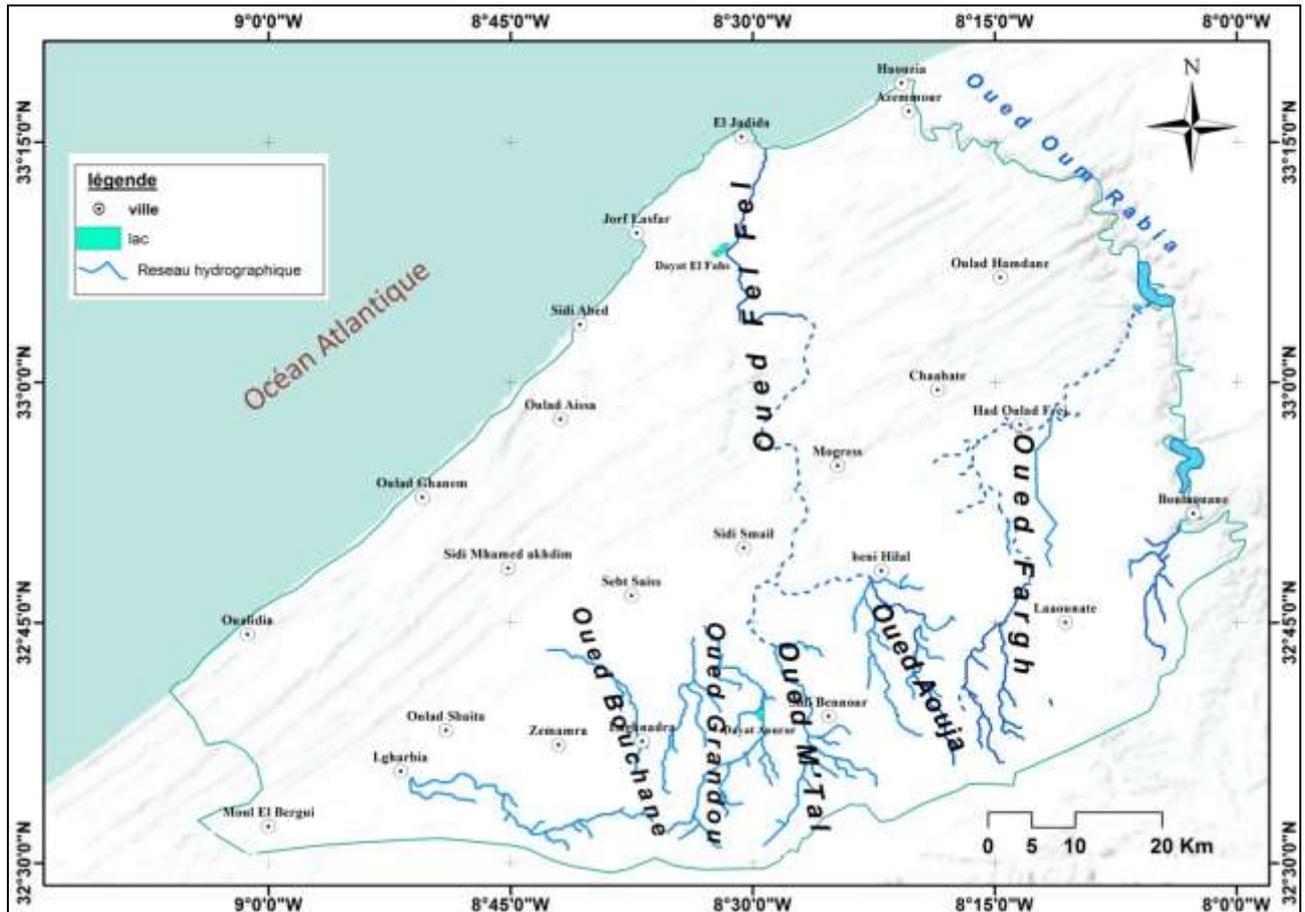


Figure 4: Réseau hydrographique de la région des Doukkala. D'après Ferre et Ruhahrd (1975)

Bassin de l'Oued Oum-Rabia

Il se présente sous la forme d'une bande large de 2 à 3 km allongée parallèlement au cours de l'Oum Rabia.

Ce dernier est l'un des fleuves les plus importants du Maroc. Son débit moyen annuel est de l'ordre de 100 m³/s. Il coule dans la zone amont du secteur d'étude dans une vallée profondément encaissée dans le Permien. Il ne semble jouer aucun rôle dans l'alimentation des nappes souterraines, mais constitue une ressource extrêmement importante puisque son débit annuel varie entre 1 et 3 milliards de m³ (El Achheb, 2003).

Bassin de l'Oued Faregh

Il est d'une superficie de 650 km² est conditionné par la présence de l'Oued Faregh qui traverse le bassin en gardant la direction Sud-Nord jusqu'à Had Oulad Frej, puis va se jeter dans l'Oum Rabia par une vallée étroite et encaissée dans les dunes du Sahel jusqu'à l'Arbaa Aounate. Le lit de l'Oued est encaissé entre des berges, hautes de 5 à 10 m, ce qui permet aux crues de passer sans débordement. A partir de ce point, avant la création du casier d'irrigation, l'Oued

commençait à divaguer et à multiplier ses bras.

L'aménagement et la réalisation du réseau de drainage ont modifié la situation. Le réseau de drainage comporte, en plus d'une branche de l'oued, deux autres colatures, l'une dans l'axe du casier et l'autre sur la bordure ouest.

La stagnation d'eau dans les Dayats est quasi inexistante puisque le bassin possède un exutoire et une bonne perméabilité des premiers horizons du sol.

Bassin de l'Oued Aouja

L'Oued Aouja (120 km² de bassin versant) débouche dans la plaine des Doukkala en se ramifiant en deux branches principales à peu près parallèles et distantes de 2 km. La branche nord donne lieu à plusieurs diffluences dont l'une contourne la ville de Sidi Bennour par le Nord-Est, les autres passent au milieu de la ville. La branche sud mêle ses eaux à celles de l'Oued M'Tal.

Bassin de l'Oued Bouchane.

L'Oued Bouchane (974 km² de bassin versant) pénètre dans la plaine par un lit encaissé d'une dizaine de mètres dans les limons quaternaire anciens; jusqu'à Arbaa-Amrane. Sa section devient ensuite insuffisante pour les grosses crues et des débordements latéraux se produisent. A environ 5 km au Nord de l'Arbaa Amrane se détache une branche vers le NE et conduit l'eau jusqu'aux Dayats d'Ouarar.

II: Cadre géologique

II.1 Rétrospective des travaux antérieurs :

Le bassin des Doukkala, a fait l'objet de nombreuses études géologiques depuis les premières observations de [Brives \(1907\)](#), l'ensemble de ces études ont progressivement amélioré nos connaissances géologiques de cette région.

En 1909, [Gentil](#) est le premier qui décrivait ce secteur comme une région caractérisée par le régime tabulaire des dépôts secondaires et tertiaires qui succèdent au régime plissé des terrains primaires. Il découvre le Rhétien fossilifère sur les berges d'Oum-Rabia. Il a remarqué aussi l'existence d'un étagement de terrasses d'abrasion marines pliocènes et quaternaires caractérisées par des faunes différentes. Chacune est couronnée par une formation éolienne.

[Lecointre \(1926\)](#) a décrit pour la première fois l'étagement de quatre niveaux marins quaternaires sur la Meseta côtière. Il a fait une distinction entre un Quaternaire ancien et un autre plus récent.

[Roch \(1930\)](#) a établi de sa part les grandes lignes de la stratigraphie de cette région tout en découpant la série sédimentaire en fonction d'étages ou de périodes. Puis il a présenté une esquisse paléogéographique du bassin pour tout le Jurassique.

La thèse de [Gigout](#) publié en 1951, après 7 ans de recherche, reste encore un des documents de référence pour toute étude de la région Abda-Doukkala. C'est une étude géologique sur la Meseta marocaine occidentale, ses observations, ses levés et ses coupes géologiques l'ont permis l'édition en 1954 des deux feuilles géologiques 1/200000. ([Gigout 1954](#)).

L'implantation de nombreux forages pétroliers et la prospection sismique ainsi que d'autres méthodes d'études indirectes ont permis à plusieurs chercheurs l'identification des formations litho-stratigraphiques et la structure profonde du substratum du bassin des Doukkala ainsi que la reconstitution de la paléogéographie de la région. Parmi ces chercheurs nous citerons :

En 1958, [Biberson](#) a identifié une succession de six niveaux marins. Il a proposé en une note des nomenclatures régionales pour le Quaternaire marin de la côte atlantique marocaine.

En 1967, Beaud et al., ont publié une analyse des étages marins du Quaternaire sous forme d'un tableau (tableau 3) résumant les données acquises sur le Quaternaire marocain.

Tableau 3 : Stratigraphie du Quaternaire marin du littoral atlantique marocain (Beaudet et al., 1967).

ETAGES	Altitudes atteintes par les transgressions	<u>Faunes malacologiques</u>	
		Espèces	Caractéristiques signification
Mellahien	+2 m	Cardiumedule Patelles	Faune actuelle
Régression			
Ouljien	+5 à 8 m	Purpura haemastoma Patella safiana	Faune actuelle + quelques éléments « sénégalien »
Régression			
Rabatien Harounien	+18 à 20 m	Purpura haemastoma Patella safiana	Faune actuelle + quelques éléments « sénégalien »
Régression			
Anfatien	+30 m	Trochatella trochiformis maximum Purpura Transgres-haemastoma-sâf Patella safiana	Faune chaude avec quelques éléments « sénégalien »
		Littorina littorea	Faune froide « norvégienne »
Régression		Purpura plessissil	Faune en voie de refroidissement
		?	
		Littorinalittorea Purpura lapillus	Faune froide
Maârifien	+50 à 60 m	Trochatella trochiformis Acanthinacrassilabrum	Faune chaude « chilo-péruvienne » ou
Régression			
Messaoudien	+90 à 100 m	TrochatellatrochiformisAcanthinacrassilabrum	Faune chaude « chilo » péruvienne » ou « sénégalienne »

Les travaux de Texier et al. (1994), ont permis d'étudier les multiples aspects du Quaternaire littoral.

Bernadin (1987) a montré que le socle des Doukkala-Abda se subdivise en zones alternativement basses et hautes de direction sub-méridienne et que le bassin permo-triasique est découpé en plusieurs zones de direction NNE-SSW.

En 1990, Akil a réalisé une étude sédimentologique et a établi une

carte géomorphologique des formations plio-quadernaires littorales entre la pointe d'Azemmour et Si Daoud (Oualidia).

En 1998, Ouadia a recensé dans le domaine mésétien, entre Casablanca et Safi, trois types de formations plio-quadernaires : les formations littorales, les formations fluviales et les dépôts de comblement des plaines ou « colluvions ». Il a par ailleurs présenté une carte géologique et géomorphologique des formations fluviales quadernaires de la vallée de l'Oued Oum Rabia.

Ce même auteur a détecté des mouvements néotectoniques dans les formations littorales, Ce qui a remis en cause le principe admis que la Meseta est un secteur où il n'y a pas d'indice de déformations.

En 1999 Khatmi a mis le point sur les principales formations méso-cénozoïques des Doukkala en se basant essentiellement sur l'étude stratigraphique de plusieurs coupes en affleurement ainsi que sur l'analyse de plusieurs forages. Ses travaux ont permis de préciser les modalités de dépôt des différentes unités jurassico-crétacé et cénozoïque de la plaine des Doukkala et de dater avec précision les dépôts miocènes de la région.

L'analyse litho-stratigraphique, sismo-statigraphique et sismo-structurale des formations du socle et de la couverture a permis à Echarfaoui (2003) de préciser l'évolution tectono-sédimentaire paléozoïque et mésozoïque de cette région et de suggérer que cette zone côtière de l'Ouest du Maroc a été touchée par : une phase de déformation compressive d'âge dévonien supérieur intra-frasnienne (éovarisque) et une seconde phase distensive due au rifting atlantique pendant la période triasico-liasique. Cette phase se termine par une séquence non faillée étendue à la quasi-totalité du bassin et marquant le passage du stade rifting au stade drifting annoncé par l'arrivée de la première transgression marine et l'établissement d'une plateforme carbonatée.

En 2001, El Attari, dans sa thèse d'état sur la Meseta occidentale, étudia le substratum paléozoïque et confirma les travaux de Gigout sur le Trias. Il a signalé que les affleurements triasiques de Sidi Saïd-Maâchou constituent très probablement un grand chenal N60 à N70 qui alimente un bassin plus ouvert à l'Ouest.

Hminna et al., 2009 ; Hminna et al., 2013 ; proposent un âge Trias supérieur (Carnien-Rhétien) grâce à la découverte des traces de pattes vertébrés (*Brachychoirotherium parvum*) dans la formation d'Oued Oum Rabia.

II.2 Cadre structural

L'histoire tectonique de la région étudiée se subdivise en trois phases : l'orogénèse hercynienne, les gauchissements tertiaires et les déformations quaternaires.

II.2.a Tectonique hercynienne

L'ensemble des auteurs s'accordent sur une phase de plissement du socle paléozoïque avec création de reliefs au Carbonifère. Les failles ont suivi de peu les plissements influencent encore la structure actuelle. L'érosion de cette chaîne s'est poursuivie pendant le Permien et le Trias.

Les principales structures plissées sont :

- L'anticlinal d'El-Jadida : d'axe Nord-Sud visible sur 7 km de longueur aux environs immédiats de la ville d'El-Jadida. Il est formé de dolomies probablement géorgiennes laissant apparaître au cœur une rhyolite,
- Anticlinorium de Sidi Saïd Maâchou: cet anticlinal fait ressortir l'Acadien. Il limite au Sud-Ouest le synclinorium de Bir Jdid Chavent ; ses rapports avec l'anticlinal d'El-Jadida sont masqués par les terrains récents,
- Synclinal d'Imfout : c'est une unité très régulière et très bien dégagée. Il est légèrement dissymétrique et tordu. La direction d'allongement est Nord-Sud dans l'ensemble.
- Le synclinal perché de jbel Lakhdar, d'axe SSW-NNE, tranché par des failles SW-NE.
- La série isoclinale des Rehamna occidentales avec la direction générale des couches orientée Nord-Sud.
- Les failles qui affectent les terrains paléozoïques sont quand à elles, pour la plupart, des failles Nord-Sud produisant de grandes cassures du socle et des failles transversales E-W ou obliques. Les plus importantes sont:
 - La faille de Daourat, complexe, elle conditionne le tracé de l'Oum Rabia sur une vingtaine de kilomètres entre Boulaouane et Sidi Saïd Maâchou.
 - Le réseau des failles de M'Tal, dont le tracé Nord-Sud se superpose sensiblement au tracé de la flexure qui intéresse le Crétacé; elle marque la limite de la Meseta côtière et de la Meseta centrale.

II.2.b Tectonique post-hercynienne

La tectonique post-hercynienne se résume à des mouvements verticaux affectant des blocs délimités par des failles normales ou flexures. Il s'agit de mouvements surtout épirogéniques mais qui ont pu s'associer à des déplacements horizontaux (Michard, 1976), notamment les plus récents (Allary, 1972). Ce sont ces mouvements qui dirigent la sédimentation ou l'érosion.

Les accidents tectoniques post-hercyniens présentent deux directions

majeures :

- Une direction Nord- Sud qui correspond au rejeu des failles hercyniennes,
- Une direction Nord-Est Sud-Ouest en rapport avec l'orogénèse atlasique (alpine)

Les formes structurales associées aux déformations se sont produites au cours du secondaire ; la faille de Daourat a rejoué entre le Trias et le Crétacé (Ferré, 1969). Mais c'est surtout au Néogène que s'est établi le relief actuel.

Les terrains secondaires qui existent à proximité de cette faille sont légèrement ondulés ou exceptionnellement plissés, flexures et faillés.

Les déformations qui ont affecté le matériel secondaire sont :

- L'anticlinal d'El-Jadida avec de faibles pendages du Cénomaniens; axé Nord Sud,
- Le synclinal de Ain Talmest qui fait apparaître la formation des Argiles rouges supérieures; de direction Nord-Sud également,
- Le monoclinal de Daourat qui se superpose à la faille hercynienne, il est qualifié par Gigout (1951) de flexure "atténuée".
- Le monoclinal des Aounates,

Par ailleurs, de petites failles existent à l'embouchure d'Ain Talmest. La flexure la plus importante est celle de M'Tal. Son tracé est formé de trois orientations très différentes : Nord-Sud de l'Oued Bouchane au M'Tal, Est-Ouest entre M'Tal et Aouja, puis Sud Ouest-nord est jusqu'au Faregh; sa longueur totale est de 55 km.

En ce qui concerne les structures détectées en subsurface, il importe de noter que sur la plus grande partie du territoire d'étude, la couverture plio-quadernaire masque le substratum crétacé. D'une manière générale, dans la plaine des Doukkala, les terrains crétacés s'enfoncent sous le remplissage limoneux de la plaine. Le plongement du toit de la formation des Calcaires inférieurs étudiés dans les forages semi-profonds de 1952 par Gigout en 1955, est assez rapide avec une pente de 4% (il mène de la côte + 300 au M'Tal à la côte -200 m à Sidi Bennour). Il est plus atténué au Nord entre Daourat et Had Oulad Frej (pente de 1 %).

Les forages assez nombreux et les études géophysiques ont permis à Ferré (1969) et à Ferré et Ruhard (1975) une étude assez précise de la structure du Crétacé de la région. Aussi reconnaît-on les structures suivantes :

- Anticlinal de Tlat-Rhanem (à l'Ouest de Zémamrara) ; sa partie Sud est de direction Nord Est-Sud-Ouest et sa partie Nord-Est de direction à peu près Nord-Sud,

- Synclinal d'Azemmour, de direction Nord-Sud, déduit de l'observation du pendage Ouest des calcaires cénomaniens dans la basse vallée de l'Oum Rabia et de leur réapparition en pendages est au Sud d'El-Jadida,

II.2.c Structure de la couverture plio-quadernaire :

Gigout (1951) a considéré la Meseta côtière comme un secteur où il n'y a aucun indice de déformation quadernaire. Cependant, Ouadia (1998) a mis en cause cette conclusion en détectant des mouvements néotectoniques au sein des formations quadernaires du secteur littoral et au niveau de l'arrière-pays. Les principaux éléments qui témoignent de cette néotectonique selon cet auteur sont les suivants :

Au niveau de l'arrière-pays la tendance à la destruction du pont de M'Tal peut être en relation avec une action combinée de la tectonique et de la karstification. En outre, certaines constructions sont fissurées dans beaucoup d'endroits : Collège d'Oulad-Frej par exemple. Parmi les effets de cette néotectonique, on note l'augmentation des apports détritiques qui auront comme conséquence de diminuer la durée de vie des barrages.

Au niveau de la zone littorale les failles du cordon dunaire du Jorf Lasfar et celles du cordon dunaire de Had-Swalem, de Hawara et du carrefour route Sebt-Oulad-Douib-Azemmour et El-Jadida Marrakech. En outre, la plate-forme d'abrasion actuelle est quasiment fissurée. Ces fissurations et ces failles ont contribué au démantèlement de la falaise vive. Cette néotectonique participe au recul de la falaise vive ainsi qu'au changement de la morphologie de la ligne de rivage actuelle.

II.3 Découpage litho-stratigraphique :

De point de vue géologique, la région des Doukkala appartient à la grande unité géologique connue, depuis Gentil, sous le nom de « Meseta marocaine occidentale ». Celle-ci est définie par le régime tabulaire (sub-horizontale) des dépôts secondaires et tertiaires reposant sur des terrains primaires fortement plissés par l'orogénèse hercynienne (Gigout, 1956).

La morphologie relativement tabulaire et le caractère peu accidenté de la région des Doukkala tendent le plus souvent à réduire les observations directes, c'est pour cela que la stratigraphie des séries paléozoïques et méso-cénozoïques de la région est fournie essentiellement par certains forages pétroliers et l'ensemble des sondages implantés dans la région.

Le bassin des Doukkala comporte des séries sédimentaires allant du Paléozoïque jusqu'au Miocène, sur lesquelles on trouve des dépôts transgressifs plio-quadernaires. (Fig.5 et tableau. 4).

Tableau 4 :Tableau récapitulatif des différentes formations géologiques.

AGE		FORMATION	EPAISSEUR (M)	SYMBOLES	
Quaternaire Plio- Quaternaire	Quaternaire limoneux	Limons sablo-argileuses	10-80	<i>q2</i>	Pq
	Quaternaire marin et dunaire	Grès, sables et calcaires coquillers	10-80	<i>q1</i>	
	Pliocène	Calcaire détritique et lumachelles ; conglomérat	10-40	<i>P</i>	
Mésocène- Cénozoïque	Miocène		Marnes sableuses ou argiles	0-20	<i>M</i>
	Cénomanién		Marno-calcaires jaunâtres	100-200	<i>Cm</i>
			Marnes ; marno-calcaire et gypse		<i>Cma</i>
	Néocomien	Hauterivien supérieur	Grès, sables et argiles rouges	0-60	<i>Cic</i>
		Hauterivien moyen	Calcaires	30	<i>Ci</i>
		Hauterivien inférieur	Marnes	60	
		Valanginien	Calcaire	5-30	
	Jurassique supérieur ou Crétacé inférieur		Conglomérat, Grès et argiles rouges	50-70	<i>Js</i>
	Jurassique supérieur		Calcaires gypseux	200	<i>Jcc</i>
	Permo-Trias		Argiles et Basaltes	200	<i>T</i>
Paléozoïque	Dévonien	Schistes, Quartzites et Dolomies		<i>d</i>	
	Silurien			<i>Si</i>	
	Cambrien			<i>K</i>	

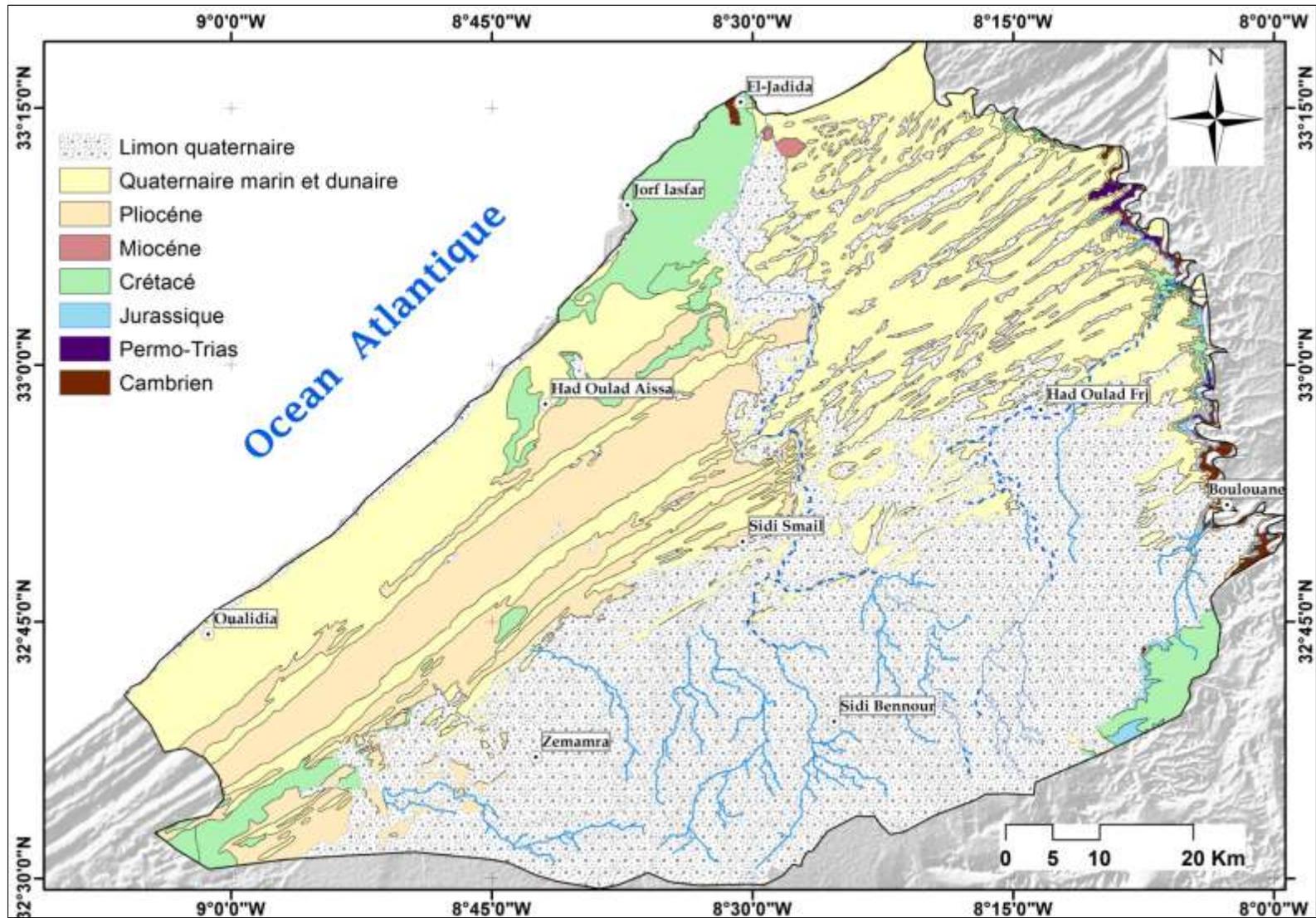


Figure 5: Carte géologique simplifiée du bassin Abda-Doukkala (d'après la carte géologique 1/1000000 du Maroc).

II.3.a Paléozoïque :

Dans l'ensemble de la région le paléozoïque est recouvert par des couches méso-cénozoïques peu épaisses. Il n'affleure que dans la région des Rehamna et dans la vallée de l'Oum Rabia ; partout ailleurs, il est masqué par des dépôts postérieurs, à l'exception du pointement d'El-Jadida.

Dans le massif des Rehamna, qui se trouve à la limite SE de notre secteur d'étude, les terrains primaires sont constitués essentiellement de schistes compacts vert foncé à bleu noir et de grès quartzitiques organisés en barres généralement puissantes.

Le Paléozoïque a par ailleurs pu être atteint dans tous les puits pétroliers implantés dans le bassin. Ces derniers n'ont cependant jamais touché le Cambrien.

II.3.b Méso-cénozoïque :

Les sédiments secondaires, supportant par endroits l'Eocène, forment une auréole de plateaux autour du massif ancien des Rehamna. Une autre auréole de plateaux ou du massif ancien entoure les terrains primaires d'Imfout. Ils constituent l'armature du Sahel entre Safi et El-Jadida, avec des affleurements assez étendus à proximité de ces deux villes (Gigout, 1956).

L'histoire géologique de la Meseta occidentale, durant la période méso-cénozoïque, est régie par les grands événements géodynamiques liés à la dislocation de la Pangea et aux mouvements relatifs des plaques Amérique du Nord, Afrique et Eurasie (Hafid, 1999). La couverture sédimentaire du Mésozoïque et du Cénozoïque est sub-horizontale, peu épaisse et lacunaire. Le remplissage sédimentaire se caractérise par la dominance des dépôts du Trias, du Crétacé supérieur et du Mio-plio-quatenaire (Gigout, 1951 et Ruellan, 1984).

Les dépôts du Méso-cénozoïque, identifiés par sismique et données des forages, dans le bassin des Doukkala-Abda sont dominés par les séries argilo-salifères triasiques qui occupent plusieurs hémigrabens, surtout au Nord du bassin, et par les ensembles carbonatés et anhydritiques du Jurassique. Etant peu affectés par la tectonique compressive atlasique comme c'est le cas du bassin d'Essaouira (Hafid, 1990 et 2000), les dépôts post-paléozoïques du bassin des Doukkala-Abda ont conservé les caractères tectono-sédimentaires liés aux mouvements du rifting et d'extension de l'atlantique central.

II.3.c Plio-quatenaire :

L'uniformité et la ressemblance des faciès pliocènes et quaternaires marins dans tout le secteur d'étude ont incité les hydrogéologues

Ferre et Ruhahrd (1975) ; Chtaini (1987) et El Achheb (2002) d'adopter le terme commode de Plio-quatenaire.

Le Pliocène est formé par des calcaires gréseux. Ces sédiments marins consolidés, qui ont été repris en dunes dont les crêtes émergent encore des "limons" quaternaires, constituant l'essentiel de la zone du Sahel.

Le Quaternaire est constitué de trois groupes de formations :

- Formations littorales constituant les grands alignements de crêtes et des sillons parallèles ou subparallèles au rivage actuel.
- Terrasses fluviales longeant l'Oued Oum Rabia.
- Colluvions de comblement à l'intérieur de la plaine.

II.4 Cadre hydrogéologique

Plusieurs études hydrogéologiques et hydrologiques ont été menées dans la région et ont permis, d'évaluer les ressources en eau et le degré de vulnérabilité et des risques de pollution des aquifères (Chtaini, 1987; Ouadia, 1998; Younsi, 2001; El Achheb, 2002; Zourarah, 2002; Nissoul *et al.*, 2002; Aboer, 2004 ; Oulaaross, 2009; Mdiker *et al.*, 2009; Belahmira *et al.*, 2010; Fadili, 2014; Mdiker, 2016).

II.4.a Les différentes nappes du bassin

Les nappes des Doukkala :

Il y a plusieurs types de nappes selon les roches magasins et selon la nature du réservoir.

➤ Les nappes profondes.

L'enfoncement des terrains Crétacés formant les collines en bordure des Rehamna sous les limons des Doukkala, avait laissé penser à l'existence de nappes ascendantes dans la plaine. En 1952, trois forages profonds implantés dans la région de Sidi Bennour ont montré effectivement la présence de nappes ascendantes, plus profondes que la nappe Plio-quatenaire (Gigout, 1952).

➤ La nappe supérieure

On l'appelle aussi nappe Plio-quatenaire car elle circule principalement dans le calcaire détritique Plio-quatenaire; son plancher imperméable n'est pas bien défini car il est constitué par le sommet du Crétacé inférieur (argiles vertes à gypse, couches rouges supérieures) ou par des bancs calcaires et marneux du Cénomaniens. Lorsque le Pliocène repose sur le Cénomaniens, l'imperméable peut faire défaut et la nappe peut alors circuler dans le calcaire cénomaniens, ce qui est le cas dans la région de Beni Helal à l'Est de Sidi Smaïl et la région de Had Oulad Frej. Dans la bordure Sud-Est de la plaine, aux abords des Rehamna la nappe circule dans le Crétacé

inférieur.

En général, la nappe supérieure est considérée comme une nappe libre profonde qui dans certaines conditions structurales peut être captive, surtout au Sud de Sidi Bennour où l'épaisseur des limons peut dépasser 80 m. Dans cette zone, la nappe est en charge sous les limons, mais cette charge reste toujours inférieure à 20 m.

➤ Les nappes perchées

Ce sont de petites lentilles très localisées que l'on rencontre parfois dans la partie superficielle dans les limons. Ces niveaux perchés sont étroitement liés au réseau hydrographique actuel ou fossile (réseau du dernier pluvial quaternaire).

Les nappes du Sahel

Dans le Sahel, il n'y a pas de nappe générale à cause de la structure des terrains et de l'absence de la continuité hydraulique pour une même couche. Dans cette région, on distingue trois zones ayant des caractéristiques aquifères différentes et qui sont du Sud au Nord : le Sahel central, le plateau d'El Jadida et le Sahel de l'Haouzia.

➤ Sahel central

Les aquifères principaux sont constitués par les calcaires de Dridrat de l'Hauterivien moyen et les calcaires détritiques du Plio-quaternaire (fig., 6). L'épaisseur des argiles de l'Hauterivien supérieur varie selon la position par rapport aux axes de plissement. Leur épaisseur est maximum dans les axes synclinaux où elles constituent un écran imperméable entre l'aquifère plio-quaternaire et celui des calcaires de Dridrat.

Dans les axes anticlinaux, ces argiles sont complètement érodées, les calcaires plio-quaternaires et de Dridrat sont alors en contact direct.

Le Sahel présente la particularité d'être représenté par un aquifère bicouche dans une partie de son secteur central et par un quasi-monocouche dans sa partie amont et aval.

➤ Plateau d'El Jadida

Le principal aquifère dans cette zone est le Cénomaniens, il s'agit d'un aquifère multicouche constitué par une alternance de couches calcaires et de couches marneuses. Un peu plus au sud, certains niveaux aquifères sont localisés dans la couverture plioquaternaire (fig., 7)

➤ Sahel de l'Haouzia

Il correspond à la zone la plus septentrionale du Sahel et au synclinal d'Azemmour. Une nappe généralisée existe dans le Cénomaniens et le Plioquaternaire. Ce secteur est mal connu par faute de travaux de

reconnaissance (El Achheb, 2002).

La série stratigraphique du bassin Sahel-Doukkala comporte quatre formations à faciès calcaires dominant susceptible de constituer des couches perméables :

- Les calcaires du Berriasien supérieur- Valangien inférieur ;
- Les calcaires de Dridrat de l'Hauterivien supérieur qui ne sont bien individualisés que dans le Sahel ;
- Le calcaire du Cénomaniens moyen qui n'est représenté que dans le plateau d'El Jadida et l'Haouzia ;
- Les grès calcaires du Plioquaternaire marins et dunaires, forment la nappe supérieure des Doukkala centre, ils sont aussi aquifères dans le Sahel côtier.

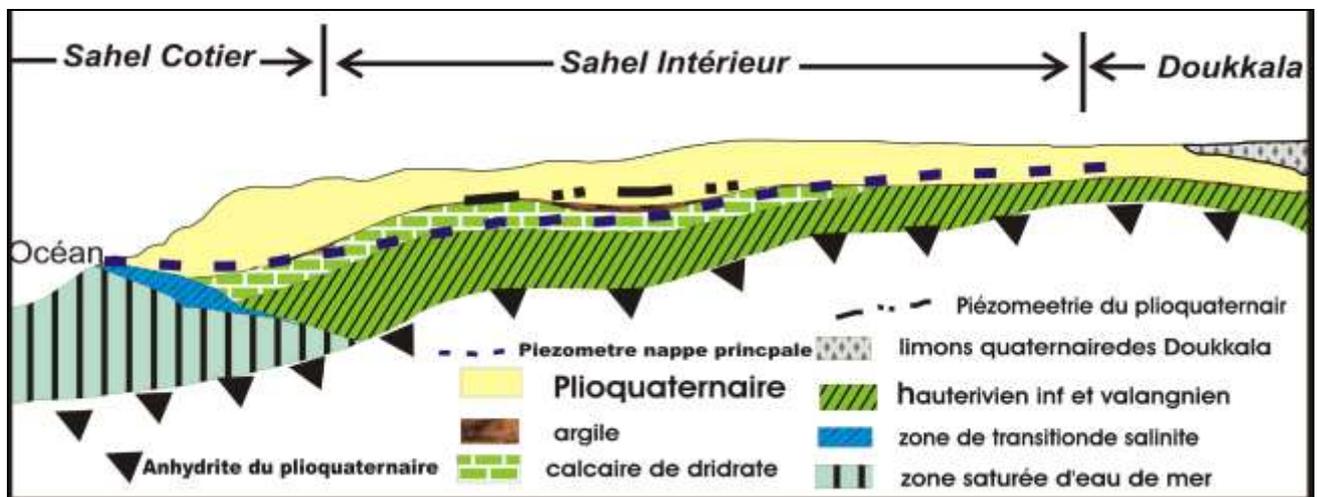


Figure 6: Schéma hydrogéologique du Sahel (D.R.H.T., 1994)

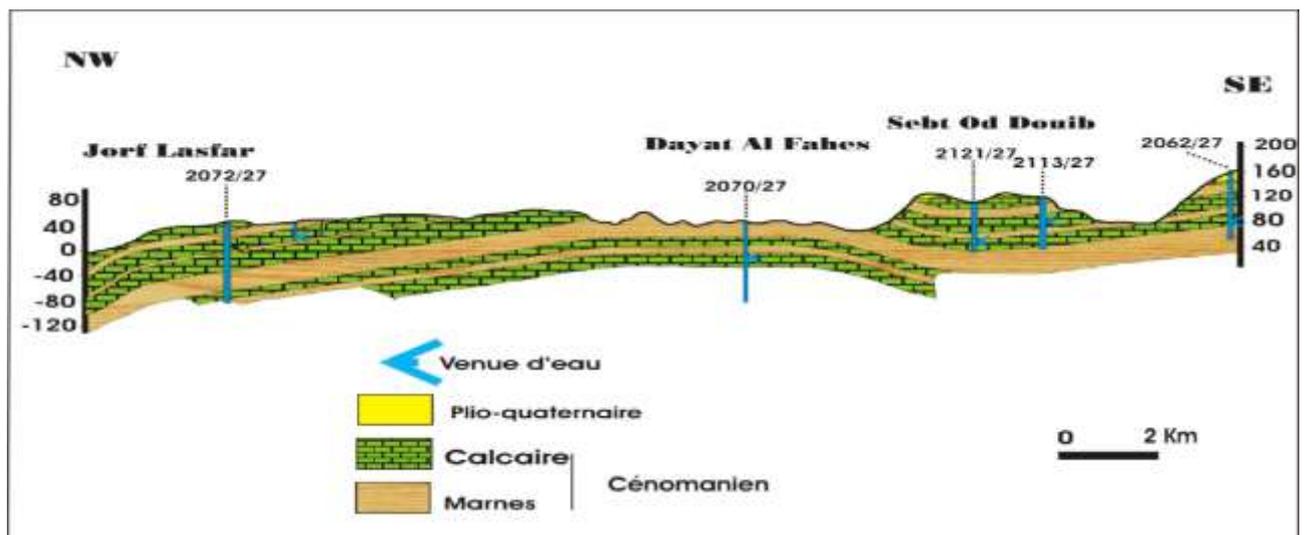


Figure 7: Coupe hydrogéologique dans le plateau d'El Jadida (Souhel et al., 2000).

II.4.b Comportement hydrogéologique des terrains :

Primaire:

Il présente assez peu d'intérêt pour les circulations souterraines. Il est généralement imperméable sauf dans la frange superficielle altérée où peuvent exister de petites nappes d'extension limitée. Ce sont des nappes pauvres et d'intérêt local.

La profondeur à laquelle se rencontre l'eau est toujours très faible, elle est comprise entre 2 et 10 m. Sa qualité chimique est très variable d'un point à l'autre, elle est fonction des vitesses de circulation, de la composition des schistes et de l'alimentation (Gigout, 1951).

Pérmo-Trias:

Il présente également peu d'intérêt, étant donné sa faible extension. Des sondages implantés dans cette formation ont confirmé le caractère hydrogéologique médiocre du point de vue débits. La nappe est peu profonde et l'eau est de bonne qualité chimique. Cette nappe se situant en amont de M'Tal est captée par de nombreux puits traditionnels, (Ferre et Ruhard, 1975).

Elle est alimentée par les sous écoulements et les crues des oueds descendants des Rehamna.

Jurassique Supérieur (Jcc, tableau 4):

Formé de puissantes assises de calcaires alternant avec des lits marneux, le Jurassique supérieur est un niveau à perméabilité de fissures ; les circulations se font souvent par l'intermédiaire de chenaux formés par la dissolution du calcaire et surtout du gypse. La nappe jurassique est mal connue car elle est inexploitable, le niveau statique étant profond (il dépasse les 100 m). L'eau est sulfatée avec un résidu sec élevé.

Crétacé inférieur:

Dans les Doukkala où la lithologie est hétérogène, les faciès présentent une importante variation latérale.

- Les argiles rouges inférieures (*Js*, tableau 4): Ce sont des formations détritiques avec alternance grés-conglomératique et argileuse. Leur perméabilité est fonction de leur degré d'argilosité. Ces couches sont connues comme aquifères en bordure du bassin (M'Tal) et dans la région de Sidi Bennour.
- Le calcaire moyen (*Ci*, tableau 4): Il forme l'armature des collines de la bordure des Rehamna (Aounate - M'Tal). Ce calcaire présente une perméabilité de fissures quand il n'est pas trop marneux. Il joue un grand rôle dans l'alimentation des nappes

souterraines des Doukkala.

- Les argiles rouges supérieures : Elles sont surtout argileuses et ne renferment que de rares bancs gréseux susceptibles de constituer des niveaux aquifères. (Ferre et Ruhard, 1975).

Dans le Sahel, les argiles brunes constituent le plancher général étanche isolant les aquifères hauteriviens et plio-quadernaires des formations jurassiques.

Le créacé inférieur, lorsqu'il est franchement calcaire, est un niveau karstique à fissuration très importante. Les essais de pompage réalisés dans ces calcaires conduisent à estimer une perméabilité moyenne de 5.10-3 m/s. (Gigout, 1951).

Les argiles sableuses rouges, forment dans certaines régions le toit du créacé inférieur et le plancher de l'aquifère plio-quadernaire (Ferre et Ruhard, 1975).

Créacé inférieur ou moyen à gypse (Cma, Tableau 4):

C'est une formation essentiellement argileuse et gypseuse qui présente une importante puissance dans le centre de la plaine. Il constitue un imperméable vis à vis du Cénomaniens et du Plio-quadernaire sus-jacent, mais l'existence de bancs calcaires permet l'établissement des circulations souterraines. (Gigout, 1951; Ferre et Ruhard, 1975; El Achheb, 2002).

Cénomaniens (Cm, Tableau 4):

Constitué d'alternance de calcaire et de marne jaune, il présente une fissuration très irrégulière. Les niveaux marneux jouent souvent, vers le sommet, le rôle de plancher imperméable pour la nappe du Plio-quadernaire. Dans le plateau d'El-Jadida, l'alternance de calcaire et de marne lui donne le caractère d'un aquifère multicouches. Des pompages d'essais dans les environs d'El-Jadida, ont donné des valeurs de perméabilités de 5.10-6 et 10-5 m/s. (El Achheb, 2002).

Plio-quadernaire marin et dunaire (Pq, Tableau 4) :

Du point de vue hydrogéologique et lithologique, le Plio-quadernaire est un ensemble perméable, leur imperméable de base est tantôt marneux (Cénomaniens) tantôt argileux (argiles rouges du Créacé inférieur).

La nature géologique et la texture du Plio-quadernaire (grès calcaire marin et dunaire) lui confèrent les caractères d'un aquifère à perméabilité d'interstices et de microfissures. Le Plio-quadernaire est susceptible d'être karstifié. Les formes karstiques superficielles et profondes en sont les témoins. Ces formes karstiques peuvent introduire dans un réservoir des meilleures propriétés hydrogéologiques et elles peuvent modifier très favorablement sa

perméabilité. (Gigout, 1951 ; Ferre et Ruhard, 1975 ; Ouadia, 2000).

Le Plio-quaternaire est le terrain aquifère le plus accessible dans la région étudiée ; il est sollicité par la plupart des puits creusés par les habitants des Doukkala. (Ferre et Ruhard, 1975, El Achheb, 2002).

La couverture limoneuse du Quaternaire détermine les possibilités d'infiltration par son épaisseur qui varie entre 10 m et 80 m ainsi que sa perméabilité. (Ouadia, 2000).

A part le Plio-quaternaire dans les Doukkala centre, aucune formation n'est suffisamment épaisse ni homogène et continue, pour constituer un aquifère susceptible d'être individualisé de point de vue hydraulique.

Le système aquifère est constitué des zones aquifères suivant, (Souel et al., 2005, Belahmira et al., 2010):

- Crétacé inférieur et Plio-quaternaire dans le Sahel intérieur et les Doukkala
- Crétacé inférieur et Cénomaniens dans le Sahel Nord.
- Cénomaniens et Plio-quaternaire dans les Doukkala Nord et EL Haouzia.

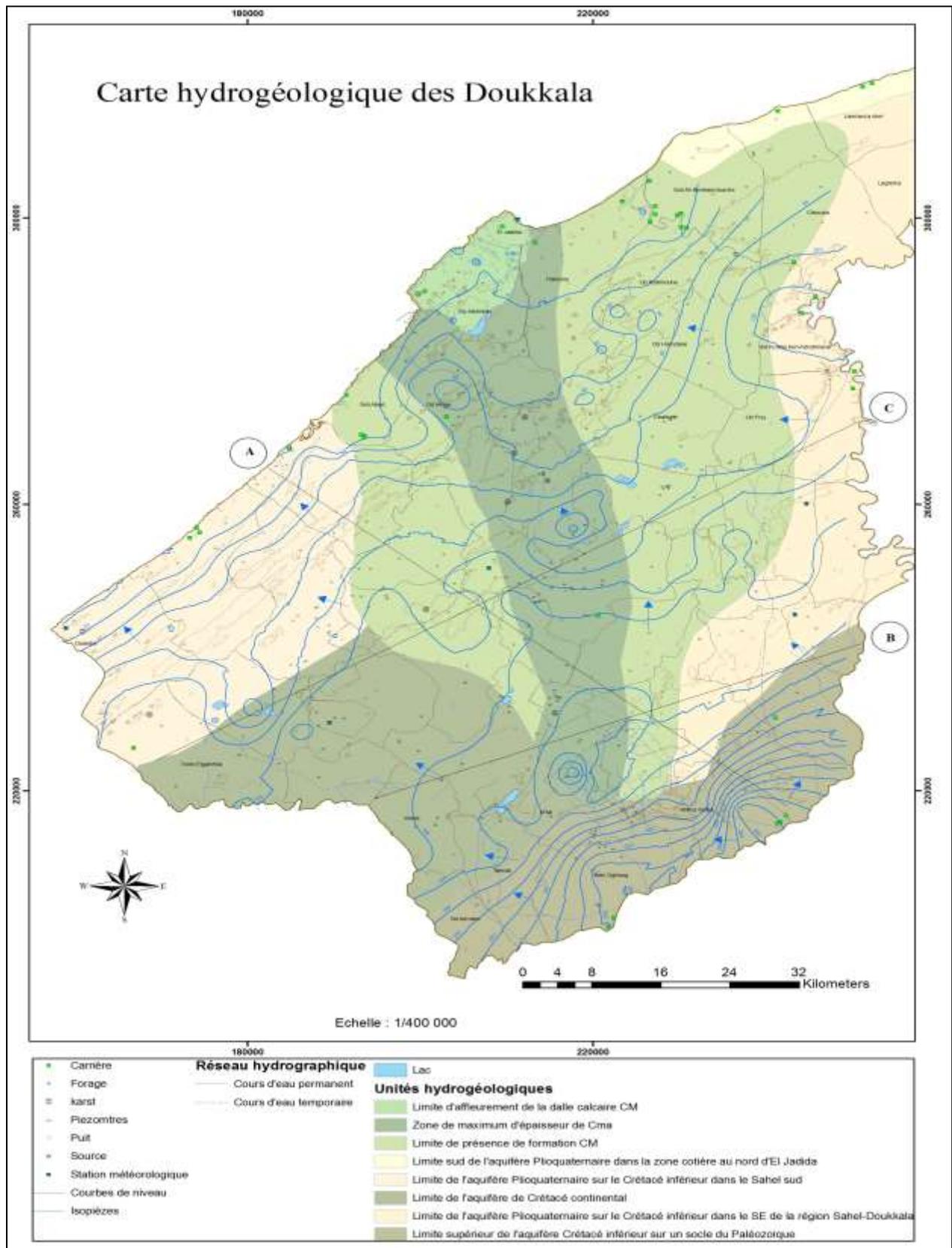


Figure 8: Extension des principales formations aquifères de Sahel Doukkala (Belahmira et al., 2010)

III : Généralités sur la modélisation géologique 3D

III.1 Définitions :

La modélisation consiste à construire et à utiliser un modèle qui est une représentation simplifiée de la réalité pour montrer les aspects importants du système étudié. Alors qu'une dimension représente un axe d'analyse dans un entrepôt de données, en informatique ; étendue d'un corps suivant une direction donnée, en mathématique ; grandeur réelle, mesurable déterminant l'espace occupée par un corps, etc. (OQLF, 2005). Pour la géologie une dimension est définie comme chacune des grandeurs (longueur, largeur, hauteur ou profondeur) nécessaires à la description géométrique des unités et surface géologique.

Mallet (2002) définit la modélisation géologique comme un ensemble des méthodes mathématiques qui permettent de modéliser de façon unifiée la topologie, la géométrie et les propriétés physiques des objets géologiques, tout en considérant les données de toutes sortes rattachées à ces objets.

Un modèle du sous-sol est généralement construit à partir de mesures brutes. Ces données bruitées doivent cependant être traitées et améliorées (Bac, 2005).

Le développement informatique depuis une trentaine d'années permet de réaliser des modèles tridimensionnels complexes en intégrant de multiples sources de données. (Calcagno *et al.*, 2008).

Ce type de modèle devrait produire une représentation cohérente de la géologie de sub-surface qui peut être un support pour la modélisation d'autres caractéristiques du sous-sol telles que des propriétés hydrogéologiques ou/et géothermiques. Les modèles géologiques tridimensionnels devraient Par ailleurs être faciles à modifier et à mettre à jour pour intégrer de nouvelles données.

III.2 Logiciels de la modélisation géologique 3D

Afin de construire des modèles 3D d'environnements géologiques, des outils numériques spécialement conçus pour stocker, manipuler et visualiser des objets tridimensionnels doivent être utilisés.

Les différents outils utilisés pour créer, manipuler et visualiser les modèles géologiques en trois dimensions sont :

Les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO), qui offrent des fonctionnalités de modélisation de la géométrie en 3D (importation, construction d'objets, édition graphique, etc.) très performantes mais ne permettent pas de gérer les systèmes de coordonnées.

Les systèmes d'information géographique (SIG), qui permettent de gérer les données positionnées dans des systèmes de coordonnées géographiques et offrent des fonctions d'analyses spatiales. La plupart des SIG sont souvent limités aux données positionnées dans des systèmes de coordonnées bidimensionnels (2D) (Bonham-Carter, 1994).

Les SIG et les CAO ne répondent pas totalement aux besoins spécifiques de la modélisation 3D géologique (Lachance *et al.*, 2004), mais ils offrent chacun des avantages distincts, pour la création des objets 3D et la manipulation des données spatiales en trois dimensions. Pouliot *et al.*, 2003 ont démontré que les CAO sont présentement plus efficaces.

Les outils géomatiques 3D spécialisés pour les sciences de la terre tel que les logiciels Earth Vision, gOcad, GEMS et Vulcan, sont à la base, des CAO auxquels ont été ajoutées des fonctionnalités spécifiques à la géologie 3D. Mais il existe une multitude de logiciels conçus principalement pour la modélisation géologique 3D (Rockworks, Petrel, Move...).

DEUXIEME PARTIE

Apport de la modélisation 3D à la géologie de la région

I. Objectif :

Dans la région des Doukkala, la topographie est généralement tabulaire, ce qui pose problème à toute étude géologique classique basée sur les observations directes d'affleurements. Pour suivre l'évolution des séries méso-cénozoïques et plio-quaternaires en subsurface, il était nécessaire de suivre une démarche basée sur des méthodes indirectes.

La méthode que nous avons utilisée, pour contourner le problème d'absence d'affleurements (surtout au centre des Doukkala), est la création d'un modèle géologique 3D à partir des données de sondages hydrologiques existants. Cette démarche basée sur l'analyse et l'interprétation de l'ensemble des sondages et des données disponibles, a permis ainsi de suivre de près la répartition géographique en subsurface des formations géologiques.

Pour atteindre cet objectif, nous avons procédé selon la démarche suivante :

- Créer un modèle géologique en 3D de la zone étudiée.
- Définir l'architecture et la répartition des unités géologiques.
- Décrire et interpréter l'architecture des diverses formations litho-stratigraphiques et leurs évolutions en subsurface.

II. Moyens et méthodes :

II.1 Données utilisées :

Pour la conception du modèle géologique 3D, nous avons utilisé une base de données comprenant : Sondages hydrogéologiques, Cartes géologiques, Coupes géologiques 2D et le MNT

❖ Sondages hydrogéologiques.

Nous avons utilisé principalement les données stratigraphiques de 229 sondages hydrogéologiques forés dans la région de Sahel-Doukkala.

L'ensemble des sondages implantés dans la région des Doukkala (Fig.9), ont été compilés, interprétés dans un précédent travail (Souhel et al., 2005). Ils proviennent de la Direction Régionale de l'Hydraulique (DRH) et de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole des Doukkala (ORMVAD).

Ces sondages, disponibles dans la base de données SaDIN, sont très hétérogènes et correspondent à :

- ❖ des fiches de descriptions de cuttings sans colonne

8) L'épaisseur des formations lithologiques et géologiques.

❖ Cartes géologiques :

Trois cartes géologiques au 1 / 200 000 établies par Gigout (1951) ont été utilisées, à savoir la carte de Casablanca, la carte de la Meseta entre Mechra Benabou et Safi et la carte de la Meseta entre Settat et Mazagan. (Gigout ; 1951)

❖ Coupes géologiques 2D :

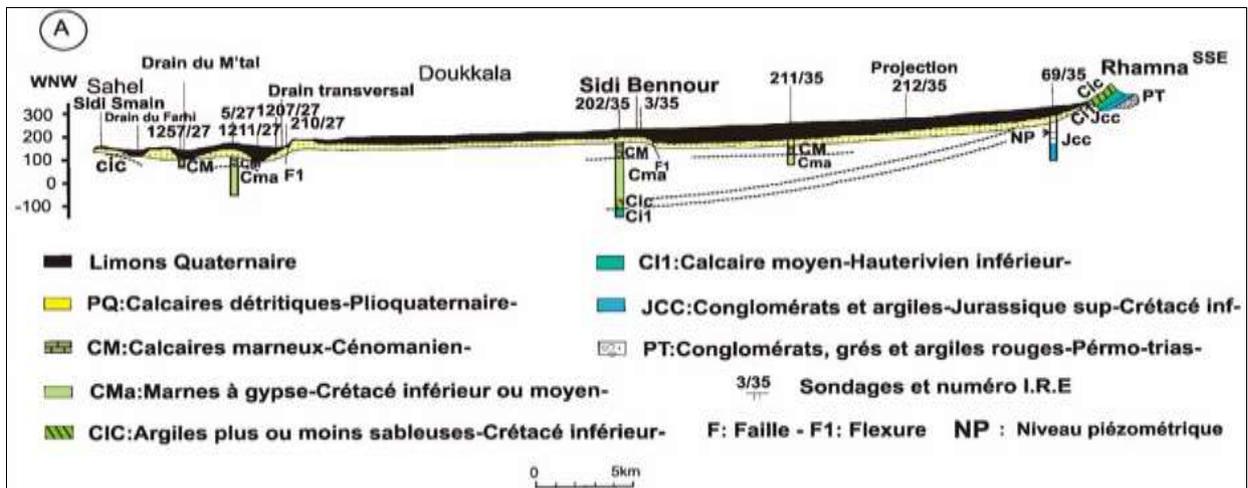


Figure 10: Coupe géologique à travers la plaine des Doukkala (Ferré et Ruhard, 1975).

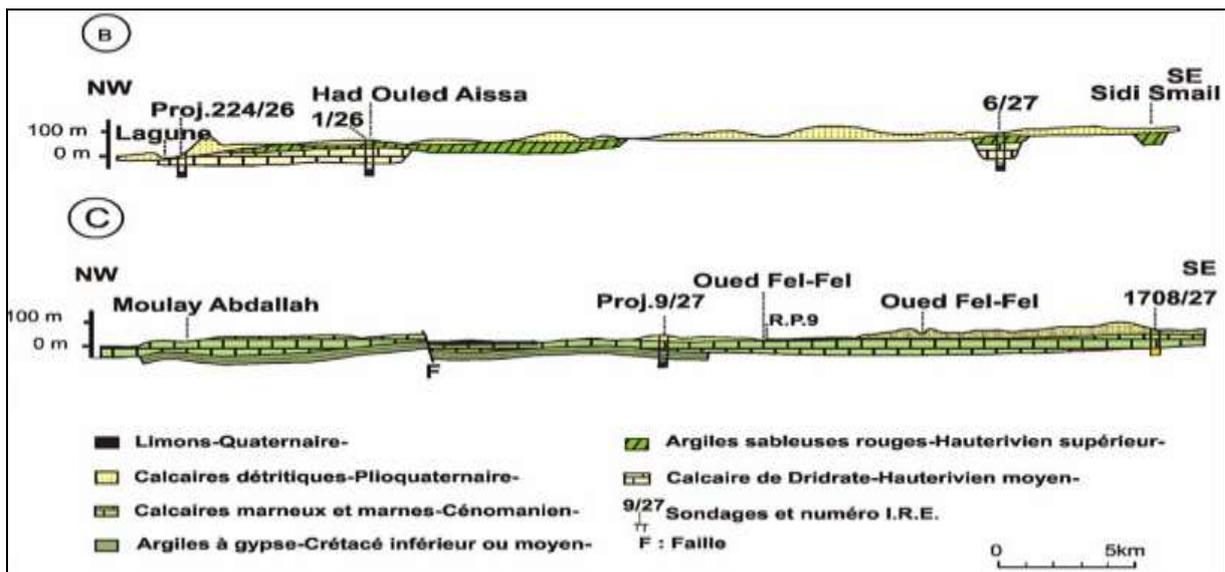


Figure 11: Coupes géologiques à travers le Sahel (Ferré et Ruhard, 1975).

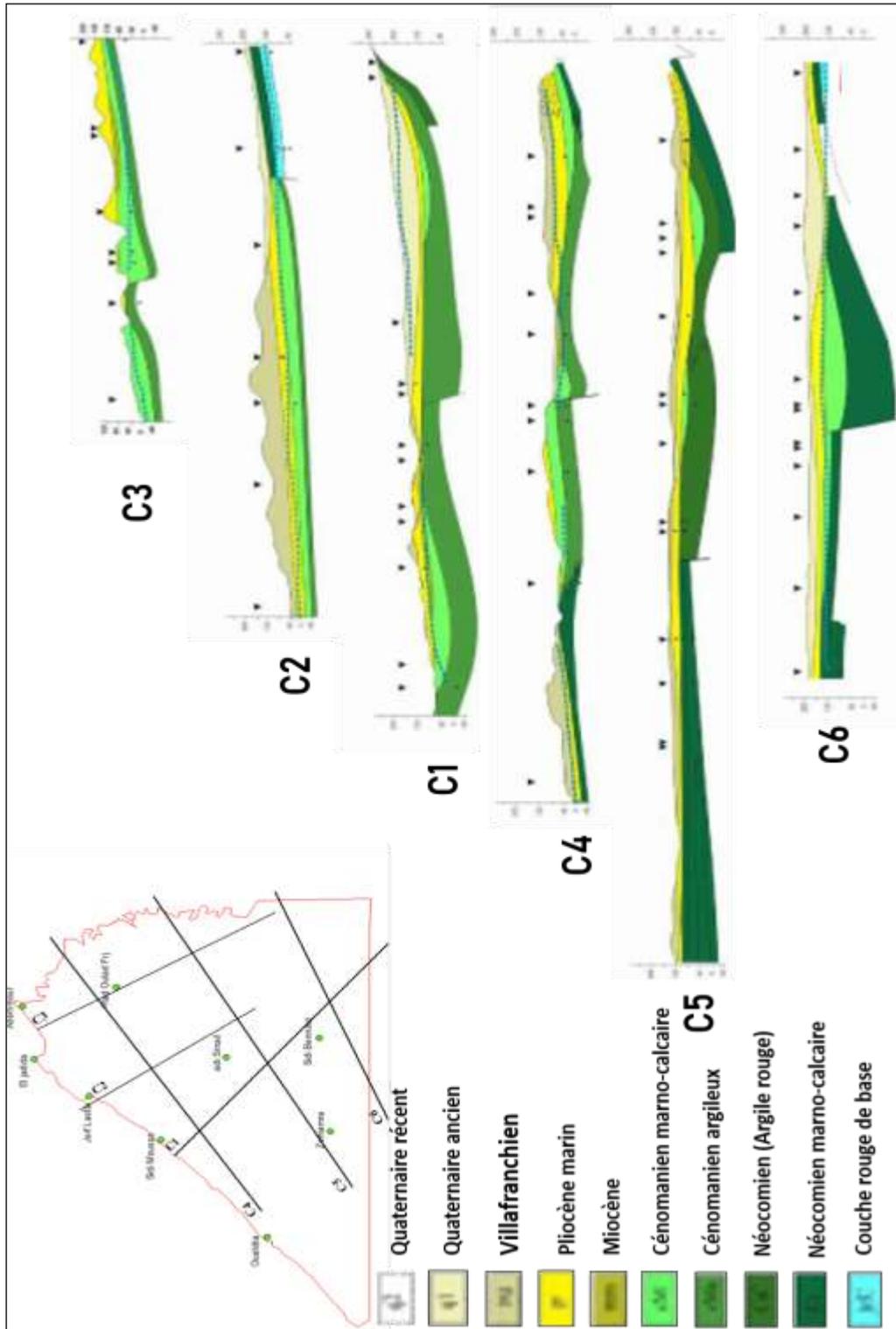


Figure 12: Coupes géologiques interprétatives de la structure de sub-surface de la région des doukkala (Souhel et al., 2005).

MNT :

Un modèle numérique de terrain (MNT) correspond à une représentation sous forme numérique (en 2,5D) de la surface topographique d'une zone géographique, créée à partir des données d'altitude du terrain. Le MNT, contrairement au MNE (modèle numérique d'élévation), ne prend pas en compte les objets présents à la surface du terrain tels que les plantes et les bâtiments. (CRAIG, 2008).

La construction du MNT peut se faire de plusieurs manières :

- ❖ par interférométrie radar,
- ❖ par système laser aéroporté (LIDAR).
- ❖ par stéréoscopie à partir de couples d'images aériennes (photogrammétrie) ou prises par satellite,
- ❖ par numérisation des courbes de niveau d'une carte,
- ❖ par saisie directe des coordonnées (x, y, z) des points du terrain, mesurées par triangulation (géomètres) ou lasergrammétrie (technique permettant de capturer les coordonnées d'un point en x, y, z au moyen d'un laser),

il existe plusieurs façons pour représenter le MNT mathématiquement et/ou graphiquement. Néanmoins, TIN (réseau triangulaire irrégulier) et raster (régulier), restent les représentations graphiques les plus utilisées (Li et al., 2005; Olaya, 2009; Rana, 2004; Weibel and Heller, 1991).

La qualité d'un MNT dépend directement de l'intervalle du maillage et de la source des données à partir desquelles il est généré.

plusieurs types du MNT sont disponibles gratuitement à l'échelle mondiale

GTOPO30 : modèle numérique d'élévation construit sur une grille de 30 secondes d'arc (approximativement 1 km). Publié en 1996, ce modèle a été construit sur 3 ans à partir de données vecteurs et rasters, issues de différents services américains (Digital Chart of the World, USGS Digital Elevation Models, Army Map Service Maps, International Map of the World). Il couvre l'ensemble de la surface terrestre. Il a été supplanté par le SRTM3 qui a une meilleure précision.

SRTM3 : modèle numérique d'élévation fourni par la NASA et la NIMA. Issu de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), ce modèle d'élévation a été produit en 11 jours par la navette Endeavour

en février 2000. Il est construit sur trois grilles différentes : une de 30 secondes d'arc (SRTM30), une autre de 3 secondes d'arc (SRTM3) et enfin la dernière d'1 seconde (SRTM1 seulement pour les Etats-Unis). Le SRTM3 possède une précision de 90m au sol, mais il n'a pas une extension complète en latitude (zone comprise approximativement entre 60° Nord et 56°Sud) et en altitude (zones de fortes pentes non fiables)

SRTM30 Plus : en 2008, le SRTM30 a été enrichi avec les données GTOPO30 et avec des données bathymétriques à partir d'une grille d'une minute d'arc entre 81° Nord et Sud, de manière à restituer la profondeur des océans.

ASTER GDEM : nouveau modèle numérique d'élévation produit en 2009 par les Etats-Unis et le Japon à partir du satellite ASTER. Ce MNT couvre l'ensemble de la surface de la Terre et possède une meilleure résolution (précision 30m au sol) que le SRTM3.

il est généré en utilisant les bandes 3N (nadir) et 3B (backward) acquises par le sous-système VNIR de l'archive ASTER avec le niveau 1A depuis l'an 2000 jusqu'au mois d'août 2008, en compilant plus de 1.5 million scène (Fujisada et al., 1998; Tachikawa et al., 2011a). La méthodologie développée par le laboratoire SILC (Sensor Laboratory Corporation) du Japon dans la production d'ASTER-GDEM comprend la stéréo-corrélation pour produire 1264118 de scènes individuelles des DEMs couvrant la zone entre les latitudes 83°N et 83°S. ASTER-GDEM est donné en format GeoTIFF avec des coordonnées géographiques et une résolution spatiale de 1 arc-sec (environ 30 m à l'équateur). La précision verticale est estimée à 20 m (Tachikawa et al., 2011b).

Une deuxième version d'ASTER-GDEM (ASTER-GDEM V2) a été libérée par la NASA et le METI en octobre 2011, où la quantité de pixels défectueux a été réduit de 4,5% à 7,5% et la quantité de bonnes tuiles a été augmenté de 10,7% à 54,3% par rapport au GDEM V1, à l'exception de l'Antarctique (Urai et al., 2012). En plus, 260000 scènes supplémentaires observées après septembre 2008 (jusqu'en août, 2010) ont été incorporées, ce qui a amélioré les vides et les artefacts causés par le manque d'observation d'ASTER.

C'est ce dernier type model numérique du terrain ASTER-GDEM qui sera utilisé dans cette étude.

II.2 Outils de traitement.

Le modèle géologique 3D a été réalisé au sein du laboratoire de la géologie à l'université Technique de Berlin. Il a été construit par le logiciel Petrel pour les données de subsurface alors que les données topographiques de surface ont été traitées par le logiciel ArcGIS.

Petrel :

La plate-forme Petrel est un logiciel qui prend de plus en plus de marché en modélisation géologique. Ce logiciel a été tout spécialement conçu pour la modélisation 3D d'environnements géologiques (réservoirs de pétrole ou de gaz, gisements de métaux, nappe d'eau souterraine) composées de surfaces et d'éléments géologiques complexes (fractures, strates plissées, failles, veines de quartz, aquifère, etc.).

Le logiciel Petrel fournit une solution complète de l'exploration à la production, l'intégration de la géologie, de la géophysique, la modélisation géologique, les forages, la géo-mécanique et la simulation de réservoir. Il intègre plusieurs types d'algorithmes spécifiques à la création et l'édition des surfaces à partir de différents types de données. [Petrel Tips & Tricks, \(2011\)](#).

ArcGIS 9.3 :

ArcGIS est une plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG). Il nous permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques principalement l'affichage la manipulation du modèle numérique de terrain, les cartes topographique et géologique et l'élaboration des cartes dérivées.

II.3 Conception du modèle géologique 3D :

II.3.a Préparation des données :

La méthodologie de travail suivie ([Fig.13](#)) consiste à la création du modèle géologique 3D à partir des données de sondage, la carte géologique et les coupes géologiques.

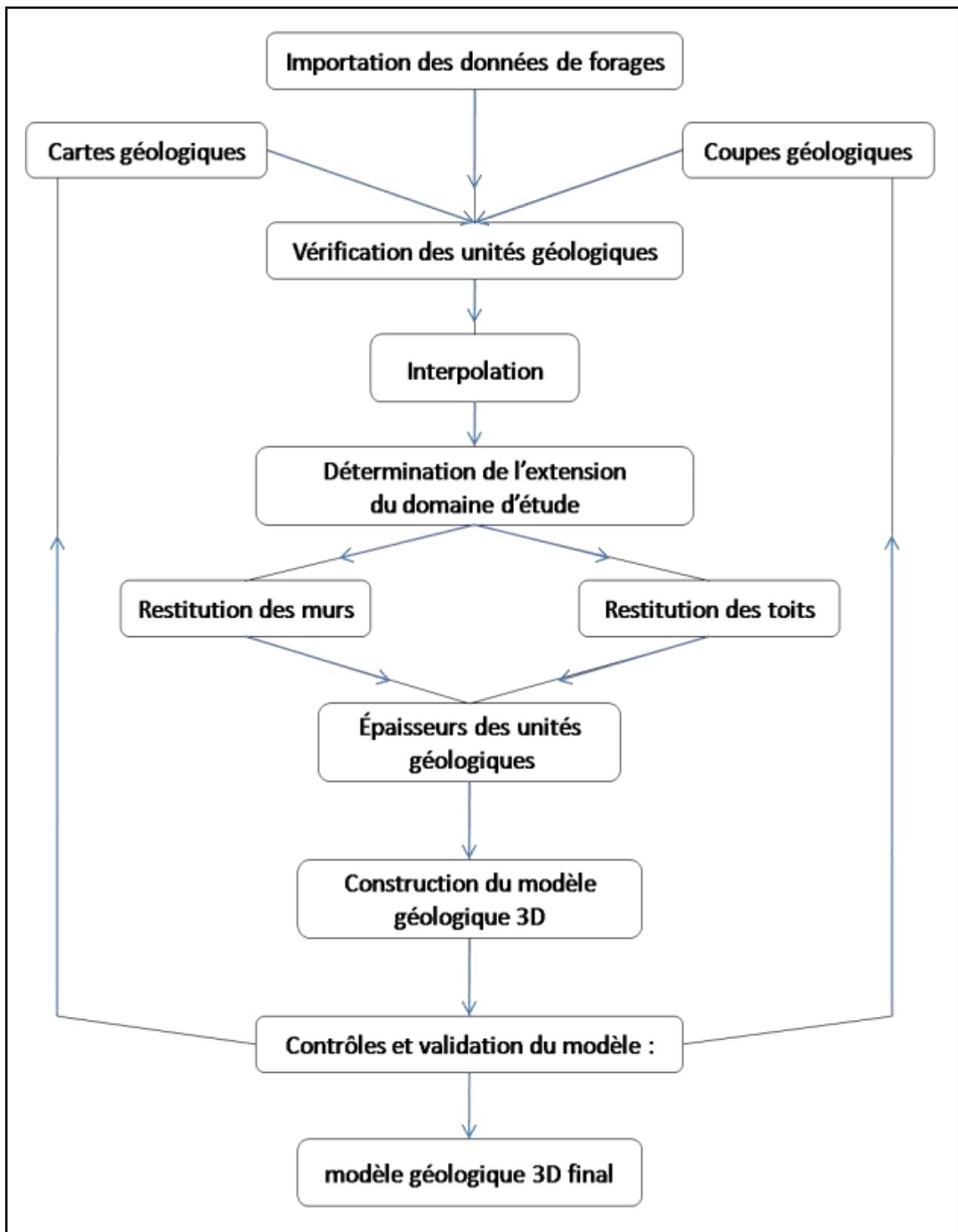


Figure 13: Organigramme de la méthodologie adoptée pour la création du modèle géologique 3D.

Deux surfaces limites fiables sont d'abord construites : la surface topographique à l'aide du MNT et le socle représenté par le mur du Crétacé.

La base de données SaDIN contient plus que 400 sondages, mais seulement 133 forages contiennent toutes les informations nécessaires (X, Y, Z, les âges des formations, les faciès, les épaisseurs...) tel que le montre l'exemple suivant.

Tableau 5 : exemple de des données de forages

N°	X	Y	Z	
2911/27	219	248,25	142	
Âge	Lithologie	Toit	Mur	Epaisseur
Q	Couverture quaternaire limono-argileuse	0	4	4
	Argiles de teinte rougeâtre	4	6	2
Pq	Grès jaunâtre très friable à joints marneux	6	24	18
CM	Marnes de teinte jaunâtres à passages calcaires	24	30	6
	Intercalations d'argiles de teinte grises	30	32	2
	Calcaires à intercalations d'argiles	32	46	14
	Calcaire de teinte grise	46	49	3
	Marnes de teinte grises	49	51	2
	Calcaire et Marnes de teinte grises	51	54	3
Cma	Calcaire de teintes beiges	54	62	8
	Marnes grises	62	68	6
	Calcaires de teinte grise légèrement marneuse	68	80	12
	Calcaire à dominance gypsifères	80	90	10

Après vérification minutieuse des sondages de la base de données SaDIN on a remarqué que 59 forages contiennent la plupart des informations (X ; Y ; âge ; lithologie) mais ne contiennent pas l'altitude Z, et 37 ne contiennent pas la géologie de surface.

Pour exploiter au maximum la base de données SaDIN et augmenter le nombre des échantillons, nous avons cherché les sondages non utilisés à cause du manque de certaines données telles que l'altitude et la géologie de la surface, et nous avons essayé de les compléter en suivant les étapes :

- Pour les sondages qui ne contiennent pas les altitudes (z) :

Les altitudes ont été corrigées en extrayant les valeurs du MNT correspondant aux positions géographiques des forages, pour cela on a opéré ainsi :

- Générer une couche ("shapfile" type point) de ces 59 forages;
 - Superposer cette couche sur le MNT;
 - Relever automatiquement les altitudes de chacun de ces forages.
- Pour les sondages qui ne contiennent pas les données géologiques de surface, pour les utiliser nous avons procédé ainsi :
- Générer la mosaïque des trois cartes géologiques au 1/200000 qui recouvrent la région à savoir la carte de Casablanca, la carte de la Meseta entre Mechra Benabou et Safi et la carte de la Meseta entre Settat et Mazagan.
 - Draper, sur l'ensemble de ces trois cartes, les forages qui ne contiennent pas des informations géologiques à la surface.
 - Compléter les lacunes litho-stratigraphiques de ces forages à partir des formations géologiques des cartes géologiques.
- Pour augmenter encore les points on a alimenté le logiciel en données de surface extrapolée à partir de carte géologique de la région selon les étapes suivantes:
- Draper les cartes géologiques sur le MNT.
 - Créer une couche (points) des sondages dans les zones de faible densité et au niveau des limites des formations.
 - Associer à chaque sondage (points) ses coordonnées (d'après le MNT) et la formation géologique superficielle (d'après la carte géologique) sans définir la profondeur du mur de cette formation.
 - Exporter un tableau avec l'ensemble de ces données.

Tableau 6: Tableau récapitulatif des sondages utilisés.

Nombre total des sondages 400	Nombre de sondages utilisé 229 (57.25%)	Nombre de sondages complets (Base des données SaDIN) 133 (33.25%)
		Nombre de sondages auxquels on a corrigé l'altitude (Z) 59 (14.75%)
		Nombre des sondages auxquels on a corrigé la Géologie de surface 37 (9.25%)
	Nombre de sondages écartés 171 (42.75%)	

II.3.b Importation des données :

La construction des modèles géologiques 3D débute par l'importation des données et la définition de l'extension du domaine spatial du modèle.

La répartition des sondages (de la base des données SaDIN) n'est

certainement pas homogène comme on peut le constater sur les figures 9 et 14. Elle est plus dense au centre de la plaine qu'au niveau du Sahel. Cette densité s'explique par la présence de plusieurs agglomérations et la forte demande en eau des zones irriguées.

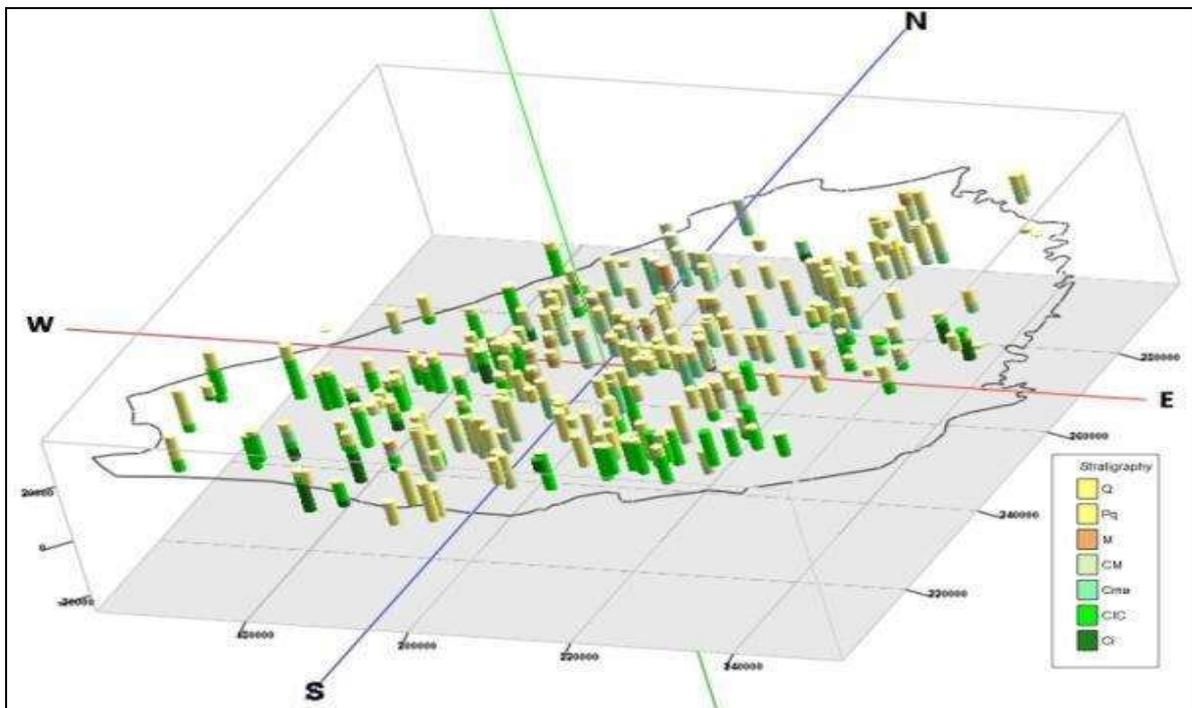


Figure 14: Présentation de l'ensemble des sondages issus de la base de données SaDIN

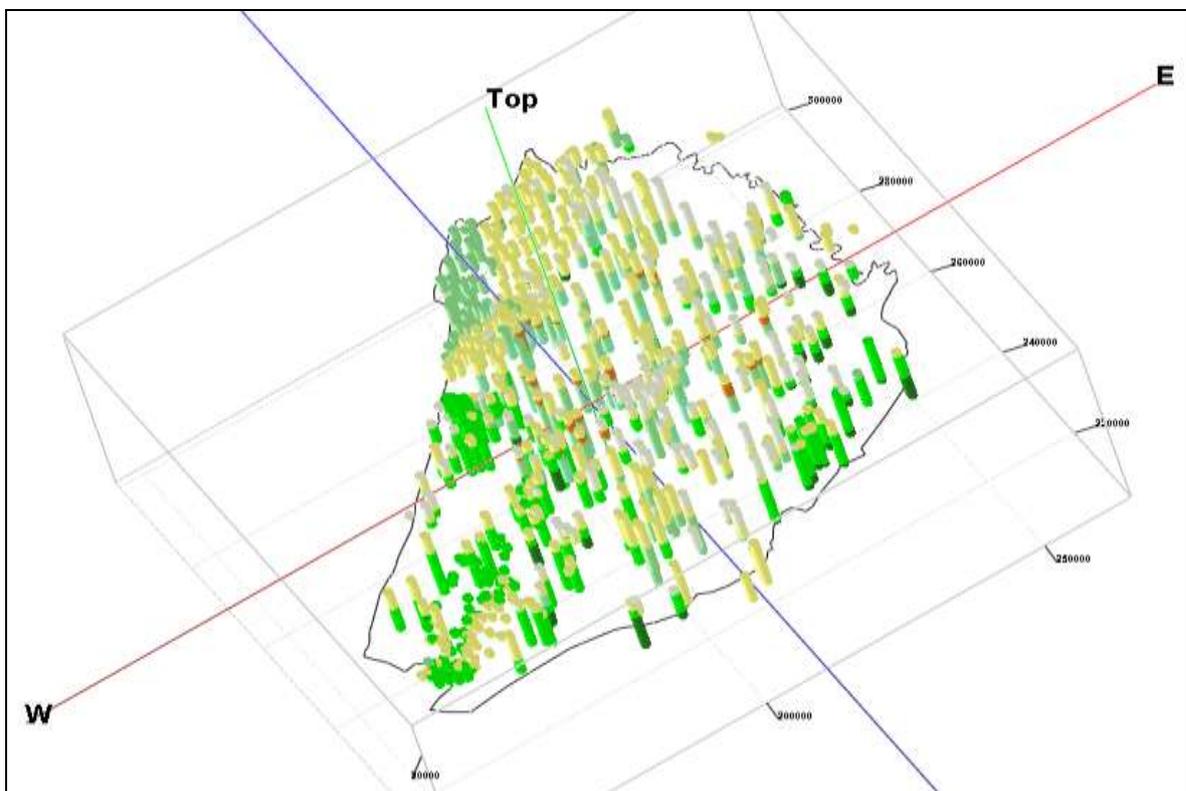


Figure 15: Présentation de l'ensemble des sondages utilisés pour la création du modèle géologique 3D

II.3.c Méthode d'interpolation

Pour créer des surfaces continues à partir des données de mesure discontinue on fait appel à des outils d'interpolation qui sont des algorithmes, il s'agit donc d'une estimation mathématique pour les endroits non échantillonnés.

Selon [Despaigne \(2006\)](#), il existe de nombreuses méthodes d'interpolation parmi lesquelles il faut faire un choix. Nous distinguerons :

Polygones de Thiessen : cette méthode consiste à partitionner l'espace géographique en polygones, puis à attribuer une valeur à chacun des polygones. Elle permet de déterminer un zonage où la valeur de la variable à prédire est a priori la même que celle du site d'observation.

Triangulation : consiste à diviser le champ en triangles disjoints, dont les sommets sont les sites échantillonnés, puis à interpoler à l'intérieur de chaque triangle.

Plus proches voisins : le plan sur lequel se situe le point à interpoler est découpé en octants. La méthode de calcul consiste en une interpolation sur les huit points de référence les plus proches du point à interpoler, répartis dans les octants. L'importance d'un point de référence est d'autant plus grande dans le résultat du calcul que sa distance au point à interpoler est faible.

Méthode de l'inverse des distances : la première étape est d'effectuer une recherche des sites qui vont intervenir dans l'estimation. On peut par exemple se fixer un rayon de recherche dont le centre est la localisation de la valeur à estimer. On ne retiendra que les sites appartenant au cercle. Dans un deuxième temps, on attribue à chaque site retenu un poids inversement proportionnel à la distance entre ce site et le point à estimer.

Les méthodes ci-dessus ont la caractéristique de traiter uniquement les données de la variable étudiée. Toutes définissent la valeur recherchée en un point comme une combinaison linéaire pondérée des mesures disponibles. Ce sont des méthodes implémentées dans la plupart des logiciels de Système d'Information Géographique (SIG). Ces techniques présentent néanmoins des défauts. Elles ignorent la structure spatiale de la variable et produisent du coup des surfaces interpolées très lisses.

Le Krigeage : est une technique géostatistique qui utilise une combinaison linéaire des données observées, mais à la différence des méthodes classiques d'interpolation, elle tient compte à la fois de l'information relative à leur position et du caractère aléatoire du phénomène étudié. De plus, elle permet d'intégrer des informations

auxiliaires dans l'estimation. Ses avantages font considérablement améliorer les estimations dans le contexte spatial. Il existe trois types de krigeage : le krigeage simple, le krigeage ordinaire et le krigeage universel. Le krigeage ordinaire est le plus fréquemment utilisé en pratique car les hypothèses de départ sont moins contraignantes que celles du krigeage simple et universel.

Dans notre approche, nous avons choisis cette dernière méthode d'interpolation (le krigeage ordinaire) car elle répond aux besoins de notre problématique (création d'un modèle géologique 3D à partir des données de forages) et elle est relativement simple et adéquate à nos types de données.

La modélisation géométrique repose sur l'analyse d'un ensemble de triplets (x,y,z) dont (x,y) sont les coordonnées des forages et z la profondeur des surfaces des unités géologiques. L'objectif est donc de restituer des surfaces $z(x,y)$ pour chaque formation géologique (toit et mur) à partir de l'interpolation des données de forages installés dans notre zone d'étude, l'ensemble de ces surfaces constituera le modèle géologique 3D. La démarche générale peut être découpée en plusieurs étapes. (Fig. 13).

Le véritable but de la modélisation 3D est d'obtenir une cohérence géologique entre les données d'entrée. Il est rare d'obtenir du premier coup une corrélation parfaite entre les données d'entrée (forages et données de surface et coupes géologiques). Les erreurs peuvent venir de chaque type de données. Par exemple, un forage peut avoir des mauvaises coordonnées ou/et des profondeurs imprécises. Quant aux coupes géologiques, l'erreur peut venir d'une mauvaise interprétation.

Le logiciel signale immédiatement l'incohérence, c'est ensuite à l'utilisateur de retrouver les données à l'origine de cette incohérence afin de les supprimer ou de les rectifier. L'objectif est d'atteindre une meilleure cohérence sur l'ensemble du modèle, c'est-à-dire entre les données d'entrée (point de départ) et les interprétations géologiques. L'interprétation personnelle de l'utilisateur joue un rôle fondamental dans la construction du modèle surtout dans les zones à faible densité des données. En revanche, le logiciel donne des pistes de réflexion, grâce à l'utilisation de la vision en 3 dimensions.

III. Résultats:

Le modèle 3D terminé, on peut le visualiser dans son ensemble en bloc (fig.16), ou bien avec des coupes croisées (Fence) (fig.17) ou bien encore chacune des formations en 3D à part.

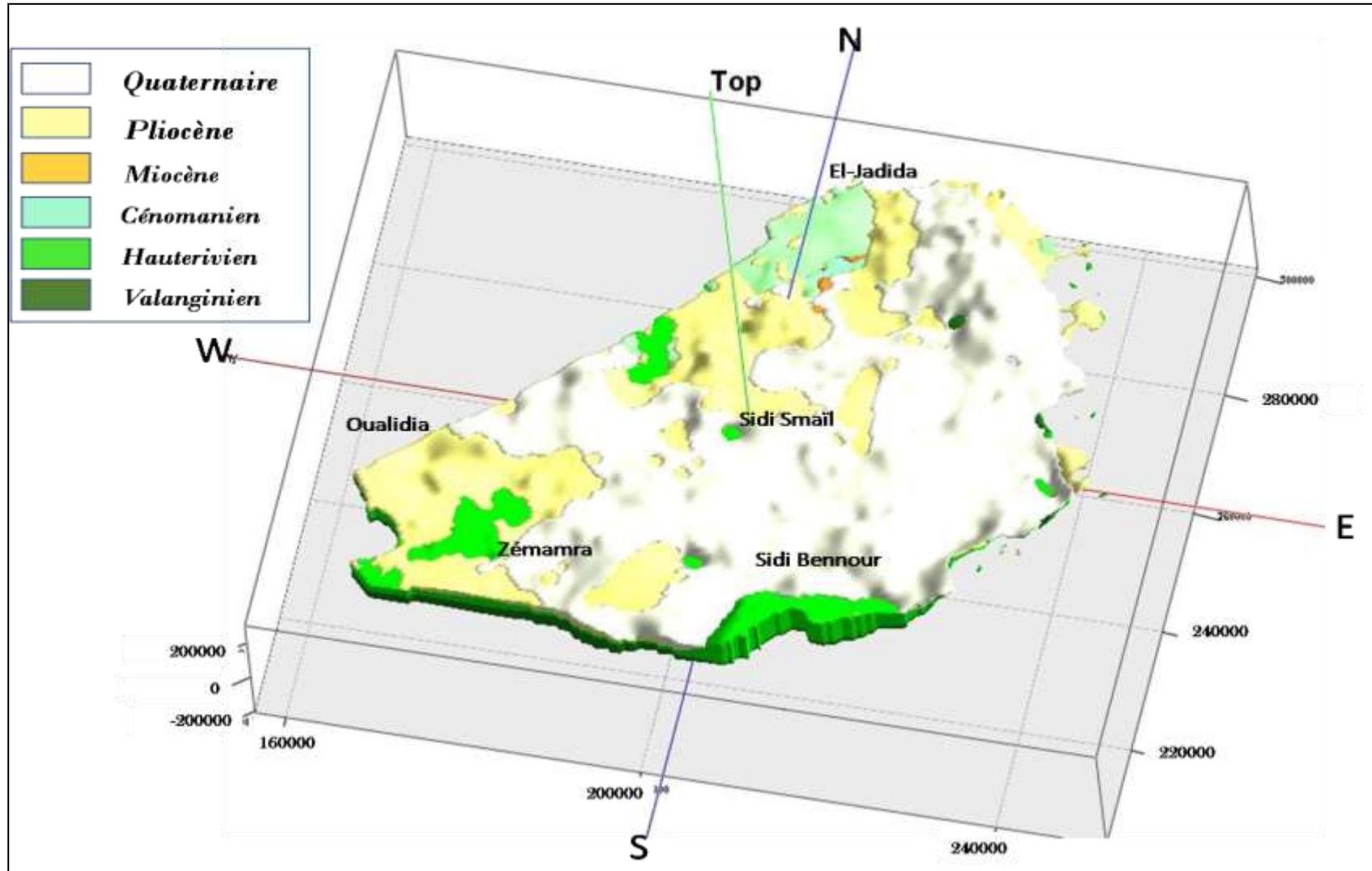


Figure 16 : Modèle géologique 3D de la région des Doukkala (vue sud-est)

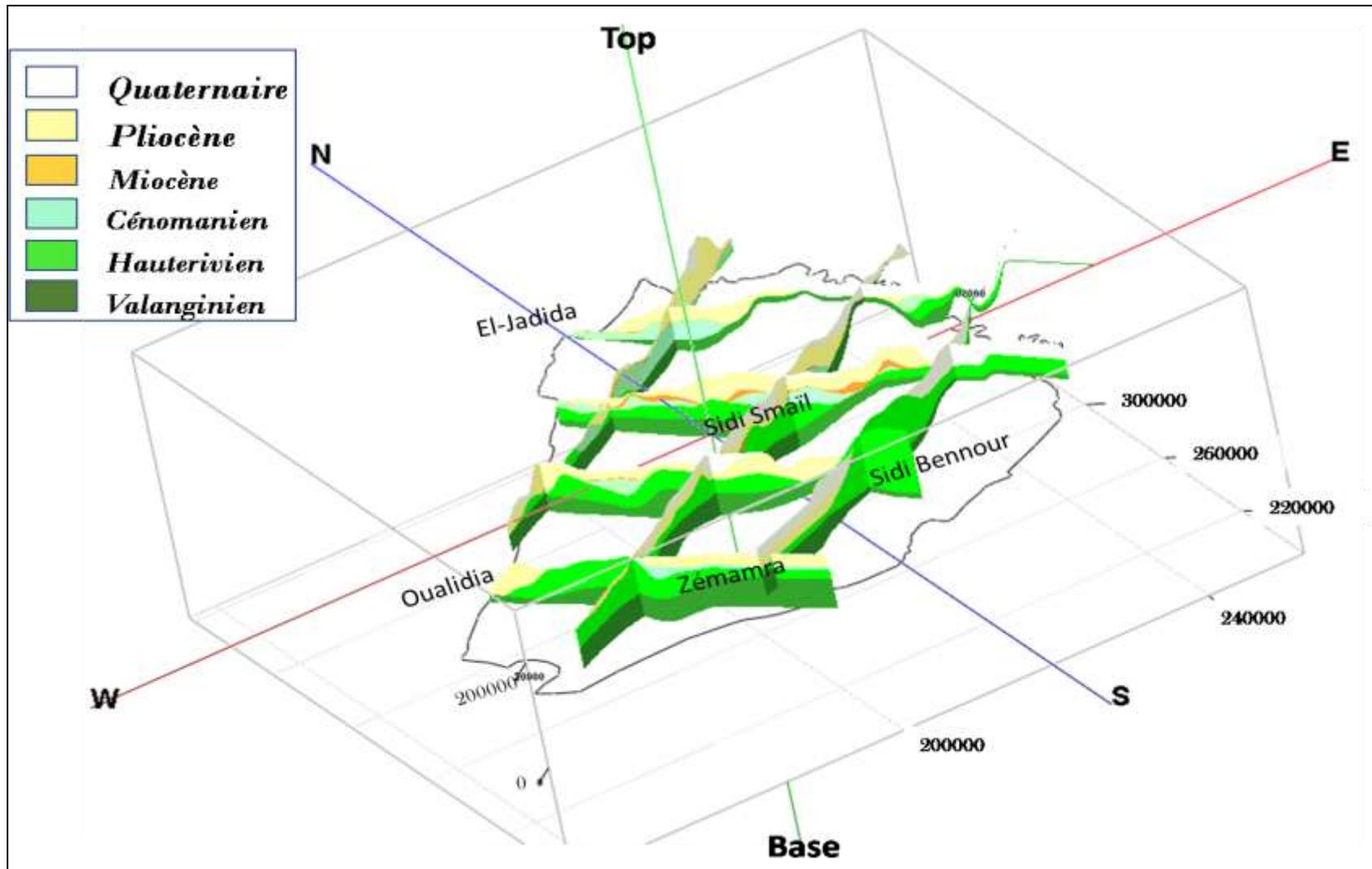


Figure 17: Représentation des coupes croisées (Fence) de la région des Doukkala (vue ouest-sud)

Le modèle a été réalisé pour l'ensemble des unités litho-stratigraphiques formant la couverture de cette région; principalement le Crétacé inférieur Hauterivien « Ci », Crétacé inférieur Valanginien "CIC", Cénomaniens "Cm", Miocène "M": Plio-quadernaire "Pq" et Quadernaire "Q".

Pour chacune de ces unités litho-stratigraphiques, on a pu visualiser dans chaque point de la région l'altitude, l'épaisseur, le mur et le toit.

III.1 Crétacé inférieur "CI" Valanginien:

III.1.a Données géologiques

Le Crétacé inférieur montre de nombreuses variations d'épaisseur et de faciès. Il comporte deux formations successives qui sont de bas en haut :

- Formation des calcaires inférieurs : C'est une formation carbonatée qui se caractérise par des calcaires jaunes, roses et blancs, souvent marneux (à intercalations de lits d'argiles, avec des traces de coquilles néritiques). Ces dépôts ont été attribués au Valanginien par [Gigout \(1951\)](#), au Valanginien inférieur par [Witam \(1988\)](#) et placés précisément par [Ettachfani et al., \(1998\)](#) dans le Berriasien terminal-Valanginien basal.
- Formation des "Argiles Grises": Elle correspond aux "marnes et argiles vertes" décrites par [Roch \(1930\)](#) ; et nommée par [Gigout \(1951\)](#), sous le nom « formation d'argiles grises ». Elle est composée d'un paquet de marnes grises. L'âge de ces dépôts a été attribué par [Gigout \(1951\)](#) au Valanginien inférieur ou moyen sur la base d'une faune d'Ammonites dans la région de Youssoufia et au Valanginien supérieur à Hauterivien inférieur par [Witam \(1988\)](#), par corrélation latérale avec la formation des argiles brunes de Safi, datée à sa base par une importante faune d'Ammonites.
- Formation détritique, composée d'alternance d'argile-gréseuse. Les argiles sont de couleur rouge, sont sableuses à grains de quartz bipyramidé et sont parfois gypseuses. Elle appartiennent à l'Hauterivien supérieur CIC, elles sont bariolées avec des passées verdâtres ou jaunâtres et présentent de nombreux niveaux sableux dans leur partie supérieure. Leur partie inférieure est composée d'argile rouge compacte et homogène ([Roch, 1930; Gigout, 1951 et Witam, 1988](#)).

III.1.b Modèle 3D

Sur l'ensemble des forages étudiés, cette unité a été rencontrée au niveau de 46 d'entre eux, ces derniers se répartissent sur l'ensemble de la zone étudiée. On peut admettre que le Crétacé inférieur recouvre

l'ensemble de la région des Doukkala, à l'exception des zones où des formations anciennes, affleurent (Pointement d'El-Jadida où affleurent les terrains paléozoïque).

Seuls quatre, des sondages qui arrivent à cette formation aboutissent à son mur, ce qui ne permet pas de faire une corrélation fiable de sa surface basale. Nous considérons donc le toit de cette unité géologique comme la limite basale de notre modèle.

La visualisation du toit du Crétacé inférieur (fig.18) et la génération des courbes de niveau de cette surface, nous ont permis de déterminer sa structure et de décrire ses différents éléments.

Au niveau du Sahel, on remarque une succession d'alignements des zones hautes et des zones basses NE- SO,

Un haut fond très peu marqué entre Oualidia et Sidi Moussa, qui devient plus distingué vers le Nord.

Un haut fond qui s'étend sur plus de 45 km, large de 2 à 3 km, de direction NE-SO qui s'infléchit près de Sidi Smaïl pour prendre une direction N-S vers El-Jadida et devient moins important.

Ces deux anomalies de subsurface sont séparées par une dépression dissymétrique, plus large en direction du NE.

Dans la plaine des Doukkala, on remarque une zone basse plus importante formée de deux parties de directions différentes ; SO-NE entre Zémamra et Had-Oulad-Frej puis N-S jusqu'au Sud d'Azemmour où il se termine par une large cuvette.

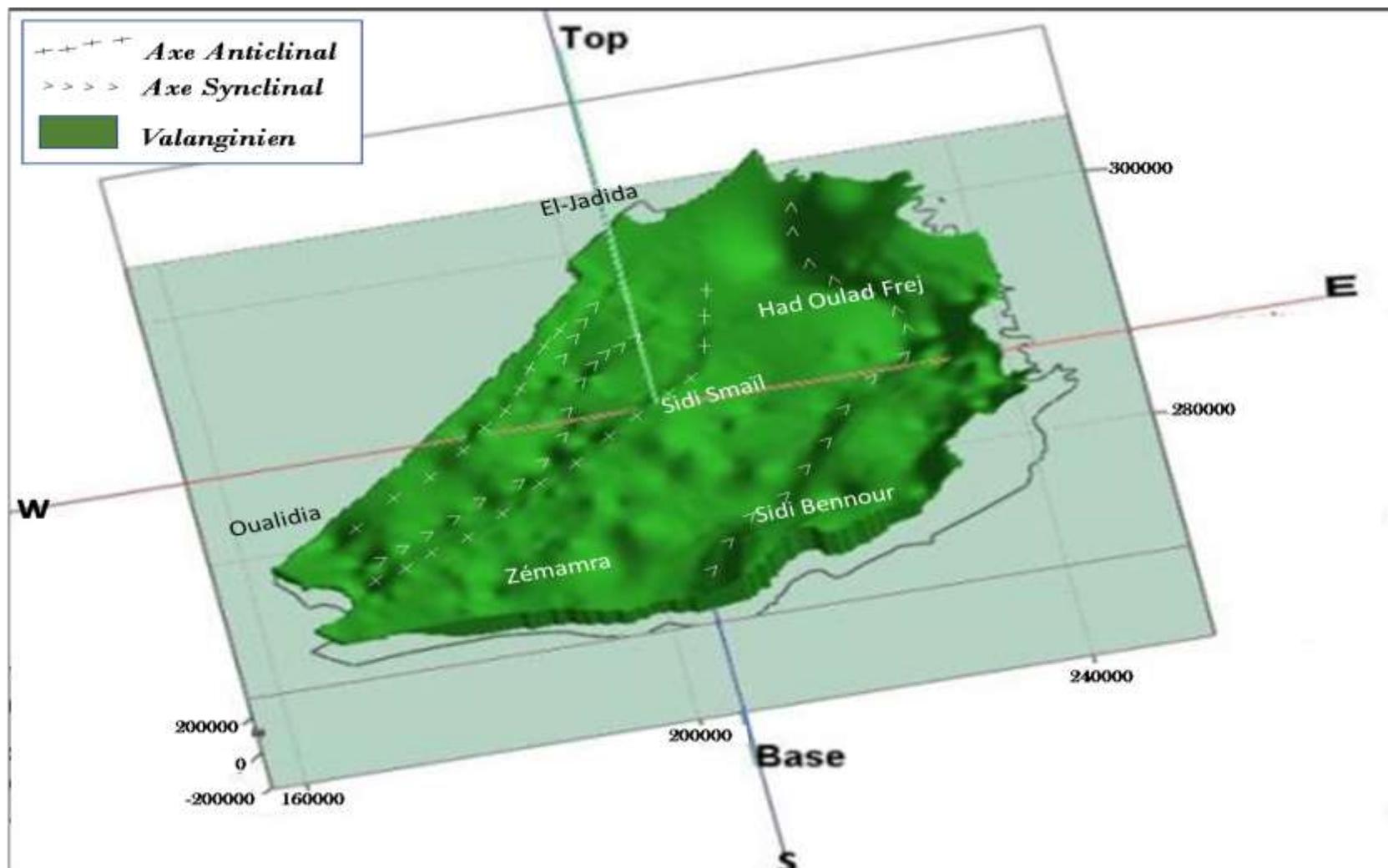


Figure 18: Géométrie du toit du Crétacé inférieur « Valanginien » au niveau de la région des Doukkala (Vue sud).

III.2 Crétacé inférieur "CI" Hauterivien:

Le modèle géologique de cette formation (fig.19 et 20) établie à partir des données de forages montre les grands traits suivants :

- L' Hauterivien n'est absent qu'au Nord de la ligne joignant Jorf-Lasfar à Sidi Smaïl à Had-Oulad-frej et dans les zones où les formations anciennes affleurent.
- Les épaisseurs sont plus importantes au niveau de la bordure des Rehamna.
- Un haut fond de direction N-S joignant Tnine-Gharbia a Oualidia.
- Un long anticlinal (ou haut fond) parallèle à la côte de direction NE-SO de Sidi Smaïl à Tnine-Gharbia, qui borde un plateau assez étendu vers l'Ouest et un large synclinal vers l'Est, il est manifesté par les affleurements à l'Est de Tnine-Gharbia, et au Sud-Ouest de Sidi Smaïl.
- Une flexure, en bordure de la mer, avec plongement vers l'océan.
- Une grande dépression s'observe dans la partie méridionale depuis Had-Oulad-Frej à Sidi- Bennour.

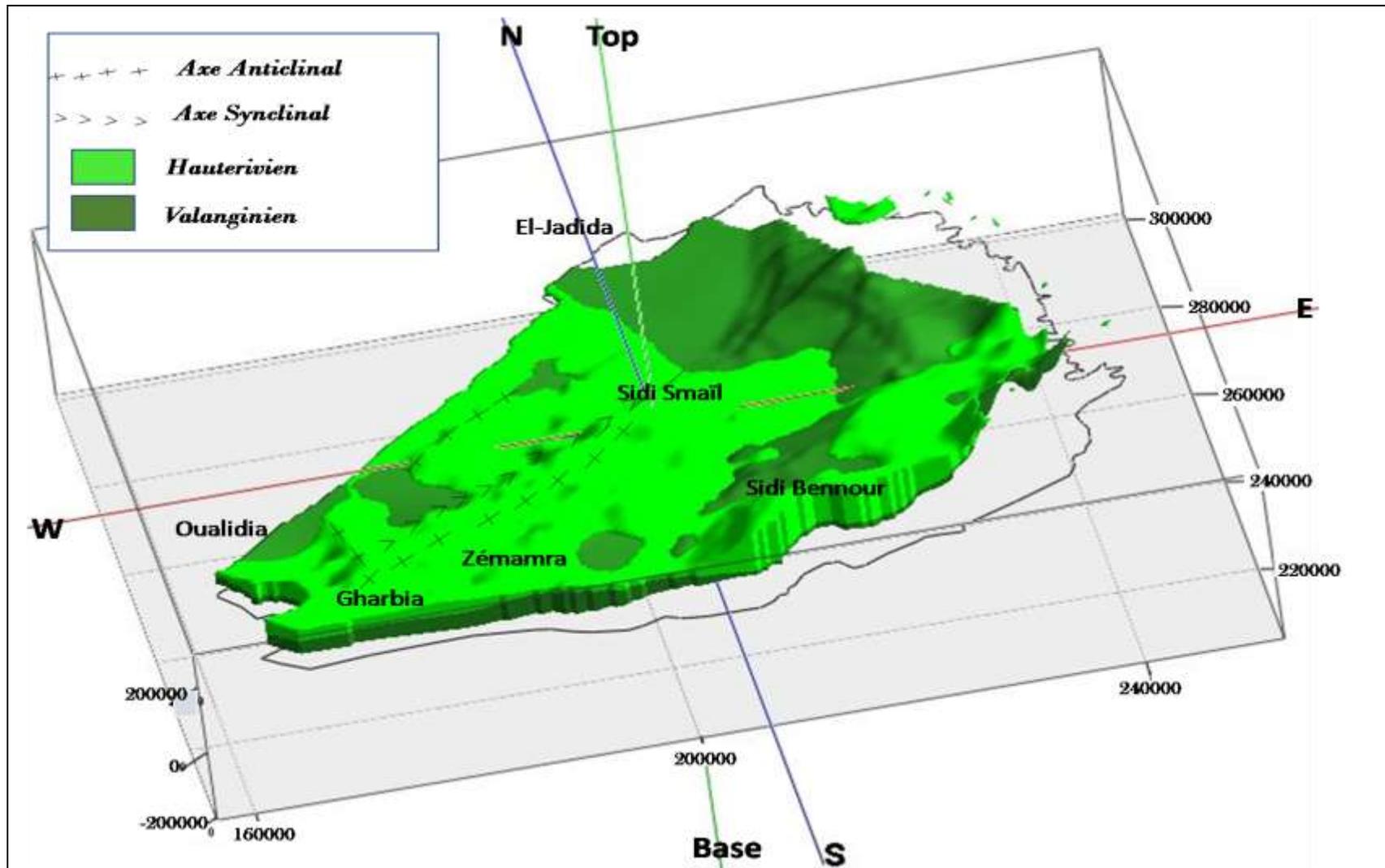


Figure 19: Géométrie du Cénomanien sur Crétacé inférieur au niveau de la région des Doukkala (Vue sud).

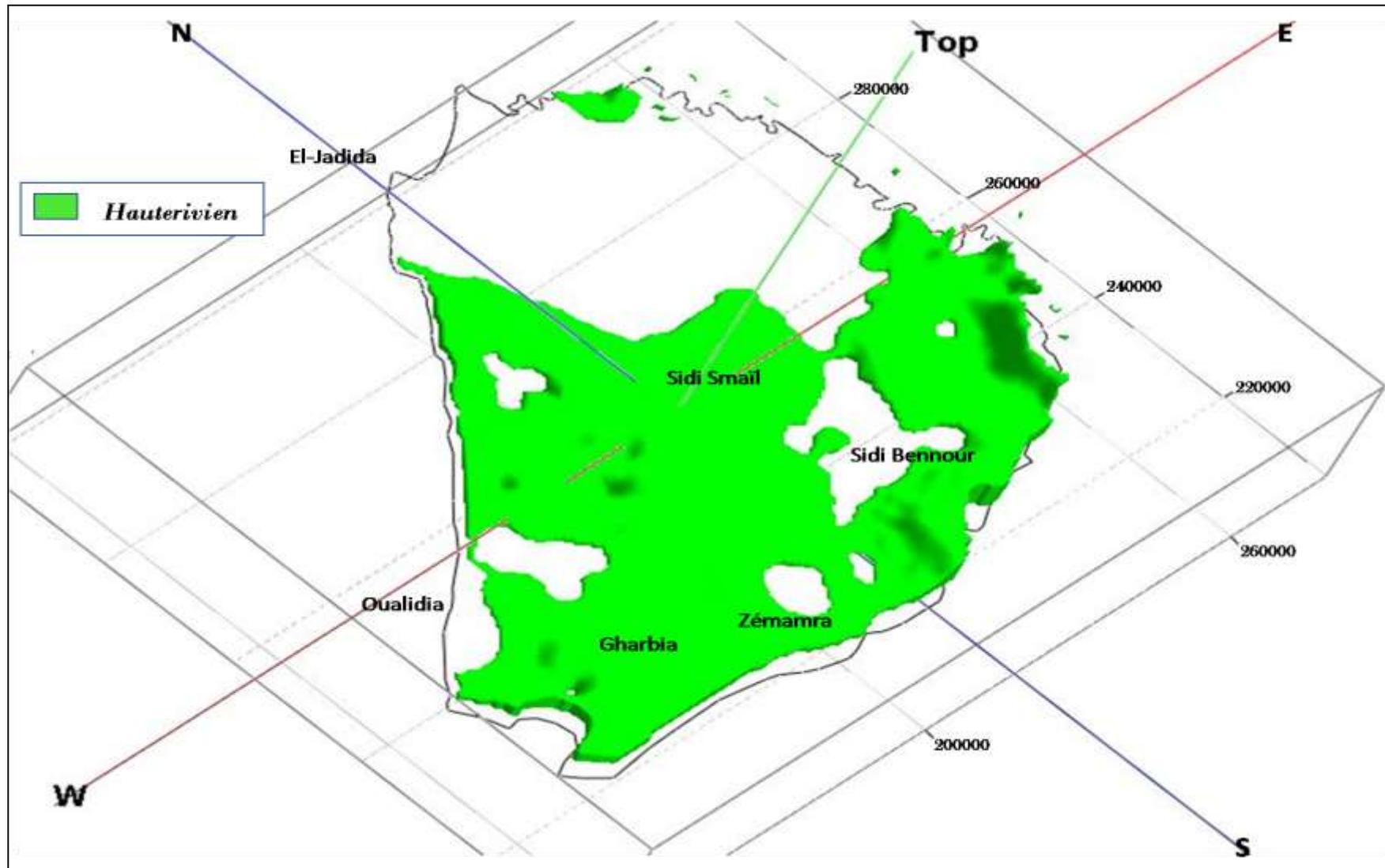


Figure 20: Représentation des coupes (Fence) de la région des Doukkala (Vue ouest-sud)

III.3 Cénomaniens "Cm":

III.3.a Données géologiques

Le Cénomaniens est reconnu sous des faciès de calcaires et de marno-calcaires de teintes jaunes et blanches, peu fossilifères. Il est nettement visible dans la bordure atlantique du territoire et dans quelques pointements en bordure de l'Oued Oum Rabia. Sa limite inférieure est soit la Formation des Argiles rouges supérieures ou les marnes à gypse.

Dans l'ensemble, les couches supérieures sont à prédominance de calcaires et de calcaires dolomitiques avec des intercalations de marnes à gypses.

L'âge cénomaniens de ces faciès, a été identifié par [Gigout \(1951\)](#), sur la base des coquilles de Brachiopodes, de Lamellibranches et de Gastéropodes.

III.3.b Modèle 3D

Sur l'ensemble des sondages étudiés, le Cénomaniens a été rencontré au niveau de 74 forages d'entre eux. La répartition des sondages de cette unité est assez importante au Nord de la ligne Sidi-Moussa/Sidi-Bennour. Il est peu représenté entre Sidi-Bennour et Zémamra et dans la basse vallée de l'Oum Rabia, et absente au Sud de Sidi-Moussa.

Le modèle géologique ([fig.21 et 22](#)) montre les limites supposées de cette formation, les variations des épaisseurs ainsi que ses variations latérales.

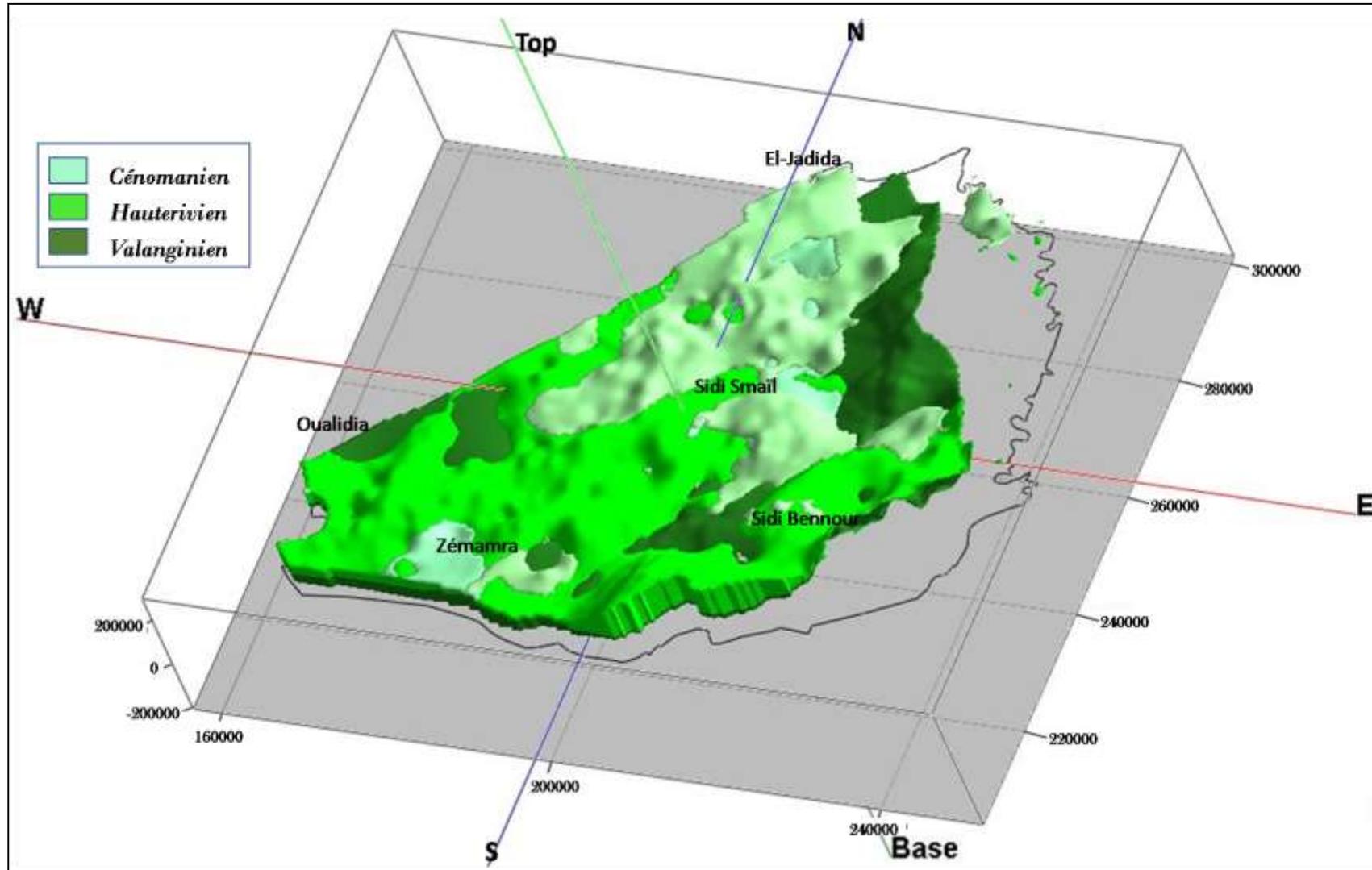


Figure 21: Géométrie du Cénomaniensien sur Crétacé inférieur au niveau de la région des Doukkala (Vue sud).

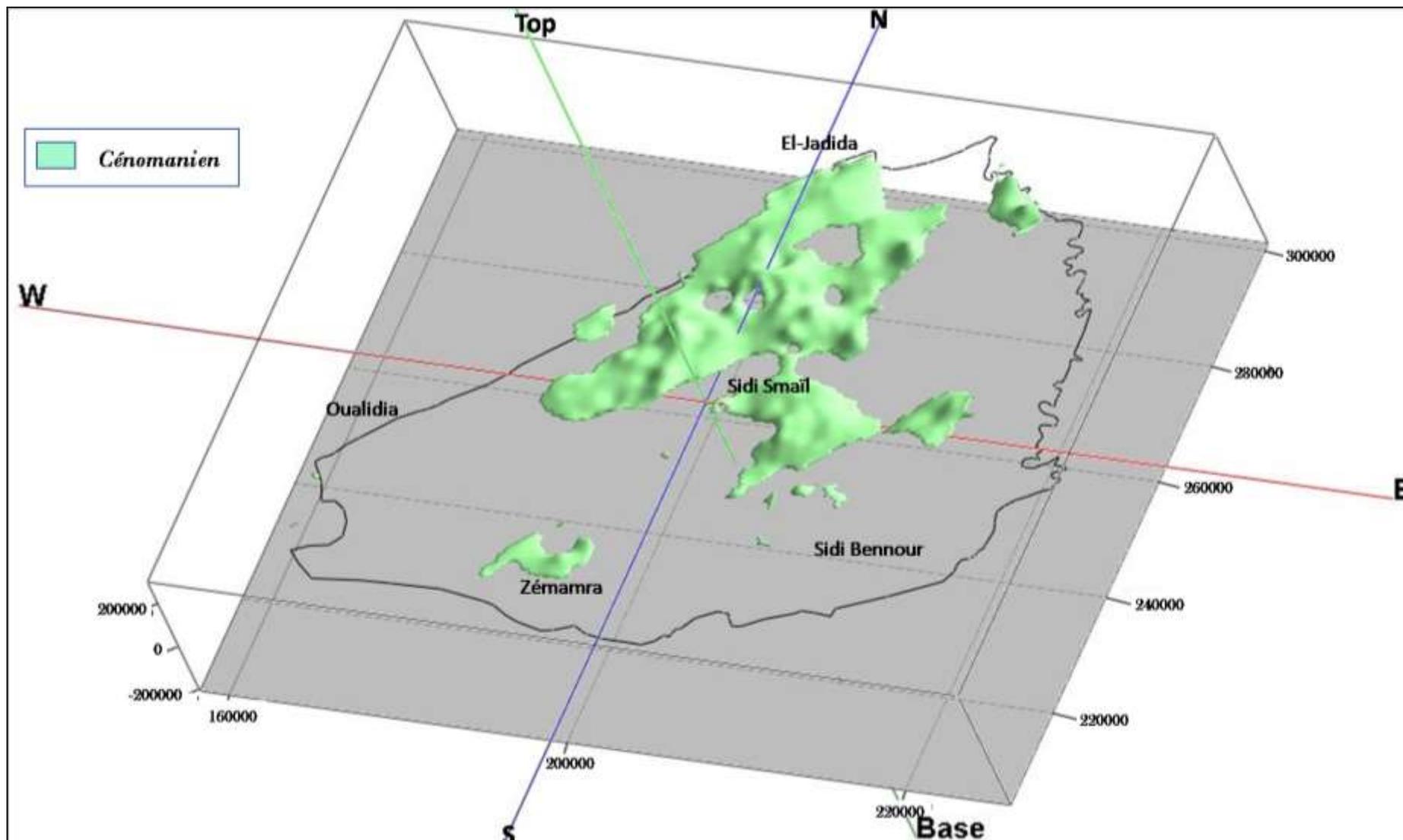


Figure 22: Géométrie du Cénomaniien au niveau de la région des Doukkala (Vue sud-ouest)

Le Cénomaniens affleure sur un vaste plateau au Sud et au Sud-Ouest d'El-Jadida, les épaisseurs de cette unité sont variables, à Sidi-Bouزيد et à Jorf-Lasfar et peut être estimée entre 25 à 50 m, à l'intérieur de la région près de Sidi Bennour elle est d'environ 60 m.

Des dépôts isolés se trouvent au Sud de la région et au niveau de la basse vallée de l'Oum-Rabia.

En général, les épaisseurs enregistrées sont plus importantes au Nord qu'au Sud de la région.

Les variations d'épaisseur peuvent être expliquées par une érosion intense dans l'ensemble de la région après le retrait de la mer cénomaniens [Ferre et Ruhard \(1975\)](#).

Les faciès les plus marins sont situés du côté NNW, cette formation s'est déposée au sein d'une plate-forme carbonatée ouverte dans cette même direction ([Khatmi, 1999](#)).

III.4 Miocène "M":

III.4.a Données géologiques

La série miocène est essentiellement marneuse. Les marnes sont vertes compactes à la base et deviennent rosâtres et sableuses vers le sommet, avec quelques intercalations de niveaux plus gréseux rougeâtres.

III.4.b Modèle 3D

Le Miocène se rencontre au niveau de 15 sondages ([fig. 23](#)), Ils sont localisés principalement au Sud de la ville d'El-Jadida. Les épaisseurs de cette unité varient entre 2 m (forage : 427/26) et 76 m (forage : 499/26). Il se trouve à des profondeurs qui arrivent à 112 m (forage : 2015/27).

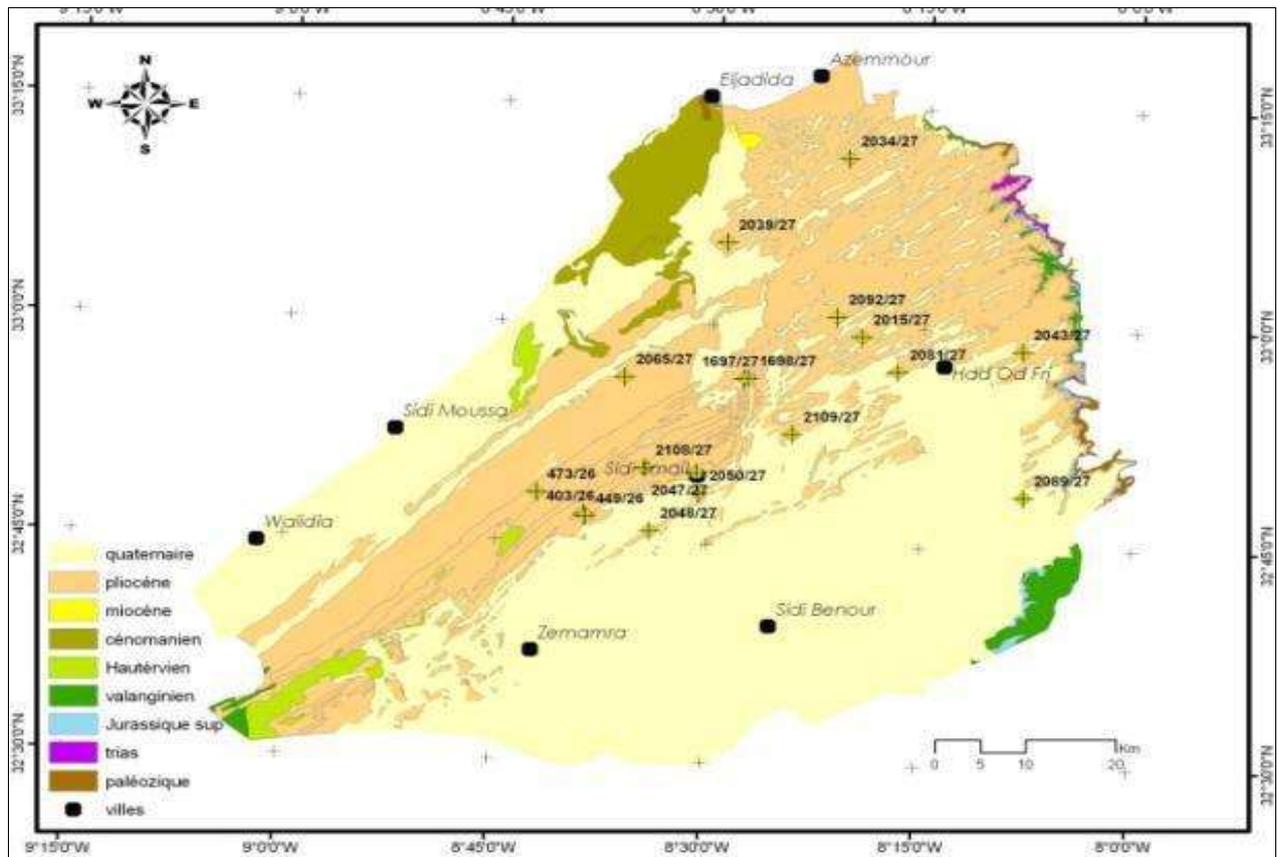


Figure 23: Répartition des forages qui contiennent le Miocène.

Le Miocène présente une répartition géographique très restreinte par rapport aux unités qui l'encadrent, il n'est rencontré qu'au centre des Doukkala entre El-Jadida, Sidi-Smaïl et Had-Oulad-Frej.

La géométrie du Miocène (fig.24 et 25) ne permet pas de décrire sa structure. Ses épaisseurs varient entre 2 et 76 m, il s'épaissit dans les zones où le Crétacé montre une réduction. Une comparaison du mur de Miocène et le toit du Crétacé montre qu'ils s'emboîtent parfaitement et que le Miocène n'est conservé que dans des cuvettes. On peut donc déduire que le Miocène a comblé des dépressions façonnées par un phénomène d'érosion dans la dalle crétacée.

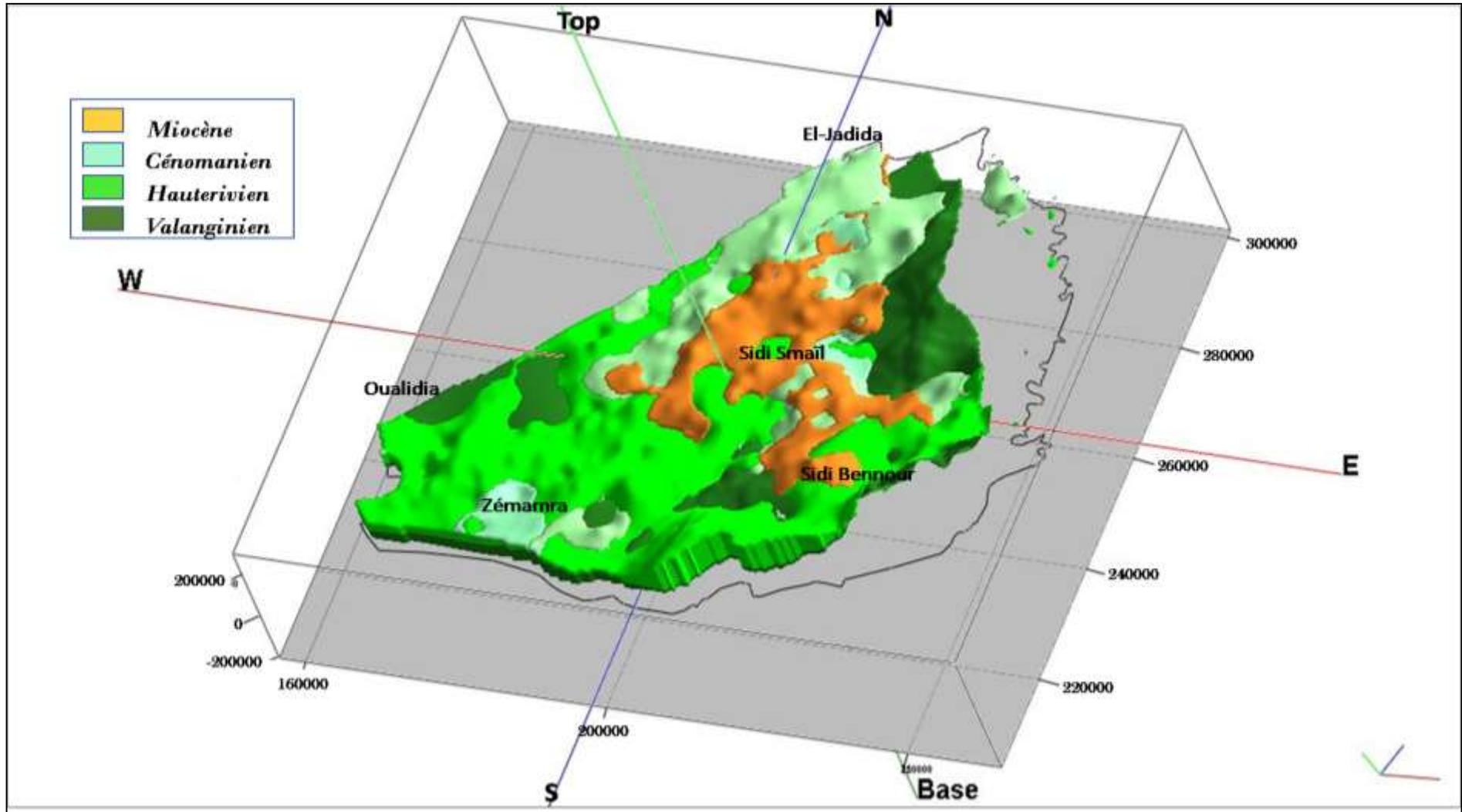


Figure 24: Géométrie du Miocène sur le Cénomanien et le Crétacé inférieur au niveau de la région des Doukkala (Vue sud-est).

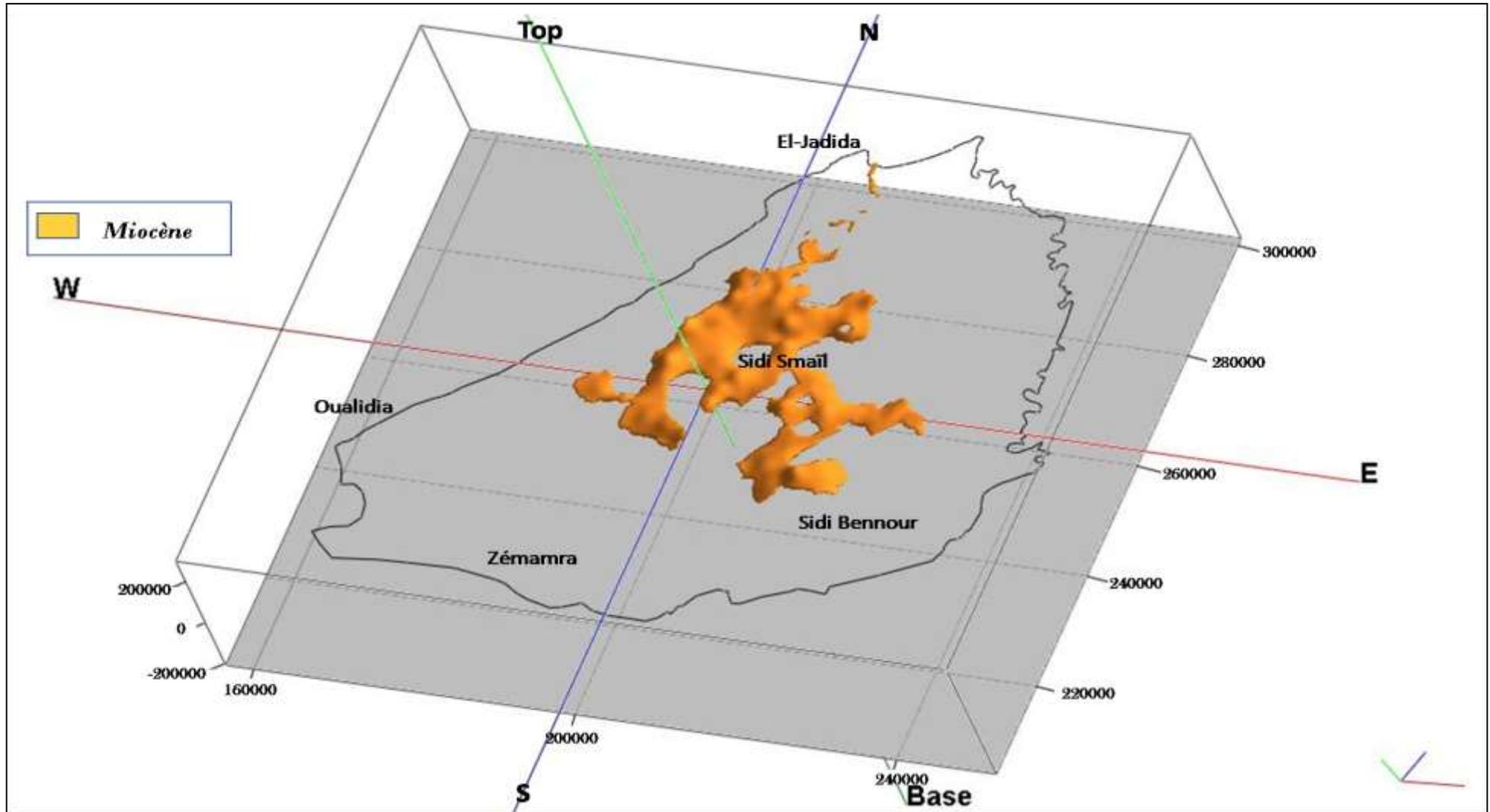


Figure 25: Géométrie du Miocène au niveau de la région des Doukkala (Vue sud-est).

III.5 Plio-quatenaire "Pq" :

III.5.a Données géologiques

➤ Pliocène

Après la transgression marine du Miocène qui n'a recouvert qu'une faible frange côtière marocaine, une nouvelle transgression plus importante est venue recouvrir tout le Sahel et la plaine des Doukkala; il s'agit de la transgression pliocène (Gigout 1951)

Les dunes côtières pliocènes sont caractérisées par l'uniformité de leur composition, elles sont formées de calcaire détritique jaune, contenant des débris de coquilles.

Dans les Doukkala, ces dépôts sont généralement couverts par la couverture "limoneuse" du Quaternaire, avec cependant des affleurements situés dans la vallée de l'Oued Oum Rabia, et au Sahel (parallèlement au rivage actuel, jusqu'à une distance maximale de 60 km de ce rivage) (Combe *et al.*, 1975).

La mer pliocène s'est avancée jusqu'au pied des Rehamna, des Mouissates et des Aounate. Lors de la régression se sont édifiées des dunes côtières qui constituent la partie est du Sahel; leurs crêtes émergent encore des "limons" au Nord d'une ligne Tnine-Rharbia-Khémis- M'Tal- Boulaouane. Le retrait de la mer est ensuite marqué par une alternance d'épisodes transgressifs et régressifs (Ferré et Ruhard, 1975).

Les faciès lithologiques décrits par Gigout (1951) sont les suivants (de bas en haut):

- conglomérats grossiers en masse, caractéristiques de l'ancien estuaire de l'Oued Oum Rabia près de Boulaouane. Les éléments sont de taille moyenne et de ciment calcaire peu abondant.
- des calcaires détritiques, lumachelliques, jaunes et très poreux: ils représentent le faciès normal, constitué de débris de coquilles liés par un ciment de calcite et d'hydroxydes de fer.
- des sables jaunes, grossiers.
- des calcaires recristallisés, très durs avec un ciment calcaire.
- des calcaires à grain fin azoïque : c'est le faciès dunaire, tendre et chargé en éléments argileux.
- des marnes sableuses.

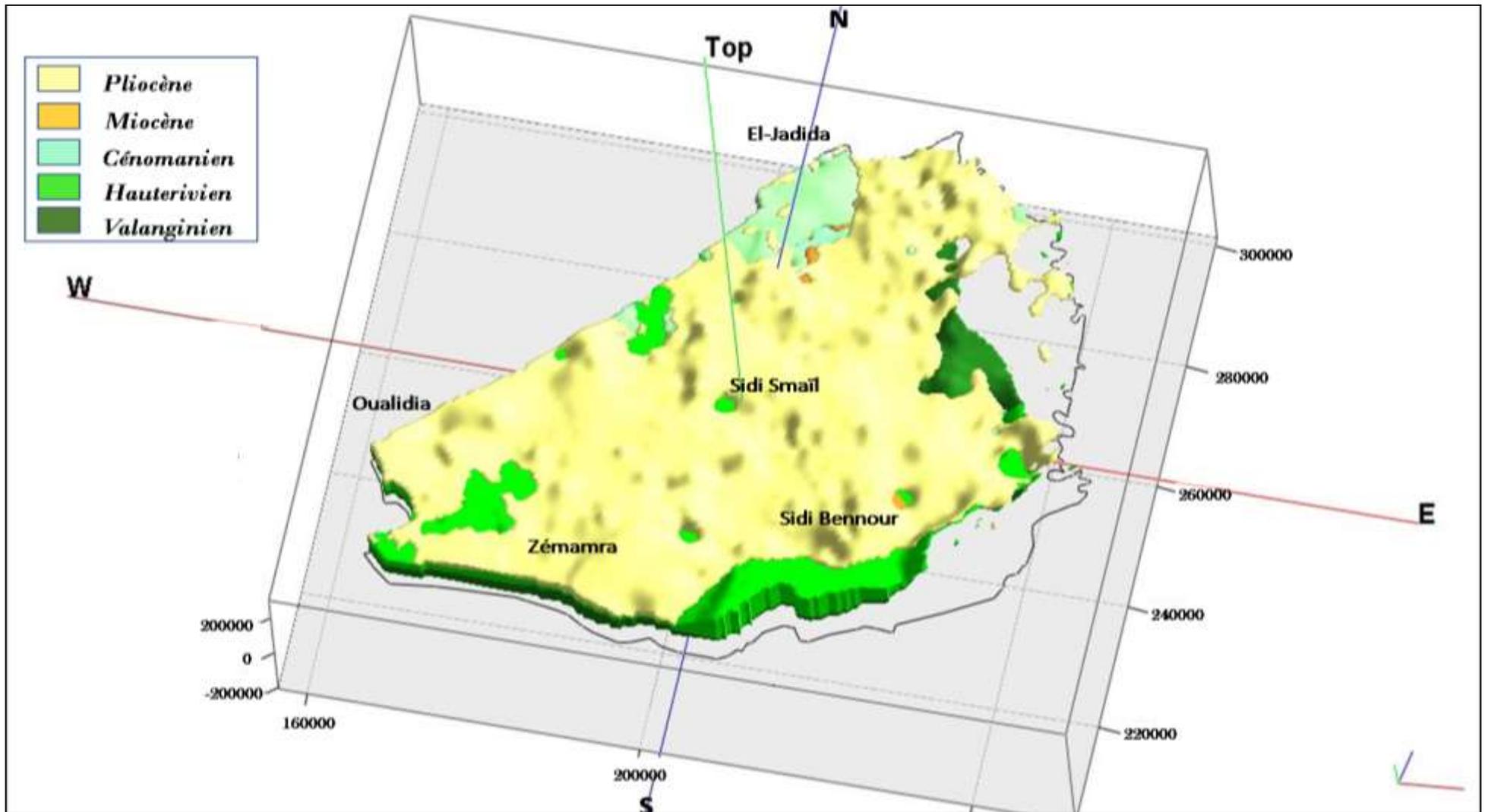


Figure 26: Géométrie du Plio-quaternaire sur le Miocène, le Cénomanién et le Crétacé inférieur au niveau de la région des Doukkala (Vue sud-est)

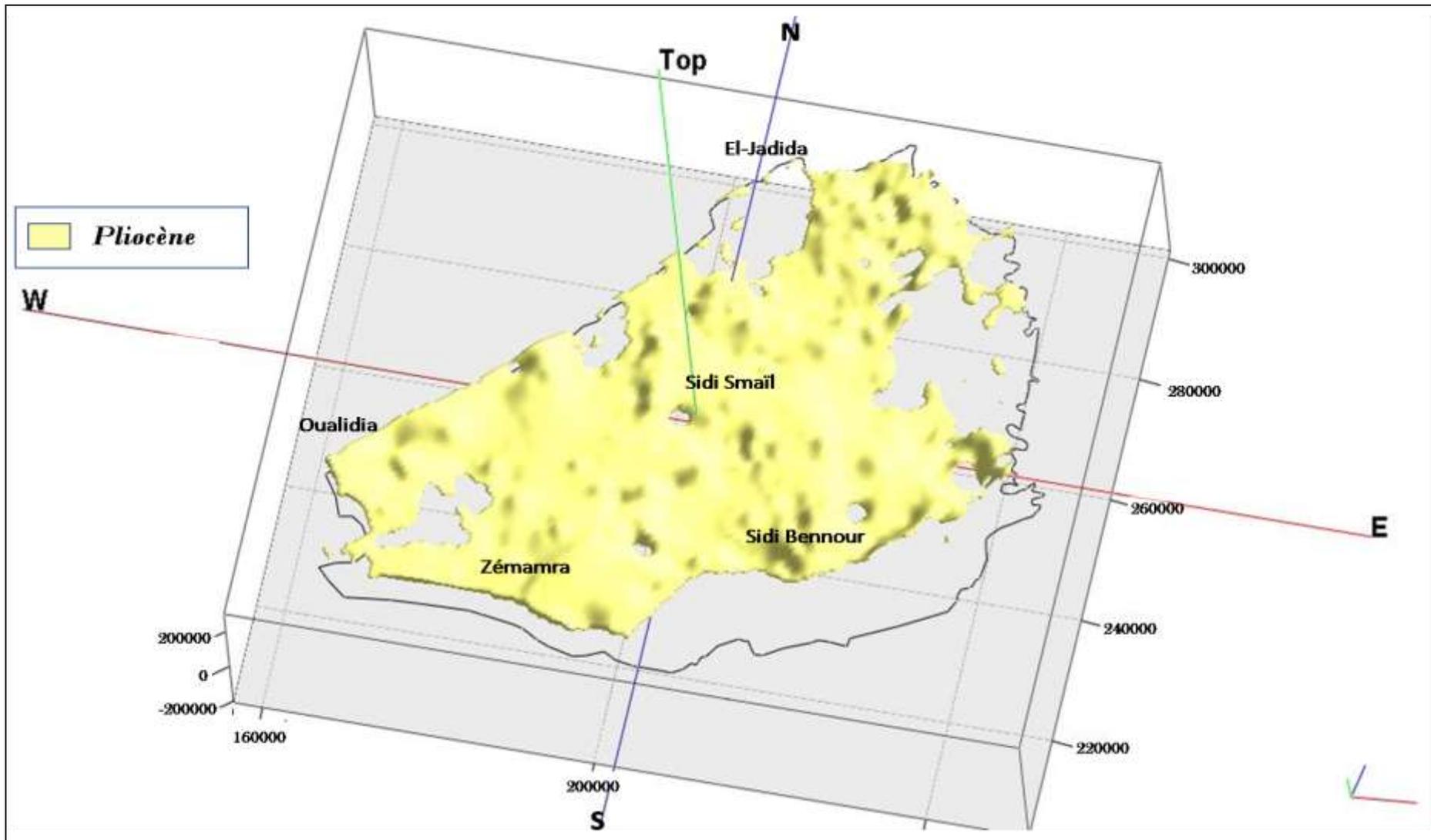


Figure 27: Géométrie du Plio-quaternaire au niveau de la région des Doukkala (Vue sud-est).

➤ Quaternaire

Le Quaternaire est constitué de trois groupes de formations (de bas en haut) [Ouada \(1998\)](#) :

- des colluvions de comblement à l'intérieur de la plaine.
- des terrasses fluviatiles longeant l'Oued Oum Rabia.
- des formations littorales constituant les grands alignements de crêtes et des sillons parallèles ou sub-parallèles au rivage actuel

Le Plio-quaternaire est formé essentiellement des calcaires gréseux. Les différents faciès lithologiques correspondent à (du bas vers haut) [Ferre et Ruhahrd \(1975\)](#).

- Conglomérats grossiers en masse de taille moyenne et de ciment calcaire peu abondant, ce faciès abonde auprès de l'Oued Oum Rabia,
- Calcaires détritiques, lumachelliques jaunes et très poreux, constitués des débris de coquilles liés par un ciment de calcite,
- Sables jaunes grossiers,
- Calcaires recristallisés, très durs avec un ciment calcaire,
- Calcaires à grain fin, sans fossiles, tendres et chargés en éléments argileux, ce faciès caractérise les dunes,
- Marnes sableuse.

III.5.b Modèle 3D

Le plio-quaternaire se rencontre au niveau de la plupart des sondages implantés dans cette région.

L'analyse du géomodèle 3D ([fig. 13, 26 et 27](#)) montre que le plio-quaternaire recouvre l'ensemble de la région, il n'est absent que dans les zones où les formations antérieures affleurent surtout au niveau du plateau du Crétacé d'El-Jadida. Les épaisseurs sont comprises entre quelques dizaines de centimètres sur les sommets des dunes à plus de 60 m un peu vers les Rehamna et au niveau des vallées. Dans le centre de la plaine, la structure devient plus irrégulière montrant une série de dômes et de cuvettes, qui pourraient être liés à l'existence d'une topographie enfouie sous le Plio-quaternaire.

En effet, entre le retrait de la dernière mer crétacée et la transgression de la mer pliocène, la région est restée émergée pendant quelques millions d'années, l'érosion a joué son rôle et crée une topographie complexe. ([Gigout, 1951](#)).

IV. Contrôles et validation du modèle

La qualité du modèle géologique dépend essentiellement de la qualité des données d'entrées. Pour notre cas les incertitudes peuvent concerner les altitudes topographiques, la position des forages, l'estimation des profondeurs des formations, la description des formations géologiques...

Ces erreurs sont directement liées à la manière dont les coordonnées ont été établies (mesurées sur terrain ou évaluées d'après les cartes) et le type de GPS utilisés, la qualification des descripteurs (parfois des foreurs ou des techniciens sans formation en géologie), l'état de connaissance lors de l'établissement des cartes géologiques...

D'autre type d'incertitude intéresse les approches de la modélisation et les algorithmes qui permettent de quantifier les volumes et les surfaces géologiques ainsi que la densité des données par secteur...

Nous avons donc cherché à réduire ces incertitudes par différents moyens :

- Confronter les données de forages (coordonnées et altitudes) avec les données du MNT.
- Comparer les formations des forages avec les forages les plus proches et d'essayer d'y retrouver des analogies.
- Évaluer les résultats par rapport aux cartes géologiques de la région et les études antérieures.
- Déterminer les zones d'incohérence et de retrouver les données erronées pour les rectifier ou les supprimer.
- Augmenter le nombre d'itération et les répéter.

Néanmoins malgré la lecture minutieuse de chaque formation, la rectification des données erronées et le nombre d'itération élevé, il est rare d'obtenir une corrélation parfaite surtout que la zone des Doukkala reste assez vaste.

V. CONCLUSION

Les principaux résultats obtenus dans le cadre de cette étude géologique permettent de préciser certains aspects qui restaient à nos jours peu argumenter sur la géologie de sub-surface de la région des Doukkala.

Le modèle géologique 3D de la zone d'étude est élaboré par les sondages de reconnaissances, les coupes géologiques et les cartes géologiques.

Les différentes unités géologiques de la région des Doukkala (plio-quadernaire, Miocène, Cénomanién, Crétacé) ne figurent pas dans l'ensemble des sondages analysés (229 sondages). En effet le Cénomanién figure sur 74 sondages (nombre maximum) et le Miocène a été rencontré sur 15 sondages (nombre minimum).

L'approche d'interpolation utilisée a été le krigeage ordinaire. Elle a été développée pour répondre aux besoins de la modélisation géologique, elle permet également le passage de l'information en 1 D (forage) et en 2D (coupes géologiques et cartes géologiques) vers une compréhension et une interpolation en un modèle conceptuel en 3D.

Ainsi, le modèle géologique 3D élaboré a mis en évidence la structure de chaque unité géologique et nous a permis d'approcher la géométrie et les épaisseurs de ces formations en tout endroit de la zone d'étude et de suivre son évolution en profondeur sous le recouvrement quadernaire. Donc de contraindre la géomorphologie tabulaire et l'absence d'affleurements dans cette région de la Meseta côtière et d'essayer d'illustrer sa géologie.

Bien que le modèle recouvre l'ensemble des Doukkala (vaste zone) et n'intègre pas les failles, il permet, néanmoins, de nous donner une idée approximative sur l'architecture générale des principales unités géologiques depuis le Crétacé; et sur certains traits d'évolution paléogéographique de la région.

TROISIEME PARTIE

Apport des SIG à la caractérisation géomorphologique de la région étudiée

I. Objectif :

Le but de cette partie est de compléter les travaux antérieurs et d'apporter plus de précisions sur :

- La forme, l'origine et l'évolution des principales unités géomorphologiques de la région des Doukkala.
- Les phénomènes karstiques conduisant à la formation des dolines et des éfondrements classés comme risques géologiques dans la région des Doukkala.

Pour atteindre ce but, nous nous sommes basé essentiellement sur la vue synoptique que présente le modèle numérique du terrain (MNT) (fig.28) et les corrélations possibles entre les différentes unités géomorphologiques.

La lecture du MNT nous a permis d'individualiser chaque unité géomorphologique et de retracer, avec précision, les éléments de chacune d'entre elles.

Les résultats obtenus ont abouti à la compréhension de la paléo-géomorphologie et de la cinématique de la région durant le Quaternaire.

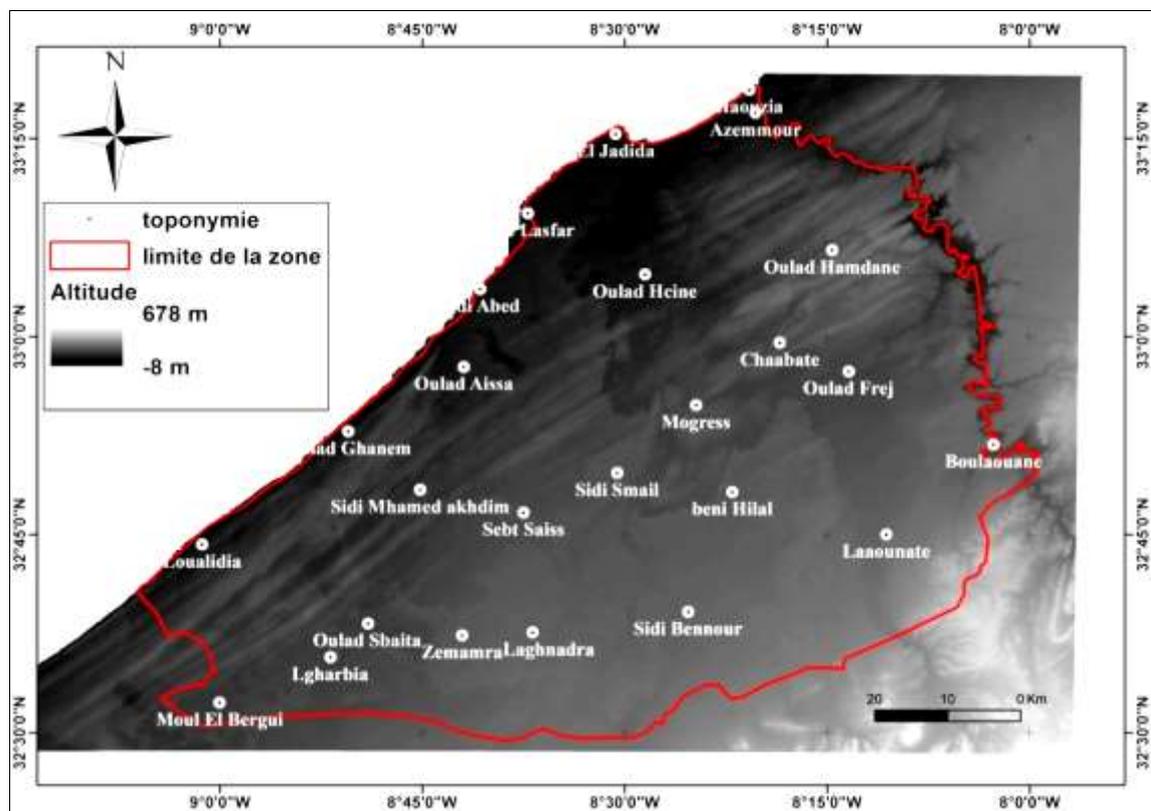


Figure 28: Modèle numérique du terrain de la région des Doukkala (Aster GDEM).

Pour examiner de près ces observations, on étudiera en détail les deux grandes unités géomorphologiques:

- Les cordons dunaires.
- Le couloir d'El-Jadida.

II. Caractéristique géomorphologique

Les Doukkala ressemble à un plateau d'allure régulière dans l'ensemble, avec une couverture plio-quadernaire très étendue.

On distingue trois régions naturelles disposées en bandes parallèles à la côte qui sont de l'Ouest à l'Est, l'Oulja, le Sahel et la plaine des Doukkala. (Fig.3)

II.1 Oulja :

L'Oulja, ou sillon ouljien de la côte, est une étroite frange côtière sous forme de gouttière de quelques kilomètres de large, parallèle au trait de côte. Elle est bordée à l'Est par une importante falaise morte « ouljienne » est protégée de l'océan par un cordon dunaire récent. Ce cordon est rompu en certains points ce qui donne les lagunes d'Oualidia et de Sidi Moussa.

C'est une forme caractéristique du littoral atlantique avec des sols sablonneux favorables aux cultures maraichères et une forte concentration de marais.

Weisrock (1987) a défini trois types morphologiques de l'Oulja en se basant essentiellement sur l'altitude, la largeur, la forme et la vigueur de la falaise morte :

- L'Oulja classique : sa largeur est de l'ordre de kilomètre, elle a l'allure d'une gouttière où se concentrent les débris fins. Cette forme résulte de l'existence d'un cordon de dunes littorales vers l'océan et de colluvions formant des cônes coalescents surbaissés du côté de la falaise morte. La hauteur de cette dernière est le premier élément de différenciation de l'Oulja ; plus elle est haute et plus l'Oulja s'individualise par rapport à l'arrière-pays.
- L'Oulja tronquée et la racine d'Oulja : elles sont incomplètes par rapport à la situation des ouljas classiques, elles ne présentent plus de profil en gouttière, mais constituent un plan incliné vers l'océan.
- L'Oulja basse et l'Oulja élevée : la situation de l'Oulja basse varie en fonction de sa communication avec l'océan. Si le cordon

dunaire est rompu, l'Oulja se transforme en lagune prolongée à l'amont par un marais maritime à slikke et à schorre allongé en fonction de la gouttière, et parcouru par un lacs de chenaux de marée. Lorsqu'il n'y a pas de rupture du cordon, la zone basse interne ne constitue que des marais d'eau douce ou merjas.

Gigout (1956) explique l'édification de cette forme morphologique par :

- Une transgression de la mer ouljienne qui a entraîné l'édification de la falaise morte,
- Une régression de la mer ouljienne sous le zéro actuel du niveau de la mer qui a entraîné l'édification d'un talus de l'Oulja ainsi que de dunes consolidées littorales.

D'après Ferré (1996), l'Oulja correspond à la plate-forme d'abrasion de la mer de +5 m (mer ouljienne), bordée à l'Est par une falaise morte avec son talus continental ; le sommet de la falaise varie entre 50 m et 100m, alors que le fond de la gouttière est à une altitude qui voisine zéro et n'est protégée de l'Océan.

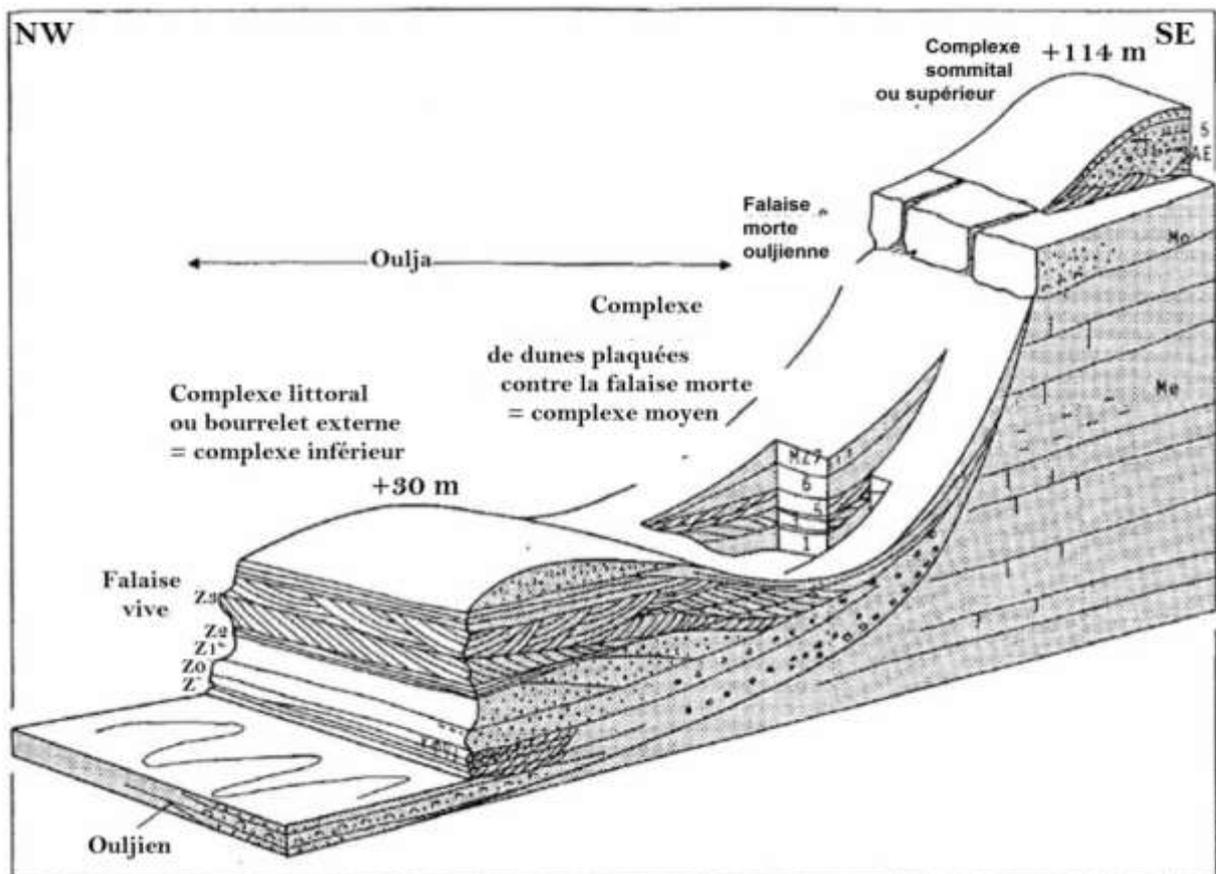


Figure 29: Bloc-diagramme de l'Oulja (Me: Mésozoïque. Mo: Moghrebien) (Weisrock, 1991).

C'est au niveau de cette partie qu'on trouve les deux fameuses

lagunes, la lagune de Sidi Moussa et la lagune d'Oualidia :

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur l'étude de ces lagunes vue leurs intérêts socio-économiques, touristiques, écologiques et scientifiques.

▪ Lagune de Sidi Moussa :

Localisée entre $-32^{\circ} 52''$ N et $-8^{\circ} 51' 05''$ W. Elle s'inscrit sur un rectangle de 5,5 km de long et sur 0,5 km de large. Sa superficie totale est estimée à 4,2 km². Trois domaines y sont distingués :

- 1) Les passes permanentes et le delta interne de marée.
- 2) Les chenaux (5 m de profondeur maximale).
- 3) Les marais salants au fond du plan d'eau, séparés par une digue.

Cette lagune possède la particularité d'être séparée du domaine océanique par un cordon de dune consolidé qui assure la stabilité de la communication océan-lagune.

Maanan (2003) montre que la forme actuelle de la lagune de Sidi Moussa a été imposée par la morphologie de la dépression interdunaire entre les dunes consolidées littorales. Cela se traduit par une forme allongée qui s'inscrit dans une bande rectiligne parallèle à la côte.

La lagune de Sidi Moussa est caractérisée par l'existence de côtes relativement différentes :

- La côte située au Nord-Est de la passe principale. C'est une côte rocheuse (des dunes consolidées) qui s'étend sur une dizaine de kilomètres. Après des plages sableuses apparaissent avec alternance de côtes rocheuses jusqu'à Cap Blanc (port de Jorf Lasfar) ;
- La côte située au Sud-Ouest de la passe principale. Il s'agit d'une flèche sableuse qui évolue vers le Nord, cette flèche est marquée par des systèmes dunaires occupés par une végétation. Ces plages se poursuivent vers le Sud-Ouest avec des interruptions par des côtes rocheuses.

▪ Lagune d'Oualidia :

La lagune d'Oualidia située entre $32^{\circ}44'20''$ N et $09^{\circ}02'50''$ W ; s'inscrit dans un domaine de 7 Km de long sur 0,4 à 0,5 km de large et sa superficie totale est évaluée à 3 km². Sa forme actuelle est imposée par la morphologie de la dépression inter-dunaire entre les dunes littorales consolidées et d'autres moins. Elle se distingue par trois unités morphologiques bien distinctes (Carruesco, 1989).

- Deux passes inégales, permanentes et secondaires, se localisant en aval de la lagune et favorisant la communication lagune-océan atlantique.
- Les chenaux: Le chenal principal de faible profondeur (0,5 à 2 m) serpente au milieu d'un schorre de 5,4 Km de long sur près de 0,4 Km de large. Sur ce chenal principal, doublé parfois d'un chenal secondaire, se greffe un réseau dendritique très étroit.
- Zone intertidale : 1,6 km² (de superficie) dont 0,2 km² de banc de sable du delta interne de marée en tête de la lagune.

Les marais salants : A l'extrémité amont du chenal principal, une digue a été construite en 1945. Elle est munie d'un système d'écluse qui assure à marée haute, le remplissage d'un réservoir de décantation de 0,5 Km de long. L'eau y maintenue pendant le jusant afin de la purifier par décantation, puis est pompée et déversée dans les bacs d'évaporation des marais salants d'une superficie de 0,3 Km².

Hillmi et *al.*,(2005) ont montré, que la lagune d'Oualidia est un estuaire sans fleuve.

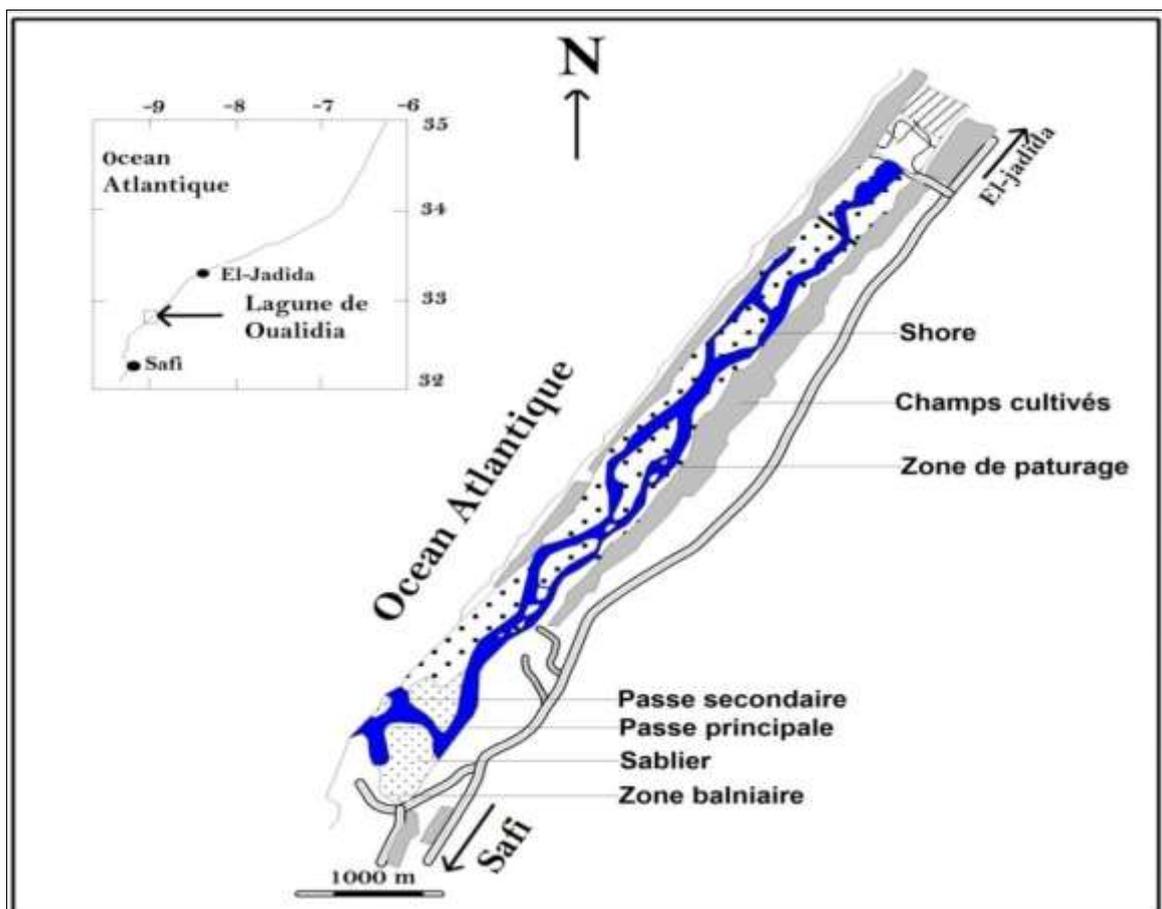


Figure 30: Morphologie de la lagune d'Oualidia (Hilmi et al., 2005).

II.2 Sahel :

Ce terme « Sahel » désigne en arabe une région côtière. C'est une bande côtière entre l'Oulja et la plaine des Doukkala, elle s'étend sur une superficie de 4000 km² avec une largeur de 30 à 50 km et une longueur de 150 km (depuis l'embouchure d'Oued Oum Rabia jusqu'à Safi). Cette zone est caractérisée par une succession de dunes d'âge et de teintes différents essentiellement des dunes consolidées, allongées parallèlement à la ligne de rivage d'une direction générale SSW-NNE (Aboumaria, 1993 et Ouadia, 1998).

Le Sahel constitue un domaine de structure très régulière et bien individualisé formé d'un ensemble de cordons dunaires qui se succèdent sur une grande distance vers l'intérieur des terres en donnant un paysage ondulé. Le sommet des dunes porte un nom en arabe dialectal qui vient de sa forme allongée dher (dos), par exemple dher-Eddellaâ (x : 233 ; y : 296). Tandis qu'on appelle le sommet circulaire Koudiat (colline) comme koudiat lwisa (x : 232 ; y : 297,5). Le contact du Sahel avec le plateau des Doukkala s'effectue, entre Tnine-Gharbia et Sebt-Saïs par une série de dépressions très accusées, bordées par un talus le long de la route de Zemamra à Tenine-Ghrbia. (Abkhar, 1995).

Les paysages rencontrés dans le Sahel ne sont pas uniformes d'une extrémité à l'autre, puisqu'en allant du Nord-Est (Oum Rabia) vers le Sud-Ouest (Safi) on distingue quatre sous unités différentes qui sont du Nord vers le Sud : Sahel d'El'Haouzia; couloir d'El-Jadida (Golf de Mazagan); plateau d'El-Jadida (le plateau du Crétacé) et Sahel central. (fig. 31).

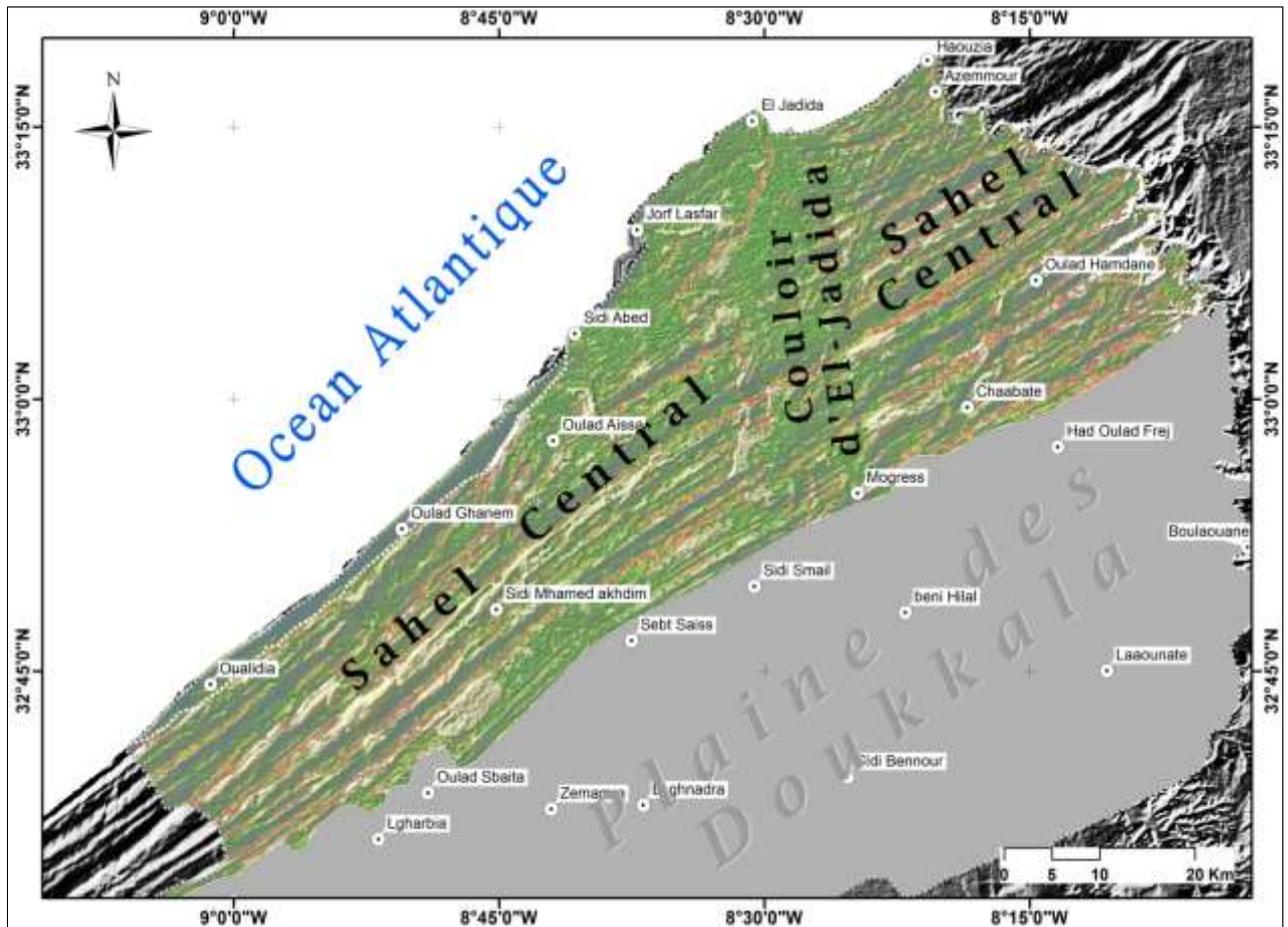


Figure 31 : Les différentes sous unités géomorphologiques du Sahel des Doukkala

I.2.a Sahel de l'Haouzia:

Il est situé entre l'Oum Rabia et le plateau d'El-Jadida, c'est la zone où le Sahel atteint sa largeur maximum 50 km, de la côte jusqu'à la ligne Sidi-Smaïl Had-Oulad-Frej.

Dans l'ensemble, la morphologie dunaire est régulière, les crêtes se suivent sur des grandes distances avec la même orientation SSW-NNE, séparées par des dépressions inter-dunaires plus ou moins vastes, aux fonds garnis de limons sableux qui permettent quelques cultures médiocres (Ferré, 1996).

Les cordons dunaires se localisent surtout à l'Est et au Nord-Est du couloir d'El-Jadida. Leurs altitudes diminuent du continent vers la mer, elles varient entre 160 m et 180 m près de Had-Oulad-Frej et entre 0 m et 40 m au niveau de la plage de l'Haouzia.

De point de vue géomorphologique, on distingue (au niveau du Sahel de l'Haouzia) les domaines suivants

- Le littoral (la baie d'El-Jadida)
- L'arrière-pays (système dunaire)

- Littoral (la baie d'El-Jadida).

De l'embouchure de l'Oued Oum Rabia au Cap d'El-Jadida on a la baie d'El-Jadida. Dans cette baie, en forme d'un arc de cercle, orientée WSW-ENE on trouve du Nord vers le Sud une plage à galets sur la rive gauche de l'embouchure de l'Oued Oum Rabia, la plage de l'Haouzia puis celle d'El-Jadida. Cette partie qui s'étend sur 15 Km passe progressivement au Sud à un cordon littoral.

Au niveau du Cap d'El-Jadida on a un changement d'orientation de la côte. Il est décrit, par [Guilcher et Joly \(1954\)](#), comme étant un redan, dont l'origine est l'intersection des terrains primaires disposés N-S avec le rivage orienté WSW-ENE. Cette déformation pourrait s'inscrire dans le cadre d'une tectonique récente, prouvée par [Ouadia \(1998\)](#) dans plusieurs sites de la région.

Dans un précédent travail [Laaziz \(2005\)](#), on a précisé que la baie d'El-Jadida est limitée au Sud-Ouest et au Nord Est par deux promontoires: celui d'El-Jadida et celui de Sidi Mohamed (Azemmour). Ces deux promontoires sont marqués à terre par les affleurements du Crétacé sur le socle (à Sidi Mohamed) et le socle (à El-Jadida). Ceci laisse suggérer, que la structure du socle a joué un rôle dans la mise en place et l'évolution morphologique de la baie d'El'Haouzia ([fig.32](#)).

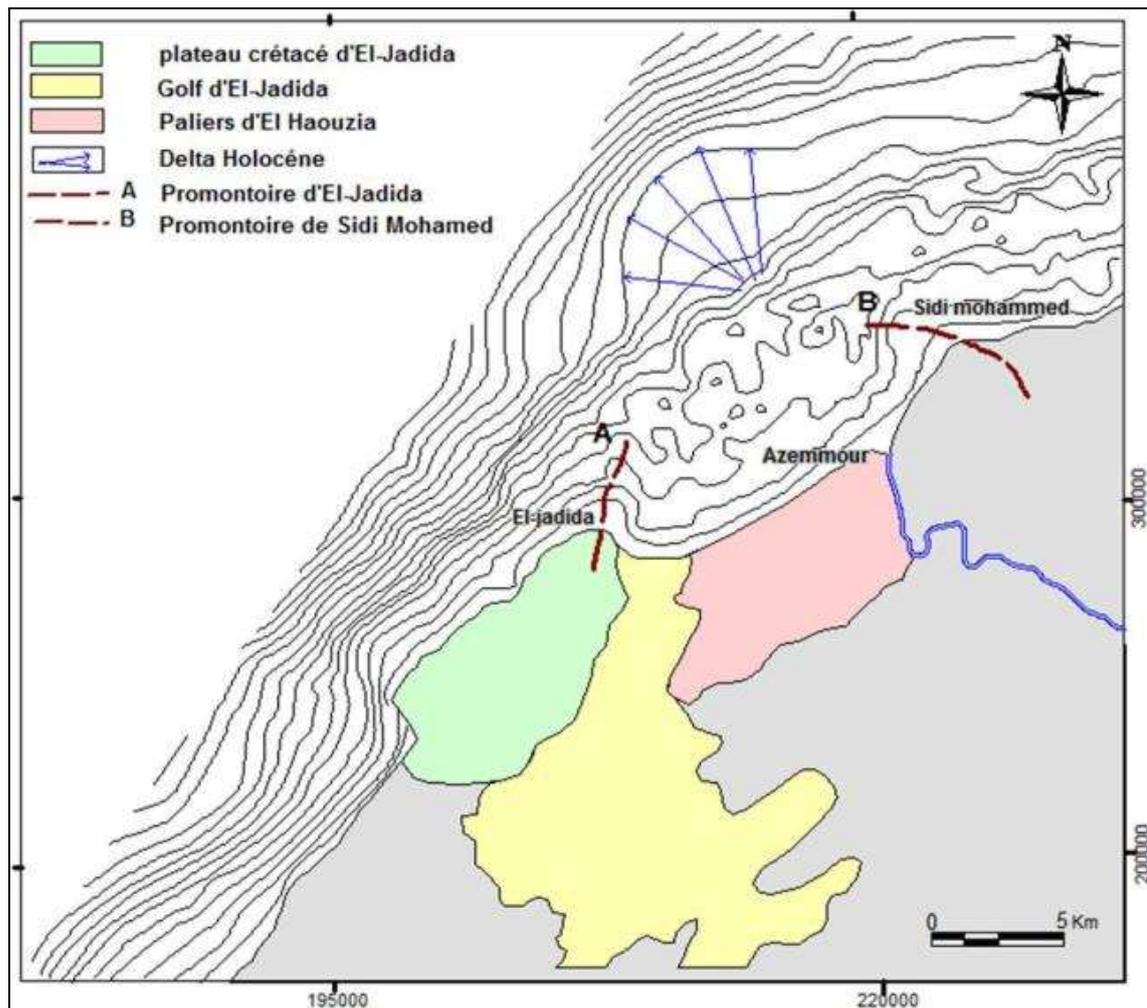


Figure 32: Carte géomorphologique de la région nord des Doukkala et son proche plateau continental. A et B les deux promontoires limitant la baie d'El-Jadida (Laaziz, 2005)

Le littoral d'El-Jadida-Azemmour s'organise de la façon suivante en partant du Cap d'El-Jadida vers Azemmour (Boulanoir, 1999) :

- La partie méridionale, peu étendue (sur 3 Km de longueur environ), est considérée comme une côte qui forme un rentrant abrité et le passage latéral se fait vers une côte de baie ouverte.
- La partie septentrionale se distingue de la première par son orientation et par une ouverture au large plus uniforme.

Généralement, les plages du Sahel de l'Haouzia passent progressivement à un cordon littoral alimenté par des sables issus de la plage. Son alimentation dépend de l'état de cette dernière, de la direction et de la puissance des vents.

▪ Arrière-pays (système dunaire)

Cette partie du Sahel est caractérisée par des formations sédimentaires du Quaternaire, qui reposent sur des formations plus anciennes, constituées d'un matériel sableux qui couvre la majeure partie de la zone.

Ces accumulations consolidées se répartissent en deux ensembles majeurs : des systèmes dunaire littoraux et des dunes consolidées du Pliocène et du Quaternaire.

Systèmes dunaire littoraux :

Les cordons dunaire littoraux constituent des unités morphologiques adjacentes aux plages sableuses. Ils montrent généralement une pente douce du côté de la mer et une pente forte du côté du continent. Parfois, le côté au vent du cordon peut montrer une pente raide.

Le secteur dunaire littoral comporte 2 systèmes dunaire :

- Les dunes vives, appelées également les dunes blanches, elles sont meubles et dépourvues de végétation.
- Les dunes jaunes ou dunes semi fixées occupent l'arrière-plan des premières. Elles présentent une couverture végétale faible essentiellement composée des hallophyles qui poussent à la faveur de l'embrun marin.

Au Nord-Est d'El-Jadida, dans la région d'Azemmour, le cordon littoral est nettement plus développé et plus large. Celui des environs de la plage de l'Haouzia présente des unités morphologiques, partiellement liées à la présence de zones riches en végétation, telles que les nebkhas, des barkhanes. (Ouada, 1998).

Systèmes dunaire consolidés :

Ce sont des accumulations éoliennes développées dans l'arrière-pays. Elles sont parallèles au cordon littoral, et plus anciennes que ce dernier. Ces formations éoliennes sont couvertes par des plantes fixatrices qui empêchent la migration des sables. Leurs sols sont davantage riches en carbone que les dunes vives d'où l'appellation « dunes grises ».

Ce type de dunes présente une extrémité large du côté de la mer et une extrémité pointue en biseau du côté du continent. Leur crête paraît moins nette.

Ces dunes sont constituées de calcarénites souvent encroûtées à la surface. Lorsqu'il n'est pas entièrement érodé, un paléosol (in situ ou remanié) peut superposer chaque dune. Leurs âges sont généralement déduits de leur comparaison aux niveaux marins sous-jacents (Ouada, 1998).

Une description détaillée de ce système est donnée par Akil (1990), (fig.33), qui décrit 5 zones ondulées alternant avec des zones plates, ces zones sont du SE au NW deux ondulations (I' et II') de grande envergure qui englobe trois cordons dunaires dont les altitudes baissent de 180 m à 110 m. Puis une troisième (III') très peu développée qui regroupe trois petites collines éoliennes dont les sommets montrent approximativement la même altitude, variant entre 120 m et 110 m. L'ondulation (IV') correspond à un seul cordon, l'importance de celui-ci diminue vers le NE de cette région.

Enfin, trois zones plates dont chacune est la surface enveloppe de cordons mineurs située à la même altitude. Cette dernière révèle une diminution en passant d'un palier à l'autre ainsi c'est trois zones (1, 2, 3) se situe respectivement entre 80 et 60 m, entre 50 et 40 m et entre 30 et 0 m. (fig.33).

Les directions de ce système dunaire sont relativement parallèles à la cote mais elles présentent des changements entre les différentes ondulations de N 50 à N 65 (en se dirigeant vers la mer) et aussi entre les extrémités NE et SW de la même dune.

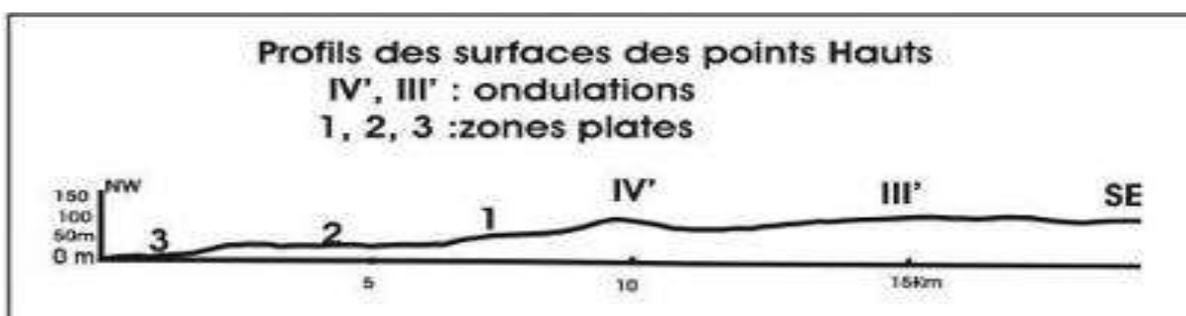


Figure 33: Profil des surfaces des points hauts à l'arrière-pays de l'Haouzia (Akil, 1990).

Tableau 7: Direction des cordons dunaires située à l'arrière-pays de l'Haouzia (Akil, 1990).

Systèmes dunaires		Direction des cordons dunaires (en degré)		Altitudes
		Extrémité SW	Extrémité NE	
Ondulations	I'	N 50 +/- 2	N 60 +/- 2	180 m
	II'	N 50 +/- 2	N 60 +/- 2	De 136 a 110 m
	III'	N 60 +/- 2	N 56 +/- 2	De 120 a 110 m
	VI'	N 62 +/- 2	N 46 +/- 2	100 m
Zones plates	1	N 75 +/- 2	N 42 +/- 2	De 80 a 60 m
=	2	N 80 +/- 2	N 58 +/- 2	De 50 a 40 m
Plateaux	3	N 85 +/- 2	N 63 +/- 2	De 30 a 0 m

I.2.b Couloir d'El-Jadida :

C'est une basse dépression orientée Nord-Sud longue de 35 Km et large de 5 Km. Elle sépare les domaines relativement surélevés N-NE (Dunes) et W (plateau d'El-Jadida).

La limite ouest de ce couloir, est l'escarpement qui sépare le couloir d'El-Jadida du plateau d'El-Jadida.

Nous avons essayé de donner plus de précisions à sa limite est (Laaziz, 2005). Celle-ci montre un tracé sinueux, essentiellement gouverné par les indentations dessinées par le prolongement des dunes consolidées de l'arrière-pays de l'Haouzia.

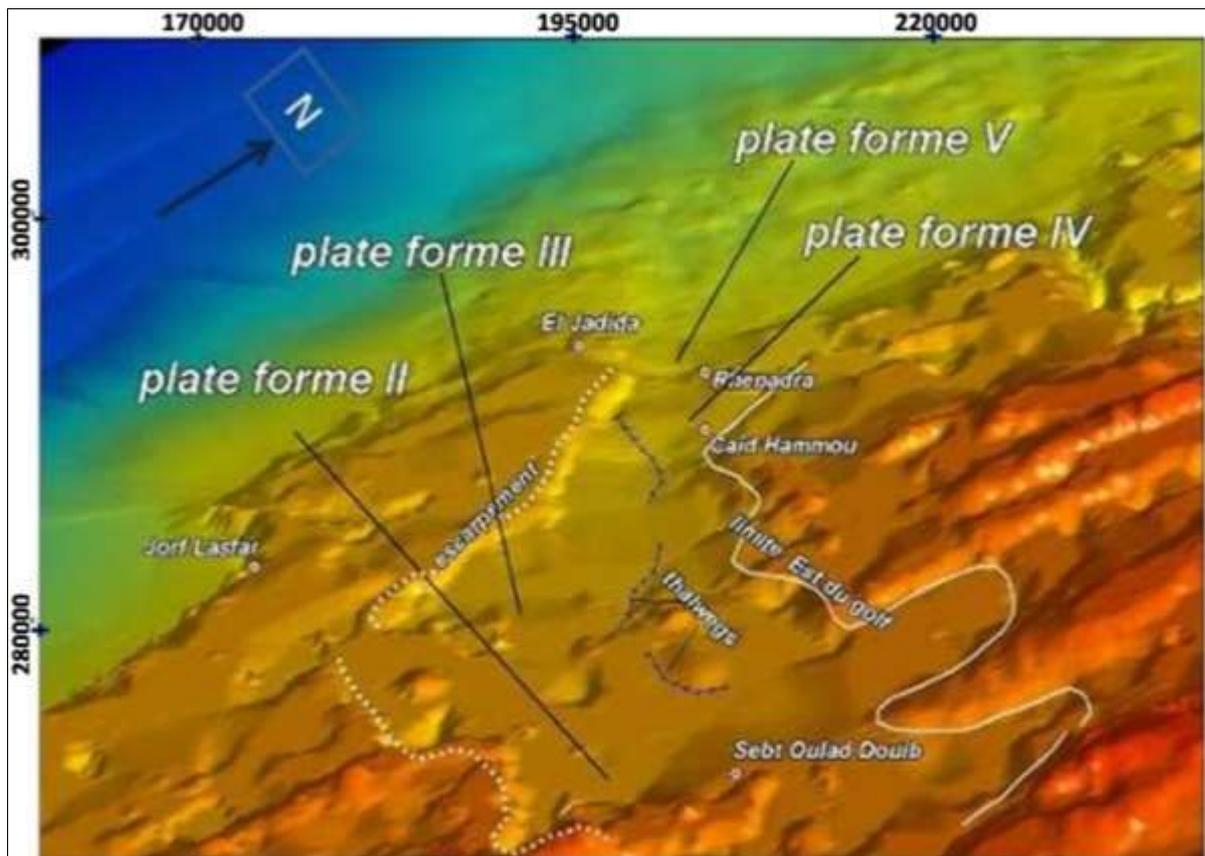


Figure 34: Représentation en 2.5D du Couloir d'El-Jadida avec sa limite est (Laaziz, 2005)

Cette partie du Sahel est ainsi caractérisée par :

- Des surfaces remarquablement planes à l'exception des petites collines à morphologie dunaire, généralement isolées qui les parsèment,
- L'alignement Nord-Sud suivant un axe El-Jadida-Sidi Smaïl,
- La bordure ouest formée d'une série de talus à regard est, hauts de 20 à 50 m, fortement travaillée par l'érosion karstique,

- Les altitudes marquées au niveau de ce couloir varient de 80 m au Sud, dans la région de Sebt Douib à 0 m au Nord au niveau de la plage d'El-Jadida.

Gigout (1951) a décrit l'alignement de cinq surfaces topographiques qui sont du Sud vers le Nord :

1. Plate-forme des Oulad Rafai,
2. Plate-forme Sebt Oulad Douib,
3. Plate-forme du Pacha,
4. Plate-forme du Douar El Khenadra,
5. Plate-du Champ de courses.

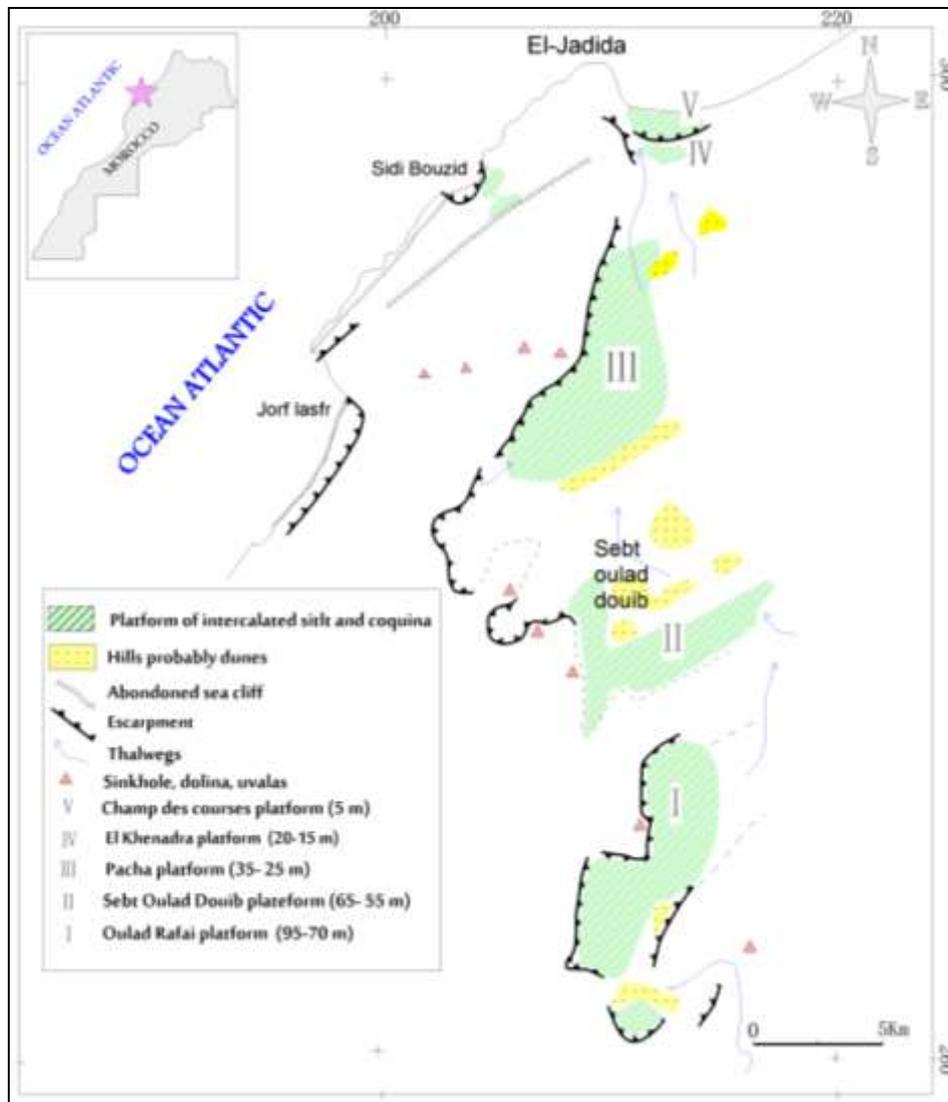


Figure 35: Golfe quaternaire de Mazagan (couloir d'El-Jadida) (d'après Gigout, 1951).

- ❖ Plate-forme des Oulad Rafai (Plate-forme I): Cette surface, de direction N-S, est subdivisée en trois tronçons par quelques basses collines : au Sud ($x= 210$ $y= 260$) s'étend une plaine d'altitude moyenne 95 m. Au centre ($x= 210$ $y= 267$) une plaine de 85m de cote. Au N, la plaine des Oulad Rafai proprement dite est large de 2 km, profonde de 2 km et d'une altitude très voisine de 70 m.

Dans la plaine se trouvent des petites collines de 10 à 20 m. de hauteur, faites d'un grès-calcaire, avec souvent des coquilles marines, des Huîtres notamment. Elles peuvent être des restes de Quaternaire marin ou des témoins de Pliocène que la dissolution karstique aurait affaiblis ; elles comprennent aussi probablement des dunes, consolidées, consécutives au retrait de la mer quaternaire. (Gigout, 1951).

- ❖ Plate-forme du Sebt Oulad Douib (II) : Elle comprend deux plaines, séparées par de basses collines : celle du Souk Sebt, de point cote 55 – 60 m, et celle au pied de la côte que la route de Mazagan à Marrakech descend en ($x=212,5$ $y=276$), cette dernière à la cote 60 - 65. Ces deux plaines se développent au pied d'une côte élevée, au tracé découpé.

Au Nord de la plaine se trouve une zone de collines, d'une altitude inférieure à 70 m; on peut les expliquer en partie par des dunes de retrait; mais plusieurs de ces petites collines, au voisinage du Souk Sebt, comprennent des lits de coquilles qui paraissent appartenir au Plaisancien, les avens et dolines sont abondantes dans cette région.

Une colline située en ($x=212,7$ $y=282,5$ montre des grès-calcaires à coquilles marines y apparaissent profondément diaclasés, et même basculés ; les crevasses sont emplies d'un Grès-calcaire fin à Helix. Le sommet des grès marins est à 65 m. Ceci fait penser aux rochers d'une cote ensevelie sous des sables éoliens (Gigout, 1951).

- ❖ Plate-forme du Pacha (III) : D'après Gigout (1951), c'est une plaine, qui s'étend au N du parallèle 285, jusqu'à 5 km. au S d'El-Jadida. Elle est limitée à l'W par une côte presque rectiligne, creusée dans le Crétacé et dominant la plaine de 15 à 20 m. Les limites S et E sont des basses collines qui font la transition avec des dunes consolidées, de direction SW-NE.
- ❖ Plate-forme du Douar El Khenadra (IV) : Située au SE d'El-Jadida. La côte qui la limite à l'W est très nette, et prolonge celle de la plate-forme du Pacha. Par contre, sa limite E n'est pas franche. L'altitude de cette petite plate-forme se maintient entre 15 et 20 m. Sa structure est mieux connue. Cette plate-forme montre généralement des grés calcaires et des sables à Hélicidés formant une petite colline de direction EW. Il s'agit de sédiments marins repris en dune.

- ❖ Plate-forme du champ de course (V) : C'est une surface plane, entièrement sous la courbe de niveau 10, s'étend à la sortie E d'El-Jadida, derrière les dunes vives qui bordent la mer. Le sédiment qui la constitue est un grès-calcaire tendre, jaune, recouvert de la croûte rose, d'aspect praliné, notée à plusieurs reprises au-dessus des dépôts de la mer de + 5 m (Gigout, 1951).

Selon Gigout (1951), cette plate-forme inférieure butte au S contre un petit ressaut de terrain, qui correspond aux dunes consolidées du Douar Khenadra, à la butte de Sidi Moussa, etc. Les tranchées de l'ancienne voie ferrée, en (x=212,25 y=297,5), montrent un sable rose encroûté en surface et contenant des Hélicidés avec leur test, reposant sur un grès-calcaire jaune, dur, à escargots à l'état de moules. Le premier a le faciès typique des sédiments de la mer de 5 m, tandis que le second correspond, par continuité, aux dunes consolidées qui surmontent la lumachelle de la mer du Douar El Khenadra. Le grès-calcaire forme le sommet de la butte, tandis que le sable rose recouvre, sur la pente N, des blocs du grès-calcaires, basculés. Il s'agit donc du talus continental de la falaise morte de +5m, identique à celui qui existe entre le Cap Blanc et le Cap Cantin mais moins développé. La plate-forme du champ de courses correspond donc à la mer de +5 m.

En se basant sur une étude détaillée des cinq plates-formes, Gigout (1951) a présenté des hypothèses expliquant la formation de ce couloir:

- Une origine tectonique : le substratum créacé au Nord de ce couloir montre un synclinal N-S (synclinal d'Azemmour), qui se manifeste par le pendage de l'ensemble ouest du Cénomaniens du bas Oum Rabia, et par le pendage léger est du même terrain à l'Est d'El-Jadida.
- Une origine hydrographique (une vallée fluviale): cette hypothèse, qui consiste à un drainage des eaux en cas de crue vers l'Océan atlantique, se base sur l'existence des petits talwegs reliant en chapelet les cinq plates formes.
- Le résultat d'une karstification, vu que les phénomènes de dissolutions et de karstification sont très développés dans toute la région. Mais Gigout (1951) a exclu cette idée parce que les fonds des plates formes de ce couloir sont plats et réguliers, ce qui n'est généralement pas le cas des fonds engendrés par les phénomènes de karstification, car cette hypothèse n'explique pas l'étagement des cinq plates formes. Pourtant, il a signalé que les phénomènes de karstification ont altéré le relief de cette région.
- Origine marine : fondée sur le fait que le sous-sol des cinq surfaces topographiques présente, sous les limons, des lumachelles marines peu épaisses sur le substratum anté-quadernaire. Cette hypothèse est considérée comme la plus logique par Gigout (1951) pour expliquer la formation de ce couloir.

Une étude plus détaillée, de Akil (1990), basée sur des analyses morphologiques, sédimentologiques et paléontologiques, a mis en cause l'origine marine, que Gigout (1951) a retenu pour expliquer la formation de cette dépression, ainsi que les limites des dépôts du Quaternaire.

Ce dernier auteur sépare la région en deux parties :

La première qui se trouve au Nord de Dar Caïd Hammou, dans la région de Khenadra, où les formations du Quaternaire récent sont clairement visibles alors que celles du Quaternaire ancien n'ont pas pu se déposer sur le substratum marneux et miocène, qui forme probablement une zone haute.

La deuxième partie est localisée au Sud du Dar Caïd Hammou, dans cette zone plusieurs facteurs agissaient, selon Akil (1990), principalement la karstification qui est favorisée par la néotectonique et l'accumulation des eaux de ruissellement.

I.2.c Plateau d'El-Jadida :

Ce plateau est limité à l'Est par un escarpement, qui le sépare du couloir d'El-Jadida, à l'Ouest il est séparé de la mer par des falaises hautes.

De point de vue géomorphologique, on note l'absence des cordons dunaires.

La côte de cette région est principalement rocheuse, à l'exception de la plage de Sidi Bouzid, qui est relativement pauvre en dépôt quaternaire et montre l'existence de trois falaises mortes dont les altitudes varient entre 5 m, 20 m et 30 m (Akil, 1985). De point de vue stratigraphique, ces falaises correspondent, respectivement, aux rivages de l'Ouljien, de l'Haronien et de l'Anfatien (Biberson, 1958).

Tableau 8: Base des falaises mortes au SW d'El-Jadida (Akil, 1990).

Etages	Bases des falaises mortes au SW d'El-Jadida
Ouljien	+ 5 a + 6 m
Harounien	+20 m
Anfatien	+30 m à 34 m

En se basant essentiellement sur l'étude du Model Numérique du Terrain (MNT) et les corrélations des plates formes du couloir d'El-Jadida avec le système dunaire de l'Haouzia, on a pu mettre en évidence une autre zone de rupture de pente (F4) qui pourrait correspondre à la falaise Mâarifienne (Laaziz, 2005).

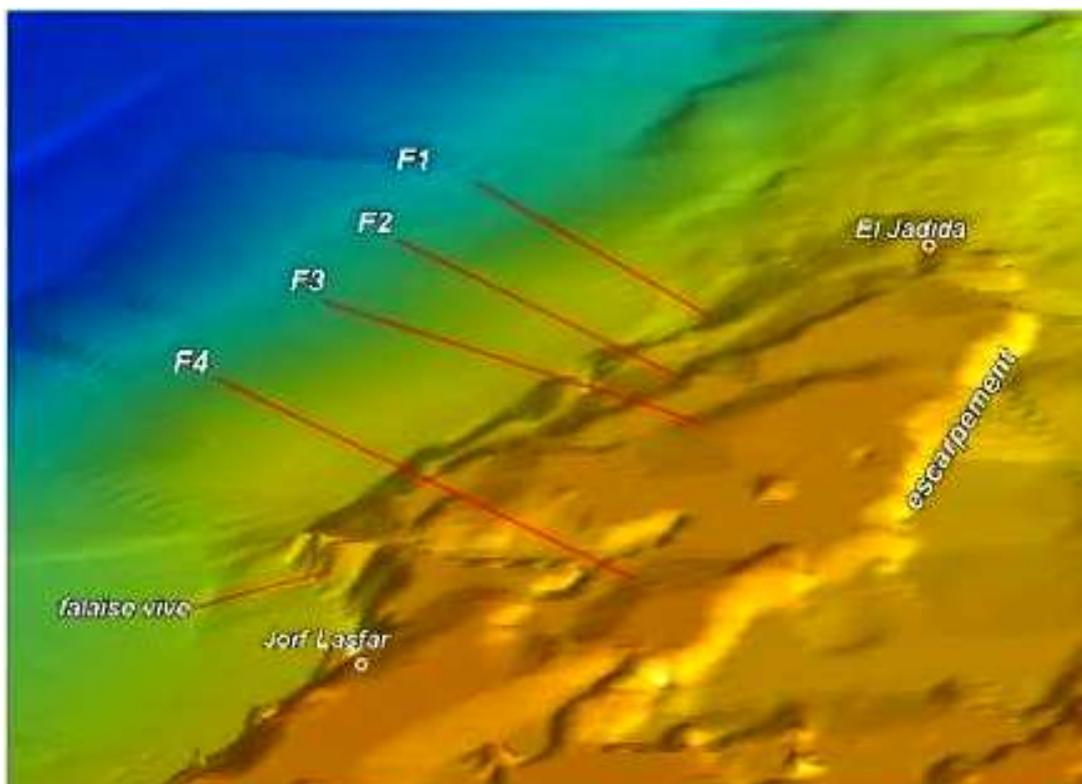


Figure 36: Vue en 2.5 D du plateau d'El-Jadida avec les quatre falaises; F1 : Falaise ouljienne; F2 : Falaise Harounienne. F3 : Falaise Anfatiien; F4 : probablement une falaise mâarifienne (Laaziz, 2005)

I.2.d Sahel central

Le Sahel central, entre Cap Cantin et Cap Blanc, se présente comme un alignement de dunes consolidées, allongées en longues crêtes d'orientation SW-NE, parallèles au rivage de 20 km.

De la côte vers l'intérieur on rencontre les formations géomorphologiques suivantes décrites par Akil (1990) et Aboumaria (1993) :

- Côtes rocheuses :

Les côtes rocheuses de cette région sont très nombreuses et très développées, parfois interrompues par des plages sableuses ou recouverts d'une fine pellicule de sables. Elles sont constituées de falaises taillées dans des calcaires marneux du Crétacé supérieur.

Dans le Sahel, les falaises sont très nombreuses, surtout dans la partie sud-ouest. Parfois, elles peuvent être polycycliques. L'analyse des falaises mortes entre El-Jadida et Cap Beddouza permet de retrouver trois paléo-rivages dont les altitudes sont évaluées à 5 m, 20 m et 30 m correspondant respectivement aux étages : Ouljien, Harounien et Anfatiien (Fig.37) (Gigout, 1951).

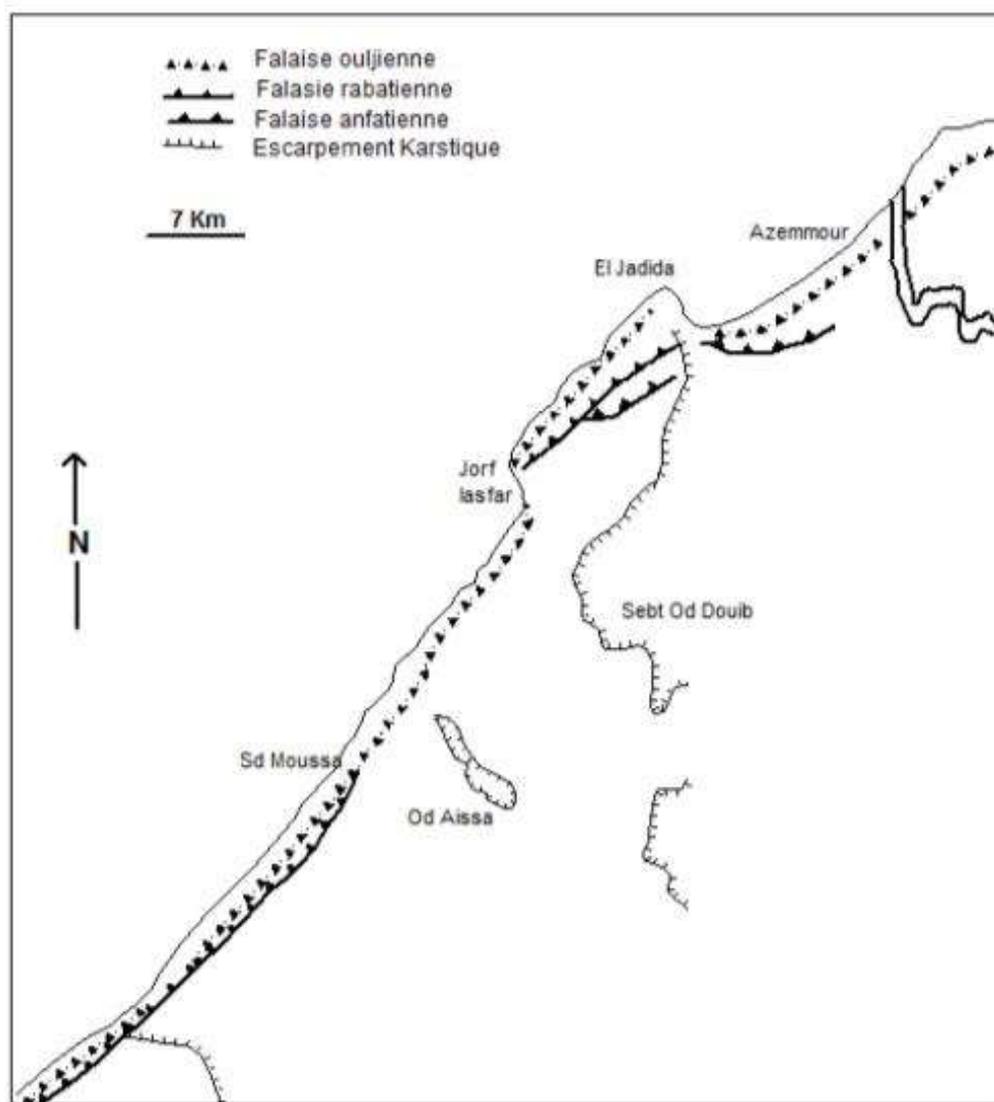


Figure 37: Carte de la répartition des falaises mortes (Gigout, 1951), modifié par Akil (1990).

Généralement, ces plages passent progressivement à un cordon littoral alimenté par des sables issus de la plage.

- Cordon littoral :

Il comporte localement des petites barkhanes dont les cornes ont des directions qui varient entre N30 et N36 selon les secteurs. Ce cordon littoral est alimenté par des sables issus de la plage. Son alimentation dépend de l'état de cette dernière, de la direction et de la puissance des vents. (Ouada, 1998).

- Arrière-pays :

L'arrière-pays est essentiellement dominé par des systèmes de cordons dunaires grésifiés pliocènes et quaternaires, plus au moins parallèles à la côte. Ces cordons sont alimentés par des paléo-plages dont les sédiments essentiellement bioclastiques n'ont pas été enrichis

par des apports détritiques comme dans le domaine nord d'El-Jadida. (Aboumaria, 1993).

Cette partie est caractérisée par une karstification intense et très diversifiée qui a engendré différentes formes (karsts, lapiez, grottes ou gouffres, dolines, ouvalas ou dolines coalescentes ...).

La karstification et les différentes morphologies qu'elles engendrent ont été bien étudiées en détail par Akil (1990), Ouadia (1998) et Khouaja (2016).

Cette karstification a joué un grand rôle dans la géomorphologie de la région puisqu'elle l'a guidée, au cours du Quaternaire (Ouadia et Aberkan, 1996).

Dans ce secteur, se développe un important effondrement karstique appelé « Bled-Sersif ». Le Sahel présente un aspect différent suite de la disparition du manteau plio-quaternaire et de l'affleurement de divers niveaux du Crétacé.

II.3 Plaine des Doukkala

Située entre le Sahel et le massif de Rehamna et les collines de Mouissates sur une superficie de 3700 km². La plaine des Doukkala est une vaste zone de bas plateaux inclinés régulièrement de 2 à 3 % du Sud Est au Nord-Ouest et son altitude décroît de 300 m en bordure des Rehamna à 120-130 m au pied du Sahel. Les paysages sont monotones et les plateaux sont souvent parsemés des dayas.

Cette zone de faibles reliefs est formée principalement par des dépôts limoneux quaternaires. Elle est marquée essentiellement par des plateaux et des vallées actuelles et anciennes. Ces plateaux sont limités par des talus dont l'origine peut être tectonique ou fluviatile. Vers la limite avec le Sahel ou bien la vallée de l'Oum Rabia on note l'apparition des premières crêtes dunaires qui émergent de la couverture limoneuse.

Cette plaine présente des potentialités agricoles remarquables car les sols, formés à partir des limons, sont variés et de bonne qualité (en particulier les sols argileux ou « tirs » dans le SW). Consacrée presque totalement (76 % de la surface cultivée) à la céréaliculture (390 000 ha), cette région, grâce à l'irrigation, a diversifié ses cultures (coton, betterave) (Ferré et Ruhard, 1975).

Ferré et Ruhard, (1975) ont décrit les deux éléments morphologiques de la plaine des Doukkala :

- Les plateaux.
- Les vallées actuelles ou anciennes.

I.3.a plateaux :

Les plateaux représentent les restes de la surface de comblement par les limons inférieurs argileux ; sous une mince épaisseur (1 à 2 m) de limons récents, on rencontre toujours les argiles rouges fortement encroûtées au sommet.

La topographie de ces plateaux est peu régulière et des « Dayat » (dépressions qui se remplissent d'eau en année pluvieuse) parsèment leur surface. Des talus les limitent, dont l'origine peut être tectonique ou fluviale.

En approchant du contact avec le Sahel et vers l'Oum Rabia, les premières crêtes dunaires qui émergent de la couverture limoneuse, apparaissent. Leur direction SW-NE a souvent imposé leur tracé aux vallées.

I.3.b Vallées

Le réseau hydrographique comprend deux oueds principaux : l'Oued Faregh et l'Oued Bouchane, et des oueds moins importants : Oued Aouja, Oued Souani, Oued M'Tal et Oued Guerrandou. Le dessin des vallées est complexe : à côté des thalwegs vifs, lorsque la pente est suffisante, il existe de nombreux thalwegs morts, constituant une suite de dépressions plus ou moins fermées.

Les Oueds principaux s'écoulent suivant une direction SE-NW, perpendiculaire à la direction des crêtes des cordons dunaires littoraux et conformes à la direction du basculement d'ensemble de la Meseta. Les artères secondaires s'alignent dans le sens SW-NE de cette disposition résultant des tracés coudés où alternent des gorges aux versants rocheux quasi verticaux et de petits bassins développés dans les roches les plus tendres (Ouada, 1998).

Un seul oued possède un exutoire : l'Oued Faregh, dont le cours SN s'infléchit ensuite vers le NE par suite d'un phénomène de capture, pour aller se jeter dans l'Oum Rabia. Les autres oueds se perdent dans la plaine, qui constitue ainsi un bassin fermé, endoréique.

Le réseau hydrographique existant à la fin du dernier pluvial quaternaire ne présentait que deux exutoires : l'Oued Faregh et l'Oued Fel-Fel ou « rivière d'El-Jadida » qui devait couler avant l'établissement d'un système d'épandage de crues sur l'Oued Bouchane.

Cette vallée, entaillée dans les cordons dunaires, conduit aux plates-formes du couloir d'El-Jadida.

A la traversée de la plaine des Doukkala, la vallée de l'Oued Oum Rabia toujours encaissée s'élargit, atteignant parfois plus d'un km de large et présente des tracés à larges méandres (Ferré et Ruhard, 1975).

III. Cordons dunaires littoraux :

III.1 Méthodologie du travail et produits dérivés :

Pour examiner et étudier avec plus d'exactitude les variations morphologiques des cordons dunaires le long du Sahel, nous avons fait une analyse longitudinale et latérale du modèle numérique de terrain selon les étapes suivantes :

1- L'édition des courbes de niveaux à partir du MNT selon un pas de 5m, pour faciliter la visualisation en plan des données altimétriques. Cela nous a permis de distinguer avec une grande précision les crêtes des cordons dunaires.

2- La présentation du MNT en 2,5D, à l'aide de l'extension « Arcscene », pour montrer clairement les crêtes des cordons dunaires

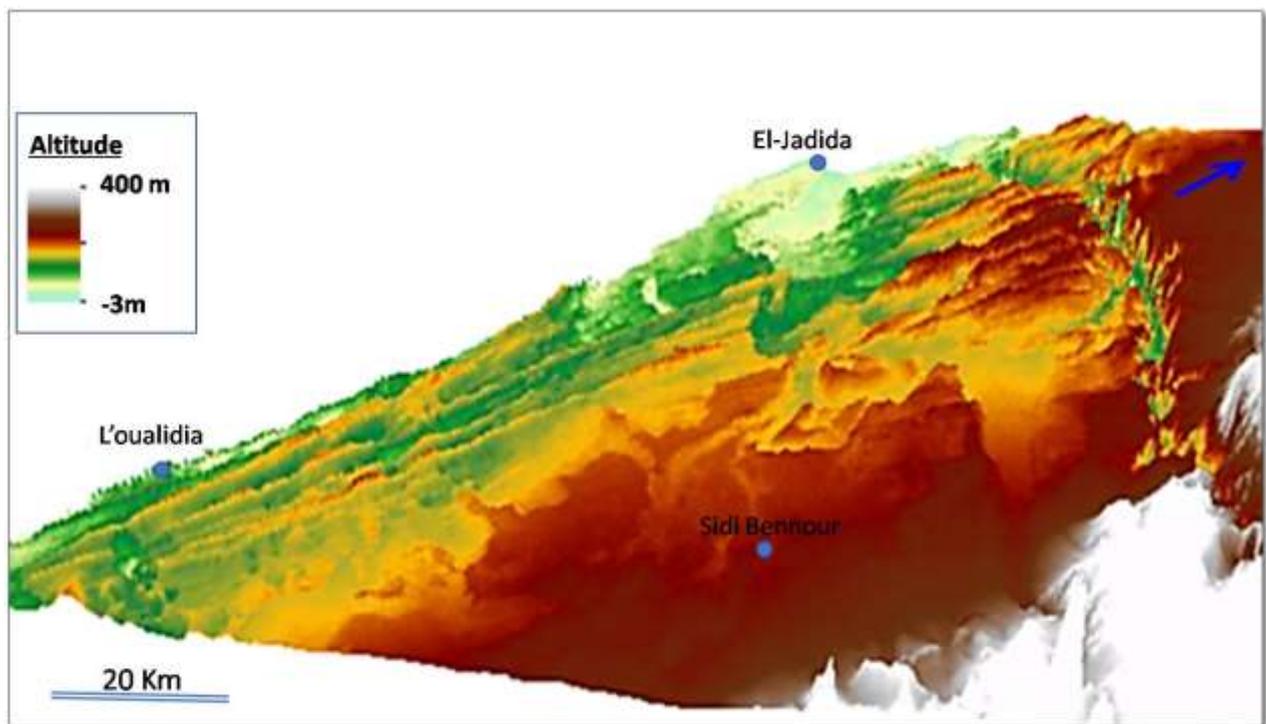


Figure 38: Modèle numérique de terrain en 2,5D.

Le couplage entre la visualisation 2,5D et les courbes de niveau générées nous a permis de digitaliser avec une grande précision les crêtes dunaires.

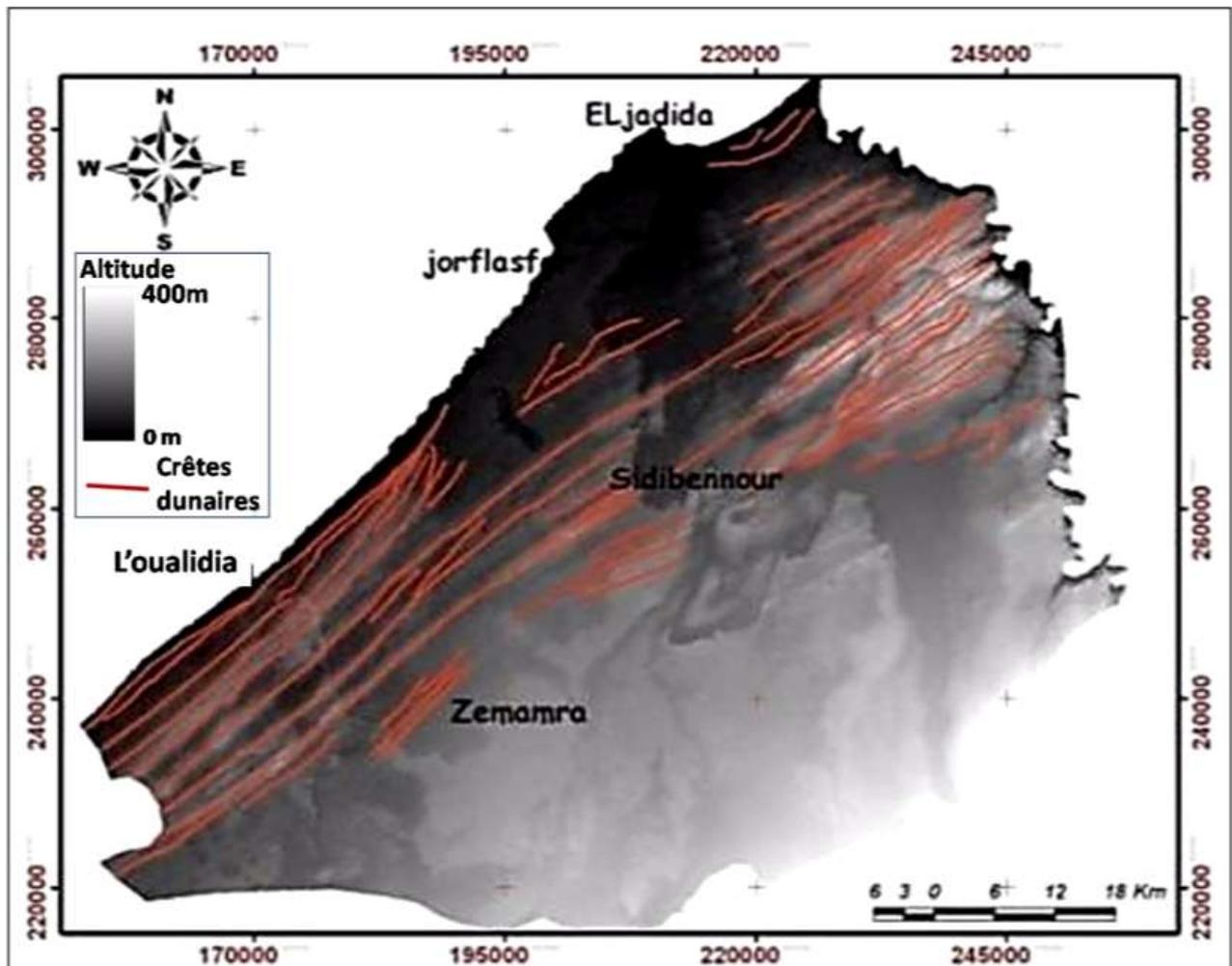


Figure 39: Disposition des crêtes dunaires

Les crêtes dunaires seront ainsi la base sur laquelle se fera l'analyse des directions des cordons dunaires.

3- L'établissement de la carte d'ombrage à partir du MNT :

La carte d'ombrage (Hillshade) (fig.40) indique l'hypothétique illumination d'une surface, donnée pour une source lumineuse. Elle permet donc d'accentuer les accidents topographiques selon l'altitude de la source qui illumine la surface (Azimut). Elle est utilisée en conjugaison avec le MNT pour indiquer la profondeur du terrain.

Selon les caractéristiques suivantes :

- un azimut de la source lumineuse de 315° ,
- un angle d'élévation de 45° ,
- une exagération de 5 fois.

Cette opération a permis d'aboutir à une carte d'ombrage où les variations morphologiques deviennent très distinguées.

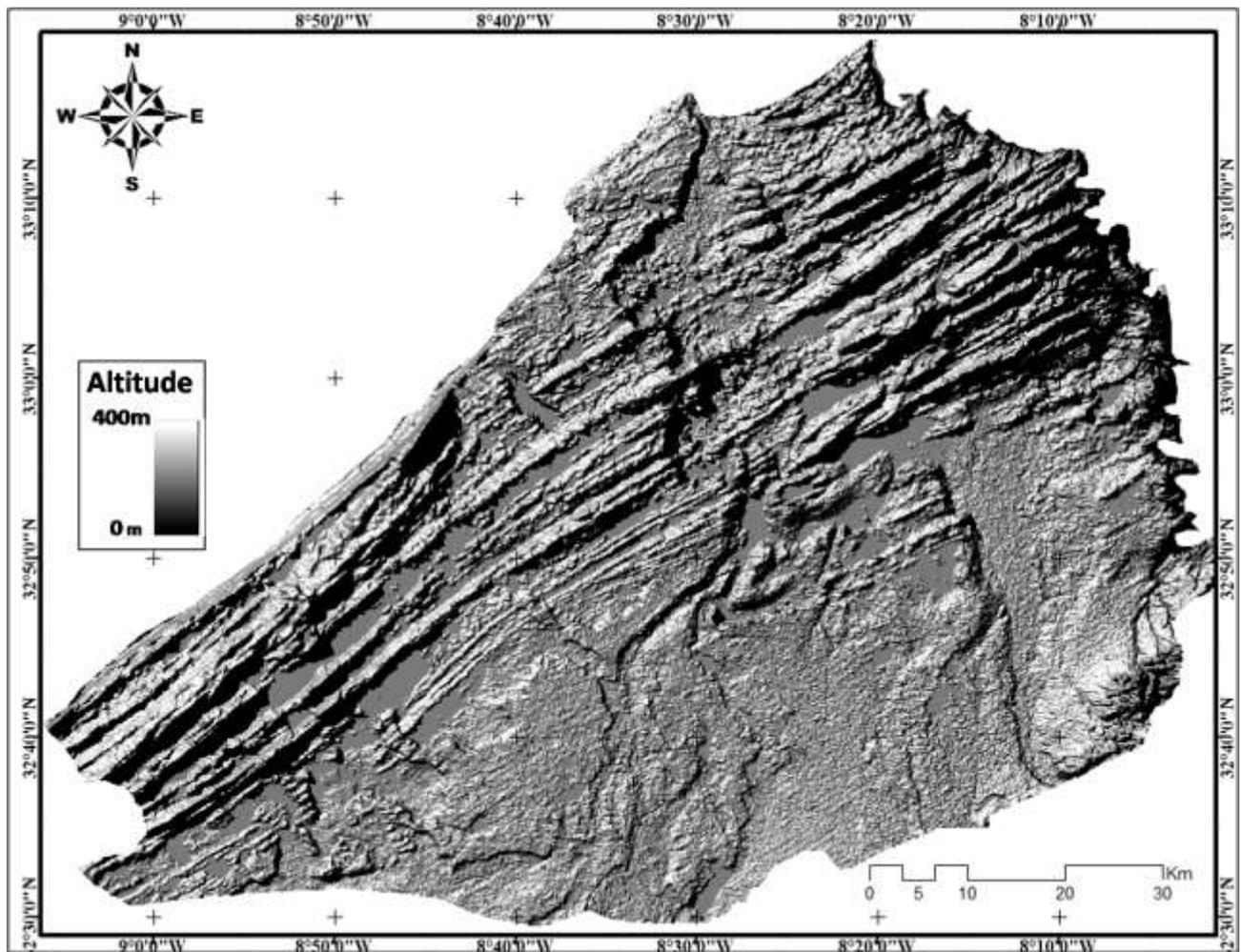


Figure 40: Carte d'ombrage "hillshade".

4 - Le drapage du MNT sur la carte d'ombrage :

Pour avoir une meilleure discrimination des différentes unités géomorphologiques et augmenter plus le contraste entre elles, on a drapé le modèle numérique de terrain transparent (50%) sur la carte d'ombrage (fig. 41).

Les variations morphologiques deviennent très distinguées cela augmente la précision de nos observations et facilite l'analyse et le suivi spatial de chaque unité.

Sur cette carte (fig.41) les unités géomorphologiques sont nettement distinctives et très bien individualisées, on distingue ainsi les limites, l'étendue et l'ampleur de chacune d'entre elles.

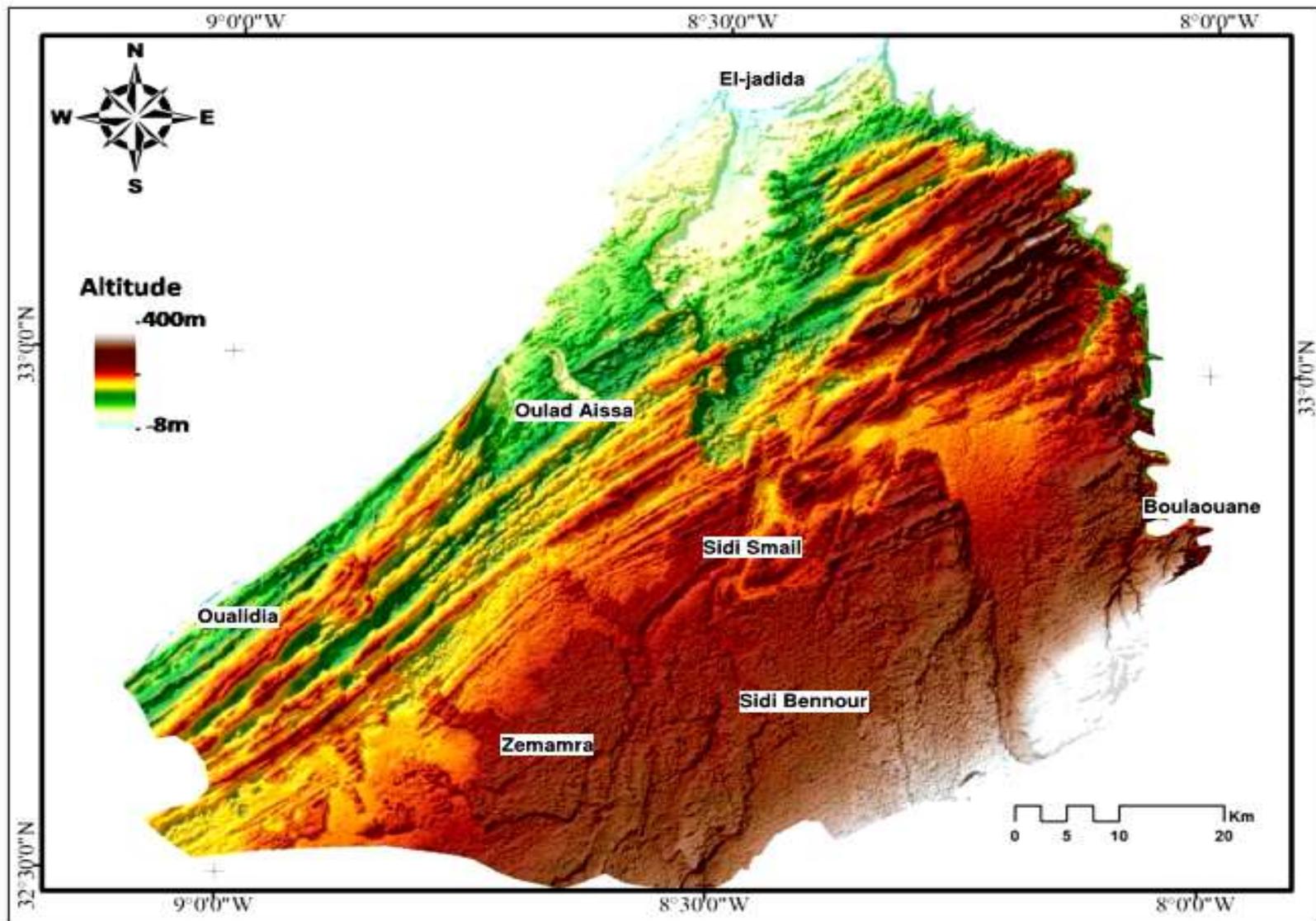


Figure 41: Combinaison de la carte d'ombrage et le MNT.

5- Pour étudier les variations latérales des cordons dunaires, 12 profils topographiques ont été réalisés (fig. 42). Ces profils, perpendiculaires à la côte actuelle, nous ont permis de suivre les changements topographiques du Sahel et nous renseigner sur la forme, l'altitude et l'ampleur des dunes.

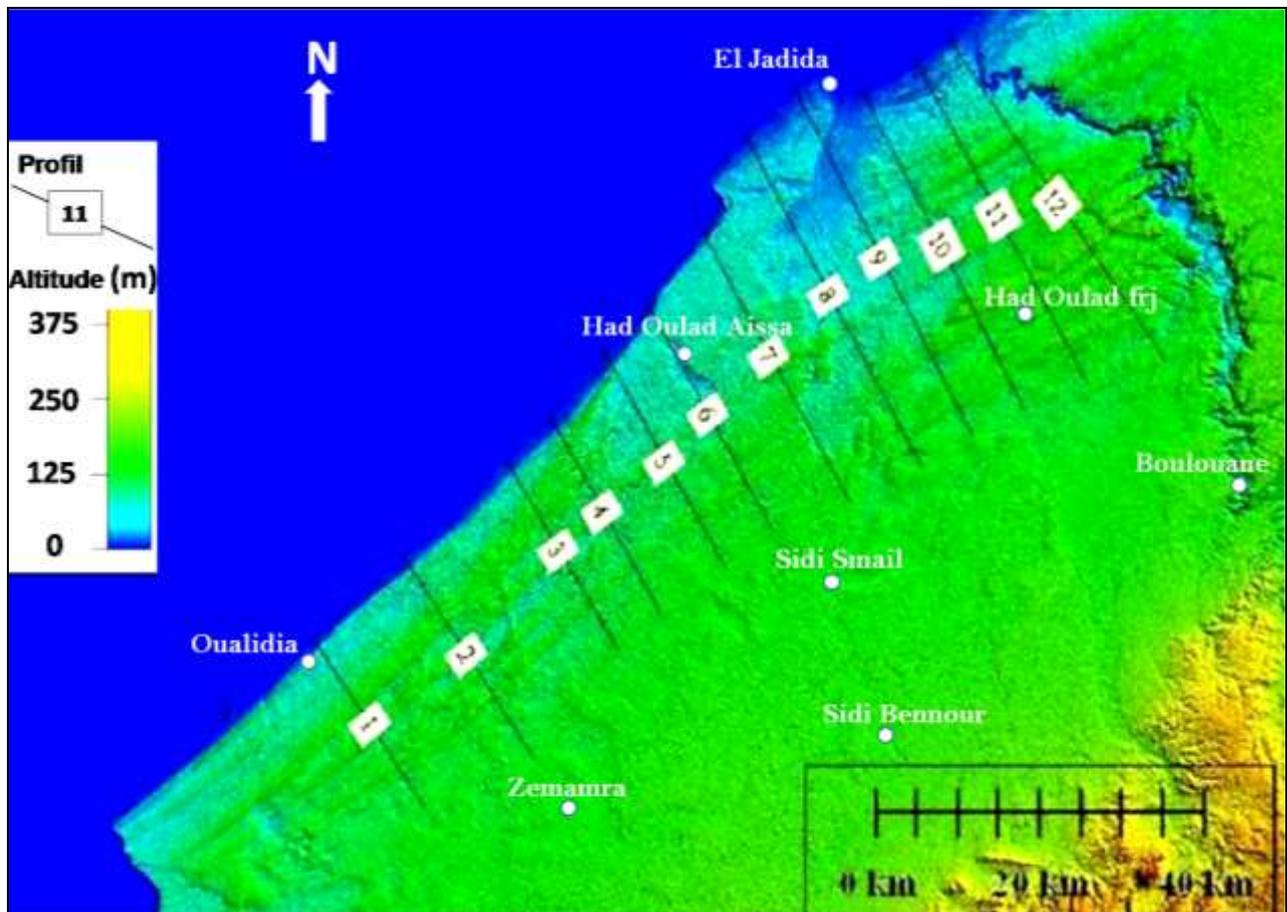


Figure 42: Localisation des 12 profils topographiques effectués.

Les profils sont réalisés à partir du MNT de la région. Le choix de l'emplacement de ces profils est effectué selon les variations morphologiques observées sur le MNT ou décrites dans les travaux antérieurs.

Une exagération d'élévation de 10 fois a été attribuée à ces profils pour augmenter les contrastes du relief et faciliter leur lecture et leur analyse.

Les profils sont numérotés de 1 à 12, du Sud vers le Nord (fig.42).

La figure 43 résume les différentes étapes de la méthodologie qu'on a adoptée pour l'étude géomorphologique de la région :

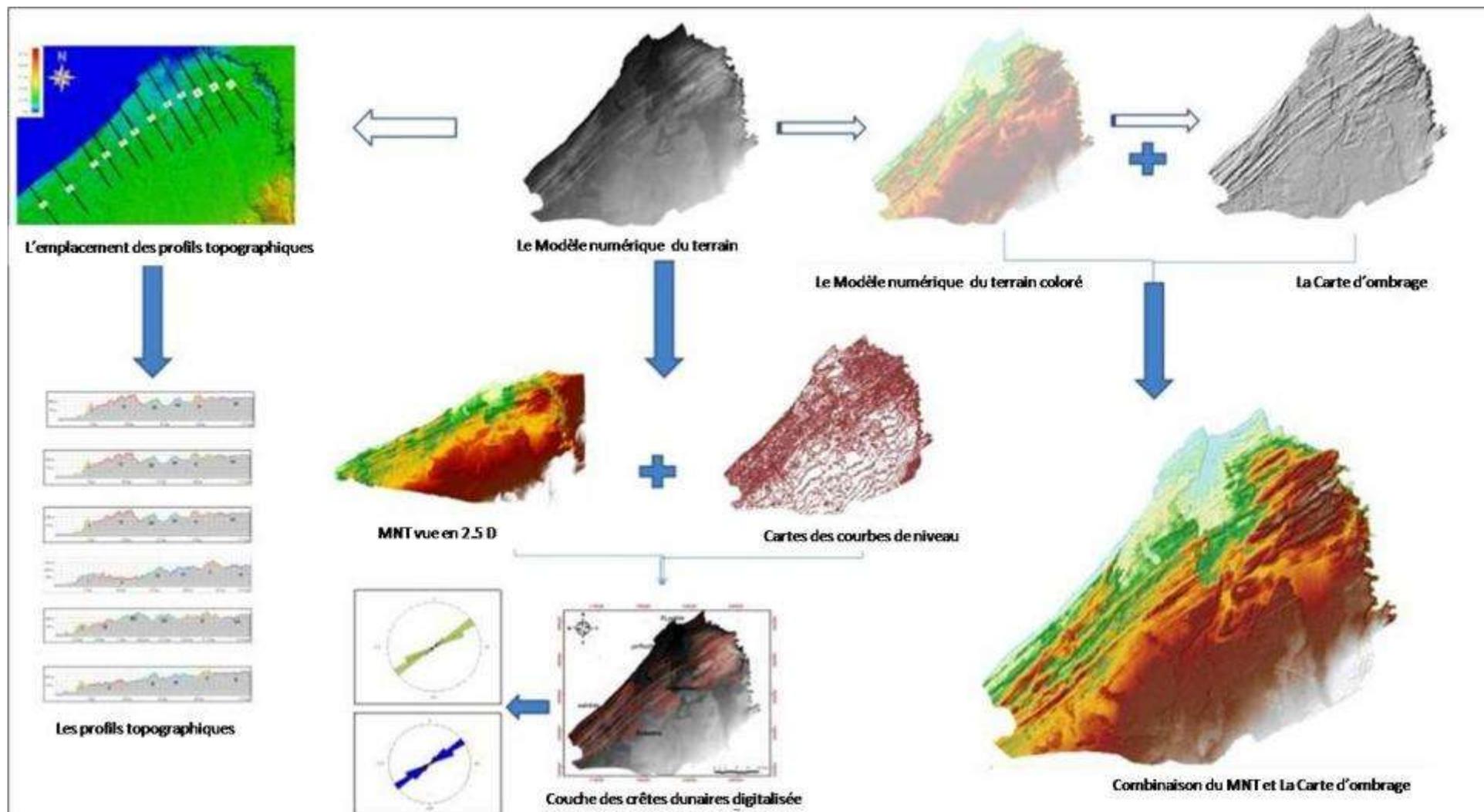


Figure 43: Méthodologie adoptée pour étudier la géomorphologie de la région.

III.2 Etude des cordons dunaires :

Le suivi des dunes le long du Sahel nous a permis de distinguer trois zones (en fonction de l'aspect général): la zone n°1 (fig.44) entre Oualidia et Had Oulad Aissa au Sud du Sahel, la partie du Sahel central zone n°2, (fig.44) entre Had Oulad Aissa et la ville d'El-Jadida et la troisième zone (fig.44) qui correspond à l'arrière-pays de l'Haouzia.

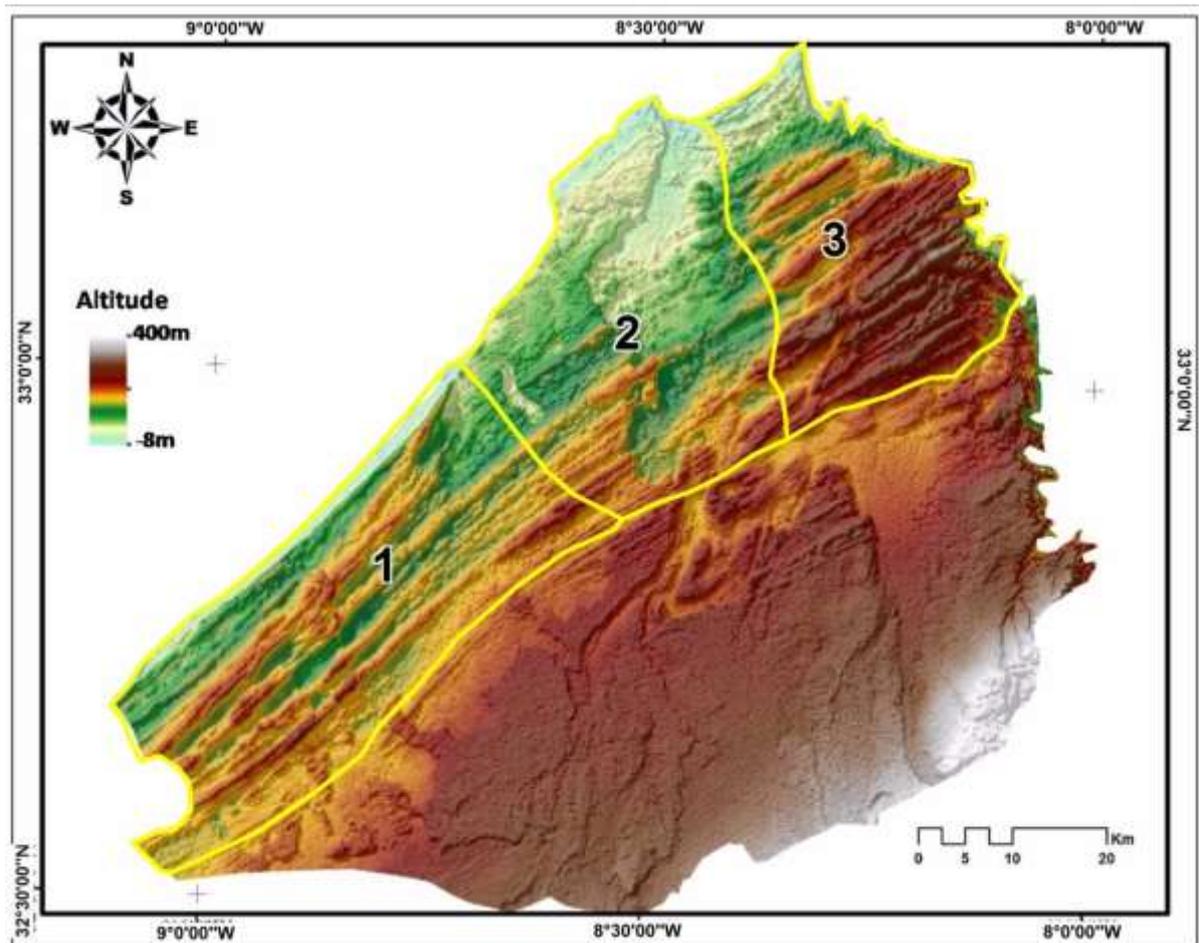


Figure 44: Localisation des trois zones géomorphologique du Sahel-Doukkala

III.2.a Zone "1" du Sud entre Oualidia et Had Oulad Aissa:

La carte (fig.45) montre que cette partie du Sahel est constituée essentiellement d'alignements de cordons dunaires, les crêtes dunaires forment un ensemble d'ondulation dont la longueur est de plus que 60 Km.

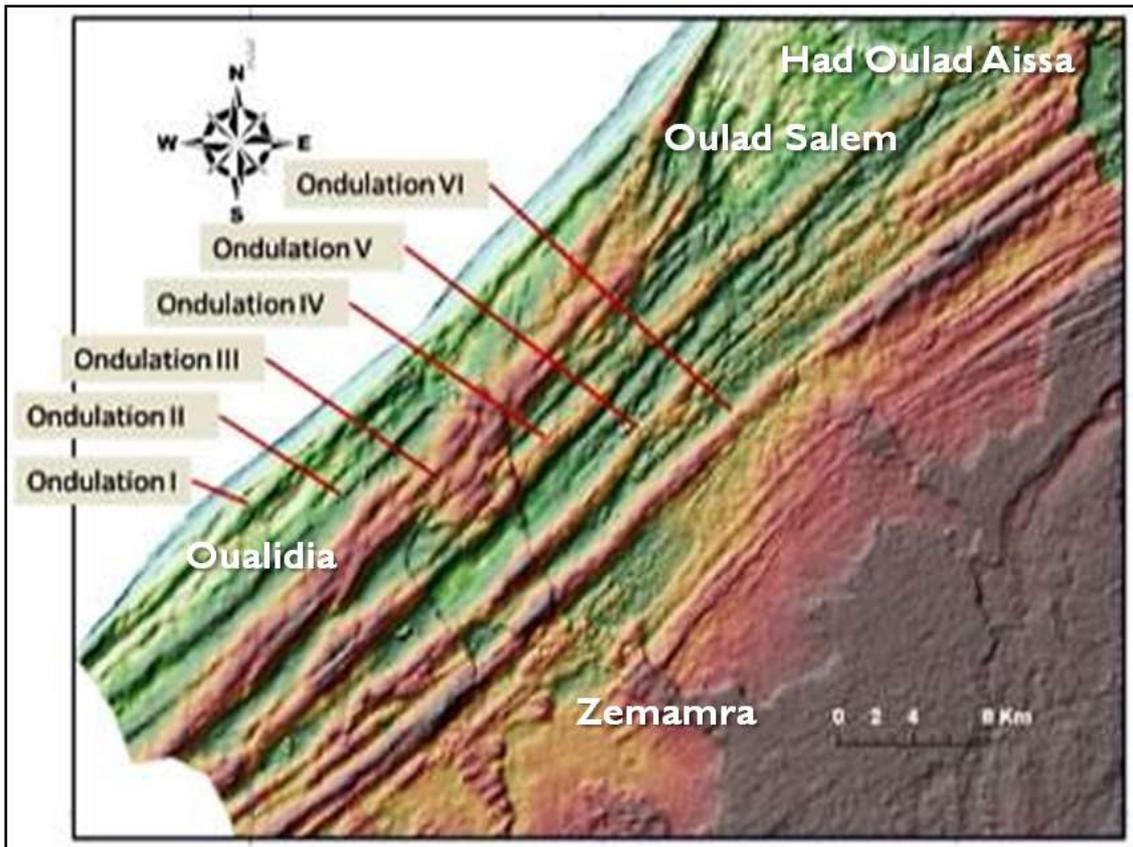


Figure 45: Organisation des cordons dunaires au Sud-Ouest du Sahel.

Direction des cordons dunaires.

Les différentes directions des crêtes anticlinales de cette zone (reparties sur un cercle subdivisé en secteurs de 10°) montre une dominance de directions comprises entre N50 et N60; et l'existence d'autres directions moins importantes comprises entre N40 et N50 et entre N60 et N70.

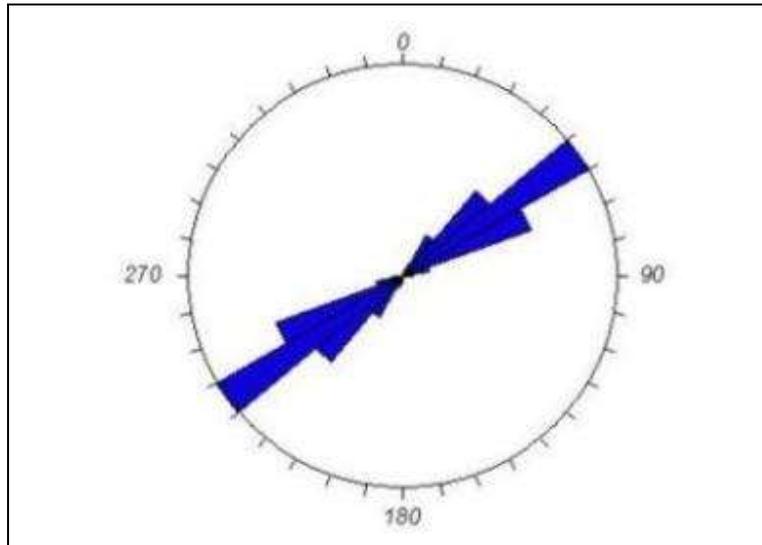


Figure 46: Diagramme de répartition des directions des cordons dunaires au Sud du Sahel.

Organisation des cordons dunaires :

Dans ce secteur, la répartition du complexe dunaire, la forme des dunes et leur nombre n'est pas uniforme du Sud vers le Nord.

Ces cordons dunaires s'organisent en six ondulations principales : I, II, III, IV, V et VI (fig.45).

- L'ondulation " I "est séparée de l'océan par une falaise morte attribuée à l'Ouljien (Gigout, 1956). Elle s'étend sur 72 km depuis le Cap Cantin jusqu'au Had Oulad Aissa et présente une largeur étroite au niveau de ses extrémités. Sa partie centrale ne dépasse pas 4,7 Km de large.
Au niveau de Had-Oulad-Aissa la direction de cette dune s'infléchit vers l'océan avant de disparaître.
- L'ondulation " II "est presque parallèle à la première ; mais au niveau de Douar Oulad-Salem elle la rejoint pour ne faire qu'une seule.
Les altitudes de ces deux premières ondulations varient entre 50 m et 100 m (profils n° 1, 2, 3,4 et 5).
- L'ondulation " III " est d'une grande ampleur, au Sud elle englobe deux cordons dunaires dont les altitudes varient entre 125 m et 130 m (profil n°1), et au Nord elle est encore plus développée puisqu'elle regroupe trois petites collines éoliennes dont les sommets montrent approximativement la même altitude, variant entre 120 m et 125 m (coupe n°2, 3, 4).

La longueur de cette troisième ondulation est de 70 km, et sa largeur, contrairement aux autres cordons dunaires, n'est pas uniforme puisqu' au Sud elle est réduite "4 km" (profil n°1) par

rapport au Nord (près de Had-Oulad-Aissa) où sa largeur atteint environ 8 km (profil n°5).

Au niveau de Had-Oulad-Aissa on constate la disparition de ces trois précédentes ondulations, seuls quelques vestiges de ces dunes (altitudes ne dépassant pas 75 m) sont enregistrés.

- L'ondulation " IV " est la plus longue (124 Km) depuis Cap Cantin au Sud jusqu'à Oued Oum Rabia au Nord, les premiers 80 km sont orientés N 55 mais au niveau de Sidi Bou-Knadel (X : 547 167 ; Y : 365 331) elle se courbe légèrement vers le Sud pour s'orienter N 65°.

Sa largeur ne dépasse pas 3,5 km et les altitudes enregistrées sont aux alentours de 125 m, elle est plus au moins régulière dans ce secteur.

- L'ondulation " V " comme la quatrième ondulation s'étale sur une longue distance mais elle disparaît au niveau du couloir d'El-Jadida avant de réapparaître au niveau de l'arrière-pays de l'Haouzia.

Ce cordon, de grande envergure, est composé de plusieurs dunes dont les altitudes enregistrées dépassent les 125 m. Ces dunes sont séparées par des dépressions inter-dunaires importantes qui sont le siège d'une sédimentation d'alluvions.

Description des profils :

Dans ce secteur (entre L'Oualidia et Had Oulad Aissa) nous avons effectué 6 profils (fig.42).

- Le premier profil est situé entre les points (X1 : 313470 et Y1 : 119025) ; (X2 : 30816 et Y2 : 118172), il s'étale sur les deux cartes topographiques au 1/50000 de Tnin-Gharbia et Cap Cantin, sur 30 km.

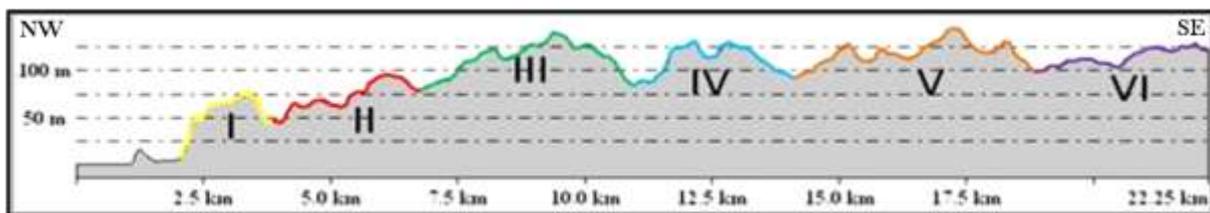


Figure 47: Profil n°1 (exagération est de 10 fois)

Après la falaise morte façonnée par le stationnement marin « Ouljienne », on retrouve, de l'océan vers le continent, les ondulations I ; II ; III ; IV ; V ; VI. (Tableau 9) alternant avec des dépressions inter-dunaires.

Tableau 9: Comparaison des altitudes et des largeurs pour chaque ondulation rencontrée au niveau du profil n°1

Ondulation	Altitude (m)	Largeur (Km)
I	75	2
II	97	2.7
III	130	4
IV	125	3
V	130	5
VI	125	2

Chacune de ces ondulations renferment une série de dunes successives, l'ensemble donne naissance à un complexe dunaire littoral.

Les ondulations III et V sont les plus larges et les plus complexes étant donné qu'elles englobent respectivement (dans ce secteur) 4 et 5 dunes.

Le deuxième profil (n° 2) est localisé entre les points (X1 :323185 ; Y1 :118149 & X2 : 317551 ; Y2 : 117395), il s'étale sur une distance de 27 km.

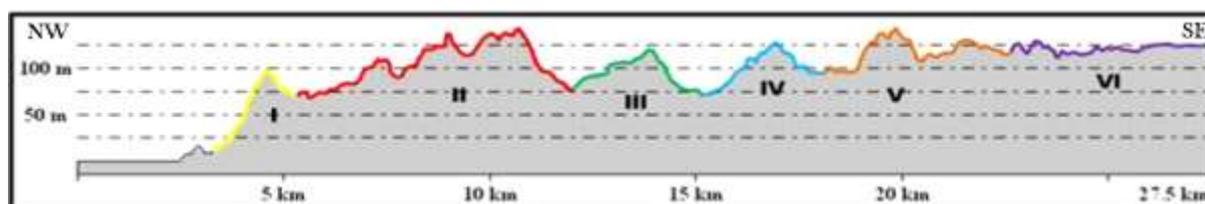


Figure 48: Profil topographique n°2

On rencontre six ondulations dont les altitudes et les largeurs varient comme suit :

Tableau 10: Comparaison des altitudes et des largeurs pour chaque ondulation rencontrée au niveau du profil n°2

Ondulation	Altitude(m)	Largeur (Km)
I	100	2
II	130	10
III	123	7
IV	125	5
V	130	4
VI	125	12

Dans cette partie, la deuxième ondulation est la plus large et présente 3 dunes dont les altitudes passent de 100 m à 130 m.

La VI ondulation est la plus érodée, elle est presque plane.

- Le troisième profil (n° 3) est localisé entre les points (X1 :319203 ; Y1 :118507 & X2 : 314221 ; Y2 : 117771), il s'étale sur une distance de 20km dans le continent.

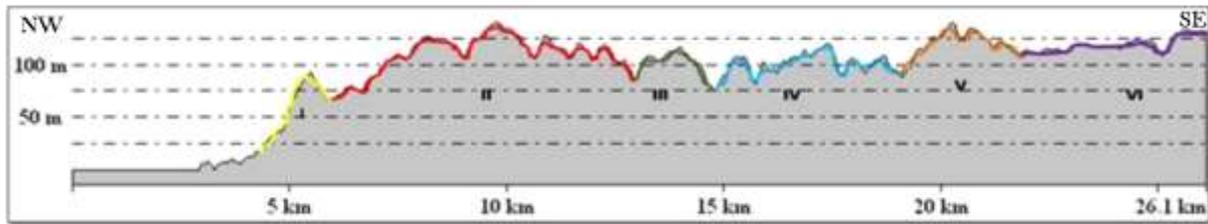


Figure 49: Profil topographique n°3

Au niveau de ce profil ; la deuxième ondulation est la plus large et la plus importante, elle renferme plusieurs dunes de différentes tailles. Dans cette partie les dépressions interdunaires ne sont pas assez profondes.

Tableau 11 : Comparaison des altitudes et des largeurs pour chaque ondulation rencontrée au niveau du le profil topographique n°3

Ondulation	Altitude (m)	Largeur (Km)
I	75	2
II	130	7
III	130	3
IV	125	4
V	130	3
VI	125	5

Le quatrième profil (n° 4) est localisé entre les points (X1 : 317326 ; Y1 : 118657 & X2 : 312590 ; Y2 : 117891), il s'étale sur une distance de 25km dans le continent.

Comme au niveau du précédent profil la deuxième ondulation est la plus importante de point de vue largeur ampleur et altitude.

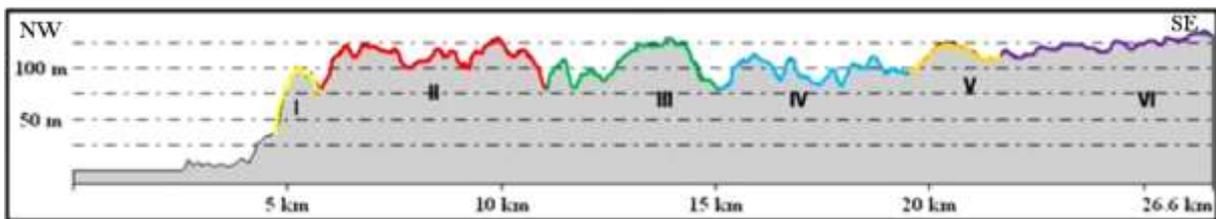


Figure 50: Profil topographique n°4

Tableau 12 : Comparaison des altitudes et des largeurs pour chaque ondulation rencontrée au niveau du profil topographique n°4

Ondulation	Altitude (m)	Largeur (Km)
I	75	2
II	125	5.2
III	130	3.7
IV	125	4
V	130	2
VI	125	5

- Le cinquième profil (n° 5) est localisé entre les points (X1 :315041 ; Y1 :118830 & X2 : 309981; Y2 : 118056), il s'étale sur une distance de 25 km dans le continent.

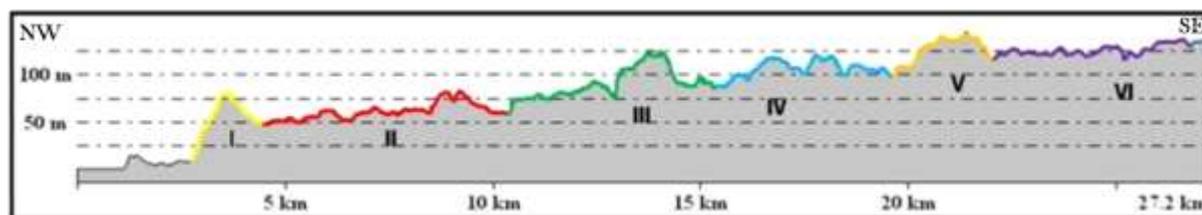


Figure 51: Profil topographique n°5

Tableau 13: Comparaison des altitudes et des largeurs pour chaque ondulation rencontrée au niveau du profil topographique n°5

Ondulation	Altitude (m)	Largeur (Km)
I	75	2
II	97	2.7
III	130	4.5
IV	125	3
V	130	5
VI	125	2

Il présente presque la même allure générale que celle des profils précédents, mais on remarque que l'ondulation II est plus érodée et dont les altitudes ne dépassent pas 50 m.

- Le sixième profil (n° 6) est localisée entre les points (X1 :313470 ; Y1 :119025 & X2 : 308160 ; Y2 : 118179), elle s'étale sur une distance de 29 km dans le continent.

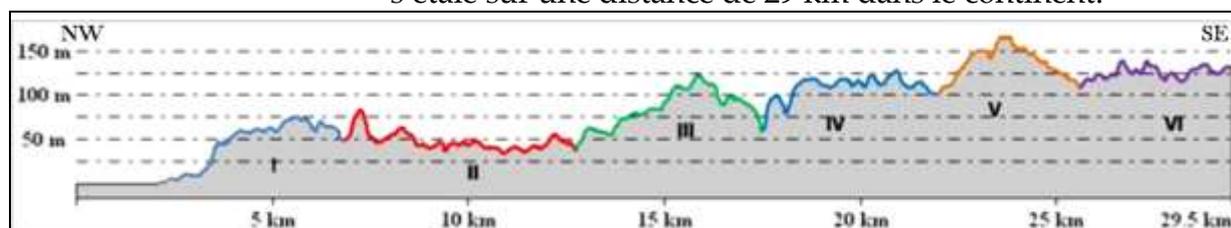


Figure 52: Profil topographique n°6

Dans la zone où ce profil a été effectué, on rencontre une longue dépression qui abrite un lac semi-permanent qui transforme l'allure général de l'ondulation II.

Tableau 14: Comparaison des altitudes et des largeurs pour chaque ondulation rencontrée au niveau du profil topographique n°5

Ondulation	Altitude (m)	Largeur (Km)
III	130	4.5
IV	125	3
V	130	5
VI	125	2

III.2.b Partie du Sahel entre Had-Oulad-Aissa et la ville d'El-Jadida :

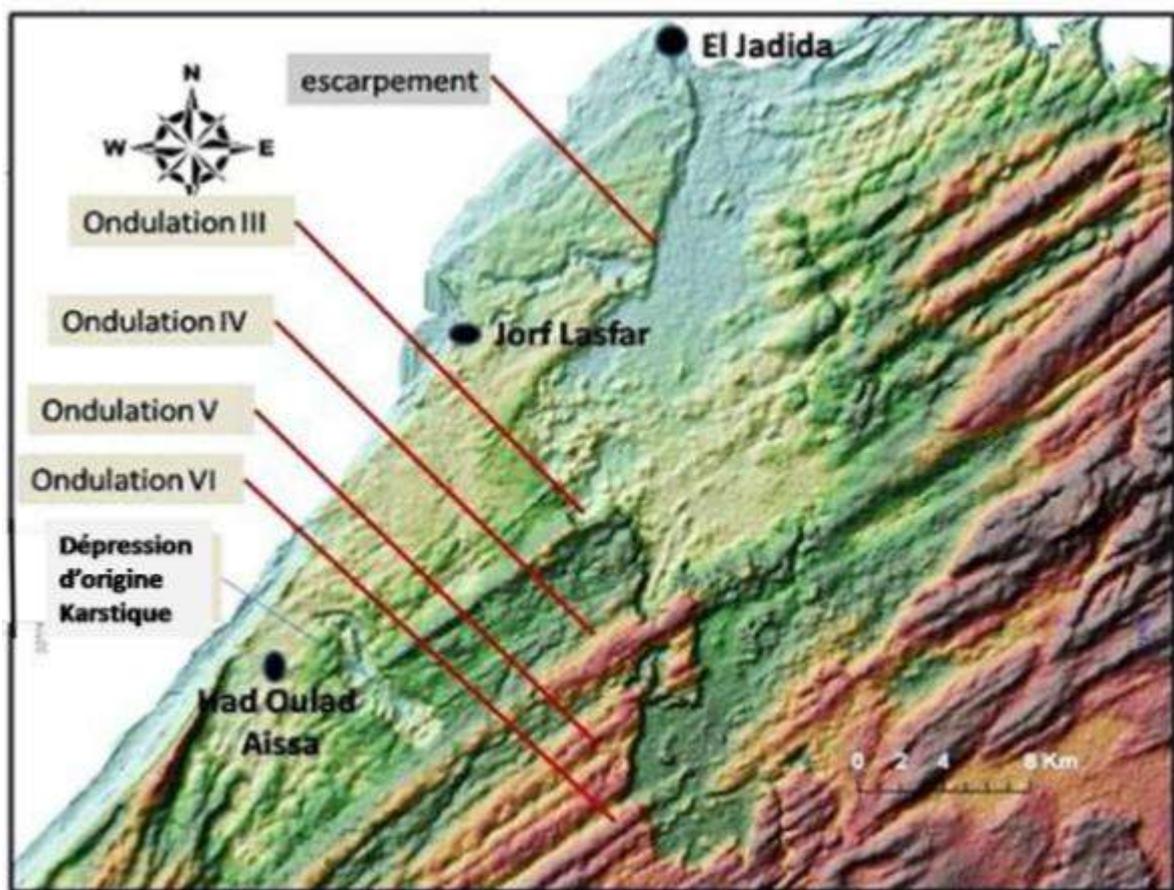


Figure 53: Géomorphologie de la partie du Sahel entre Had-Oulad-Aissa et la ville d'El-Jadida

Cette région présente deux unités morphologiques différentes :

- Entre Had-Oulad-Aissa et Jorf-Lasfar : Cette partie longue d'environ 15 km présente une morphologie différente du reste du Sahel, elle est marquée par l'absence de cordons dunaires sauf quelques vestiges, un effondrement large de plus de 5 km est enregistré à cet endroit.
- Entre Jorf-Lasfar et la ville d'El-Jadida : c'est le plateau du Crétacé d'El-Jadida ; il est caractérisé essentiellement par des falaises mortes et l'absence de cordons dunaires.

Les cordons dunaires n'existent qu'au niveau de l'arrière-pays du plateau d'El-Jadida à environ 15 km du trait de côte.

Direction des cordons dunaires

Les statistiques des directions des crêtes dunaires (Fig.54) montre une dominance des directions dunaires comprises entre

N50 et N60 en premier lieu; en deuxième lieu les directions comprises entre N60 et N70.

On enregistre donc une légère déviation de 10° degré vers l'Est.

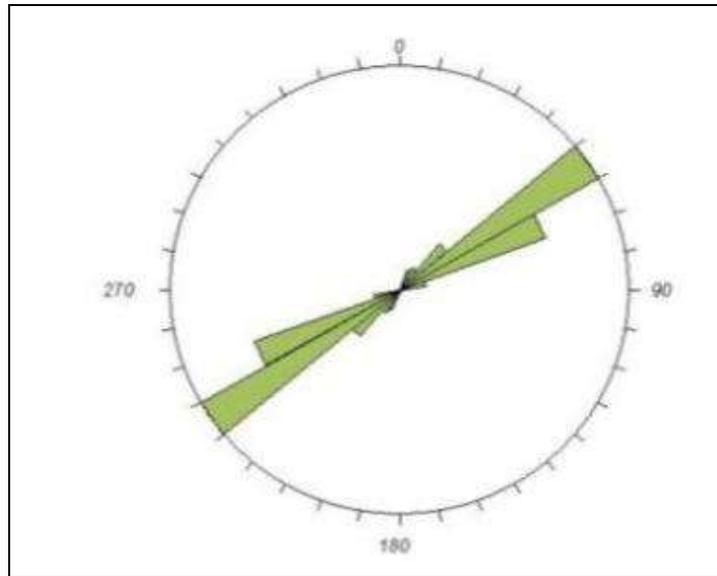


Figure 54: Digramme de répartition des directions des cordons dunaires dans la zone littorale comprise entre Had-Oulad-Aissa et la ville d'El-Jadida

Organisation des cordons dunaires :

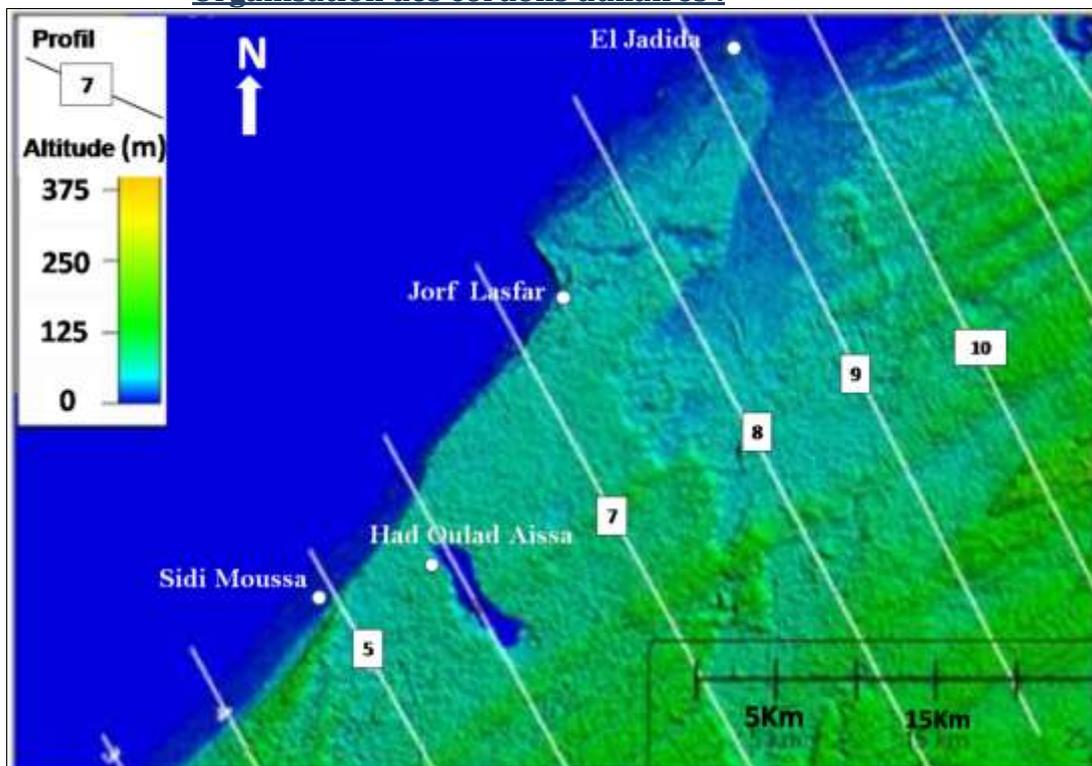


Figure 55: Localisation des profils n°7, n°8 et n°9

Entre Had-Oulad-Aissa et Jorf-Lasfar, le long des premiers 15 km, on a seulement quelques vestiges de cordons dunaires.

Après, on rencontre une succession d'ondulations qui sont la continuité des ondulations III, IV, V, VI.

L'absence de cordons dunaires peut être expliquée par la présence du plateau du Crétacé qui était un haut fonds au moment de la formation des anciens cordons dunaires.

Description des profils :

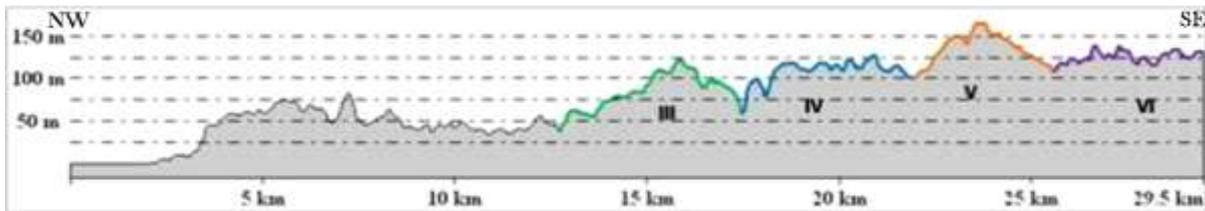


Figure 56: Profil topographique n°7.

Le profil topographique n°7 effectué dans ce secteur entre les points (X1 :313470 ; Y1 :119025 & X2 : 308160 ; Y2 : 1181790) montre au niveau des premiers 15km des altitudes ne dépassant pas 75 m.

Les ondulations qui sont bien individualisées sont la III, IV, V et VI.

Tableau 15: Comparaison des altitudes et des largeurs pour chaque ondulation rencontrée au niveau du profil topographique n°7

Ondulation	Altitude (m)	Largeur (Km)
III	125	5
IV	125	4.5
V	160	3
VI	125	2.5

Ce profil traverse une grande dépression sur environ 5 km, cette dépression sépare la falaise ouljienne de l'ondulation III.

➤ Le profil topographique n° 8 est localisé entre les points (X1 :301418 ; Y1 :119906 & X2 : 309981 ; Y2 : 118772), il s'étale sur une distance de 25 km.

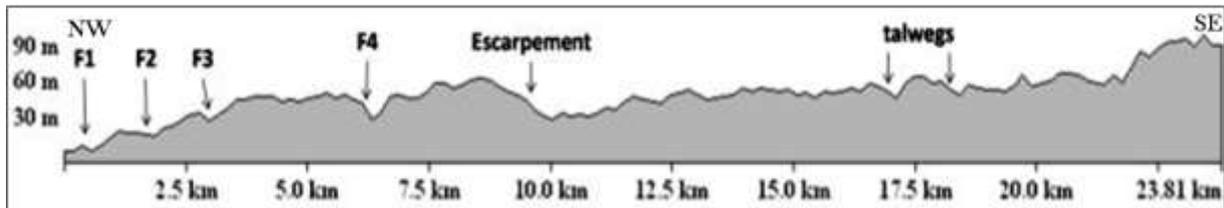


Figure 57: Profil topographique n°8 (F1 : falaise Ouljienne, F2 : falaise Haronienne, F3 : falaise Anfatiennne, F4 : falaise Maarifienne ?).

Au niveau de ce profil qui traverse le plateau du Crétacé et le couloir d'El-Jadida la morphologie est différente de celle du reste de la région :

Au niveau du plateau du Crétacé (les premiers 10 km du profil) on rencontre les trois falaises mortes (F1, F2, F3) décrites par Gigout (1951) dont les altitudes respectives sont 5 m, 20 m et 30 m. La quatrième falaise F4 pourrait être une falaise Mâarifienne (Laaziz, 2005)

Après un escarpement, on rencontre une morphologie presque plate traversée par des talwegs, c'est le couloir d'El-Jadida.

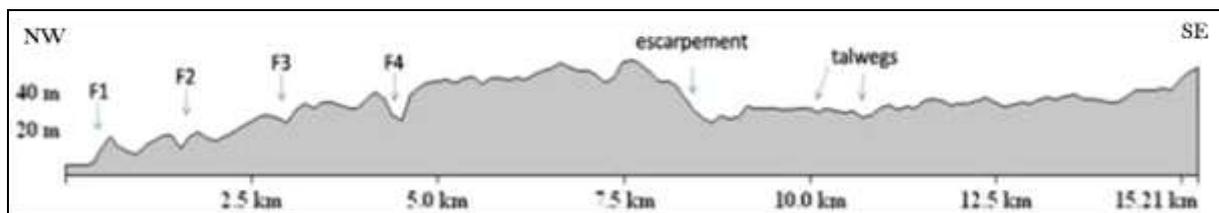


Figure 58: Profil topographique n°9 (F1 : falaise Ouljienne, F2 : falaise Haronienne, F3 : falaise Anfatiennne, F4 : falaise Maarifienne ?).

- Le profil topographique n°9 est localisé entre les points (X1 :308000 ; Y1 :119647 & X2 : 304991; Y2 : 119188), il s'étale sur une distance de 15 km dans le continent. On retrouve les mêmes organisations avec la succession de quatre falaises au niveau du plateau du Crétacé, après l'escarpement on rencontre les plates formes du couloir d'El-Jadida. Sauf que dans cet endroit le plateau du Crétacé d'El-Jadida ne dépasse pas 8 km.

Organisation des falaises du plateau d'El-Jadida :

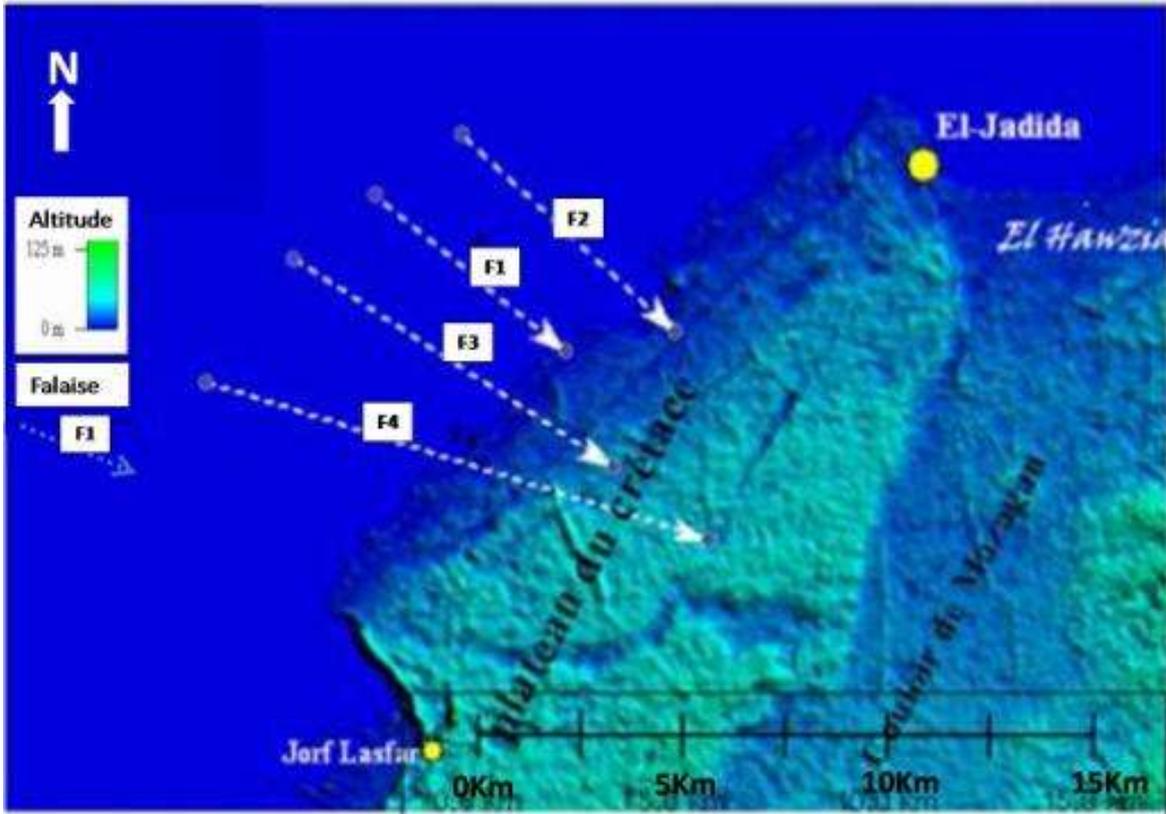


Figure 59: MNT du plateau d'El-Jadida, (F1 : falaise Ouljienne, F2 : falaise Haronienne, F3: falaise Anfatienne, F4 : falaise Mâarifienne).

Cette partie rocheuse est caractérisée par l'absence de cordons dunaires. Le MNT (fig. 59) nous expose clairement la succession des falaises qui forment le plateau du Crétacé d'El-Jadida décrite depuis Gigout (1956) ainsi que la quatrième falaise F4 qu'on a évoqué pour la première fois en 2005 par corrélation avec les plates formes du couloir d'El-Jadida et le système dunaire qui pourrait correspondre à la falaise Mâarifienne.

III.2.c Arrière-pays de la baie de l'Haouzia :

Direction des cordons dunaires.

Les directions des crêtes dunaires dans l'arrière-pays de la baie de l'Haouzia montrent une dominance de directions dunaires comprises entre N40 et N50, ainsi que d'autres directions moins importantes comprises entre N50 et N60.

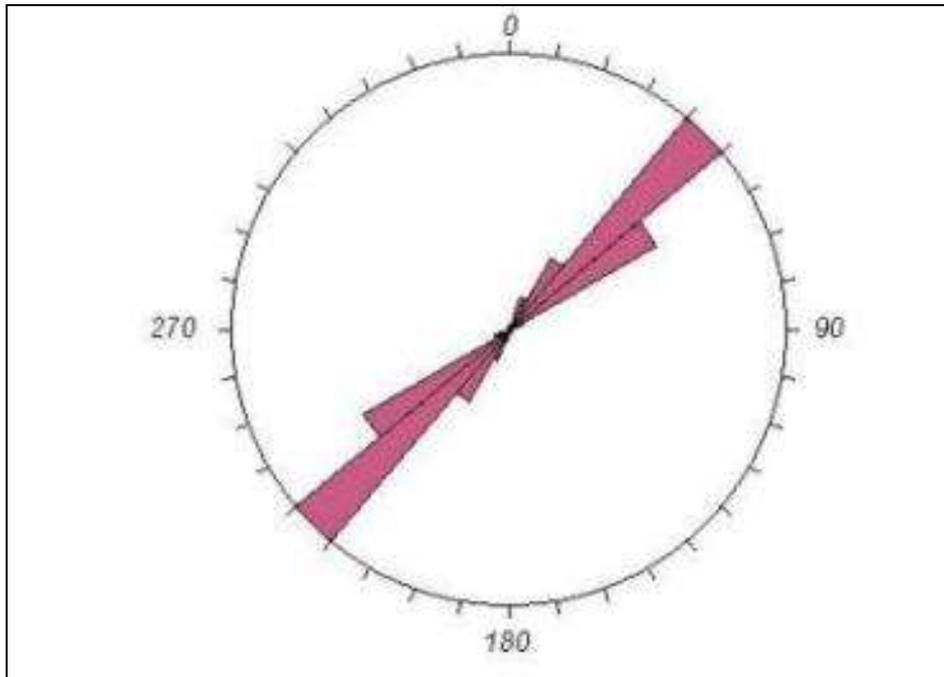


Figure 60: Digramme de répartition des directions des cordons dunaires dans la zone littorale comprise entre Had-Oulad-Aissa et la ville d'El-Jadida.

Organisation des cordons dunaires :

Cette partie est la plus large du Sahel, elle est marquée par une abondance de dunes très développées et condensées, les premières dunes non consolidées (dunes blanches) ne sont pas rectilignes forment un demi concave vers l'océan, les dunes consolidées trop développées présentent des largeurs assez importantes.

On rencontre à nouveau la succession de six dunes décrites dans le Sud du Sahel. Ces dunes s'étalent sur des longueurs variables depuis le couloir d'El-Jadida jusqu'au Oued Oum Rabia ; plus on s'éloigne de la côte plus leur largeur augmente.

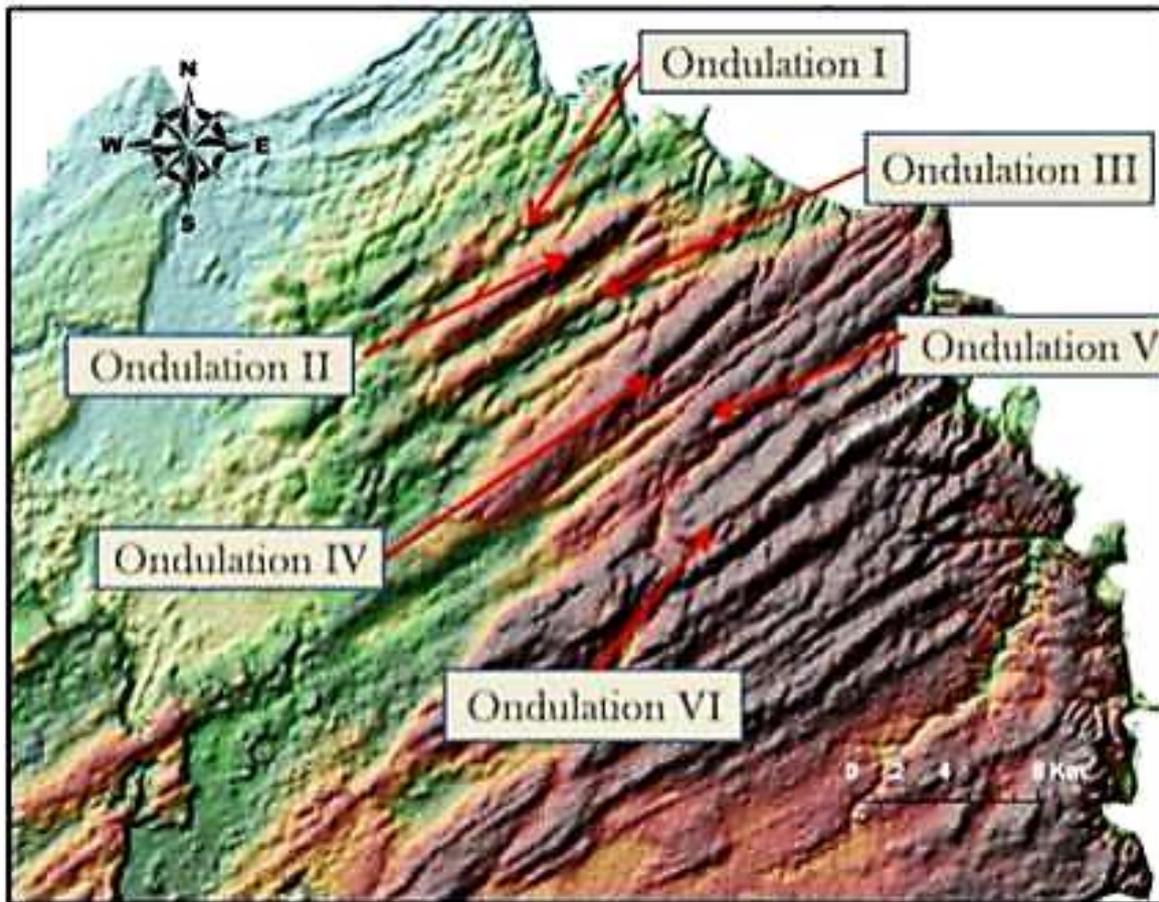


Figure 61: Carte d'ombrage présentant les six ondulations de l'arrière-pays de l'Haouzia.

La figure 61 montre la succession de six ondulations consolidées :

- L'ondulation " I "est séparée de la plage de l'Haouzia par un ensemble de dunes blanches, elle est rectiligne et moins développée que les autres ondulations, sa longueur est de 8 km.
- Les ondulations " II " et " III " sont parallèles entre elles et presque parallèles à la première, mais plus longues. Elles ne sont séparées que par une dépression inter-dunaire étroite.
- L'ondulation " IV " est d'une grande ampleur, elle englobe trois cordons dunaires formant un "Z" sur une largeur de 4 km :
 - Le premier cordon est étroit sa largeur ne dépasse pas 1 km et orienté N55.
 - Le deuxième cordon le plus large (1 km de largeur) et le plus élevé, sa direction est différente du premier cordon N60.

- Le troisième cordon comme le premier étroit et moins élevé, il est orienté N55 et séparé du deuxième cordon par une dépression en forme de "V" puisque les deux cordons se croisent.
- L'ondulation " V " est plus large du côté de l'Oued Oum Rabia, s'étale sur une distance de 21 km. Elle est orientée N45.
- L'ondulation " VI" est orientée N60 et sa largeur ne dépasse pas 3,5 km, elle est composée de quatre dunes dont les altitudes enregistrées dépassent les 125 m. Ces dunes ne sont séparées que par des dépressions inter-dunaires réduites.

Description des profils :

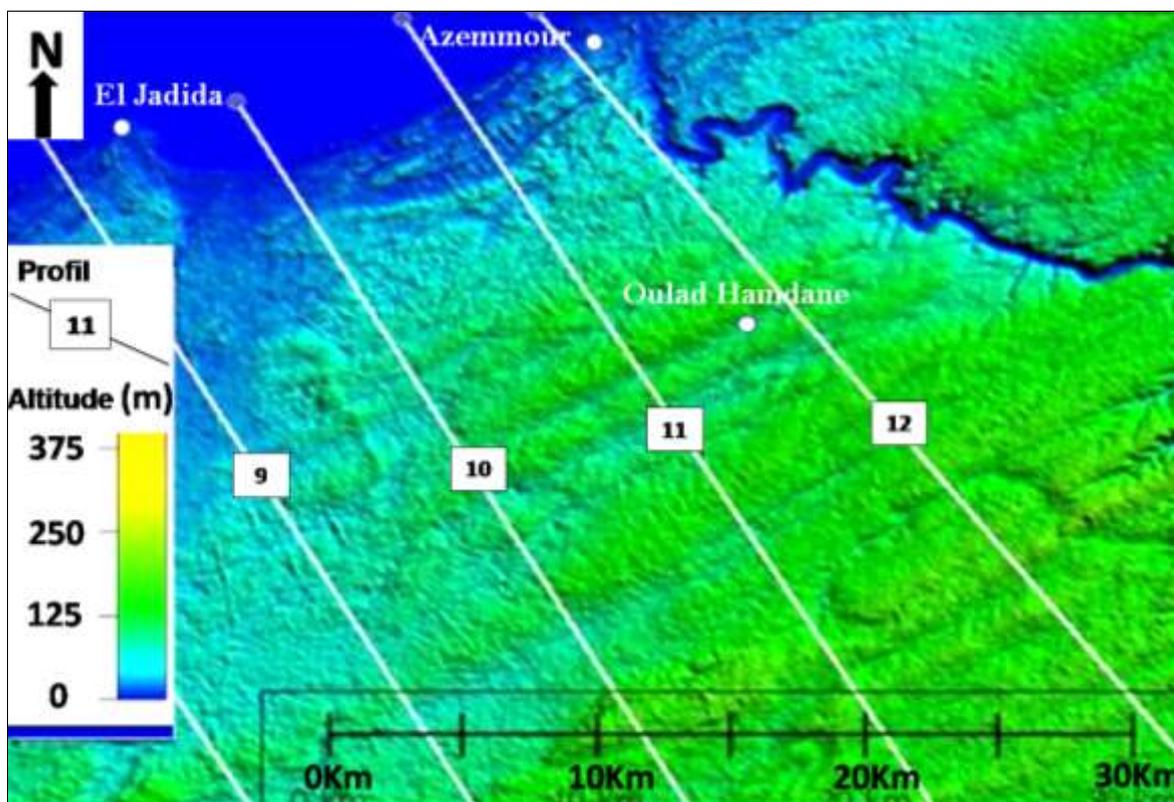


Figure 62: Localisation des profils 7, 8 et 9.

- Le premier profil de l'arrière-pays de l'Haouzia est le profil n°10, il est localisée entre les points (X1 :307321 ; Y1 :119727 & X2 : 300300 ; Y2 : 118515), sur une distance de 20 km dans le continent, il présente une succession de six cordons dunaires dont les altitudes augmentent de la mer vers le continent.

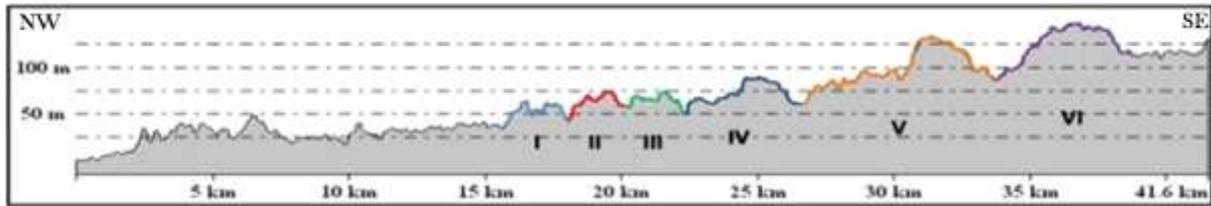


Figure 63: Profil topographique n°10.

- Le deuxième profil (profil n°11) de l'arrière-pays de l'Haouzia est situé entre les points (X1 :304820 ; Y1 :119751 & X2 : 298210 ; Y2 : 118592), il s'étend sur une distance de 40 km dans le continent. Les premiers 13 km correspondent à des dunes blanches, après on rencontre les dunes consolidées dont les altitudes augmentent de 50 m de la première ondulation jusqu'à 130 m enregistré au niveau de l'ondulation "VI".

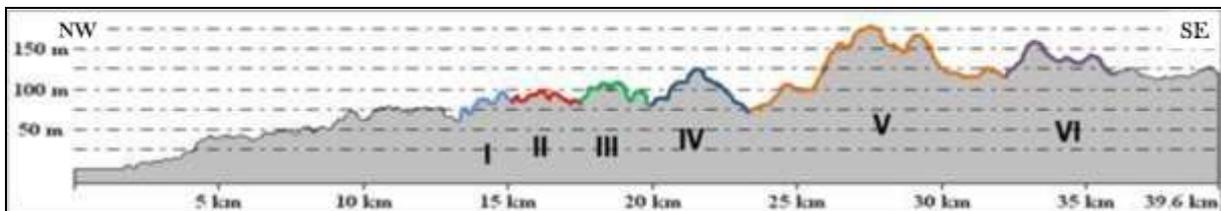


Figure 64: Profil topographique n°11

- Le dernière profil (n°12) est localisé entre les points (X1 :302640 ; Y1 :119836 & X2 : 295740 ; Y2 : 118693), il s'étale sur une distance de 39,5 km dans le continent.

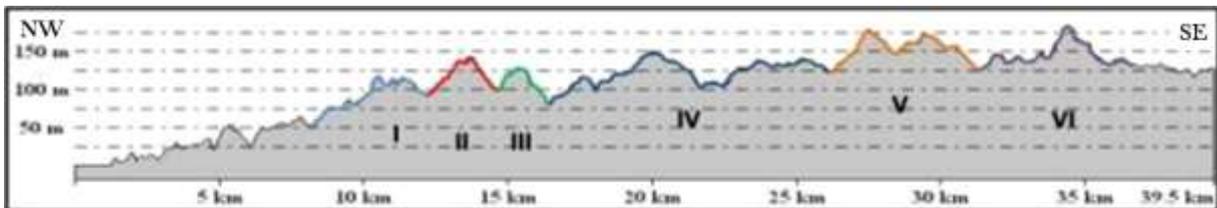


Figure 65: Profil topographique n°12

Les trois premiers cordons dunaires ne sont pas assez larges puisqu'ils ne dépassent pas 5km de large alors que leurs altitudes approchent 125 m. Cependant, les cordons IV, V et VI sont plus larges avec des dépressions inter-dunaires moins importantes.

Tableau 16 : tableau récapitulatif des cordons dunaires de la région des Doukkala.

Ondulations	Zone "1" : De l'oualidia et Had Oulad Aïssa				Zone "2" : De Had-Oulad-Aïssa à El-Jadida				Zone "3" : Arrière-pays de la baie de l'Haouzia			
	Altitude (m)	Largeur (Km)	Longueur (Km)	Direction	Altitude (m)	Largeur (Km)	Longueur (Km)	Direction	Altitude (m)	Largeur (Km)	Longueur (Km)	Direction
I	Entre 50 et 100	Entre 2 et 4.7	72	N50					Entre 50 et 100	Entre 2 et 2.5	8	N55
II	Entre 90 et 130	Entre 2.7 et 10	70	N50					Entre 75 et 125	Entre 1.5 et 2	12	N50
III	Entre 120 et 130	Entre 3 et 7	65	N50	Entre 125 et 130	5	25	N60	Entre 75 et 128	Entre 2.5 et 4	12	N50
IV	Entre 120 et 125	Entre 2 et 3.5	114	N50	Entre 120 et 125	4.5	40	N60	Entre 80 et 150	Entre 7 et 9.5	25	N55
V	Entre 125 et 130	Entre 2 et 4.5	120	N50	Entre 130 et 160	3	45	N60	Entre 125 et 200	Entre 5 et 10	21	N45
VI	Entre 100 et 125	Entre 2 et 4.5	120	N50	Entre 120 et 125	2.5	45	N60	Entre 150 et 175	Entre 2.5 et 3.5	26	N45

III.3 Conclusion

Cette étude détaillée de la région des Doukkala nous a permis de décrire avec une grande précision les grands traits géomorphologiques des trois zones naturellement distinctes.

Ainsi nous retenons que :

- ❖ Les directions des cordons dunaires ne sont pas uniformes du Nord vers le Sud :

Au Sud de Had-Oulad-Aïssa ils s'alignent parallèlement au rivage actuel (direction de N45), après on enregistre une petite déviation de 10° qui marque la zone de l'arrière-pays de Had Oulad Aïssa jusqu'à l'arrière-pays de la baie de l'Haouzia où les cordons dunaires retrouvent de nouveau la direction N45.

- ❖ En ce qui concerne l'organisation de ces cordons dunaires le long du Sahel des Doukkala, on peut retenir les éléments suivants :
 - Au Sud - Ouest entre Had-Oulad-Aïssa et Oualidia, sur une largeur de 20 Km, les cordons dunaires se présentent comme un alignement régulier de crêtes dunaires, mais en se rapprochant de Had-Oulad-Aïssa on perd cette régularité puisque les crêtes s'entrecroisent (surtout les cordons dunaire I et II) et les altitudes deviennent de plus en plus réduites ainsi que la largeur des cordons dunaires.
 - Au plateau crétacé de Mazagan, sur 10 Km de largeur, on enregistre une morphologie complètement différente du reste du Sahel, avec une surface remarquablement plane (absences de cordons dunaires) et la présence d'une succession de falaises attribuées au Quaternaire.

- A l'arrière-pays de la baie de l'Haouzia, entre l'Oued Oum Rabia et le couloir d'El-Jadida (Golf de Mazagan), sur une largeur de 50 Km, les crêtes dunaires se suivent sans interruption, parallèles entre elles et parallèles à la côte. Les plus loin de la côte sont les plus larges et les plus anciennes

Les différences enregistrées pour ces trois unités géomorphologiques (direction et organisation) sont dues principalement au comportement de chaque unité vis-à-vis du dynamisme des fluctuations marines considérées comme l'origine de cette morphologie particulièrement régulière du Sahel :

- Au niveau du plateau du Crétacé les stationnements marins se manifestaient par des zones d'érosion ce qui se traduit sur le terrain par des falaises.
- Au niveau de la baie d'El Hawzia et au Sud de Had-Oulad-Aissa les stationnements marins se traduisant par des zones d'accumulation d'où l'édification de l'ensemble des paléo-cordons qui caractérisent la région.

La géomorphologie du Sahel Doukkala est donc en relation directe avec les fluctuations marines du plio-quaternaire et la paléo-géomorphologie qui a gouverné lors de la mise en place de chaque cordon dunaire et la quantité des apports sédimentaires.

L'absence de cordons dunaires entre Had Oulad Aissa et Jorf-Lasfar serait liée à l'existence du plateau du Crétacé qui constituait un haut fond à cette époque.

IV. COULOIR d'El Jadida.

IV.1 Objectifs

A travers l'examen de la vue d'ensemble que présente le MNT et l'analyse des sondages existants dans ce secteur on a constaté que le couloir d'El-Jadida est bien distingué de l'ensemble des unités géomorphologiques adjacentes et que sa forme est plus importante que ce que nos prédécesseurs ont décrit.

L'origine du couloir d'El-Jadida reste incertaine, même si [Gigout \(1951\)](#) a essayé de trancher est de prouver qu'elle est marine, mais l'étude de [Akil \(1990\)](#) porte des arguments en faveur de l'origine fluviale.

Notre objectif est de déterminer, dans une première partie, la forme exacte et l'ampleur du couloir d'El-Jadida, et dans une deuxième partie présenter une nouvelle interprétation quand a son origine.

IV.2 Méthodologie du travail

IV.2.a. Ampleur et les limites du couloir d'El-Jadida.

Après avoir superposé "drapé" Le MNT sur la carte d'ombrage "hillshade" (utilisé précédemment ; [Fig.43](#)) pour mettre en relief la géomorphologie de la région, nous avons essayé de lire et de suivre les différentes irrégularités géomorphologiques de ce couloir, cela nous a permis de retracer avec une grande précision ses limites ([fig. 66](#)).

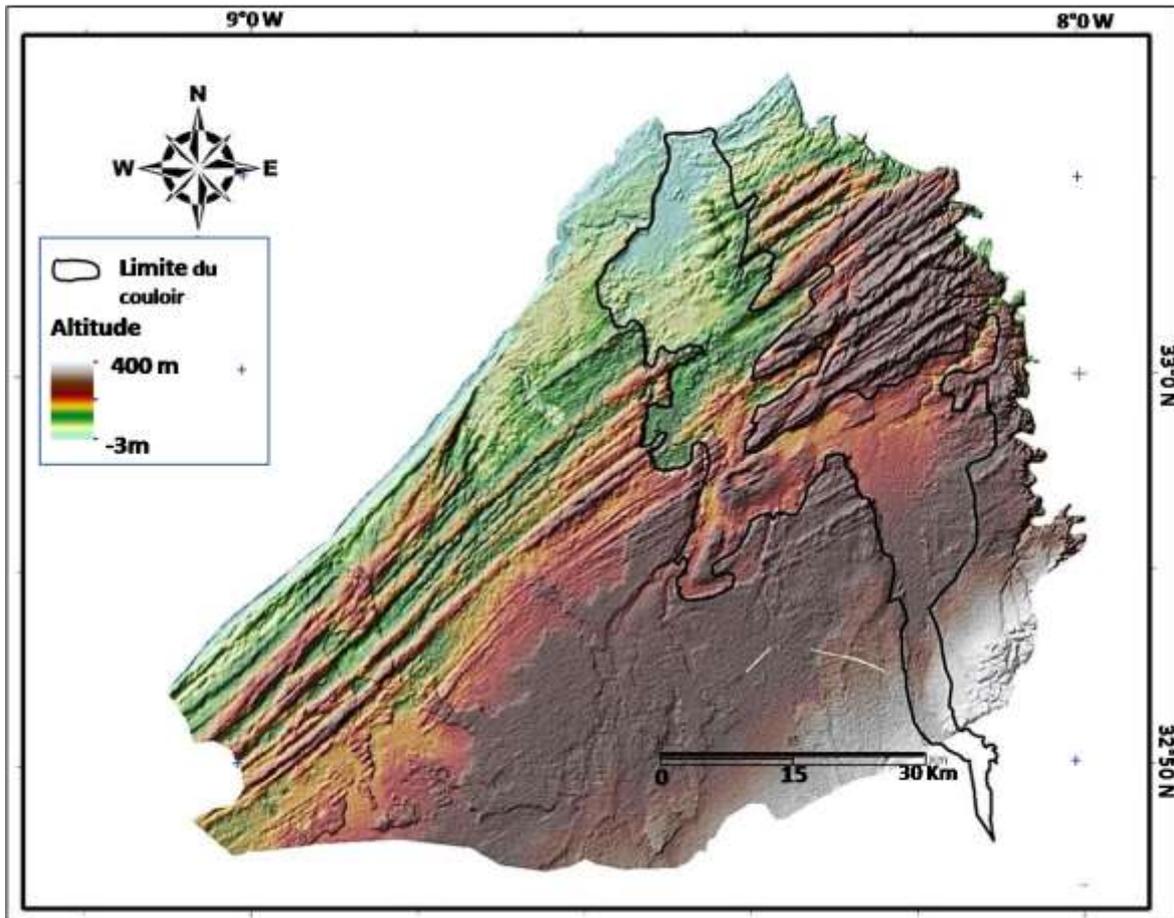


Figure 66: Représentation des limites du couloir d’El-Jadida.

On constate ainsi que le couloir fait partie d’une unité géomorphologique qui présente une extension beaucoup plus étendue que celle décrite par nos prédécesseurs. Il présente une forme plus allongée qui s’étend depuis la plage de l’Haouzia au Nord jusqu’au pied du Massif des Rehamna au Sud.

IV.2.b. Origine du couloir d’El-Jadida

Dans cette nouvelle perspective, et pour mieux expliquer l’origine de cette unité géomorphologique nous avons adopté la méthodologie suivante :

- Trier les forages de la base de données SaDIN pour déterminer ceux situés dans ce secteur :

La base des données SaDIN compte plus que 300 sondages étalés sur l’ensemble de la région, nous avons sélectionné ceux qui sont localisés dans le couloir d’El-Jadida à partir de la couche de l’ensemble des forages par la fonction "clipping by mask", pour cela on a utilisé comme masque la couche qui contient le couloir d’El-Jadida (digitalisé auparavant). Le résultat obtenu est présenté au niveau de [la figure 67](#).

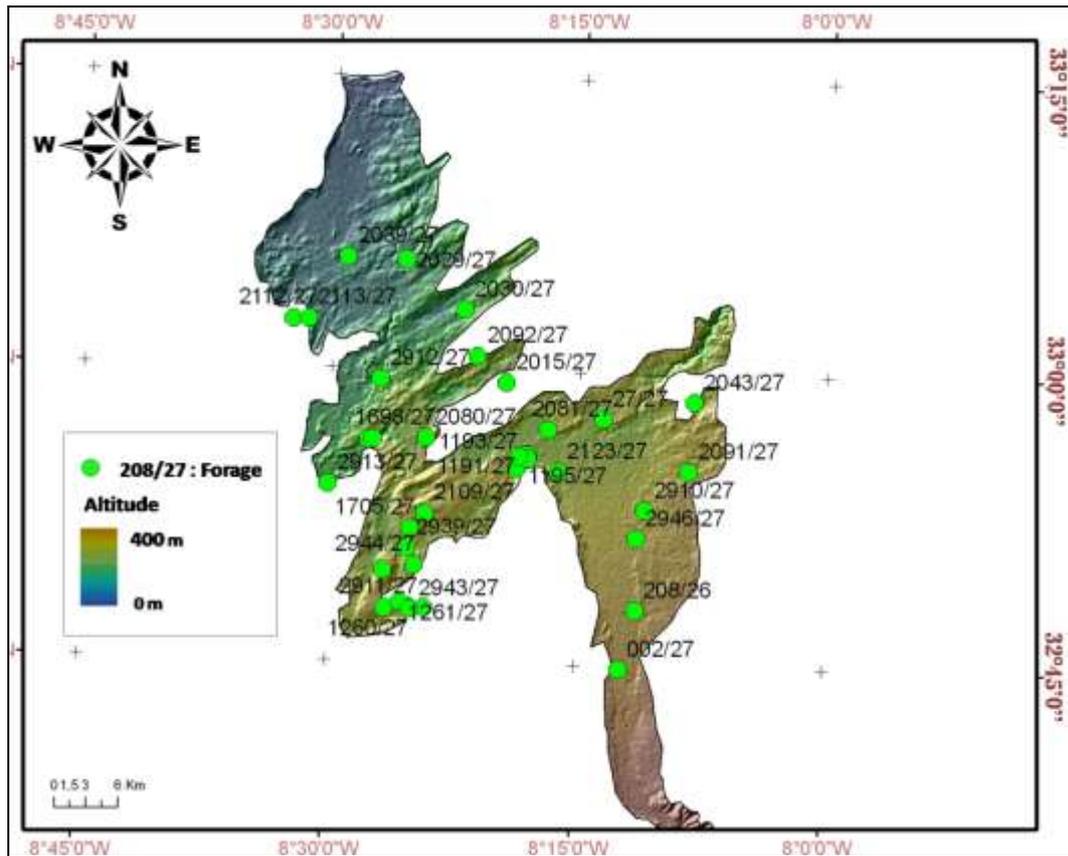


Figure 67: Localisation des forages existant au niveau du couloir d'El-Jadida.

Les 35 forages sélectionnés sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 17: Forages situés (35 forages) au niveau du couloir d'El-Jadida.

N° de Forage	X	Y	N° de Forage	X	Y
002/27	217650	248100	2030/27	212000	281450
208/26	210000	260000	2039/27	222950	276390
1185/27	215000	269900	2043/27	217450	281200
2123/27	219000	248250	2053/27	226850	269450
1187/27	239850	257300	2080/27	217700	255750
1190/27	236000	266000	2081/27	214260	264260
1191/27	231700	261000	2091/27	213800	264200
1193/27	208250	275650	2092/27	216700	248800
1195/27	206850	275650	2109/27	217500	248350
1259/27	219100	257150	2112/27	215250	248250
1260/27	224150	272000	2113/27	228000	262450
1261/27	244000	260950	2910/27	228800	262250
1697/27	230800	265000	2911/27	228600	262600
1698/27	219300	264300	2912/27	228900	262650
1705/27	238900	247850	2943/27	228700	262350
2015/27	215150	251850	2939/27	227826	261335
2029/27	244600	267500	2913/27	237300	242300

La lecture et l'analyse litho-stratigraphique des sondages montre qu'on a une répartition spatiale bien déterminée pour les faciès attribués au Quaternaire. Ces derniers s'organisent comme suit :

En se dirigeant du pied des collines des Rehamna jusqu'aux plates formes, la taille des dépôts décroît progressivement.

Des dépôts d'origine fluviatile au Sud formés de conglomérats, des sables et des argiles.

Au milieu, vers Rhenadra on a des dépôts d'origine marine mêlés à d'autre faciès d'origine fluviatile alors qu'au Nord on a une dominance de dépôts marins.

IV.3 Interprétation :

Contrairement à la description présentée par Gigout (1951), le couloir d'El-Jadida n'est pas limité au niveau de la plate-forme Oulad Refai, mais il sillonne la plaine des Doukkala du Sud vers le Nord depuis les Rehamna.

La carte d'ombrage nous montre aussi que le couloir d'El-Jadida peut être subdivisé géo- morphologiquement en deux parties différentes séparées par une ancienne passe :

La partie nord, décrite par Gigout, constituée par la succession de cinq plates formes dont les altitudes augmentent du N vers le S.

La partie sud qui est sous forme d'un triangle longue de 35 km parcouru par l'Oued Faregh, et l'Oued Fel-Fel, les dépôts rencontrés dans cette partie sont essentiellement des limons, des argiles et des lentilles décamétriques de sables et de galets qui correspondent à la divagation de chenaux méandriformes. Cela rappelle les dépôts d'une plaine d'inondation.

Un passage étroit sépare les deux parties, ce passage se situe au niveau du cordon dunaire n° VI daté du Moghrebien, ce passage rappelle un passe d'une lagune. Il est emprunté actuellement par l'Oued Fel-Fel à l'occasion des crues exceptionnelles. On pense qu'il a dû être ainsi depuis le début de sa formation avec des débits bien supérieurs.

La présence de dépôts limoneux qui comblent la surface du couloir ont été apportés par l'Oued Fel-Fel qui envahit sa plaine d'inondation et y dépose des matériaux généralement plus fins, les limons, contenant une forte proportion d'argile. [Akil \(1990\)](#),

On peut ainsi avancer l'hypothèse suivante : avant

l'établissement des plates formes, l'Oued Fel-Fel emprunte cette direction, mais au moment de la régression de la mer moghrebiennne et la naissance des cordons dunaires, ces derniers ont formé une barrière infranchissable (un barrage naturel) pour les oueds descendant des Rehamna. A ce moment les traits géomorphologiques de la partie nord et de la partie sud de ce cordon dunaire vont se distinguer.

L'édification de la dune VI, dont les altitudes dépassent 125 m, a empêché l'évacuation des eaux fluviales, l'Oued Fel-Fel n'a plus d'exutoire sur l'océan, son lit au Nord commence à recevoir uniquement les eaux et les dépôts marins, son estuaire se transforme donc en un bras de mer. La confrontation naturelle entre les eaux fluviales et marines n'a plus lieu que lors des fortes crues.

Au début le bras de mer était étroit, avec le temps l'océan façonne cette partie, le bras de mer s'élargissait (cette phase est fort probable accentuée par la karstification) et les cinq plates formes s'installent l'une après l'autre suivant les fluctuations marines.

Bou-Regreg constitue un exemple actuel de la transformation d'un estuaire à un bras de mer. La construction du barrage Sidi Mohamed Ben Abdelah a changé la géomorphologie de cette embouchure d'un estuaire à un bras de mer (Laouina, 1996).

L'étude géomorphologique du couloir et l'analyse lithologique des différentes unités du Quaternaire et Plio-quaternaire nous a permis de proposer une nouvelle hypothèse, nécessitons bien évident d'autres éléments de confirmation qui explique l'ambiguïté remarquée entre les explications de Gigout (1951) et celles de Akil (1990), sur l'origine de ce couloir, et de donner une réponse satisfaisante expliquant la présence des indices des dépôts fluviaux confondu avec des indices des dépôts marins (superficiels).

La région des Doukkala, malgré sa monotonie apparente, est caractérisée par une variété des unités morphologiques et par l'importance et la complexité des formations plio-quaternaires.

Le traitement du modèle numérique du terrain a permis de survoler la région des Doukkala et d'analyser de près chaque unité morphologique et d'apporter plus de précision aux différents traits géomorphologique du sahel Doukkala particulièrement la forme, la direction et l'extension exactes des cordons dunaires et du Golf d'El-Jadida.

V. Délimitation des zones à risques d'effondrements liés aux évaporites

V.1 Introduction

La carte spéléologique du Maroc montre que la zone d'étude est l'une des régions où le phénomène de karstification donc le risque d'effondrement est trop élevé, cela est due essentiellement à la géologie, à la géomorphologie, à l'hydrogéologie et à l'hydrologie de la région.

La morphologie karstique est issue essentiellement des processus de dissolution en sous-sol par l'eau circulant dans les vides des roches, ces karsts peuvent se développer en surface par l'apparition d'effondrements, phénomènes difficilement prévisibles et potentiellement dangereux.

Cette dissolution concerne principalement les roches carbonatées et évaporitiques.

La karstification qui est une forme d'érosion/précipitation spécifique due à la dissolution de ce type de formation engendre, dans les Doukkala-Abda, des galeries karstiques. Ces dernières sont souvent à l'origine d'effondrement redoutable dans la région on citera deux exemples celui de Sebt-Saïss de 2007 et celui de Beni-Helal de 2016.

Ces karsts sont de formes et de tailles variables, leur répartition dépend de plusieurs paramètres (nature et épaisseur de la roche, fissuration, circulation des eaux...) Ils sont plus fréquents sur le littoral qu'en arrière-pays (Ouada *et al.*, (2008).

V.1.a Inventaire des formes karstiques de la région

Ces dernières années de nombreuses recherches ont essayé d'étudier avec différentes méthodes l'ensemble des formes karstique de la région : Ouadia & *al.* (2008); Boualla et Mehdi (2011); Enniouar & *al.* (2013); Habib (2016); Laaziz (2016); khouaja (2017). Ces études confirment que :

Les niveaux susceptibles de subir une karstification intense sont:

- le Jurassique supérieur, calcaire et gypseux, très épais,
- les calcaires hauteriviens de Dridrate, plus ou moins dolomitiques,
- les marnes à gypse du Crétacé inférieur ou moyen,

- les calcaires cénomaniens,
- les calcaires détritiques plio-quadernaires.

Ils n'ont pas tous la même importance ni la même aptitude à la karstification ; le plus important étant les marnes à gypse du Crétacé inférieur ou moyen. Quant au Plio-quadernaire, sa constitution lithologique limite le développement d'ouvertures de grande taille (Ferré et Ruhard, 1975).

Les plateaux créacés de la bordure des Rehamna ne présentent pas de formes karstiques, malgré la grande superficie où affleurent les calcaires.

Les types des karsts qui caractérisent les Doukkala sont :

❖ Dolines :

Elles sont fréquentes ; de belle taille, elles se trouvent le plus souvent en groupes, alignées ou en essaims. Un alignement de formes se situe notamment à l'extrémité nord de la vallée de l'Oued Fel-Fel.



Planche 1: Photo d'une doline en cuvette aux environs d'Oualidia (32°43'53''N; 9°01'26''W)



Planche 2: Photo d'une doline en baquet aux environs d'Oualidia (32°44'06''N; 8°59'52''W)

❖ Lapiez

Ils sont abondants au centre du Sahel, sur les crêtes dunaires dénudées par l'érosion ; dans le fond des dépressions, ils peuvent être masqués en partie par les limons.



Planche 3: Photos des lapiez du Sahel (région de l'Oualidia) (32°44'25''N; 8°59'37''W)

❖ Ouvalas ou dolines coalescentes :

Ils existent dans les mêmes zones que les dolines simples. Des dépressions de grande taille à fond plat presque circulaire comme la dépression de Larbaa de Mogress (Douar Oulad Salem). (fig.68)



Figure 68 : Ouvalas ou dolines coalescentes dans la zone de Larbaa de Mogress (source de l'image google earth)



Planche 4: Photo d'une grande dépression à Larbaa de Mogress (32°56'09''N 8°27'05''W)

Il existe des grandes dépressions comme le Bled-Serssif (8 km sur 2 km) (fig.69), terme ultime de la coalescence de dolines très nombreuses, se situe au Sud-Ouest du plateau céno-manien d'El-Jadida. Elle s'encaisse de 40 à 50 m sous la surface moyenne des sommets dunaire environnants; sa forme générale est celle d'un S étiré, disposé à peu près perpendiculairement à la côte atlantique sa longueur est de 8 km pour une largeur de 1,5 à 2km. Le fond est loin d'être plan: il est encombré de dépressions irrégulièrement réparties. De point de vue géologique, on observe en affleurement d'argiles jaunes verdâtre compactes dans le fond et le calcaire jaune en grain fin du céno-manien sur les flancs. La nappe se situe à une vingtaine de mètres de profondeur (Ferré et Ruhard, 1975).

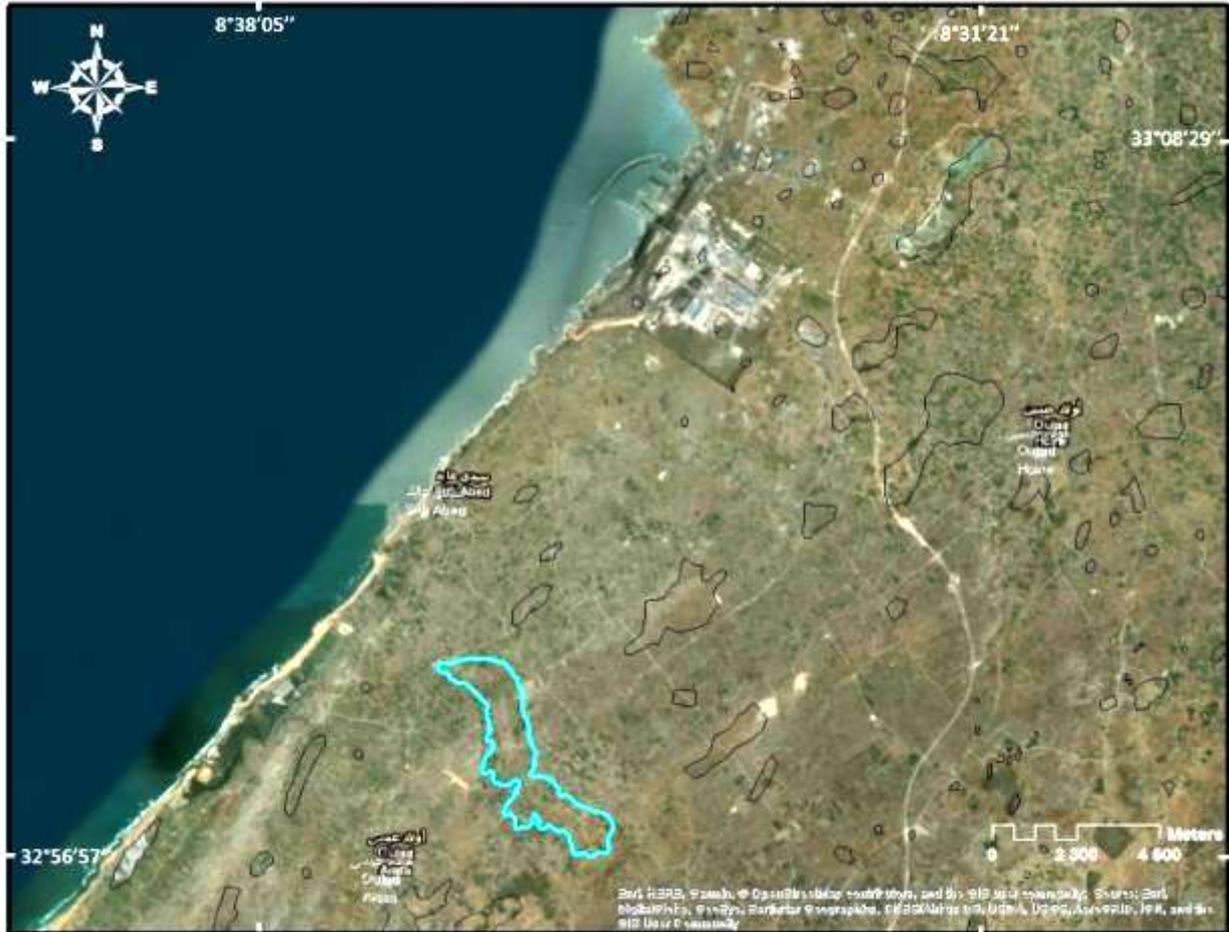


Figure 69: Localisation de la grande dépression de bled Serssif (source de l'image google earth)

❖ Grottes ou gouffres :

La zone côtière des Doukkala-Abda abrite de belles grottes qui sont de nature et de qualité très diversifiées.

L'inventaire des grottes établies par le Ministère de l'équipement (direction de l'hydraulique) d'après les relevés des clubs spéléologiques du Maroc montre les grottes suivantes (**Tableau 17**):

Tableau 18 : Grottes de la région des Doukkala d'après l'inventaire des clubs spéléologiques du Maroc, (Ministère de l'équipement, direction de l'hydraulique 1981).

Nom de la grotte	X (m)	Y (m)	Z (m)
El-khenzira	200300	290400	30
Koufrit-Zemram	187850	270000	25
Aven Zoubia	187200	265700	40
Ghar-laaguig	188800	266000	40
Oualidia	159020	244000	40
GharTakkout	163500	242000	120
Gharsbaa	155300	235100	75

Ces grottes sont des exutoires souterrains qui ont fonctionné aux diverses époques pluviales du Quaternaire et parfois fonctionnent encore. Certaines grottes ont un intérêt dans la géologie du Quaternaire et de la Préhistoire (abris, témoins de l'histoire naturelle et de l'environnement quaternaire) et dans le domaine de la spéléologie (Ouada *et al.*, 2008).



Planche 5: Photo de l'entrée principale de la grotte Takkout. (x : 163500 ; y : 242000) (A : vue de l'intérieur de l'entrée ; B : Vue de l'extérieur de l'entrée)

Exemple la grotte de Takkout : Selon l'inventaire spéléologique du Maroc (1981), la grotte de Takkout ou Ghar Takkout appartient à la zone spéléologique B.d.1, située (x : 163500 ; y : 242000 ; z : 120 m) non loin de l'autoroute El-Jadida-Safi dans les dunes consolidées du Quaternaire. C'est un gros effondrement de voûte 25x 15 m se divisant en deux parties (fig.70), dans la première au NE, descente rapide mais facile jusqu'à 15m. Une assez grande galerie, 15 à 20 m de large, toujours en descente mène à 120 m de l'entrée sur un boyau colmaté, hauteur de la voûte 15 m environ. Dans la seconde partie au SW, de l'autre côté de l'effondrement, un puits vertical est visible dans la voûte à environ 200 m de l'entrée ; à ses pieds un éboulis, ensuite la galerie continue sur environ 100 m et de profondeur de 30 m.

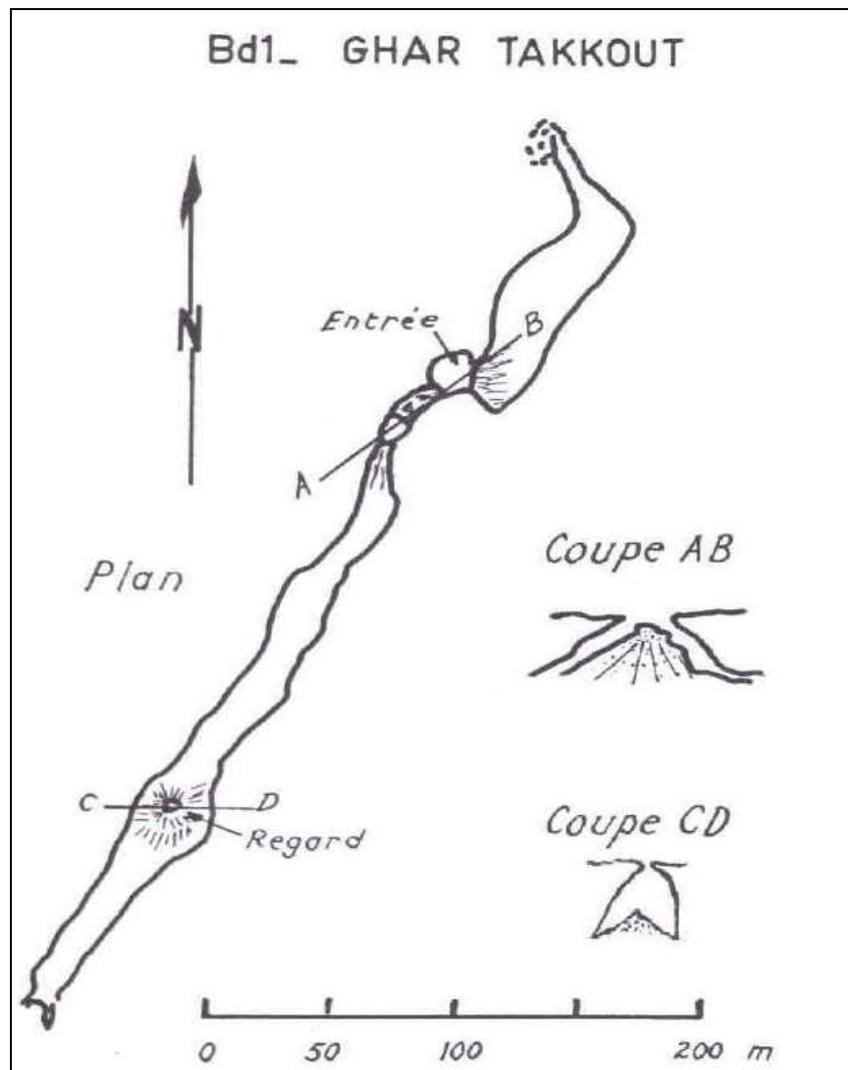


Figure 70: Schéma de la grotte de Takkout selon l'inventaire spéléologique du Maroc (Ministère de l'équipement, Direction de l'hydraulique, 1981).

❖ Effondrements :

La région des Doukkala est marquée par plusieurs effondrements on citera deux exemples celui de Sebt-Saiss de 2007 et celui de Beni-Helal de 2016.

Effondrement de Sebt Saiss

L'effondrement de Sebt-Saiss a eu lieu le jeudi 01 février 2007 au Douar Swalah (cercle de Sebt-Saiss)



Planche 6 : Photo de l'effondrement Sebt-Saiss (2007) (x : 245.694 ; y : 200.700)

De point de vue géologique la structure générale connue dans la région montre trois grandes unités géologiques :

- Une unité marno-sableuse quaternaire à tertiaire
- Une unité calcaire cénomanienne.
- Une unité inférieure marneuse et gypsifère.

La dernière unité (marnes plastiques et gypses) est susceptible d'être facilement dissout par les circulations des fluides souterrains. Ce qui se traduit notamment par des pertes totales au niveau des sondages hydrogéologiques (le cas du sondage 2048/27). (El Achheb et al, 2007)

De point de vue hydrogéologique l'esquisse piézométrique (fig.71) montre une brusque chute de la piézométrie entre le puits 1 et le puits 2. Le puits 1 est situé à environ 300 m à l'Est et sur la même ligne topographique que la zone affaissée. La profondeur est de 18.65 m et une altitude de 150 m. D'après les habitants du Douar ce puits a connu une remontée du niveau d'eau (environ 12 m) après la mise en irrigation des casiers de Zemamra et Sidi Smail. Ce phénomène est confirmé par les piézomètres de contrôle 2/26 et 1823/27 situés au Nord de Zaouiat Saiss et en aval du site étudié. Par rapport à la zone d'affaissement, le puits 2 se trouve à la même distance que le puits 1 mais vers le Nord. La profondeur est de 62 m avec une altitude de 143 m. Le dénivelé piézométrique entre ces deux points est d'environ 50 m. Cette anomalie piézométrique se matérialise sur la carte piézométrique par une rupture de pente avec une très nette augmentation du gradient hydraulique. Dans cette zone les eaux ne

circulent plus dans la nappe supérieure, mais elles sont vidangées par les formations sous-jacentes du Crétacé qui ne jouent plus le rôle d'imperméable de base. Cette situation serait liée à la présence de cavités de dissolution d'évaporites ou de terrains calcaires karstifiés et qui peuvent alors drainer les eaux de la nappe en profondeur. (El Achheb et al 2007).

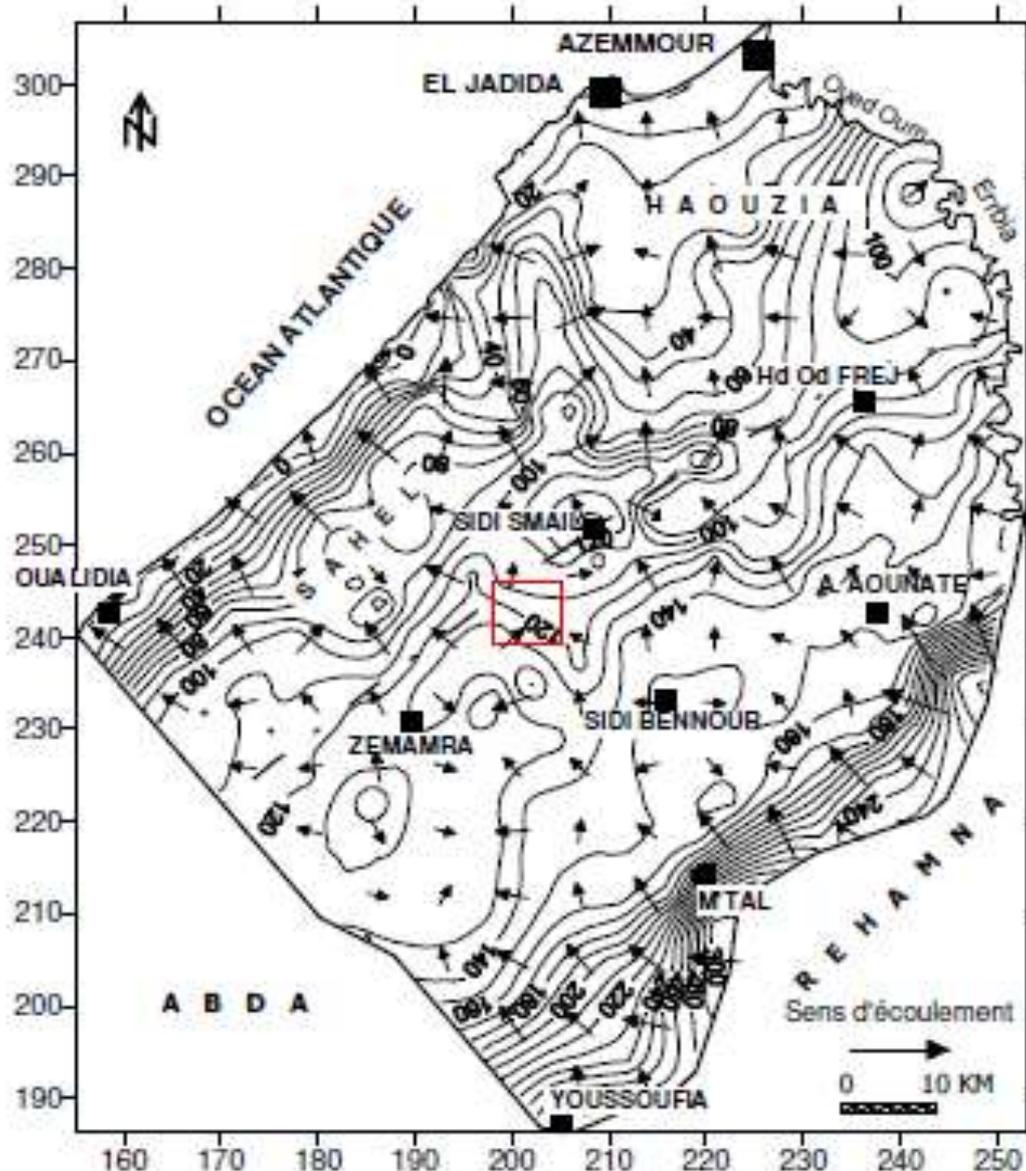


Figure 71: Carte piézométrique avec localisations la zone d'effondrement de Sebta-Saïss.

(El Achheb et al., 2007)

Effondrement de Beni-Helal

L'effondrement de Beni Hilal a eu lieu le 06 février 2016 à Douar Laab, à environ 2 km du centre Jamaa Beni Hilal, à gauche de la Route provincial P3426 reliant ce centre et la route Nationale N9 (x : 219404,329 ; y : 248027,115).



Figure 72: Localisation de l'effondrement (x : 219404,329 ; y : 248027,115) sur fond "Google earth" de la région Beni Hellal

Il s'est produit au centre d'un terrain agricole situé à 150 m d'un bâtiment du Douar Laab. Il s'agit d'un affaissement formant un trou d'environ 8 m de diamètre et 15 m de profondeur.



Planche 7: Photo de l'effondrement de Beni-Hellal. (El Achheb et al., 2016)

D'après la carte géologique et l'analyse du modèle géologique 3D obtenu ainsi que l'ensemble des sondages de reconnaissance hydrogéologiques disponibles auprès de l'effondrement on constate une unité inférieure marneuse et gypsifère surmontée par le Cénomaniens et le Plio-quadernaire.

Il faut souligner particulièrement la composition du niveau inférieur (marnes plastiques et gypses) susceptible d'être facilement dissous par les circulations des fluides souterrains. Ce qui se traduit notamment par des pertes totales au niveau des sondages hydrogéologiques (dans ce secteur, cas du sondage N° 2911/27). (El Achheb et al 2016).

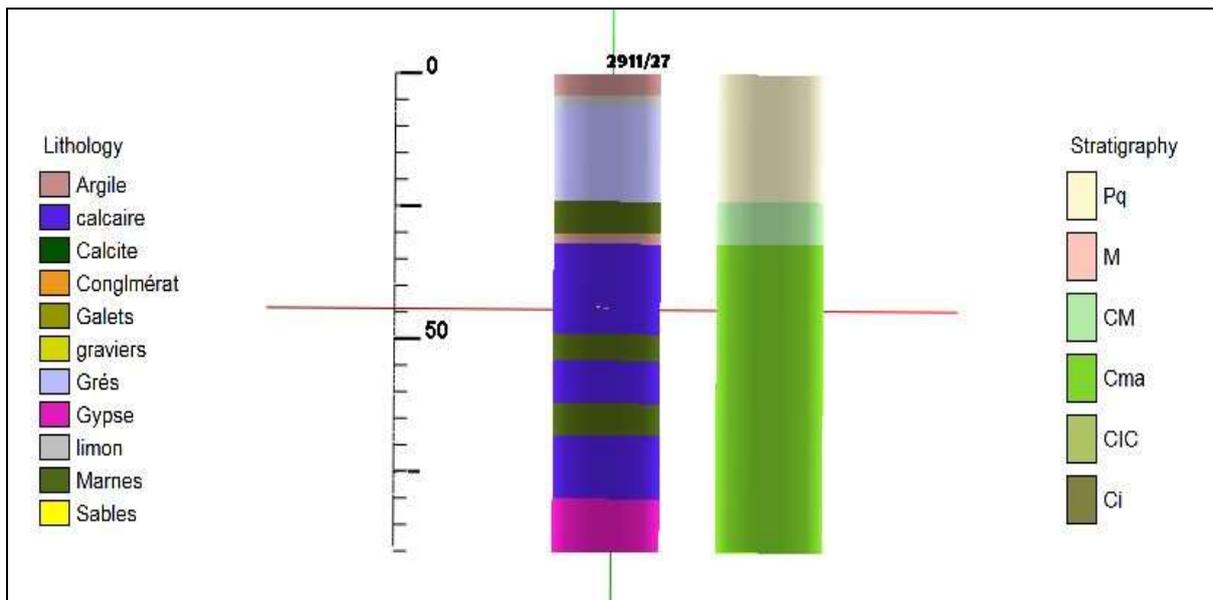


Figure 73: Lithologie et stratigraphie du sondage 2911/27 (x : 219000 ; y : 248250)

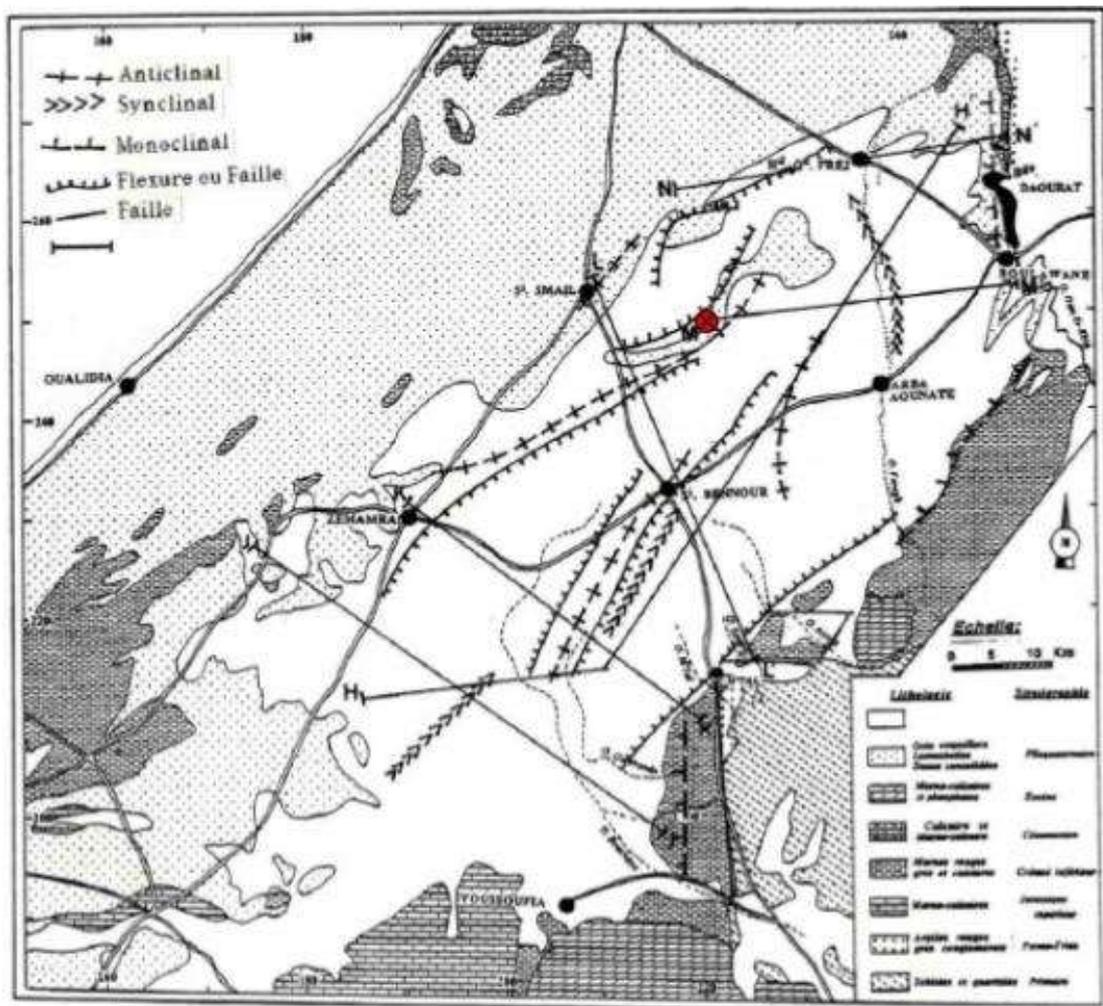


Figure 74: Esquisse structurale de la région (Ferré et Ruhard, 1979) localisation de l'effondrement (point rouge).

L'esquisse structurale de la région des Doukkala montre que la zone de l'effondrement correspond à une dépression tectonique située entre deux failles qui affectent des terrains tertiaires à quaternaires :

- Faille Sud, qui correspond au soulèvement des terrains affleurant du Plio-quaternaire.
- Faille Nord qui longe la limite Sahel-Doukkala.

La présence des failles (zone de faiblesse) contribue à augmenter l'infiltration des eaux de surface donc amplifier la dissolution des formations gypseuses du sous-sol. (El Achhab et al 2016).

De point de vue hydrogéologie ; l'analyse de la carte piézométrique montre qu'on a une brusque chute de la piézométrie entre la zone centrale à environ 1 km au Sud et la zone aval (zone d'affaissement).

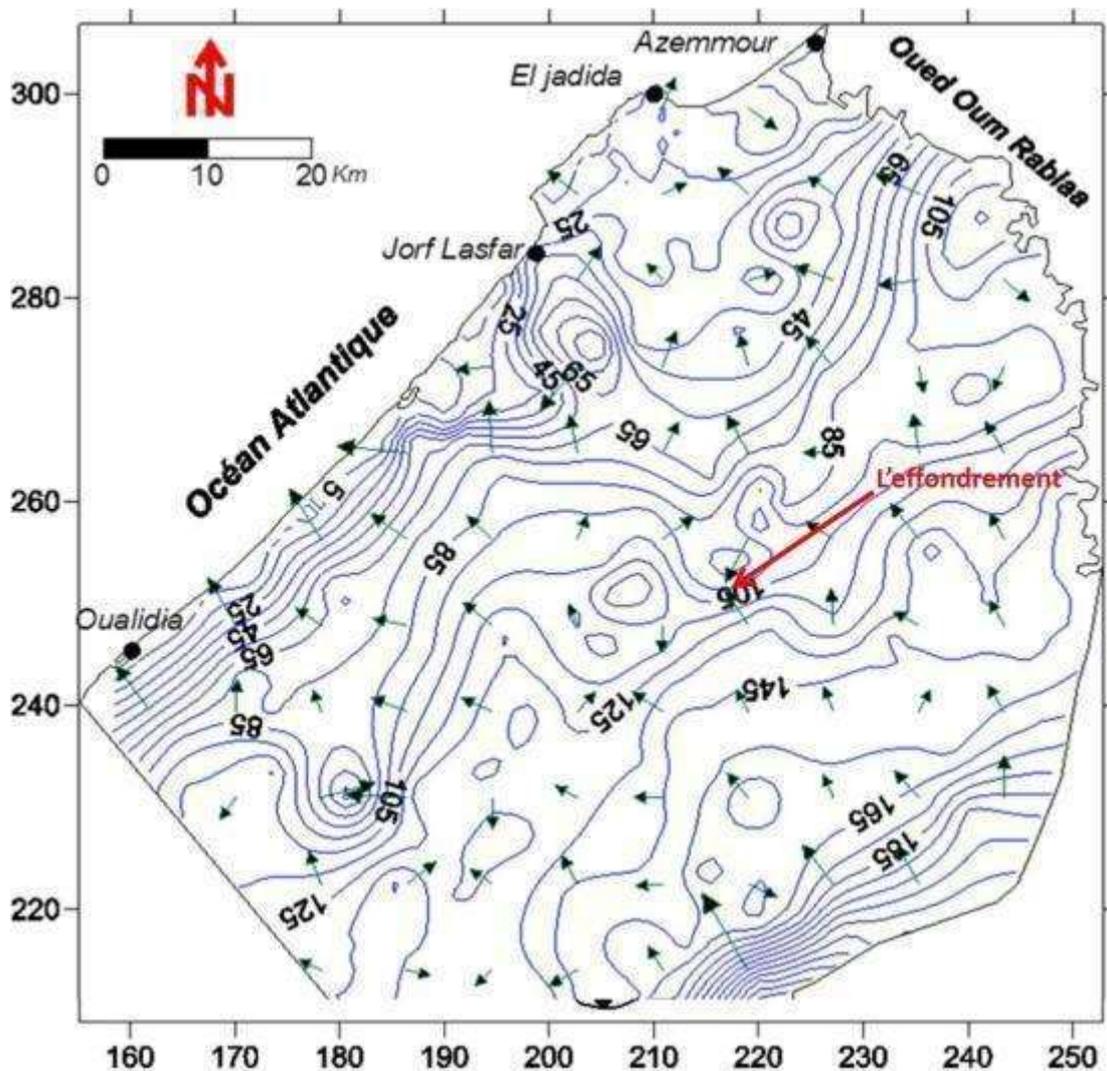


Figure 75: Carte piézométrique des Doukkala (El Achheb, 1993).

Selon le rapport effectué par l'équipe du laboratoire LGTE juste après l'effondrement, la région a connu une remontée du niveau d'eau de la nappe après la mise en irrigation des casiers de Sidi Bennour et de Sidi Smail. Ce phénomène est confirmé par les piézomètres de contrôle 133/27 et 5000/27 situés en amont et en aval du site étudié.

La piézométrie en amont est de 135m alors qu'au niveau d'affaissement est de 110 m. Le dénivelé piézométrique entre ces deux zones est d'environ 25 m. Cette anomalie piézométrique se matérialise sur la carte piézométrique par une rupture de pente avec une très nette augmentation du gradient hydraulique. Dans cette zone les eaux ne circulent plus dans la nappe supérieure, mais elles sont vidangées par les formations sous-jacentes du Crétacé qui ne jouent plus le rôle d'imperméable de base. Cette situation serait liée à la présence de fractures qui sont associées aux failles et aux flexures ou à des cavités de dissolution d'évaporites ou à des terrains calcaires karstifiés et qui peuvent alors drainer les eaux de la nappe en profondeur.

Les rapports de l'équipe du LGTE (2007 et 2016) ont conclu que Les

deux cas sont des effondrements brutaux mais localisés qui se manifestent sous la forme d'un entonnoir, avec une géométrie pseudo circulaire qui atteint plusieurs mètres. Donc on est ici en présence d'un effondrement de type « Fontis » ou « Suffosion ». Les deux effondrements étudiés ont façonné des trous impressionnants, causés par l'érosion hydrique du sous-sol calcaire et gypseux, Le régime hydrogéologique et la lithologie sont donc les facteurs impératifs à l'initiation et le développement, dans le temps et dans l'espace, de ces cavités naturelles.

D'autres facteurs sont des accélérateurs du processus, tel que les failles qui font augmenter l'infiltration des eaux superficielles et la géomorphologie de la région qu'est susceptible d'avoir une influence sur le devenir et le comportement de ces cavités karstiques (El Achheb et al 2007 ; 2016).

V.2 Méthodologie :

V.3.a Principe de détermination du niveau d'aléa karstique

La méthodologie élaborée pour déterminer les zones à risque des effondrements consiste à intégrer, dans un SIG, les trois principaux facteurs susceptibles de favoriser la dissolution des formations : la géomorphologie (les dépressions), la lithologie (carbonates et évaporites) et l'hydrogéologie.

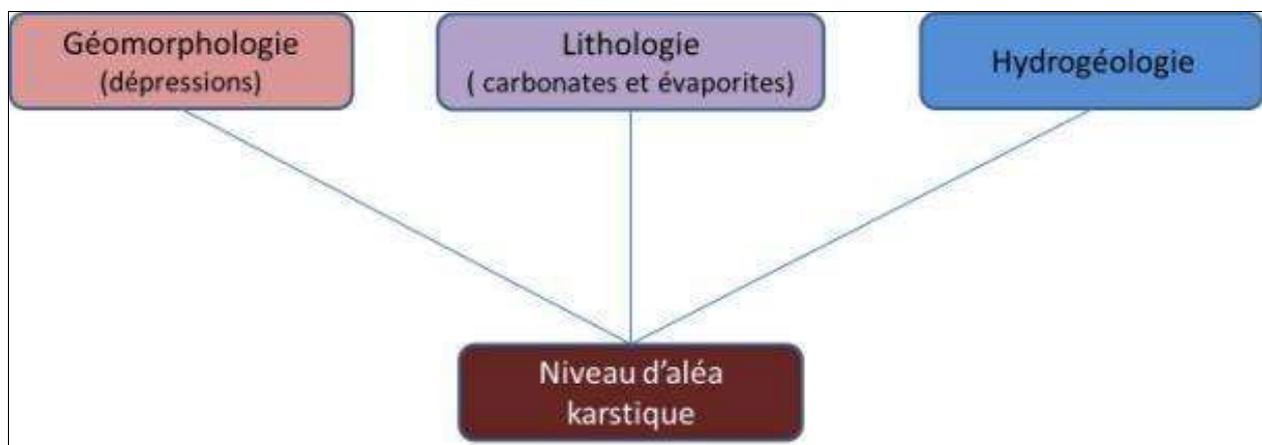


Figure 76 : Approche méthodologique général

Afin de répondre à nos objectifs, nous avons procédé à :

- Digitaliser les dépressions, susceptibles de recevoir l'eau, à partir du MNT et l'ensemble de ses cartes dérivées.
- Déterminer les zones en surface et en sub-surface où les évaporites sont abondantes.
- Détecter les secteurs d'accumulation d'eau de surface.
- Etude de cas de certains effondrements.

V.3.b Détection des dépressions.

En géomorphologie, une dépression est une forme topographique en creux fermée dont l'altitude est inférieure à celle des régions voisines et les pentes convergentes vers elle, partiellement ou totalement endoréiques.

En MNT une dépression est une cellule (ou des cellules) dont la valeur d'altitude est entourée par des cellules de valeur d'altitude plus élevée. Certaines peuvent être naturelles, notamment dans les zones de karst, d'autres sont simplement des imperfections du MNT.

Dans ArcMap, plusieurs outils d'analyse hydrologique sont conçus pour modéliser la convergence des flux sur une surface de terrain naturel. Ces outils partent du principe que la surface contient suffisamment de relief vertical pour qu'une trajectoire de flux soit déterminée. Les outils fonctionnent selon un postulat de base. On considère que pour une cellule distincte, l'eau peut s'écouler depuis de nombreuses cellules adjacentes, mais la source ne doit provenir que d'une cellule.

Lorsqu'on délimite les bassins versants on effectue une série d'opérations. L'écoulement sur une surface se fait toujours dans le sens de la pente descendante la plus raide. Une fois la direction du flux sortant de chaque cellule connue, on a déterminé les cellules et le nombre de cellules qui s'écoulent dans une cellule donnée. Ces informations sont utilisées pour définir les limites de bassin-versant à partir d'un modèle numérique de terrain.

Le MNT permet de déterminer les cellules qui s'écoulent dans d'autres cellules (la direction du flux). Toutefois, si on modélise une géologie de karst, certains emplacements de cellule sont moins élevés que les cellules voisines. Si tel est le cas, l'eau qui pénètre la cellule n'en sort pas. Ces dépressions sont appelées des cuvettes ou dépressions. Les outils d'analyse hydrologique nous permettent d'identifier ces cuvettes.

Donc pour déterminer l'ensemble des dépressions d'une zone aussi vaste que les Doukkala, des processus automatiques et semi-automatiques sont nécessaires, pour cela nous avons produit à partir du MNT les cartes suivantes :

- Carte d'ombrage.
- Carte des courbes de niveau.
- Carte des bassins versants.

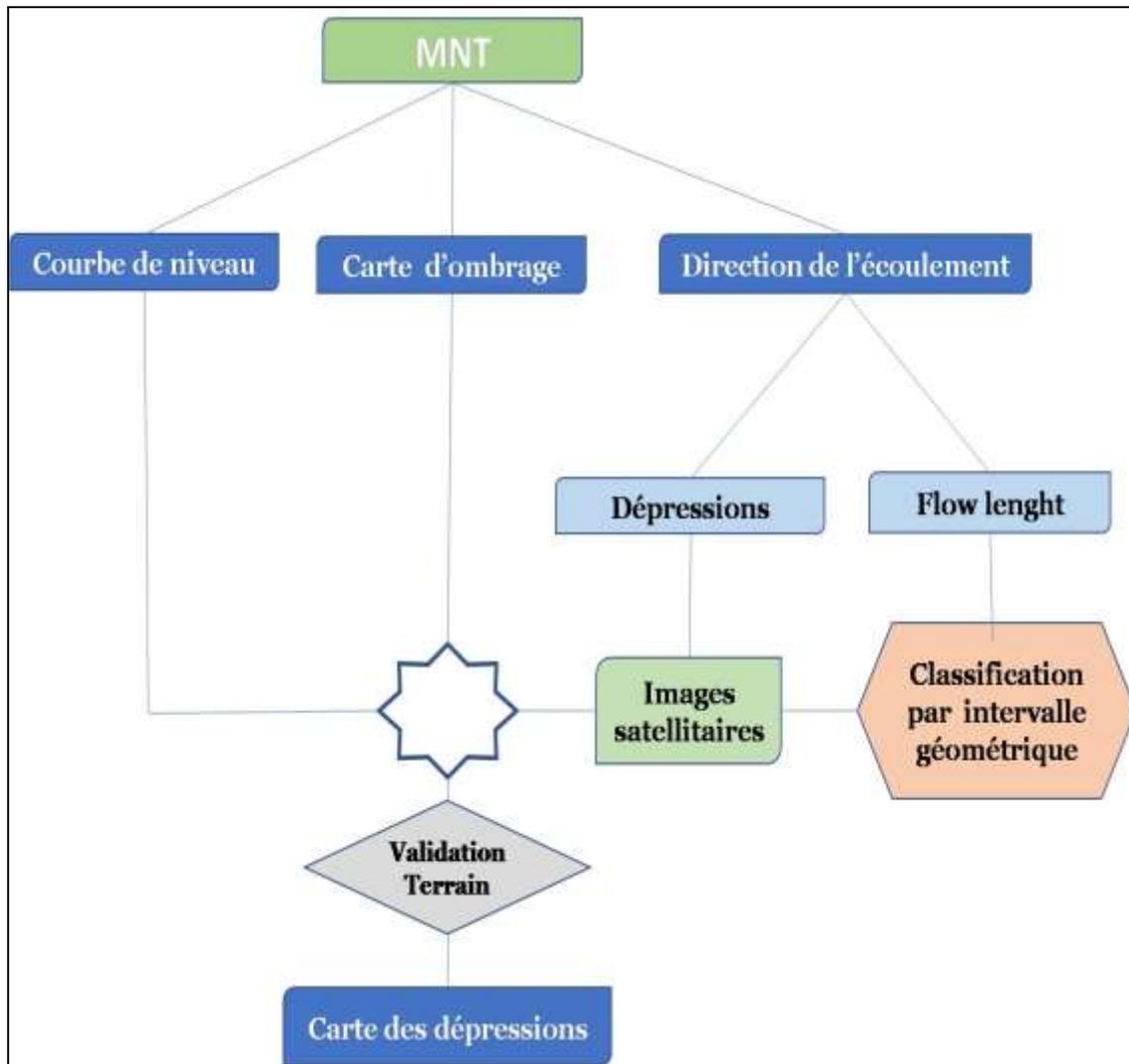


Figure 77: Représentation de la méthodologie adoptée pour déterminer les dépressions

Carte d'ombrage (Hillshad) :

Nous avons appliqué sur le MNT, un azimut de la source lumineuse de 315° et un angle d'élévation de 45° . Cette opération a permis d'aboutir à une bonne illustration du relief et des dépressions de la région de Doukkala. (Fig. 40 et 41).

Carte des courbes de niveau :

Si le relief présente un creux (comme cela est le cas dans les régions karstiques), pour celui-ci la courbe indiquant les altitudes plus basses sera encerclée par la courbe représentant les altitudes plus hautes.

Les courbes de niveau sont générées à partir du MNT avec une

équidistance de cinq mètres et un mètre pour bien détecter les dépressions de petite taille.

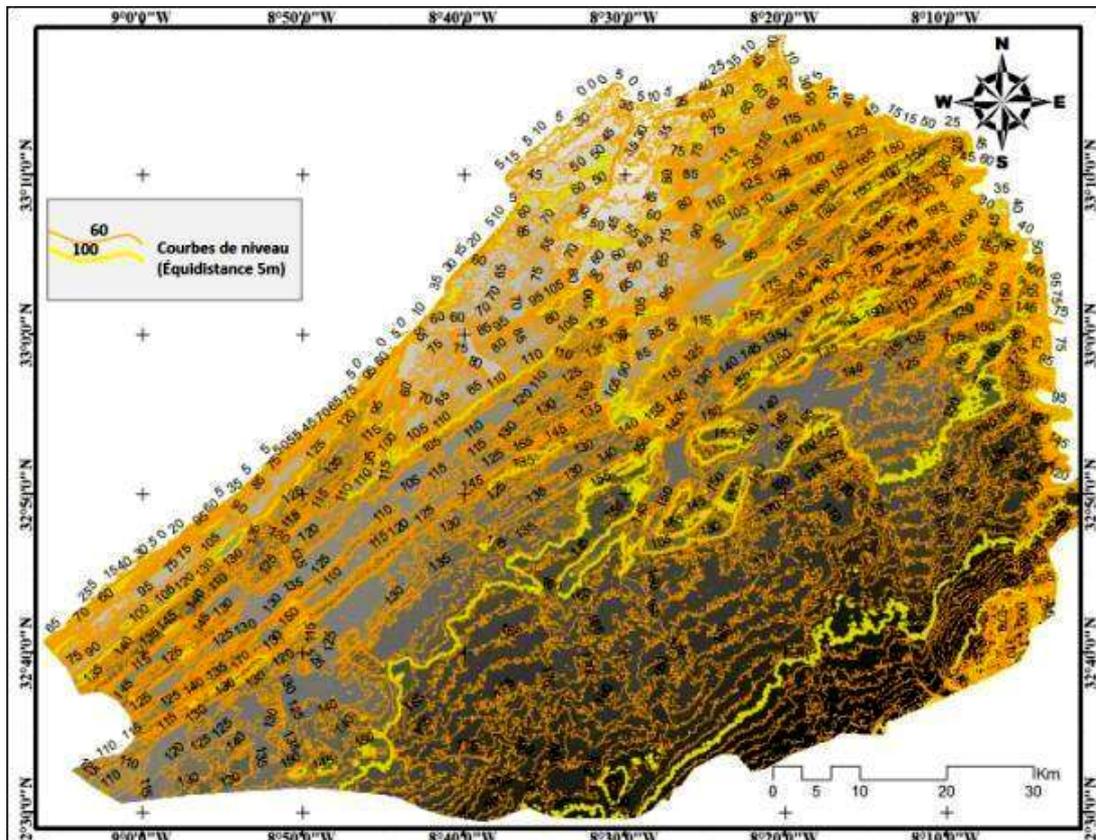


Figure 78: Courbes de niveau générées automatiquement à partir du MNT. (Équidistance 5m)

La représentation simultanée des courbes de niveau et la carte d'ombrage permet une visualisation assez claire et facilite ainsi la détection et la digitalisation des dépressions.

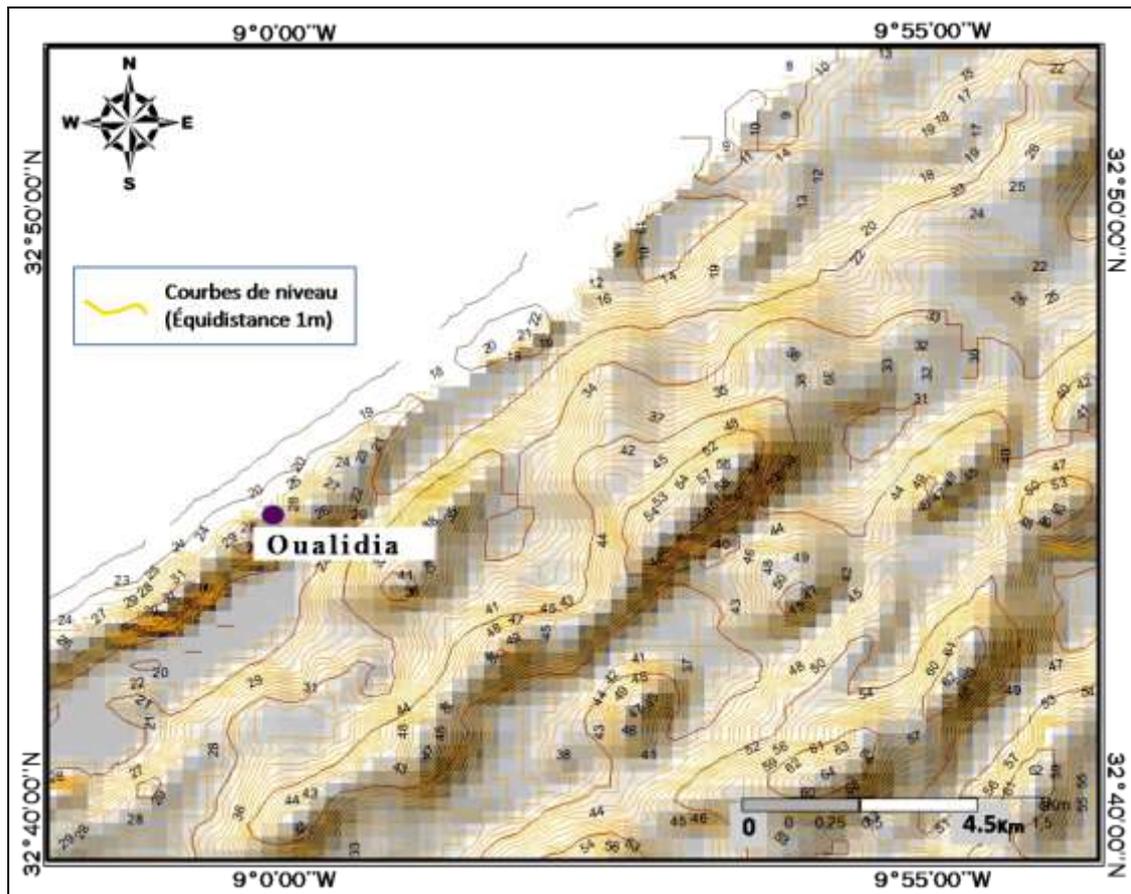


Figure 79: Représentation de la carte d'ombrage avec les courbes de niveau (équidistance 1m). (Région de l'Oualidia)

Carte des bassins versants :

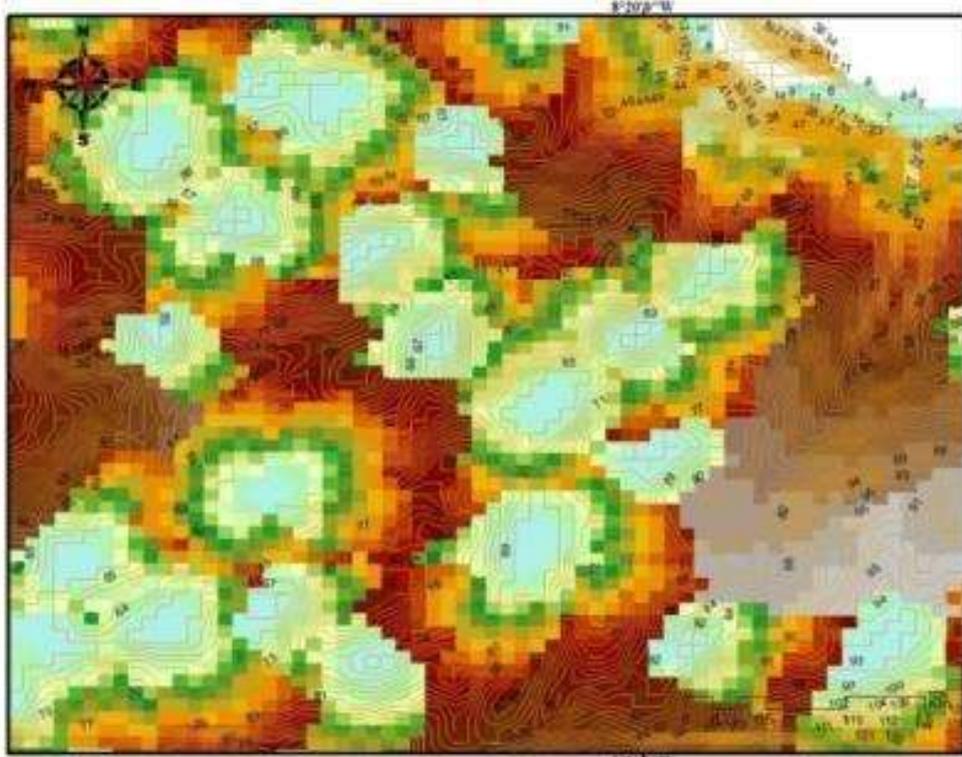
Pour détecter les dépressions automatiquement l'une des méthodes les plus simples est de déterminer l'ensemble des petits bassins versants, puisque les dépressions sont des bassins versants à une petite échelle.

Pour délimiter les petits bassins versants, nous avons identifié les points d'écoulement. En principe, ces zones sont les bouches des cours d'eau. A l'aide des outils d'analyse hydrologique, on a généré ainsi des bassins versants pour chaque segment de cours d'eau entre les jonctions des cours d'eau. Pour créer le réseau hydrographique, on a calculé au préalable l'accumulation de flux (Flow accumulation) pour chaque emplacement de cellule.

Pour que les bassins représentent les petites cuvettes, une classification d'intervalles géométriques était nécessaire. Ce type de classification crée des interruptions de classe basées sur des intervalles de classe ayant une série géométrique. Le coefficient géométrique de ce classificateur peut changer une fois (en son inverse) pour optimiser les plages de classe. L'algorithme crée des intervalles géométriques en réduisant la somme de carrés du nombre d'éléments dans chaque

classe. Cela garantit que chaque plage de classes a approximativement le même nombre de valeurs et que le changement entre intervalles est relativement cohérent.

Cet algorithme crée un équilibre entre la mise en surbrillance des modifications dans les valeurs centrales et les valeurs extrêmes. Il génère un résultat visuellement intéressant et complet d'un point de vue cartographique.



*Figure 80: Extrait de la carte des dépressions avec des courbes de niveau.
(Les cellules en couleur verte représentent les dépressions les traits représentent les courbes de niveau).*

Images satellitaires :

Les images satellitaires à haute résolution de ce secteur et les sorties de terrains nous ont permis de vérifier l'emplacement de ces dépressions et de les digitaliser avec une plus grande précision.

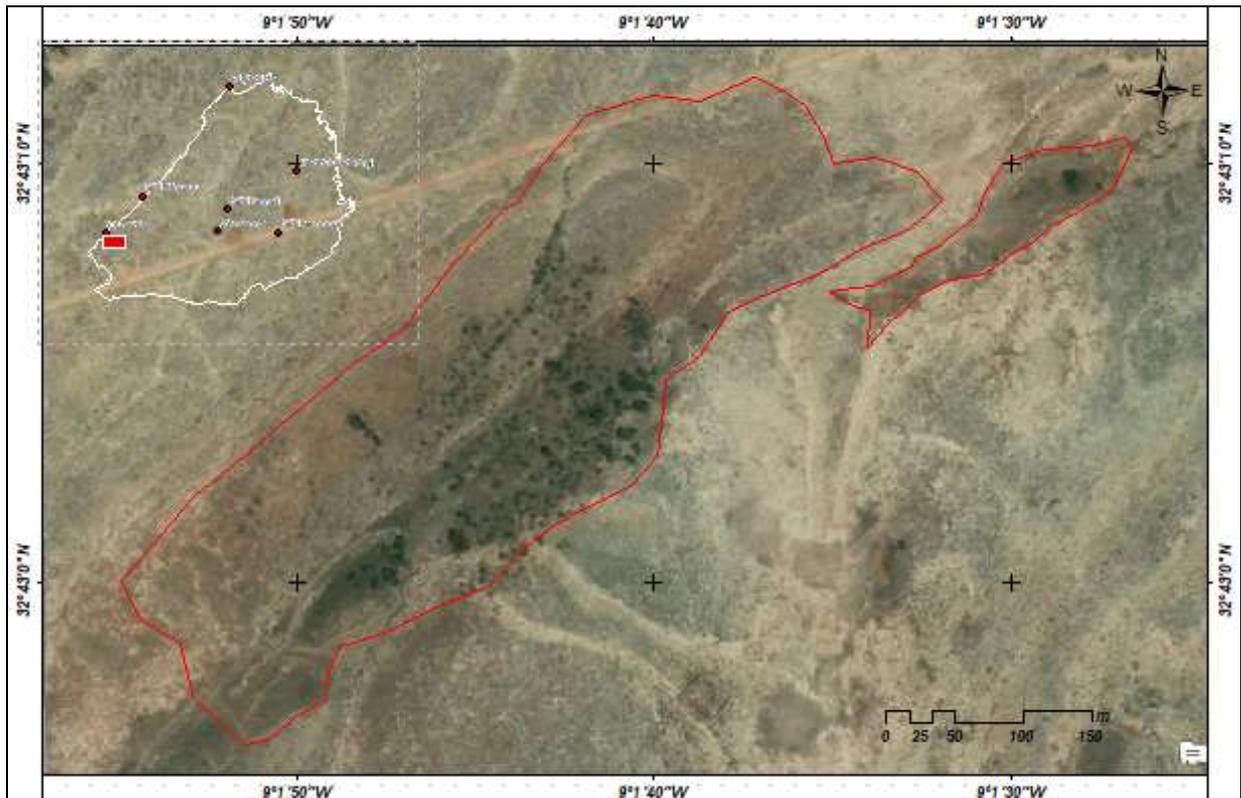


Figure 81: Exemple de dépression digitalisée sur l'image satellitaire (région Oualidia).

V.3 Résultats :

L'ensemble de produits précédents nous ont permis de localiser les dépressions et les creux et les digitaliser (sous forme de shapfile vecteur). Ces dépressions sont susceptibles de correspondre à des réceptacles d'eau qui entraineront dans des cas particuliers la formation des karsts et des effondrements.

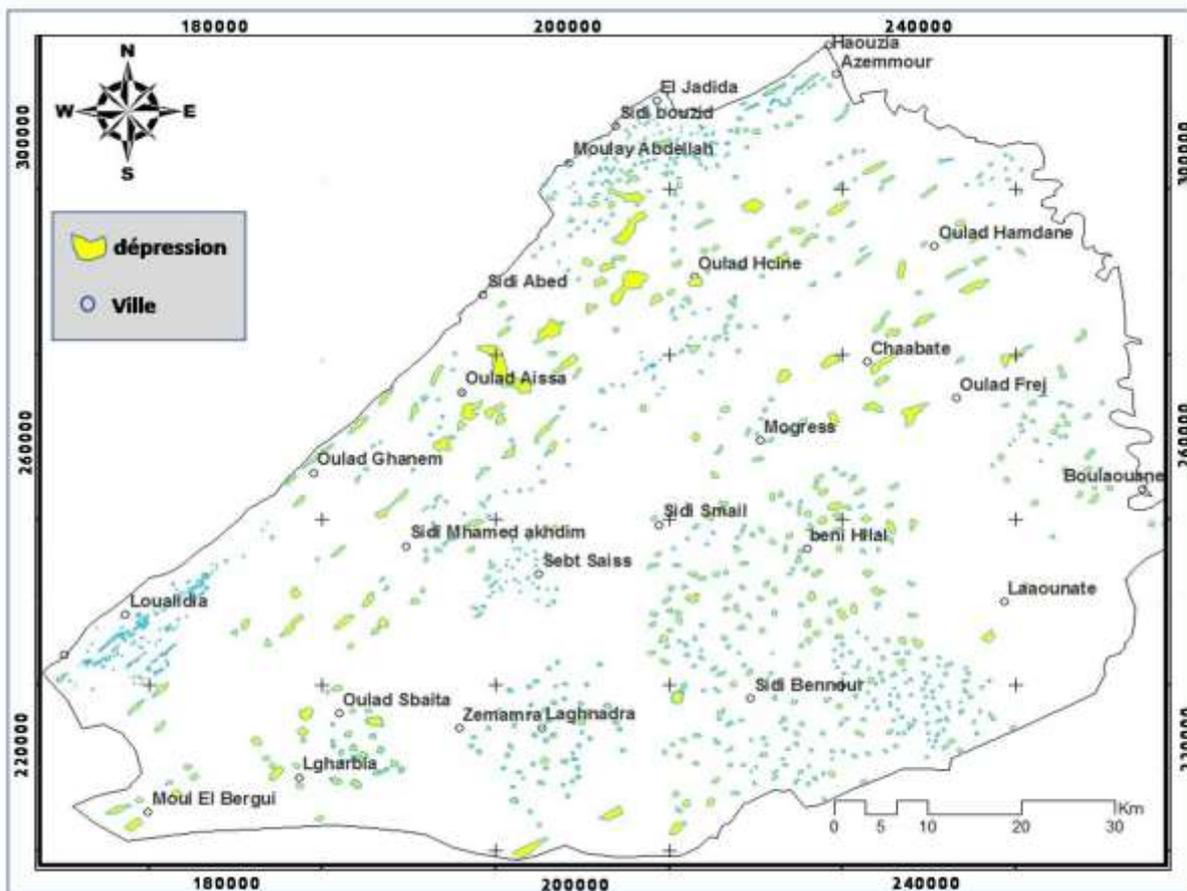


Figure 82. Répartition des dépressions détectées au niveau de la région des Doukkala

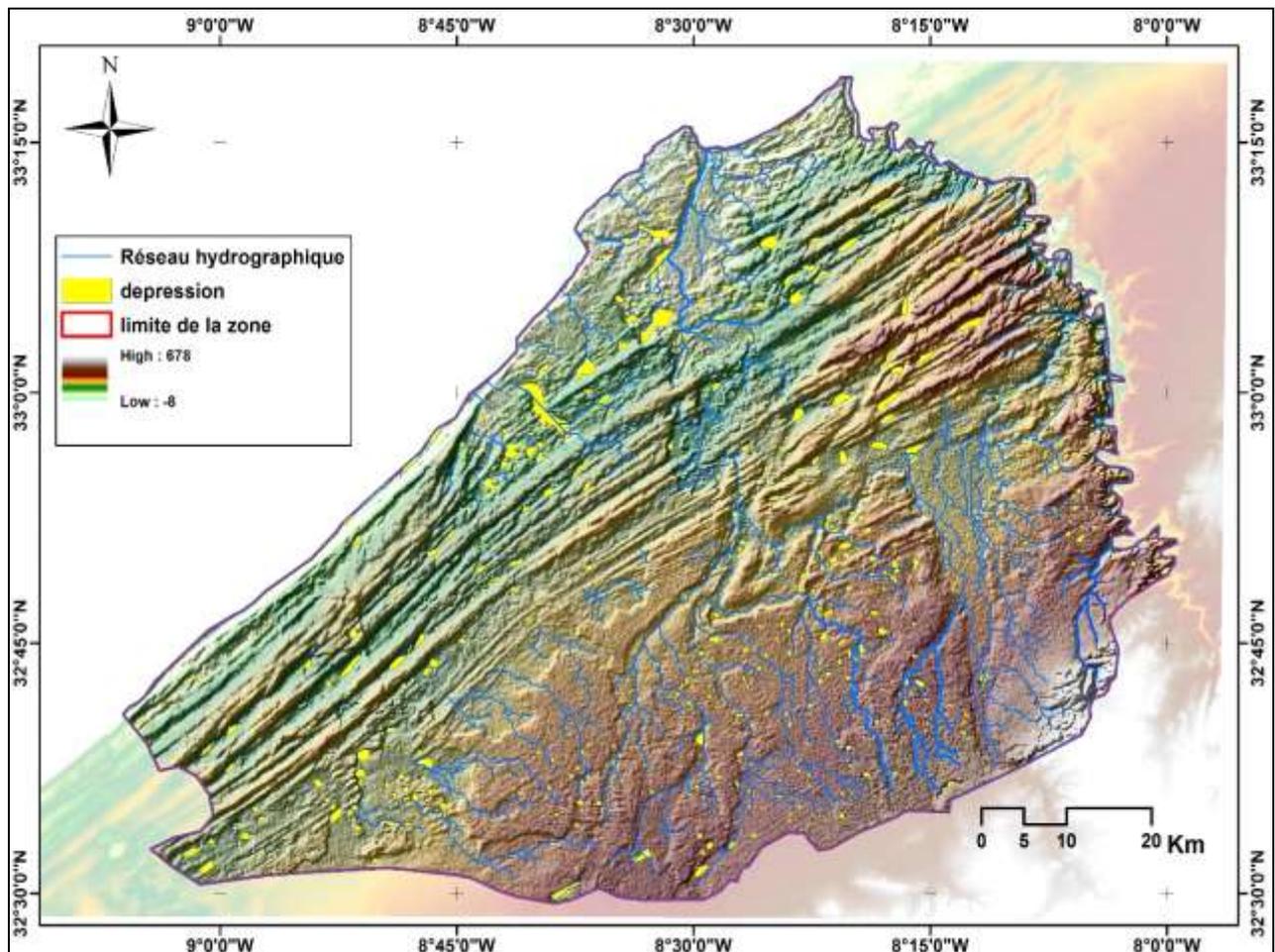


Figure 83: Drapage des dépressions sur l'assemblage de la carte d'ombrage et le MNT coloré

Cette partie géomorphologique, basée sur l'analyse du MNT, nous a permis de cartographier les dépressions de la zone d'étude. La plus part de ces dépressions ont été vérifiées sur les images satellitaires et une partie d'entre elles sur le terrain.

Généralement les dépressions du Sahel sont de grande taille et de direction NE-SW, se localisent surtout au niveau des zones interdunaires, alors que celles de la plaine sont de petite taille, de forme circulaire et bien dispersées sur la totalité de la plaine.

V.3.a Contexte hydrogéologique et hydrologique :

Les zones de drainage seront les zones les plus vulnérables à la karstification, puisque l'eau est l'un des facteurs essentiel dans le processus de dissolution.

La surface qui capte l'eau et le réseau à travers lequel l'eau circule jusqu'à un orifice sont appelés "système de drainage".

Cette étape consiste à déterminer les zones de drainage, elle est estimée à partir du réseau hydrographique, ce dernier est généré à partir du MNT.

Les outils de modélisation hydrologique proposent des méthodes qui fournissent des algorithmes permettant de créer des réseaux hydrographiques à partir du MNT.

L'image ci-dessous illustre le réseau hydrographique dérivé d'un modèle Numérique du terrain de la région :

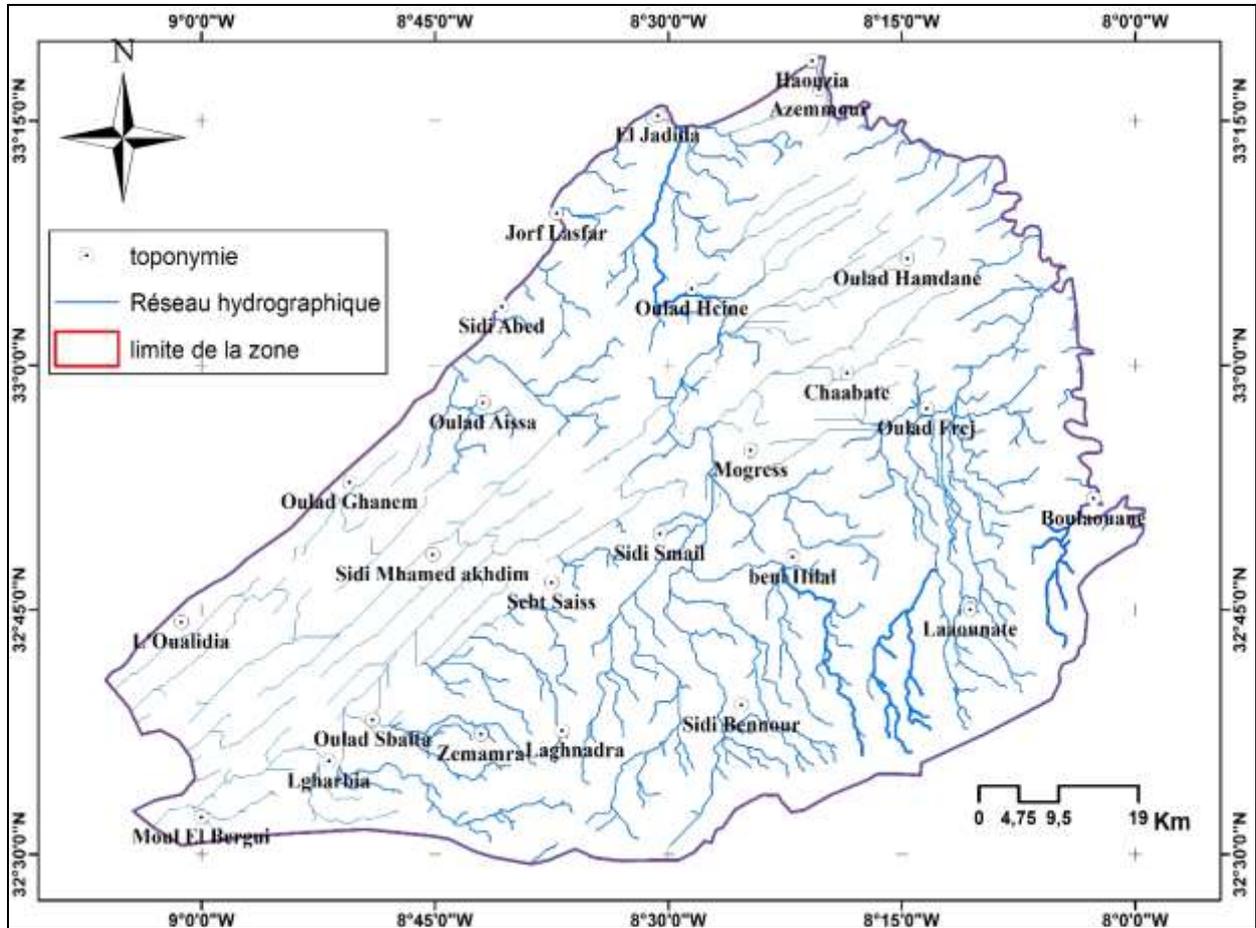


Figure 84: le réseau des talwegs généré à partir du MNT

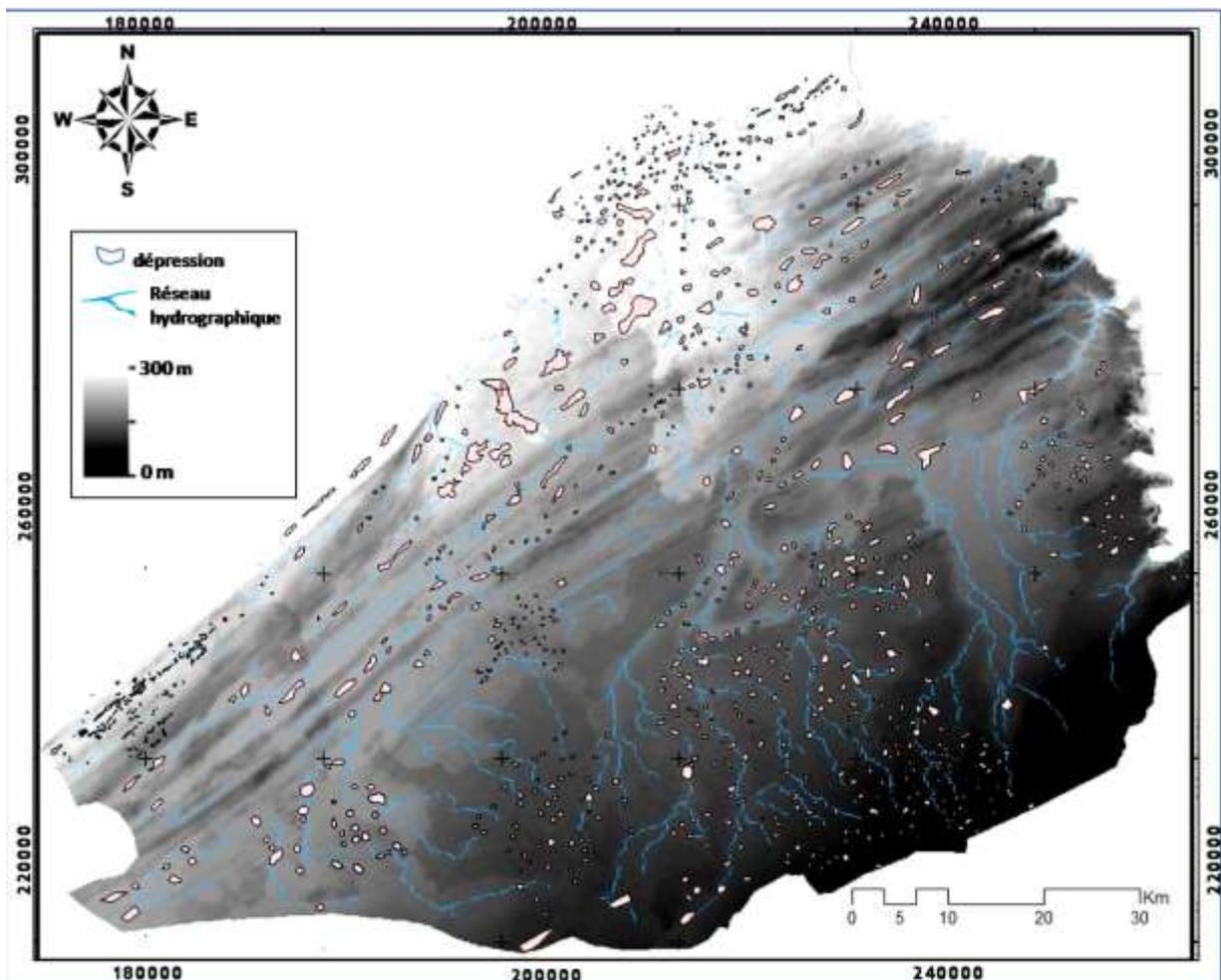


Figure 85 : Drapage de la couche des dépressions et le réseau des talwegs généré sur le MNT

V.3.b Prédisposition géologique.

Les formations susceptibles de subir une karstification intense dans la région des Doukkala sont les suivantes :

- les calcaires hauteriviens, plus ou moins dolomitiques,
- les marnes à gypse du cénomanien,
- les calcaires cénomaniens,
- les calcaires détritiques plio-quadernaires.

L'objectif de cette partie est de cartographier en sous-sol de manière tridimensionnelle les formations contenant le gypse ; à savoir les marnes à gypse du cénomanien, celles-ci peuvent en effet engendrer des phénomènes de dissolution donc la création de vides souterrains susceptible de conduire à des désordres fréquents en surface (fontis, effondrements, affaissements) préjudiciables pour les biens et les personnes.

Les marnes à gypse du Cénomaniens n'affleurent que dans la vallée de l'Oum Rabia, et dans la région d'El-Jadida, elles sont constituées de marnes vertes ou bleues, avec des bancs de marno-calcaires. Dans cette série le gypse tient une place importante (60 m de gypse pur au Sondage 285/35 (x : 209300 ; y : 215750). L'absence de fossiles ne permet pas de dater avec précision cette formation. Les calcaires marneux sus-jacents ont apporté une seule espèce Arcacarinata qui caractériserait le Cénomaniens ([Gigout, 1955](#)).

Pour comprendre la relation des phénomènes karstiques de la région avec la présence des gypses nous allons tout d'abord essayer à l'aide des sondages hydrogéologiques de déterminer la répartition spatiale en trois dimensions des gypses.

Parmi l'ensemble des sondages, 19 entre eux contiennent des gypses. Ils se trouvent essentiellement au centre des Doukkala principalement entre Sebt-Saïss, Sidi Moussa et Had Oulad Frej.

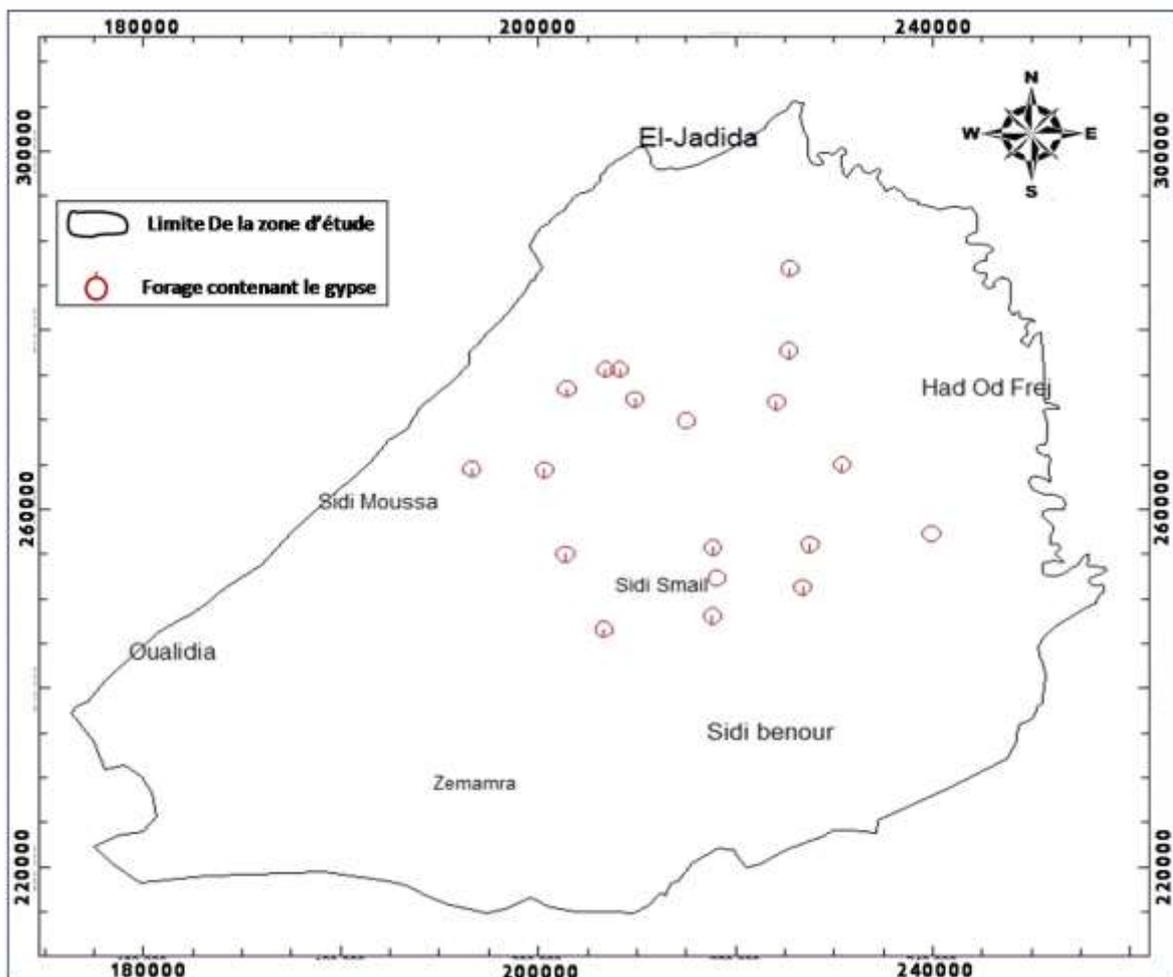


Figure 86: Répartition des forages contenant les gypses au niveau de la région des Doukkala

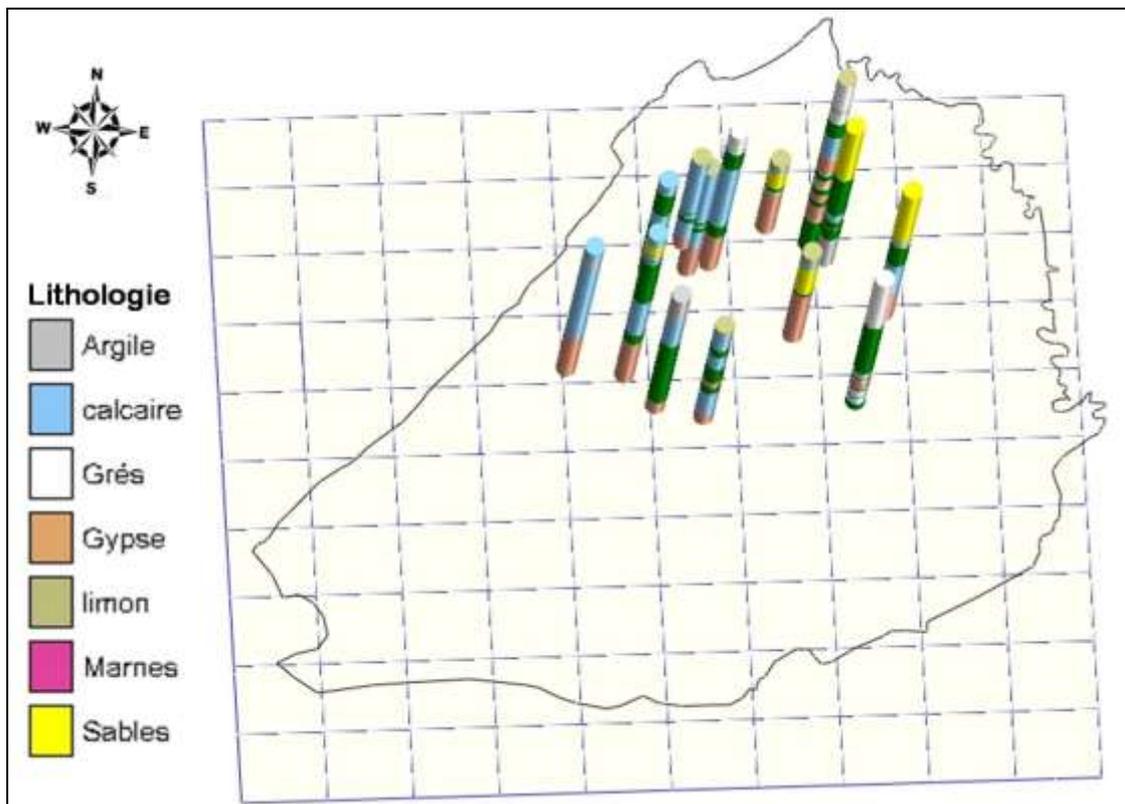


Figure 87: Répartition géographique des forages qui contiennent le Gypse

A l'aide d'outil spécialisé en 3D lithologique nous avons essayé de corréler l'ensemble des unités lithologiques des sondages afin de déterminer la répartition spatiale en sous-sol des gypses.

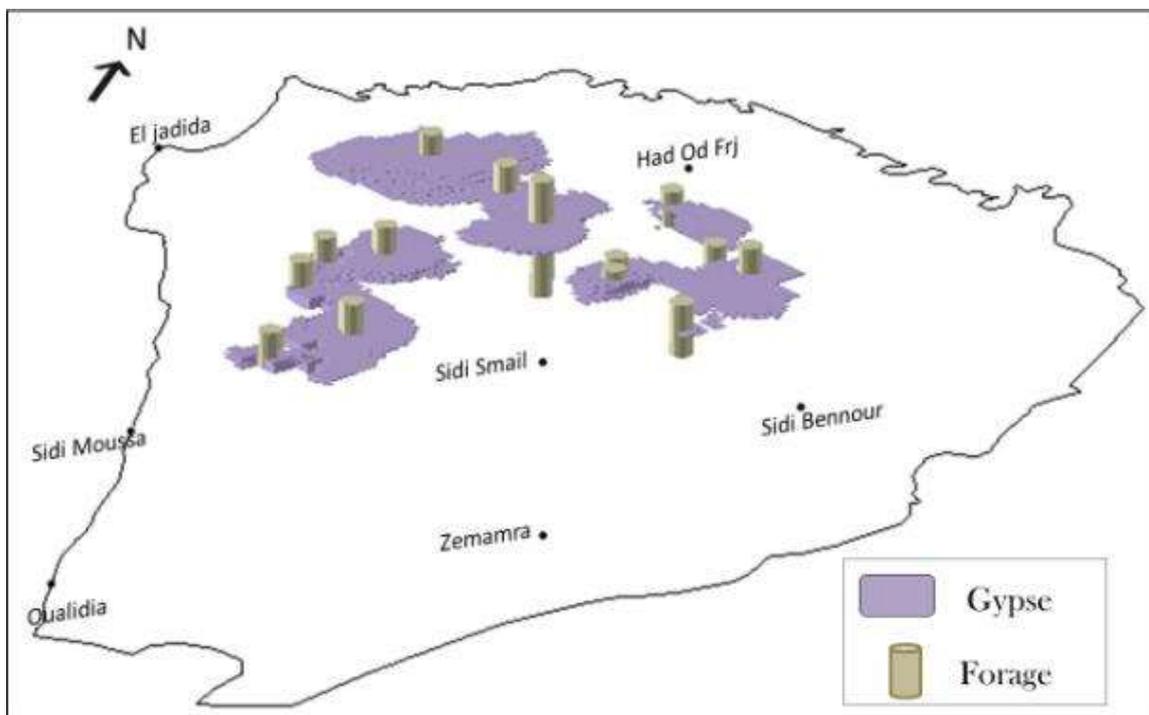


Figure 88: Répartition spatiale des gypses dans la région des Doukkala. (Vue en 3D du Sud-Ouest)

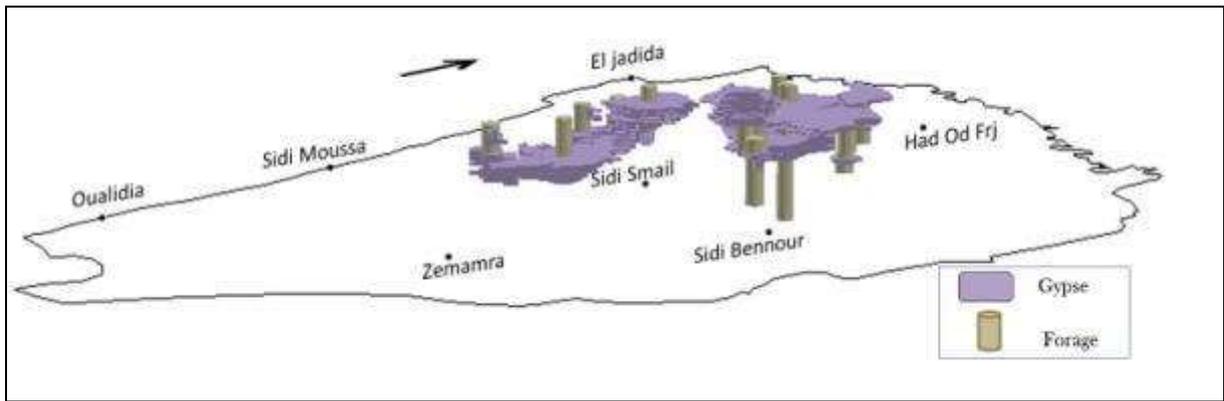


Figure 89: Répartition spatiale des gypses dans la région des Doukkala. (Vue en 3D du Sud)

Le résultat montre que les gypses sont localisés au centre de la région des Doukkala principalement au Sahel et à la limite Sahel - Plaine des Doukkala à des profondeurs différentes qui varient entre 37 et 130 m, les épaisseurs de cette entité sont de l'ordre de 10 m à 60 m.

La différence des épaisseurs et la profondeur des gypses ainsi que la perméabilité des unités lithologiques qui le superposent sont les principales caractéristiques que nous essayons de développer dans cette partie.

Le plus important complexe karstique des Doukkala se trouvent au Sud de la ville d'El-Jadida au niveau du couloir d'El-Jadida (entre les plates formes Oulad Rifai et Pacha), les dolines et ouvalas les plus importantes se trouvent au niveau de Mogress. Ces deux zones se trouvent au niveau des zones où les gypses ont été détectés.

Pour comprendre la relation de ces formations karstiques avec la présence des gypses nous avons effectué deux coupes lithologiques qui traversent cette zone.

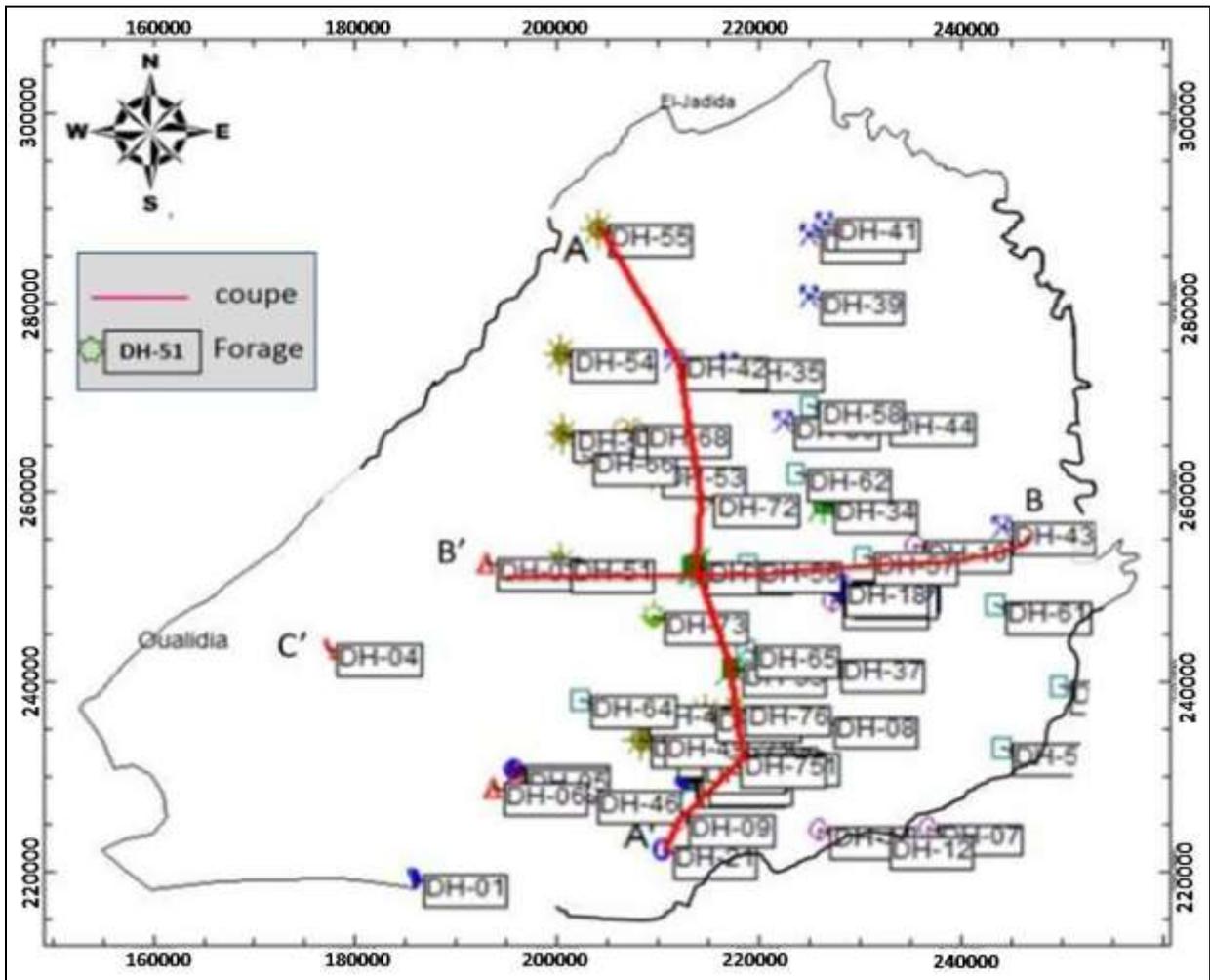


Figure 90: Situation des sections lithologiques effectuées au niveau de la région.

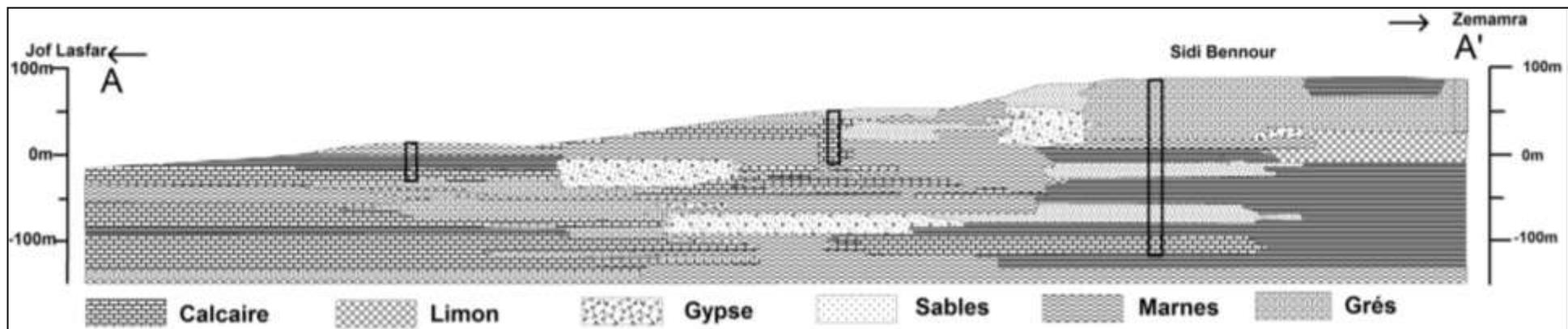


Figure 91: Section AA'. Direction Nord-Sud. A:(x: 204 477, y:292 337); A':(x: 211 081, y: 240 481)

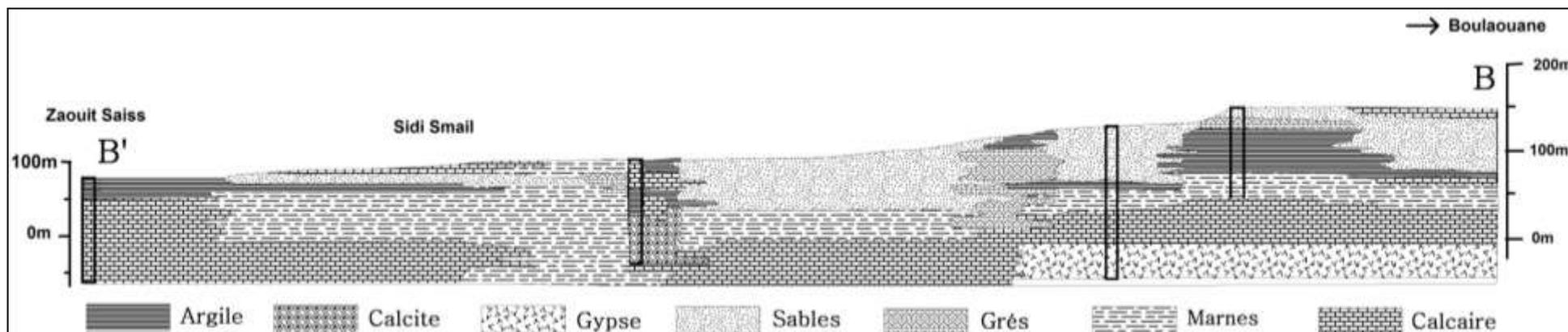


Figure 92: Section BB'. Direction Est-Ouest. B:(x: 194 687, y: 251 321); B':(x: 245 816, y: 254 456)

La section AA' (Fig.91):

Du Nord au Sud on constate : la présence du Cénomaniens qui est marqué par une dalle de calcaire avec des intercalations des marnes et des argiles. Cette formation est souvent représentée en falaise qui borde l'océan atlantique, son épaisseur dépasse 100 m. Puis on rencontre les grès et les calcaires qui s'entrecroisent avec les marnes vertes à gypse avec des bancs de marno-calcaires. Dans cette zone le gypse tient une place importante on le rencontre à deux reprises ; à une profondeur de 40 m et à 100 m. Le premier s'étale sur une distance d'environ 8 km dont l'épaisseur atteint environ 40 m surmonté par des marno-calcaires et les limons du Quaternaire. Le deuxième s'étale sur une distance d'environ 12 km, son épaisseur ne dépasse pas 20 m.

C'est dans ce secteur (la plate-forme Sebt-Douib du couloir d'El-Jadida) que l'on rencontre le complexe karstique décrit au niveau de l'esquisse géomorphologique réalisée par Ferré Ruard (1975).

Au niveau de Mogress, on rencontre une autre unité de gypse qui se trouve à environ 30m de profondeur avec une épaisseur de 40 m, elle est surmontée par des sables et des limons. En surface les dolines sont fréquentes ; de belle taille, elles se trouvent le plus souvent en groupes et alignées.

Une zone d'anomalie est observée dans cette partie. Les marno-calcaire et gypse du Cénomaniens se trouvent au même niveau que les grès et les argiles du Crétacé inférieur. Cette anomalie se traduit par des perturbations affectant le toit de la formation marno-évaporitique.

L'abondance des formations karstiques (Dolines, Ouvalas et Gouffres de Larbaa de Mogress et le complexe karstique de la plate-forme de Sebt-Douib) s'explique par la présence des principaux facteurs suivant :

- ❖ Une lithologie riche en gypse et calcaire à des profondeurs relativement faibles avec une épaisseur relativement importante.
- ❖ Ce secteur est une zone de drainage important puisque c'est le lit d'Oued Fel-Fel le seul exutoire naturel des eaux de surface de la plaine.
- ❖ La présence des dépressions qui jouent le rôle réceptacle d'eau.
- ❖ Les anomalies structurales observées accentuent l'infiltration des eaux donc la dissolution des gypses.

La section BB' (Fig.92):

Cette coupe montre la succession suivante : les calcaires et les marno-calcaire du cénomanien surmontés par les sables et les calcaires détritiques du Plio-quatenaire, le gypse se trouve au niveau de la plaine à une profondeur de 120 m. Son épaisseur dépasse 40 m, il est surmonté par des calcaires et des marnes de même âge (cénomanien) et des sables ainsi que des argiles dont l'épaisseur atteint 100 m. Cela explique l'absence des formations karstiques dans ce secteur ; puisque ces formations constituent un manteau épais qui empêche l'infiltration des eaux donc le développement des karsts.

V.4 Conclusion

Cette étude est basée sur l'ensemble des paramètres (la géomorphologie, la lithologie, l'hydrologie et la tectonique) essentiels qui favorisent le développement des karsts.

L'analyse de ces paramètres en une dimension (point : les effondrements), deux dimensions (coupes lithologiques) et trois dimensions (modèle lithologique en 3D), nous a permis de préciser les zones les plus vulnérables au risque d'effondrement karstique.

Le bassin du Sahel-Doukkala est le siège d'une forte activité karstique surtout dans le Sahel et la limite Sahel-plaine, Cette activité est liée principalement à l'existence des gypses et les dépressions interdunaires ainsi qu'aux flexures tectoniques. Dans la plaine des Doukkala la présence de gypse est masquée par un manteau épais qui bloque l'infiltration des eaux superficielles sauf au niveau des zones structurellement dérangées.

De point de vue lithologique, les gypses du Crétacé inférieur sont le siège de ces phénomènes karstiques préjudiciables à la stabilité des sols. Le déclenchement des mouvements de surface peut être corrélé avec d'autres facteurs d'ordre hydro-dynamique, géomorphologique, et structural.

Côté hydrogéologique, on constate que les zones les plus favorables à la karstification sont les zones des lits fluviaux et les zones interdunaires.

Concernant la tectonique, on aperçoit une relation étroite existant entre les karsts et les flexures tectoniques ce qui explique l'alignement géographique des dolines.

Les résultats de ce chapitre montrent l'intérêt de l'utilisation de la technologie 3D et des SIG dans l'évaluation de la vulnérabilité à l'érosion liée au gypse et permet d'identifier des zones à risque d'effondrement ce qui pourrait constituer un document de base pour tout aménagement futur.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Conclusion

L'objectif principal de cette thèse consistait à mettre à jour la géomorphologie et la géologie de la région des Doukkala sur la base des nouvelles données et méthodes, et de montrer l'apport de ces résultats à la compréhension des risques liés aux effondrements.

De point de vue géologique :

Les principaux résultats obtenus dans le cadre de cette étude géologique permettent de préciser certains aspects qui restaient à nos jours peu argumentés sur la géologie de sub-surface de la région des Doukkala.

Le modèle géologique 3D de la zone d'étude est élaboré par les sondages de reconnaissances, les coupes géologiques et les cartes géologiques.

L'approche d'interpolation utilisée a été le krigeage ordinaire. Elle a été développée pour répondre aux besoins de la modélisation géologique, Elle permet également le passage de l'information en 1D (forage) et en 2D (coupes géologiques et cartes géologiques) vers une compréhension et une interpolation en un modèle conceptuel en 3D.

Bien que le modèle recouvre l'ensemble des Doukkala (vaste zone) et n'intègre pas les failles, il permet, néanmoins, de nous donner une idée approximative sur l'architecture générale des principales unités géologiques depuis le Crétacé; et sur certains traits d'évolution paléogéographique de la région avec en particulier les étapes suivantes :

- Gauchissements affectant les formations du Crétacé inférieur avec formation des structures NE-SW et NS donnant lieu à des haut fonds. L'état actuel des connaissances ne permet pas de conclure à la nature même des structures.
- L'orientation préférentielle NE- SW observée permet toutefois de les associer aux diverses phases d'extension de l'océan atlantique durant la période Néocomienne.
- Une transgression généralisée à toute la zone de la plate forme carbonatée Cénomano-Turonien. Celle-ci a par la suite subit une longue phase d'érosion (du Turonien au Miocène ~ 60 Ma). La nature lithologique de la formation permet de supposer le développement de larges surfaces karstiques sur l'ensemble de la région.
- Une transgression marine localisée au cours du Miocène avec comblement préférentiel des dépressions façonnées sur la dalle carbonatée Cénomano-Turonien.
- Une seconde longue phase d'émersion, érosion et pénéplanation a ensuite duré du Miocène jusqu'au Pliocène (~ 20 Ma) en prélude à la dernière transgression marine du Plioquaternaire.

De point de vue géomorphologique et d'après cette analyse :

La côte des Doukkala est peut être considérée, au cours du Plio-quadernaire, comme une côte d'accumulation au Sud et au Nord, ce qui a engendré des cordons dunaires, Alors qu'au niveau du couloir d'El-Jadida et le plateau crétaé d'El-Jadida on a eu une côte d'abrasion qui se traduit par l'absence de cordons dunaires et la formation de plates-formes (au niveau du couloir d'El-Jadida) et des falaises (au niveau du le plateau crétaé d'El-Jadida).

Le système dunaire, les plates-formes et les falaises correspondant à des phases multiples de transgression et de régression au cours du Plio-quadernaire enregistrent ainsi les stationnements marins des différentes subdivisions du Plio-quadernaire (Ouljien, Harounien, Anfatién, Maarifién, ...).

Les directions des cordons dunaires ne sont pas uniformes du Nord vers le Sud. Une déviation de 10° au niveau du Sahel central est nette.

La formation du couloir d'El-Jadida d'extension plus grande que celle définie par nos prédécesseurs résulterait d'une morphologie particulière d'une ancienne ria engendrée par l'Oued Fel-Fel transformée sous l'action marine à un bras de mer puis à des plates-formes.

Les falaises sont une autre forme de stationnement marin qui a enregistré l'action érosive des fluctuations marines au cours du Quadernaire au niveau du plateau de Mazagan.

Après l'analyse géomorphologique de chaque partie de la région on déduit que l'ensemble des formations est le résultat des transgressions et des régressions marines que la région à connu, Une corrélation entre les traits des stationnements marins a permis de préciser la paléogéographie de la région.

Les karsts sont des formations particulières qui caractérisent la géomorphologie de la région des Doukkala, Ils ont un très grand rôle dans l'hydrogéologie tant superficielle que souterraine de la région, mais ils sont aussi liés aux risques des effondrements.

La combinaison des données géomorphologiques et géologiques, issues respectivement de l'analyse du MNT et du modèle géologique tridimensionnelle, ainsi que des données hydrologiques, nous a permis de proposer une nouvelle méthodologie pour cartographier les zones à risque des effondrements liés aux gypses.

Cette méthodologie est basée sur l'analyse combinées des facteurs lithologique (l'existence des gypses) géomorphologique (les dépressions) et hydrologique (présence d'eau).

Le modèle lithologique tridimensionnel donne une idée sur la répartition et la géométrie des gypses (surtout les gypses du Crétacé inférieur) qui sont le siège des phénomènes karstiques préjudiciables à la stabilité des sols.

La corrélation du modèle lithologique tridimensionnel dans un SIG avec d'autres facteurs d'ordre hydro-dynamique, géomorphologique et structural permet d'identifier les zones à risque d'effondrement, ce qui pourrait constituer un document de base pour les aménagements futur.

Perspectives

Le présent travail a pu mettre à jour les diverses données et connaissances en géomorphologie et en géologie. Cependant plusieurs points restent à approfondir et à développer, tel que :

- ❖ Compléter le modèle géologique tridimensionnel par d'autres données (nouveaux sondages, failles, profils sismiques, piézométrie...),
- ❖ Utiliser des images radar pour une interprétation géomorphologique pénétrative,
- ❖ Etaler cette étude géomorphologique et géologique sur la région d'Abda au sud et de la chouia au nord,
- ❖ Intégrer le temps (quatrième dimension) pour essayer d'approcher l'évolution paléogéographique des Doukkala depuis le Crétacé jusqu'à l'Actuel,
- ❖ Créer un portail internet pour exploiter et partager les données géologiques 3D de la région d'une manière dynamique et pratique et facilement abordable et utilisable.

REFERENCE

- Abkhar F. (1995):** Étude géomorphologique de la basse vallée de l'Oum er-Rabia (Méséta côtière marocaine de Sidi Saïd Maâchou à Azemmour). Thèse Doct. Paris 12., 290 p.
- Aboer M. (2004) :** Synthèse géologique et hydrogéologique et actualisation des données relatives à la nappe, rap. 105p.
- Aboumaria K. (1993) :** Les formations quaternaires du Sahel des Doukkala (Meseta occidentale marocaine) : mise en place et évolution post-sédimentaire. D.E.S., Thèse de 3ème cycle, Fac. Sci, Rabat, 8 tab., 88 fig., 186 p.
- Akil M. (1990) :** Les dépôts quaternaires littoraux entre Casablanca et Cap Beddouza (Meseta côtière marocaine) - Etudes géomorphologiques et sédimentologiques. Thèse Doct. es. Sci., Fac. Sci, Rabat, 417 p.
- Allary A. (1972) :** Etude tectonique et microtectonique d'un segment de chaîne hercynienne dans la partie sud-orientale du Maroc central. Thèse 3ème cycle, Montpellier, Fr. 44 p. au Maroc. Afrique science, Vol. 5, No. 2, pp. 232- 245
- Bac A. Nam V T., Daniel M., et Perrin M. (2005):** Traitement de surfaces géologique pour la construction de modèles 3D. In GTMG. [BNDP05]
- Beaudet G., Maurer G. et Ruellan A. (1967) :** Le quaternaire marocain. Observations et hypothèses nouvelles. Rev Géol. dyne. Géogr.. Phys. , (2), Vol.IX, 4,p.269-310.
- Belahmira A., Souhel A., El Achheb A., Midiker N., El Maliki S., et Ettachfini E. (2010):** Utilisation des systèmes d'information géographique à l'établissement d'une carte hydrogéologique de la région des Doukkala (Integrated Water Resources Management And Challenges Of The Sustainable Development) Second International Conference Agadir, 24–26 March 2010.
- Bernardin C. (1987) :** Interprétation gravimétrique et structure profonde de la Mésétamarocaine et de sa marge atlantique. Thèse Sci. Univ. Aix-Marseille 3, Fr., 163 p. et Trav. Lab. Sci. Terre St-Jérôme, Marseille, 1988, B, 29, pp. 1-162.
- Biberson P. (1958) :** Essai de classification du Quaternaire marin du Maroc atlantique. C. R. Somm. Soc. Géol., France, 4, pp. 67-70.
- Bonham-Carter G. F. (1994):** Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon, Kidlington, UK, 398 pages.
- Boualla O., et Mehdi K. (2011) :** Grotte El Goraan: des atouts pour un site touristique. In: Abstract of first international conference on African and Arabian Geoparks, El-Jadida, Morocco, p 53.

Boulanoir Z. (1999) : L'arc sableux d'El-Jadida Azemmour (Maroc) : Etude morphosédimentaire et approche dynamique pour une gestion environnementale. Thèse de Doctorat Uni. Bretagne Occidentale, 190 p., 96 fig., 11 ab.

Brives A. (1907) : Les terrains crétacés au maroc occidental. Bull. Soc. Géol. France. 4^{ème} série, N°1, p. 81-96.

Calcagno P. (2008): Geological modelling from field data and geological knowledge Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. Physics of the Earth and Planetary Interiors, vol. 171, no 1_4, p. 147-157.

Carruesco C. (1989) : Genèse et évolution de trois lagunes du littoral atlantique depuis l'holocène : Oualidia, Moulay Bouselham (Maroc) et Arcachon (France). Thèse de Doctorat D'état n° 960, 2 tomes, 485 pages. Université de Bordeaux I (France).

Choubert G. (1958): L'Adoudounien et le Précambrien III dans l'Anti-Atlas, in: Les relations entre Précambrien et Cambrien. Colloque intern. Centre nat. Rech. sci., Paris, 76, p. 143-162.

Chtaini A. (1987): Etude hydrogéologique du Sahel des Doukkala (Maroc) Thèse Univ. Sc. Tech. et médicale de Grenoble.

CRAIG (2008): Modèle numérique de terrain. Lempdes, CRAIG, 2 p.

Combe M., Ferre M. et Thauvin J.P. (1975): Ressources en eau du Maroc , plaines et bassins du Maroc atlantique. Not. Mém .Serv. Géol., Maroc, 231, 2, p.1872-184 .complexe dunaire de la zone du Rharb. 10^{ème} Réunion. Annu. Sci. Terre, Bordeaux.

Despaigne W. (2006): Méthodes géostatistique pour l'interpolation et la modélisation en 2D/3D des données spatiales. » Master Université de Bretagne Sud.

Echarfaoui M. (2003): Etude sismique du bassin des Doukkala-Abda, Déformation hercynienne précoce (eovarisque) dans le socle et distension continentale triasico-liasique: implications géodynamiques. Thèse de doctorat d'état es science; Université Ibn Tofail Kenitra.

El Achheb A. (1993): Etude hydrogéologique et hydrochimique de la plaine des Doukkala (Maroc occidental) D.E.S Thèse de 3^{ème} cycle, Fac. Sci, El jadida, 28 tab., 74 fig ., 171 p

El Achheb A. (2002) : Contribution a l'étude de la minéralisation et identification des sources de contamination des eaux souterraines. Application au système aquifère du bassin Sahel Doukkala (Maroc). Thèse de Doctorat d'Etat es Science. Univ. Chouaib Doukkali. El-Jadida. Mémoire.D.E.S.A.51

El Achheb A., Ettachfini EL., Ouadia M., Ibno-Namr K., et Ouakka A. (2016): Rapport préliminaire de l'effondrement survenu le 06/02/2016 sur le territoire communal de Beni Hilal

Enniouar A., Errami E., Lagnaoui A., Boualla O. (2013): Le géopatrimoine de la région de Doukkala-Abda (Maroc): un outil pour un développement socio-économique local durable et homogène. In: Abstract 24th colloquium of African geology, Addis Ababa, Ethiopia, p 336.

Ettachfini M., Company M., Rey J., Taj-Eddine K., Taverab J.M. (1998): Le Valanginien de bassin de Safi (Maroc Atlantique) et sa faune d'Ammonites. Implications paléobiogéographiques. Comptes rendues de l'académie des Sciences. Paris, 327, 319-325.

Ettachfini M., Souhel A., El Attari A., Ouadia M., Maanan M., et Toufiq A. (2005): Rapport sur la Géologie: Système de gestion d'information scientifique dans la région de Sahel-Doukkala, Maroc (SaDIN) LIFE03 TCY/MA/000050, 48p Septembre 2005.

Fadili A. (2014): Etude hydrogéologique et géophysique de l'extension de l'intrusion marine dans le sahel de l'Oualidia (Maroc): Analyse statistique, hydrochimie et prospection électrique. Thèse national, Université Chouaïb Doukkali, Fac Sci, El-Jadida. 256p.

Ferré M. (1969): Hydrologie et hydrogéologie des Abda-Doukkala. Thèse de Docteur Ingénieur, Nancy.

Ferré M. et Ruhard J. P. (1975): Ressources en eau t. 2, (Plaines et bassins du Maroc atlantique); les bassins des Abda-Doukkala et du Sahel d'Azemmour à Safi. Not. Mém. Ser Géol. Maroc, n°231, pp. 261-298.

Frizon de Lamotte D., Crespo-Blanc A., Saint-Bezar B., Comas M., Fernadez M., Zeyen H., Ayarza H., Robert-Charrue C., Chalouan A., Zizi M., Teixell A., Arboleya M.L., Alvarez-Lobato F., Julivert M., Michard A., (2004) : TRASNSMED-transect I [Betics, Alboran Sea, Rif, Moroccan Méseta, High Atlas, Jbel Saghro, Tindouf basin], in: W. Cavazza, F. Roure, W. Spakman, G.M. Stampfli and P.A. Ziegler (Eds), The TRANSMED Atlas – the Mediterranean region from crust to mantle, Springer, Berlin.

Haut Commissariat au Plan (2018) : Annuaire Statistique du Maroc, 692 pp.

Gentil L. (1905) : Quelques observations sur la géologie du Maroc occidental. Bull. Soc. Géol. France.4ème série. T5, p. 755-759.

Gigout M. (1951) : Etude géologique sur la meseta marocaine occidentale (arrière-pays de Casablanca, Mazagan et Safi). Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, n° 86, 2t, 507 pp.

Gigout M. (1952) : Les ressources en eau souterraine des Doukkala et Abda (Maroc Occidental) Rapp. Ined., seconde thèse.

Gigout M. (1955) : Enseignement de trois forages sur la stratigraphie du Crétacé des Doukkala. Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, t 11, N°123, pp 44-55.

Gigout M. (1955) : Note sur la géologie récente des Doukkala. Note. Serv. Géol. Maroc, t. 13, N°128, pp 9-46.

Gigout M. (1956) : Recherches sur le Pliocène et le Quaternaire atlantiques marocains. Trav. Inst. Sc. Chérifien, Serv. Géol. Dyn. Géogr. phys, 5-91 pp.

Gigout M. (1965) : Carte géologique de la Méséta marocaine entre Settat et Mazagan (El-Jadida) (Doukkala et Chaouia occidentale). Notice explicative. Not. Mém. Serv. Géol. Maroc, n° 75 bis.

Guilcher A. et Joly F. (1954) : Recherches sur la morphologie de la côte atlantique du Maroc. Trav. Inst. Sci. Chérifien, Rabat, 2, 104 p.

Habib A. (2016) : données géospaciales multi-sources pour la modélisation hydro-géomorphologique et la cartographie des linéaments dans le sahel-Doukkala, Maroc : apport de la photogrammétrie satellitaire et de l'interférométrie radar. Thèse Doctorat, Univ-Chouaib Doukkali, Fac. Sci. El-Jadida, 271p.

Hafid M. (1999) : Influence de l'évolution du Haut Atlas Occidental et de son avant-pays septentrional sur la dynamique MésoCénozoïque de la marge Atlantique (entre Safi et Agadir) ; apport de la sismique réflexion et des données de forages, Université Ibn Tofail, Kenitra, Maroc, 283 pp.

Hafid M. (2000) : Triassic-early Liassic extensional systems and their Tertiary inversion, Essaouira Basin (Morocco). *Marine and Petroleum Geology*, 17(3): 409-429.

Hilmi K., Orbi A., Lakhdar J., Sarf F. (2004) : Etude courantologique de la lagune de Oualidia (Maroc) en automne Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Vie, 2004-2005, n°26-27, 67-71.

Hminna A., Saber H., Schneider J.W., Klein H., Voigt S., et Hmich D. (2009): Brachychirotherium ichnofauna from the Upper Triassic of Oued OumErRbiaa Formation of the Sidi Said Maachou basin, Coastal Meseta, Morocco. In: 1st International Congress on North African Vertebrate Palaeontology, Marrakech, Morocco, May 25–27, 2009, p. 32.

Hminna A., Voigt S., Klein H., Saber H., Schneider JW., et Hmich D., (2013): Première apparition de tétrapode pieds intes du Trias continental de la région de Sidi Said Maâchou (Meseta occidentale, Maroc). *Journal de Sciences de la Terre en Afrique*, 80, p. 1 - sept.

Khatmi S. (1999) : La couverture méso-cénozoïque des Doukkala (Meseta côtière, Maroc) : Stratigraphie et évolution géodynamique. Thèse de 3ème cycle. Univ. Chouaib Doukkali, El-Jadida, 112 pp.

Khouaja S. (2017) : Etude des formations superficielles du domaine Mesetien occidental Marocain entre Azemmour et Sidi El Abed : Géomorphologie, Géorisque, Sédimentologie et environnement. Thèse Doctorat, Univ-Chouaib Doukkali, Fac. Sci. El-Jadida, 220p.

Laaziz Y., Souhel A., Laylman M., Elaabasi M., et Elbchari F. (2016): Geospatial modeling for karstic collapse probability Map in the Doukkala basin (Morocco), Arabian Journal of Earth Sciences, Vol.3 - Issue 2: 6-16.

Laaziz Y. (2005): Synthèse des études relatives aux formations Sahel-Doukkala (lithostratigraphie et géologie). Rapport. D.E.S.A., Faculté des Sciences, El-Jadida.

Lachance B., Bédard k., Pouliot J., et Kirkwood D. (2004) : la modélisation 3D : application à la géologie. Colloque national Géomatique 2004 de l'ACSG-CIG, Montréal, 27-28 octobre.

Laouina A. (1996) : " le littoral de la ville de rabat-sale, un espace menace, évolution des activités et des implantations, dégradation environnementale et options d'aménagement", Chaire Unesco-Gas Natural de développement durable, Rabat, Maroc.

Lecointre G. (1926) : Recherches géologiques dans la Meseta marocaine. Mém.Soc. Sei. natur.Maroc, t. 14, p.158.

Mallet J.L. (2002) : Geomodeling . Oxford University Press, New York, USA, 599 pages.

Mc Gaughey J., et Morrison K. (2001) : The Common Earth Model: A Revolution in Exploration Data Integration", Site Web de Mira Geosciences: www.mirageosience.com, Septembre 2004, 11 pages.

Mdiker N., El achheb A., El mandour A., Younsi A., El maliki S., et Bouteyeb K. (2009) : Contribution à l'étude de la salinisation de la nappe côtière de sahel El l'Haouzia région d'El-Jadida au Maroc. Afrique science, Vol. 5, No. 2, pp. 232-245.

Mdiker N. (2017) : Etude de la salinisation des eaux souterraines du sahel el haouzia (maroc) : approches hydrogéologique, hydrochimique et isotopique. Thèse national, Université Chouaïb Doukkali, Fac Sci, El-Jadida. 197p.

Michard A. (1967) : Plissement concentrique, plissement synschisteux et granitisation dans le Cambro-Ordovicien des Rehamna occidentaux (Maroc). CR. somm. Séances Soc. géol. Fr. , 8,p. 347-348.

Negroni X., Gendrot Y., Jahn Z., et Skwirblies W. (1966) : Rapport géologique et technique du puits OLD1, convention Preussag–BRPM,.

Nissoul A., Aberkan M. et Ouadia M. (2002) : Contribution à l'étude des formations littorales plio-quaternaires entre Casablanca et Azemmour Ann. Soc. géol. Nord, t. 9, p. 231-236.

OQLF (2005) : Le grand dictionnaire terminologique. Office Québécois de la Langue Française.

Ouadia M. (1998) : Les formations plio-quaternaires dans le domaine mésétien occidental entre Casablanca et Safi : Géomorphologie, Sédimentologie, Paléoenvironnements quaternaires et Evolution actuelle. Thèse d'Etat es Sciences. Univ. Mohammed V. Rabat, 319 p.

Ouadia M. (2000) : La problématique des eaux superficielles des Doukkala. Actes de la 2^{ème} session de l'Université de Printemps des Doukkala-Abda, Pub. Univ. Chouaib Doukkali-El-Jadida, n° 3, pp. 75-76.

Ouadia M., Aberkan M., et Boualla O. (2008) : les merveilles et les risques de la karstification dans les formations plioquaternaire de la zone côtière des Doukkala-Abda (maroc). Actes RQM4, Oujda, 2008,40-48.

Oulaaross Z., (2009) : Etude climatologique, hydrogéologique et géophysique du Sahel Côtier des Doukkala (Maroc). Apport de l'analyse statistique et de l'inversion des données géoélectriques à l'étude du biseau salé de la lagune de Sidi Moussa. Thèse national, Université Chouaïb Doukkali, Fac Sci, El-Jadida. 282p.

Pouliot J., Lachance B., Brisebois A., Rabaud O., Kirkwood D. (2003) : 3D geological modeling: Are GIS or CAD appropriates? Dans Proceedings of ISPRS Workshop, WG H/5, II/6, IV/1 and IV/2 Joint Workshop on "Spatial, Temporal and Multi-Dimensional Data Modelling and Analysis", Québec, Canada

Raper J.F. (2000) : Multidimensional Geographic Information Science. Taylor & Francis, London, 300p.

Richardson D., et Martin L. (2001) : Evaluation of Exploration Targets Using 3D GIS (GOCAD) at Kidd Creek. gOcad Mining Users Meeting, Sudbury, Canada, 24-26 Septembre 2001.

Roch E. (1930) : Études géologiques dans la région méridionale du Maroc occidental. Notes. Mém. Serv. Géol. Maroc, t. 9, pp. 1-152.

Ruellan E. (1985) : Structure and evolution of Mazagan (El-Jadida) plateau and escarpment off central Morocco Océanologica act n° sp., 59-72p.

Souhel A., Maanan M., et El Bchari F. (2005) : Rapport sur la géologie des aquifères. Système de gestion d'information scientifique dans la région de Sahel Doukkala, Maroc (SaDIN). Projet, LIFE03 TCY/MA/000050. 33P.

Texier J.P., Lefevre D. et Raynal J.P (1994) : Contribution pour un nouveau cadre stratigraphique des formations quaternaires de la région de Casablanca (Maroc). C.R.Acad Sc., Paris. 318, p. 1247-1253.

Weisrock A., et Fontugne M. (1991) : Morphogenèse éolienne littorale au Pléistocène supérieur et à l'Holocène dans l'Oulja atlantique marocaine. In: Quaternaire, vol. 2, n°3-4, 1991. pp. 164-175.

Witam O. (1988) : Etude stratigraphique et sédimentologique de la série Mésozoïque. Thèse Uni. Cadi Ayyad.. Marrakech. 193p.

Younsi A. (2001) : Méthodologie de mise en évidence des mécanismes de salure des eaux souterraines côtières en zone semi-aride irriguée (Chaouia côtière, Maroc). Thèse d'Etat. Univ. Chouaïb Doukali. El Jadida. 175 p.

Zourarah B. (2002): Les processus côtiers actuels et leur impact sur l'environnement littoral des Doukkala : Approches hydrodynamiques, morphologiques, sédimentologiques et géochimiques. Thèse de Doctorat d'Etat es Science, Univ. Chouaib Doukkali, El-Jadida. 209p.

www.sadin.org **Base de Données.**, Projet SaDIN « Sahel-Doukkala Scientific Information Network »..

www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/fr/home/topics/geology/3D-Geology/terms.html.

www.scminc.com **Petrel tips & tricks (2011):** from SCM (Knowledge Worth Sharing) « *Table: Petrel/Z-MAP Plus algorithm pairings with discussions* » 4801 Woodway Drive, Suite 150W • Houston, TX 77056 • info@scminc.com © 2011 SCM E&P Solutions, Inc.

"L'apprentissage est sans fin."

XUN Zi (465-390 B.C.)
