



UNIVERSITE SULTAN MOULAY SLIMANE
Faculté des Sciences et Techniques
Béni-Mellal



*Centre d'Études Doctorales : Sciences et
Techniques*

Formation Doctorale : Ressources Naturelles, Environnement ET Santé

THÈSE

Présentée par

SALAHDDINE DIDI

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR

Spécialité : Géosciences

Option : Géophysique appliqué et hydrogéologie

**Reconnaissance hydro-géophysique et structurale de la zone
Nord-Est du bassin sédimentaire du Tadla et étude de la
vulnérabilité à la pollution intrinsèque de la nappe phréatique**

Soutenue le 27/11/2018 à 10h devant la commission d'examen :

<i>Pf. Abderrahmane EL GHMARI</i>	<i>Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T. Beni-Mellal, Maroc</i>	<i>Président</i>
<i>Pf. Amina WAFIK</i>	<i>Professeur, Université Cadi Ayyad, F.S. Semlalia-Marrakech, Maroc</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>Pf. Ahmed BARAKAT</i>	<i>Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T. Beni-Mellal, Maroc</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>Pf. Fatima Ezzahra HOUSNI</i>	<i>Professeur, Université de Guadalajara, Mexique,</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>Pf. Abderrazak El HARTI</i>	<i>Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T. Beni-Mellal, Maroc</i>	<i>Examineur</i>
<i>Pf. Abdessamad NAJINE</i>	<i>Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T. Beni-Mellal, Maroc</i>	<i>Encadrant</i>

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au sein du «Valorisation et gestion des Ressources naturelles » à l'a Faculté des Sciences et Techniques, Université Sultan Moulay Slimane de Béni Mellal.

Dans le petit espace de liberté des remerciements, je voudrais remercier toutes les personnes qui ont émaillé ces trois dernières années pour en faire des années riches en belles rencontres...

*En tout premier lieu, je tiens à remercier sincèrement le directeur de thèse Mr **Abdessamad NAJINE**, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal, pour la qualité de son encadrement scientifique, pour ses conseils très utiles et ses critiques constructives pour l'amélioration de la qualité de la rédaction, l'harmonie et la présentation de ce mémoire. Je lui exprime donc mes vives gratitudee.*

*J'aimerai aussi remercier Madame **Amina Wafik**, (Co-encadrant de thèse) Professeur à la Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech et Madame **Fatima Ezzahra Housni**, Professeur au centre universitaire du Sur de l'université de Guadalajara, pour leurs soutiennes et leurs accompagnements, leurs critiques constructives et leurs remarques subtiles qui ont été pour moi, à la fois, un encouragement et une motivation illimitée.*

*Je tiens à remercier particulièrement Mr **Humberto Bracamontes del Toro** professeur au Campus national de technologie du Mexique Cd. Guzmán. CD. Guzmán Jalisco, Mexique, pour leur précieux aide et leur encouragement.*

Mes remerciements s'adressent aussi aux membres de jury :

- *Le professeur **Abderrahmane EL GHMARI**, qui a bien voulu me faire l'honneur de présider le jury*
- *Le professeur **Abderrazak ELHARTI**, d'avoir accepté d'examiner et juger ce travail.*
- *Le professeur **Amina Wafik**, d'avoir accepté de rapporter cette thèse*
- *Le professeur **Fatima Ezzahra HOUSNI**, d'avoir accepté de rapporter cette thèse*
- *Le professeur **Ahmed BARAKAT**, d'avoir accepté de rapporter cette thèse*

*Je n'oublie pas dans ces remerciements tous mes amis de la faculté des sciences et technique de Béni Mellal pour leur ambiance agréable dans laquelle s'est déroulé ce travail, leur sympathie et leur soutien durant toutes ces années de recherche et qui m'ont accompagné lors de l'acquisition des mesures géophysiques sur le terrain en particulier Je cite **Sabri, Aadraoui, Karaoui, Khalid, Zerouali, Ikram, fadwa, Halima, Fatima Zahra, Mostapha, Mohamed.***

Ce que je dois à ma chère mère va bien au-delà des remerciements ou même de la gratitude. Mon vocabulaire est trop limité pour exprimer son importance dans ce travail et dans ma vie. Elle le sait.

*Je dédie enfin ce manuscrit à tous les membres de ma famille qui m'ont toujours aidé, encouragé et soutenu durant toutes ces longues années de recherche jusqu'au l'achèvement de ce travail, et plus précisément je cite : en premier lieu **mes parents, mes frères et sœurs.***

Merci encore à tous.

Résumé

L'utilisation des eaux profondes de la plaine dans agriculture, eau potable et domestique nécessite une connaissance approfondie des caractéristiques géophysiques des formations géologiques perméables. Pour cela une étude géologique, hydrogéologique, géo-électrique, gravimétrique et de vulnérabilité à la pollution intrinsèque a été effectuée dans la zone Nord-est de la plaine du Tadla afin de mesurer les paramètres hydrogéologiques, imager la structure du sous bassin et évaluer la vulnérabilité de son système aquifère.

Les mesures des sondages électriques et la tomographie électrique ont été traitées, analysées à l'aide des logiciels spécifiques (IP2Win, Res2d) puis corrélées avec les données de certains forages et puits existant dans la zone. L'analyse et l'interprétation de l'ensemble des mesures montrent que les profils de résistivités établis mettent en évidence la superposition de plusieurs couches d'épaisseurs variables (15-190 m) et de résistivités électriques différentes (14-1600 Ω .m). Ces terrains illustrent grosso modo une structure monoclinale qui plonge du NE vers le SW avec une épaisseur qui augmente du Nord vers le sud.

L'utilisation des Système d'information géographique (SIG) a permis de dresser un certain nombre de cartes thématiques relatives respectivement aux isopaques des résistants, aux toits et murs des aquifères, aux iso-résistivités et aux isohypses afin de cerner la structure géologique du système aquifère et de mieux comprendre ses implications hydrogéologiques et hydrodynamiques.

L'étude gravimétrique du bassin montre une diminution des valeurs de l'anomalie de Bouger du Nord vers le Sud. Cette diminution peut être expliquée par un épaissement de la série sédimentaire en se déplace vers le Sud. D'autre côté La carte d'anomalies résiduelles montre plusieurs zones de gradients gravimétriques qui peuvent correspondre à des contacts ou des discontinuités (failles, flexures).

La modélisation de la vulnérabilité à la pollution intrinsèque de la nappe phréatique par la méthode DRASTIC en utilisant le SIG a permis de mettre en évidence la présence de Trois classes de vulnérabilité (forte, moyenne, faible à très faible). Cette étude montre que la zone Sud-est présentent des vulnérabilités à la pollution élevées à très élevées sur une superficie de 3.6 % de la surface totale étudié. Ces classes ont été validées par une campagne d'analyse physico-chimique exécutée sur des échantillons prélevés de 20 puits répartis sur la totalité de la zone d'étude.

Mots clés : La plaine de Tadla, Sondages électriques, Tomographie électrique, résistivité, Vulnérabilité, DRASTIC, Géophysique, Hydrochimie.

Abstract

The use of the deep waters of the plain in agriculture, drinking and domestic water requires a thorough knowledge of the geophysical characteristics of permeable geological formations. For this, a geological, hydrogeological, geo-electric, gravimetric and vulnerability to intrinsic pollution study was carried out in the North-East zone of the Tadla plain, in order to measure the hydrogeological parameters, to image the structure of the sub-basin. and to assess the vulnerability of its aquifer system.

Electrical sounding measurements and electrical tomography were processed and analyzed using specific software (IP2Win, Res2d), and correlated with data from some existing boreholes and wells in the area. The analysis and interpretation of all the measurements as well as the established resistivity profiles highlight the superposition of several layers of variable thickness (15-190 m) and different electrical resistivities (14-1600 Ω .m). These lands roughly illustrate a monoclinical structure that plunges from NE to SW with a thickness that increases from north to south.

The use of the Geographical Information System (GIS) made it possible to draw up a certain number of thematic maps relating respectively to the isopachs of the resistant ones, the roofs and walls of the aquifers, the iso-resistivities and the isohypses, in order to define the geological structure of the aquifer system and to better understand its hydrogeological and hydrodynamic implications.

The gravity survey of the basin shows a decrease in the values of the Bouger du Nord anomaly towards the South. This decrease can be explained by a thickening of the sedimentary series as it moves towards the South. On the other hand, the residual anomaly map shows several zones of gravity gradients that may correspond to contacts or discontinuities (faults, flexures).

The modeling of the intrinsic pollution vulnerability of groundwater by the DRASTIC method using GIS allowed to highlight the presence of three vulnerability classes (high, medium, low to very low). This study shows that the Southeast zone has high to very high pollution vulnerabilities over an area of 3.6% of the total area studied. These classes were validated by a physico-chemical analysis companion performed on samples taken from 20 wells distributed over the entire study area.

Key words : Tadla Plain, Electrical Surveys, Electrical Tomography, Resistivity, Vulnerability, DRASTIC, Geophysics, Hydrochemistry.

خلاصة

يتطلب استخدام المياه الجوفية للسهل سواء في الزراعة والشرب والمياه المنزلية معرفة دقيقة بالخصائص الجيوفيزيائية للتكوينات الجيولوجية النفوذة ولهذا الغرض ، أجريت عدت دراسات جيولوجية، هيدروجيولوجية و أيضا دراسات جيو-كهربائية، وجاذبية، كما تمت دراسة تلوث الفرشة المائية للمنطقة الشمالية الشرقية لسهل تادلة من أجل قياس المعلمات الهيدروجيولوجية وتصوير هيكل الأحواض السفلى وتقييم ضعف نظام طبقة المياه الجوفية لديها.

تمت معالجة قياسات التنقيب الكهربائي، باستخدام برامج محددة (Res2d، IP2Win) كما تمت مقارنة وتحليل نتائجها بالاعتماد على بعض بيانات بعض الآبار الموجودة في المنطقة والمعطيات الجيولوجية الموجودة حول المنطقة المدروسة. هذه الدراسة سلطت الضوء على تراكم عدة طبقات مختلفة السمك (15-190 م) ومقاومات كهربائية مختلفة (14-1600 ميكرومتر). توضح هذه الأراضي تقريبا بنية أحادية تنغم من الشمال الشرقي نحو الجنوب الغربي مع سمك يزيد من الشمال إلى الجنوب.

لقد أتاح استخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS) رسم عدد من الخرائط الموضوعية المتعلقة على التوالي بخرائط السمك لمختلف طبقات المياه الجوفية الموجودة وخرائط تساوي المقاومة ، وأيضا خرائط تساوي الارتفاع، كل هذا من أجل تحديد البنية الجيولوجية لنظام طبقة المياه الجوفية وفهم عميق لآثارها الهيدروجيولوجية والهيدرودينامية.

تظهر الدراسة الجاذبية للحوض انخفاضاً في قيم شذوذ Bouger من الشمال نحو الجنوب، ويمكن تفسير هذا الانخفاض بارتفاع سمك الطبقات الرسوبية كلما اتجهنا نحو الجنوب. هذا من جهة، من ناحية أخرى تظهر خريطة الشذوذ المتبقية لعدة مناطق تتكون من تدرجات جاذبية والتي قد تتوافق مع تماس أو الانقطاعات جيولوجية (فوالق ، الثنيات).

ساعدت دراسة أوجه تلوث الفرشة المائية الجوفية من خلال طريقة DRASTIC باستخدام نظام المعلومات الجغرافية إلى تسليط الضوء على وجود ثلاث فئات (مرتفع، متوسط، منخفض إلى منخفض جدا). كما تظهر هذه الدراسة أن المنطقة الجنوبية الشرقية تعاني من نقاط ضعف عالية إلى درجة عالية جداً من التلوث على مساحة تبلغ 3.6% من إجمالي المساحة التي تمت دراستها.

تم التحقق من صحة هذه الفئات اعتماداً على دراسة التحليل الفيزيائي والكيميائي والذي أجري على عينات مأخوذة من 20 بئراً موزعة على منطقة الدراسة بأكملها.

الكلمات المفتاحية : حوض تادلة، التنقيب الكهربائي، التصوير المقطعي الكهربائي، المقاومة، الضعف، الجيوفيزياء، الهيدروكيمياء.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Contexte géographique et géologique.....	7
1. Cadre géographique et socio-économique de la zone d'étude :.....	7
1.1 Situation Géographique :.....	7
1.2 Cadre administratif.....	10
1.3 Secteurs Productifs.....	12
1.3.2. L'élevage.....	13
1.3.3. L'industrie.....	14
1.3.4. MINES.....	14
1.3.5. Le tourisme.....	15
2. Cadre géologique :.....	17
2.1. Contexte géologique générale :.....	17
2.2- Cadre géologique régional :.....	20
2.3- Évolution paléogéographique : (Bolelli, 1952).....	27
Chapitre II : Contexte climatique, hydrologique, hydrogéologique et pédologique.....	30
1. Cadre climatique de la zone d'étude.....	30
1.1 Introduction.....	30
1.2 Étude des précipitations.....	31
1.3 Étude de la température.....	32
1.4 Indice d'aridité.....	34
1.5 Évaporation.....	35
1.6 Évapotranspiration.....	37
1.6.1- Évapotranspiration potentielle ETP.....	37
1.6.2. L'évapotranspiration réelle (ETR) :.....	39
1.7 Les vents.....	42
2. Cadre Hydrologique.....	43
3. Cadre Hydrogéologique de la zone d'étude.....	47
3.1 Les nappes phréatiques du Tadla.....	49
3.1.1 La nappe phréatique du périmètre de Béni Amir.....	49
3.1.2 Nappe de Béni Moussa.....	50
3.2 Les nappes profondes du Tadla.....	52
3.2.1 Nappe de l'Eocène.....	52
3.2.2 L'aquifère du Sénonien.....	54
3.2.3 L'aquifère du Turonien.....	56
4. Étude pédologique.....	60

4.1	Sols isohumiques.....	60
4.2	Sols calcimagnésiques	61
4.3	Sols fersiallitiques	62
4.4	Sols hydromorphes	62
4.5	Sols peu évolués.....	62
Chapitre III : Généralités sur les méthodes géophysiques		66
<i>Principes des méthodes géophysiques :</i>		<i>66</i>
1.	Méthodes électriques.....	66
	<i>Notion de la résistivité électrique</i>	<i>67</i>
1.1-	<i>Le sondage électrique.....</i>	<i>69</i>
1.1.1	<i>Propriétés physiques des matériaux qui affectent la résistivité électrique</i>	<i>70</i>
1.1.2	<i>Dispositifs et acquisition des données</i>	<i>72</i>
1.1.3	<i>Interprétation des sondages électriques</i>	<i>75</i>
1.1.4	<i>Règles d'interprétation des sondages électriques</i>	<i>76</i>
1.2.	<i>La tomographie électrique :.....</i>	<i>78</i>
1.2.1	<i>Acquisition des données</i>	<i>80</i>
1.2.2	<i>Modélisation des mesures</i>	<i>81</i>
1.2.3	<i>Instruments de mesure</i>	<i>82</i>
1.3	<i>Gravimétrie</i>	<i>84</i>
1.3.1	<i>Principe de La méthode gravimétrique :.....</i>	<i>84</i>
1.3.2	<i>Champ gravitationnel</i>	<i>85</i>
1.3.3	<i>Calcul de l'anomalie de Bouguer</i>	<i>86</i>
1.3.4	<i>Traitement des données</i>	<i>87</i>
Chapitre IV : Apport des Méthodes géophysique à l'étude des ressources en eau dans la zone Nord-est de la plaine de Tadla		89
1.	<i>Sondages électriques</i>	<i>89</i>
1.1.	<i>Méthodologie de travail</i>	<i>89</i>
1.2.	<i>Matérialisation de la grille de mesure :</i>	<i>90</i>
1.3.	<i>Moyens mis en œuvre.....</i>	<i>91</i>
1.4.	<i>Traitement des donnes</i>	<i>93</i>
1.5.	<i>Analyse des diagrammes des sondages électriques.....</i>	<i>93</i>
	<i>Famille I :</i>	<i>93</i>
	<i>Famille II :.....</i>	<i>95</i>
	<i>Famille III :</i>	<i>96</i>
	<i>Famille IV :</i>	<i>97</i>
1.6.	<i>Interprétation qualitative des SEV.....</i>	<i>98</i>

-Carte de résistivité pour AB= 200 m.	99
-Carte de résistivité pour AB= 600 m.	100
-Carte de résistivité pour AB= 1000 m.	101
1.7. Interprétation quantitative des résultats des SEV	101
<i>Carte des isohypses du toit du substratum de la formation Eocène-Maestrichtien :</i>	102
<i>Carte des isohypses du toit du substratum de la formation sénonien</i>	103
<i>Carte des isohypses du toit du substratum de la formation Turonien</i>	103
<i>Carte des isopaques de l'aquifère Moi- Plio-Quaternaire</i>	104
<i>Carte des isopaques de la formation de l'Éocène</i>	105
<i>Carte des isopaques de la formation conductrice de sénonien</i>	106
1.8. Coupe Géo-électriques :.....	107
1. <i>Le profil Nord-Sud</i>	107
2. <i>Le profil ENS-WSW</i>	110
3. <i>Coupe géoélectrique E-W</i>	113
2. <i>Tomographie électrique</i>	117
2.1. <i>Programme, acquisition, traitement et inversion des données</i>	117
2.2. <i>Interprétation des données de tomographie électrique (TRE)</i>	118
2.2.1 <i>Interprétation des résultats du profil e3</i>	118
2.2.2 <i>-Interprétation des résultats du profil a3</i>	119
2.2.3 <i>-Interprétation des résultats du profil F1</i>	120
3. <i>Gravimétrie</i> :.....	123
3.1. <i>Moyens et méthodes</i> :	123
3.2. <i>Interprétation des résultats</i>	124
Chapitre V : Étude de la vulnérabilité intrinsèque de la zone d'étude du bassin du Tadla	133
1. <i>Concept de vulnérabilité</i> :.....	133
2. <i>Les critères de vulnérabilité</i>	134
2.1. <i>Critères de vulnérabilité intrinsèque</i>	134
2.2. <i>Critères de vulnérabilité spécifique</i>	135
3. <i>Méthodes de cartographie de la vulnérabilité</i> :	135
3.1. <i>Méthode " GOD" de Foster et Hirata (1989)</i> :	135
3.2. <i>Méthode NRA. National River Authority Britannique (1991)</i> :	136
3.3. <i>Méthode de Suais et Dubar (1993)</i> :	136
3.4. <i>Méthode EPIK (J-P.Tripet et al ; 1997)</i> :	136
3.5. <i>La Méthode GALDIT</i>	137
3.6. <i>La méthode RISK</i>	137
3.7. <i>Méthode DRASTIC</i> :.....	138

4.	<i>Application de la méthode DRASTIC à la zone Nord-est de la plaine de Tadla.....</i>	<i>138</i>
4.1.	<i>Système de pondération (poids).....</i>	<i>139</i>
4.2.	<i>Système de notation (cotes).....</i>	<i>140</i>
5.	<i>Données utilisées.....</i>	<i>141</i>
6.	<i>Collecte des données.....</i>	<i>142</i>
7.	<i>Cartographie et évaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères (unicritères).....</i>	<i>143</i>
7.1.	<i>Carte thématique du critère D (Profondeur de la nappe).....</i>	<i>143</i>
7.2.	<i>Carte thématique du critère R (Recharge efficace).....</i>	<i>144</i>
7.3.	<i>Carte thématique du critère A (nature des matériaux aquifères).....</i>	<i>145</i>
7.4.	<i>Carte thématique du critère S (type de sol).....</i>	<i>145</i>
7.5.	<i>Carte thématique du critère T (Topographie).....</i>	<i>146</i>
7.6.	<i>Carte thématique du critère I (Zone non saturée).....</i>	<i>147</i>
7.7.	<i>Carte thématique du critère C (Conductivité hydraulique).....</i>	<i>148</i>
	Chapitre VI : Étude hydrochimique de la zone septentrionale de la plaine de Tadla.....	151
1.	<i>Échantillonnage et matériel :.....</i>	<i>151</i>
2.	<i>Les paramètres physico-chimiques mesurés.....</i>	<i>152</i>
2.1.	<i>La température.....</i>	<i>152</i>
2.2.	<i>Le potentiel d'hydrogène.....</i>	<i>152</i>
2.3.	<i>Composés azotés :.....</i>	<i>153</i>
2.3.1	<i>Nitrates (NO_3^-).....</i>	<i>153</i>
2.3.2	<i>Sulfates (SO_4^-).....</i>	<i>153</i>
2.3.3	<i>Phosphate PO_4^{3-}.....</i>	<i>154</i>
3.	<i>Résultat et Interprétation.....</i>	154
3.1	<i>Température (T °C).....</i>	<i>154</i>
3.2	<i>Potentiel hydrogène (pH).....</i>	<i>154</i>
3.3	<i>Nitrate :.....</i>	<i>155</i>
3.4	<i>Sulfate :.....</i>	<i>156</i>
3.5	<i>Chlorures (Cl^-) :.....</i>	<i>157</i>
	DISCUSSION GENERALE.....	159
	CONCLUSION GENERALE.....	163
	Références bibliographiques.....	167
	Annexes.....	177

Liste des figures :

Figure 1 : Situation de la zone d'étude à l'échelle du Maroc	7
Figure 3: carte d'altitude sous forme du modèle numérique de terrain (MNT)	9
Figure 4 : Carte des pentes (en degré) dans la Plaine de Tadla	9
Figure 5 : Provinces de la Région de Béni Mellal-Khénifra	10
Figure 6 : Évolution de la population de la région Béni Mellal-Khénifra selon le RGPH, 2014	11
Figure 7 : Productions des principales céréales dans la région Béni Mellal-Khénifra, Diagramme à partir des données de l'HCP.	13
Figure 8 : la répartition d'élevage dans la région.....	13
Figure 9 : Répartition du chiffre d'affaires industriel selon les provinces, diagramme réalisée à partir des données de l'HCP de 2015	14
Figure 10 : le jardin d'Ain Asserdoune et la Zone touristique d'Ouzoud.....	15
Figure 11 : Carte des domaines structuraux du Maroc (Michard, 1976).....	19
Figure 13: coupe géologique N° 1.....	21
Figure 14: coupe géologique 2.....	22
Figure 15: coupe géologique N° 3.....	22
Figure 16: Log synthétique des formations géologique de la plaine de Tadla (Michard, 2011)	26
Figure 17: Coupe géologique du synclinal du Tadla. (Boulelli, 1952)	28
Figure 18: Évolution des précipitations moyennes mensuelles interannuelles (1982-2017).....	31
Figure 19 : Répartition de la température moyenne mensuelle des stations étudiée.....	33
Figure 20: Diagramme Ombro-thermique (Station de Béni Mellal)	33
Figure 21: Indice d'aridité de Martonne (Station de Béni Mellal)	34
Figure 22: Variations des moyennes mensuelles d'évaporation de la station de Béni Mellal (1985- 2016)	36
Figure 23: Variations des moyennes mensuelles d'évaporation de la station d'Ahmed Al Hansali (1985- 2016).....	36
Figure 24: La variation de l'évapotranspiration potentielle mensuelle, entre 1985 et 2016, de la station d'Al-hansali et la station de Béni Mellal	38
Figure 25: Évapotranspirations réelle, entre 1985 et 2016, du barrage Ahmed Al-Hansali, et la station de Béni Mellal.....	40
Figure 26: Bilan de Thornthwaite, entre 1985 et 2016, de la station de Béni Mellal.....	41
Figure 27 : Variations des moyennes mensuelles de Vent des stations étudiées (1985- 2017).....	42
Figure 28: Réseau hydrographique couvrant la Plaine du Tadla	43
Figure 29 : Débit moyen en m ³ /s des stations de AC- Mly Bouzekri, Mechra Eddahk, et Oulad Sidi Driss	46
Figure 30: Coupe montrant le système aquifère multicouche de la plaine du Tadla (Najine .2005).....	48
Figure 31: Nappes phréatiques de la Plaine du Tadla (d'après la carte des aquifères de la zone d'action de l'ABHOE)	49
Figure 32 : Carte piézométrique de la nappe phréatique du Mio-Plio-Quaternaire de Tadla (2.2.2016)	51
Figure 34: Carte piézométrique de la nappe profonde du Sénonien de Tadla (2.2.2016)	55
Figure 35 : Carte d'évolution de la piézométrie de la nappe du Turonien (2.2.2016)	57
Figure 36: Carte pédologique de la plaine de Tadla (Source : ORMVAT)	61
Figure 37: Répartition schématique au 1/500000 des sols de Tadla (Missante, 1963)	63
Figure 38: la résistivité électrique.....	67
Figure 39: Technique de sondage électrique diagramme bi logarithmique	69
Figure 40: Diagrammes de sensibilité des principaux dispositifs 2D utilisés pour mesurer la résistivité électrique d'un sous-sol. D'après Dalhin et Zhou (2004)).....	72
Figure 41: Dispositif de Schlumberger	73
Figure 42: dispositif de Wenner	74
Figure 43: Profondeur d'investigation et pouvoir de résolution (d'après Ray. 1971 ; Barker. 1989)	75
Figure 44: Conductance longitudinale et Résistance transverse	77

Figure 45 : Embrayage permettant d'identifier la présence d'à-coup de prise.	78
Figure 46 : Courbe de résistivité présentant un à-coup de prise.	78
Figure 47: principe de la tomographie électrique.....	79
Figure 48: Principe de construction d'une pseudo-section [d'après BARKER. 1992]	81
Figure 49: Représentation des blocs et des points de mesure de la résistivité électrique apparente	81
Figure 50: Exemple de modèle géologique que l'on peut étudier par un levé gravimétrique (Knödel, 2007).....	84
Figure 51 : Étude géologique	90
Figure 52: Emplacement des sondages électriques verticaux	91
Figure 53: Matériels de prospection utilisée.....	92
Figure 54 : Sondage électrique type I	94
Figure 55 : Sondage électrique 37(Famille 2)	96
Figure 56 : Sondage électrique 8(Famille 3)	97
Figure 57 : Sondage électrique 27(Famille 4)	98
Figure 58: Carte de la répartition spatiale de la résistivité apparente pour une ligne AB= 200m.	99
Figure 59: Carte de la répartition spatiale de la résistivité apparente pour une ligne AB= 600m	100
Figure 60: Carte de la répartition spatiale de la résistivité apparente pour une ligne AB/2= 1000m.....	101
Figure 61: Carte des isohypses du toit de la formation Éocène	102
Figure 62: Carte des isohypses du toit de la formation Sénonien.....	103
Figure 63: Carte des isohypses du toit de la formation Turonien	104
Figure 64: Carte des isopaques de l'aquifère Mio- Plio-Quaternaire.....	105
Figure 65: Carte des isopaques de la formation résistante de l'éocène	106
Figure 66 : Carte des isopaques de la formation conductrice de sénonien	107
Figure 67: coupe géoélectrique N_S	109
Figure 68: Sondages carottés de la coupe synthétique N-S.....	110
Figure 69: coupe géoélectrique N°2	112
Figure 70: Sondages carottés de la coupe synthétique WSW-ENE.....	113
Figure 71: Coupe Geoélectrique N°3.....	115
Figure 72: Sondages carottés de la coupe synthétique E-W.....	116
Figure 73: Carte des affleurements des formations aquifères	116
Figure 74: Localisation des profils de tomographie électrique	117
Figure 75: Matériel de la tomographie.....	118
Figure 76: Section d'imagerie électrique 2D de la ligne tomographique e3.....	119
Figure 77: Section d'imagerie électrique 2D de la ligne tomographique a3	120
Figure 78 : Section d'imagerie électrique 2D de la ligne tomographique F 1	121
Figure 79 : Profils inversés de tomographie électriques 2D du Nord vers le sud de la zone d'étude	121
Figure 80 : Profils inversés de tomographie électriques 2D du Nord vers le sud de la zone d'étude	122
Figure 81: Localisation des puits au niveau du bassin de Tadla	123
Figure 82: Carte gravimétrique de l'anomalie de Bouger du Bassin de Tadla	125
Figure 83: Carte gravimétrique de l'anomalie résiduelle de la zone d'étude	126
Figure 84: illustration de l'épaississement de la couverture sédimentaire du Nord vers le Sud à travers le bassin de Tadla.	127
Figure 85 : Contacts gravimétriques obtenus à partir des maxima du gradient horizontal calculé pour la carte d'anomalies résiduelle et pour ses prolongements vers le haut à différentes altitudes : 200 m (1), 500 m (2), 1000 m (3) , 2000 m (4) et 3000 m (5).....	129
Figure 86: Schéma structural de la zone d'étude et rosace des failles mises en évidence	130
Figure 87 : carte des discontinuités géophysique	130
Figure 88: Les critères de la vulnérabilité intrinsèque de la méthode RISK (modifiée d'après Petelet Giraud et al, 2001).....	137

<i>Figure 89: organigramme présentant l'intégration des sept paramètres principaux de la méthode DRASTIC</i>	142
<i>Figure 90 : Carte de vulnérabilité de la nappe phréatique relative à la profondeur de l'eau (D)</i>	143
<i>Figure 91 : Carte de vulnérabilité de la nappe relative à la Recharge efficace (R)</i>	144
<i>Figure 92: Carte de vulnérabilité de la nappe relative à lithologie de l'aquifère (A)</i>	145
<i>Figure 93 : Carte de vulnérabilité de la nappe relative au type du Sol (S)</i>	146
<i>Figure 94: Carte de vulnérabilité de la nappe relative à la Pente (T)</i>	147
<i>Figure 95: Carte d'altitude de région étudiée</i>	147
<i>Figure 96: Carte de vulnérabilité de la nappe relative à la Zone non Saturé (I)</i>	148
<i>Figure 97: Carte de vulnérabilité de la nappe relative à la Perméabilité (C)</i>	149
<i>Figure 98: Carte de vulnérabilité intrinsèque à la pollution (Application de la méthode DRASTIC)</i>	149
<i>Figure 99: Localisation des points de prélèvements des eaux souterraines</i>	151
<i>Figure 100: les mesures in situ</i>	152
<i>Figure 101: Distribution spatiale de la Température dans la zone d'étude</i>	154
<i>Figure 102: Distribution spatiale de PH dans la zone d'étude</i>	155
<i>Figure 103 : Distribution spatiale de Nitrate dans la zone d'étude</i>	156
<i>Figure 104: Distribution spatiale de sulfate dans la zone d'étude</i>	156
<i>Figure 105: Distribution spatiale phosphate dans la zone d'étude</i>	157
<i>Figure 106: Distribution spatiale de chlore dans la zone d'étude</i>	158

Liste des Tables :

Tableau 1 : Population légale de la région de Béni Mellal-Khénifra (MG, 2015) -----	11
Tableau 2 : Coordonnées Lambert des stations étudiées -----	30
Tableau 3 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles des stations étudiées (1982-2017). -----	31
Tableau 4: Températures moyennes mensuelles (en °C) enregistrées à Béni Mellal (1985-2016),(Source : ABHOE, 2017) -----	32
Tableau 5 : Températures moyennes mensuelles (en °C) enregistrées à Ahmed AL hansali (1985-2017). (Source : ABHOE, 2017) -----	32
Tableau 6 : La relation entre l'indice d'aridité de Martonne et le type de climat : -----	34
Tableau 7 : Évaporations moyennes mensuelles de la Station de Béni Mellal (Source : ABHOR 1985-2016)----	35
Tableau 8 : Évaporations moyennes mensuelles de la Station d'Ahmed Al Hansali (Source : ABHOR 1985-2016). -----	36
Tableau 9 : Calcul de l'ETP mensuelle et annuelle par la méthode de Thornthwaite pour la Station de Béni Mellal (Latitude = 32° 32'N) (Source : ABHOR 1985-2016).-----	38
Tableau 10 : Calcul de l'ETP mensuelle et annuelle par la méthode de Thornthwaite pour la Station d'Ahmed AL-Hansali (Latitude = 32° 40'N) (Source : ABHOR 1985-2016).-----	38
Tableau 11 : Calcul de l'évapotranspiration réelle mensuelle, entre 1985 et 2016, par la méthode de Turc pour l'ensemble des stations étudiées. (Source : ABHOR 1985-2016).-----	39
Tableau 12 : Bilan de Thornthwaite, entre 1985 et 2015, pour la station de Béni Mellal-----	41
Tableau 13 : Vitesse du vent mensuel moyen (m/s) entre 1985 et 2016. (Source : ABHOR 1985-2016).-----	42
Tableau 14 : Évolution saisonnière du débit d'Oum Er Rbia de l'amont vers l'aval de AC- Mly Bouzekri (1970-2011). -----	45
Tableau 15 : Valeurs usuelles de la résistivité électrique des formations géologiques (Parasnis. 1962 ; Meyer de stadelhofen. 1991)-----	68
Tableau 18 : caractéristiques géoélectriques du SEV 15 -----	94
Tableau 19 : caractéristiques géoélectriques du SEV 37 -----	95
Tableau 20 : caractéristiques géoélectriques du SEV 8 -----	96
Tableau 21 : caractéristiques géoélectriques du SEV 27 -----	97
Tableau 22 : Classification de la vulnérabilité dans DRASTIC standard (Aller et al. 1987) -----	139
Tableau 23 : Poids des paramètres dans la méthode DRASTIC standard (Aller et al. 1987)-----	139
Tableau 24 : Cotes accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC dans la zone d'étude -----	140
Tableau 25 : Types et sources d'informations disponibles.-----	142
Tableau 26 : Classes et notes retenues pour D -----	143
Tableau 27 : Classes et notes retenues pour R -----	144
Tableau 28 : Classes et notes retenues pour A -----	145
Tableau 29 : Classes et notes retenues pour S (type de sol) -----	146
Tableau 30 : Classes et notes retenues pour T (topographie) -----	146
Tableau 31 : Classes et notes retenues pour I (zone non saturée)-----	148
Tableau 32 : Classes et notes retenues pour C (la conductivité hydraulique) -----	148
Tableau 33 : classification des eaux d'après leur pH -----	153

Abréviations

ABHOER : Agence du Bassin Hydraulique de L'Oum Er-bia

CE : Conductivité électrique

C_s : Niveau conducteur du sénonien

C_c : Niveau conducteur du Cénomanién

DOS : Dark Objet Soustraction

DPA : Direction Provinciale de l'Agriculture

ERST : Earth Resource Technology Satellite

ERS : European Remote Sensing

ETR : Évapotranspiration Réelle

ETP : Évapotranspiration Potentielle

ETP : Évapotranspiration

ESRI : Environmental Systems Research Institut

HCP : Haut-Commissariat au Plan

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index,

NP : Niveau piézométrique

ORMVAT : Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Tadla

OCP : Office chérifien des phosphates

P : Précipitations

RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitat

RFU : Réserve Facilement Utilisable

R_t : Niveau résistant du Turonien

R_e : Niveau résistant d'Eocène

R_q : Niveau conducteur de Mio-Plio-Quaternaire

R_T : Résistivité transversale

SEV : Sondage Électrique Vertical

SIG : Système d'Information Géographique

SPOT1 : (Satellite Pour l'Observation de la Terre)

T : Température

TRE : Tomographie de Résistivité Électrique

Introduction générale

La gestion des ressources en eau est un des problèmes majeurs propres aux pays de la rive sud de la Méditerranée, car elle représente une source de clé du développement durable, de l'amélioration de la qualité de la vie. Cette gestion qualitative et quantitative des ressources en eaux superficielles et souterraines est actuellement une nécessité, compte tenu d'une part de l'accroissement continu des besoins, et d'autre part de la dégradation constatée durant ces dernières décennies de la qualité de l'eau dans ces pays en voie de développement. De surcroît, lorsque les ressources sont limitées et que la sécheresse qui touche l'ensemble du pays devient conjoncturelle, cette nécessité devient urgente.

Au Maroc, une bonne connaissance du fonctionnement des aquifères régionaux et le recours à une gestion appropriée sont ainsi reconnus par l'ensemble des usagers (agriculture, régies, industries) et par le législateur (promulgation de la loi sur l'eau en 1995). Cette connaissance nécessite au préalable, une identification géologique et hydrogéologique poussée (réalisation de forages, reconnaissances géophysiques, essais par pompage, jaugeage des sources et des cours d'eau, analyses physico-chimiques et bactériologiques...)

🔍 Problématique :

Selon l'indicateur de pénurie de l'eau, le Maroc se situe dans le niveau de stress hydrique régulier (Falkenmark et al, 1992), et ce à cause de ses ressources en eau renouvelable qui sont inférieures à 1700 m³ et supérieures à 1000 m³ par habitant par an.

Du fait de sa constitution géologique, le Maroc comporte la part la plus importante de ces eaux dans les aquifères souterraines qui représentent une quantité considérable de son patrimoine hydrique : bassins sédimentaires à nappes phréatiques et à nappes captives dans les zones de Souss, Tadla, Haouz, et Saïs. En plus le Maroc compte une cinquantaine d'aquifères superficiels et une trentaine d'aquifères semi-profonds à profonds (Bahir et al, 2002).

Les études de planification effectuées ont dévoilé que les ressources en eau conventionnelles seront saturées au niveau de la plupart de bassins à l'horizon 2020, et que ces déficits prévus risquent d'être aggravés dans le cas de conjonction avec des périodes de sécheresse (Bahir 2002).

Les ressources en eau au Maroc sont considérées comme une priorité dans le cadre de la stratégie nationale de protection de l'environnement. Toutefois, elles sont confrontées à des

problèmes quantitatifs et qualitatifs. Ces problèmes sont dus successivement au type de climat (semi-aride à aride dans la majeure partie du territoire, avec des sécheresses épisodiques ainsi que de la répartition inégale dans le temps et dans l'espace de la pluviométrie) et à la détérioration par les différents rejets polluants, telles que les déchets et les eaux usées domestiques et industrielles.

🔗 Objectifs :

Afin de surmonter ces problèmes, le Maroc a planifié et a exécuté plusieurs actions dans le but d'assurer en permanence l'alimentation en eau pour ses populations. Ces actions se basent sur un principe de gouvernance rationnelle qui tend à conserver le patrimoine hydrique et maîtriser sa distribution tant dans les années humides que dans les années sèches. Dans ce sens s'inscrit l'amélioration de la performance des infrastructures hydraulique (grands barrages, ouvrages de transfert d'eau et forages).

Le bassin de Tadla représente une vaste aire agricole où les eaux souterraines sont soumises à une exploitation intense, afin de subvenir aux besoins de plus en plus accrus de l'irrigation, de l'usage industriel des sucreries installées dans la région et de l'usage domestique de la population. Lors des deux dernières décennies, la succession de plusieurs années de sécheresse sous un climat semi-aride a aggravé la situation, en provoquant un accroissement de l'activité de pompage des eaux souterraines. Ceci a induit une baisse du niveau piézométrique et, par conséquent, un assèchement de nombreux points d'eaux habituels. Les eaux souterraines sont devenues ainsi de plus en plus rares et beaucoup de forages de reconnaissance de ces eaux se sont révélés négatifs, à cause de l'insuffisance des connaissances de l'hydrogéologie régionale.

Le développement de l'activité agricole s'est accompagné par la mise en place d'une infrastructure routière, agro-industrielle et commerciale très importante qui a eu pour effet direct l'accélération de l'intégration de la plaine dans l'économie nationale. Néanmoins, ces atouts caractéristiques sont contrariés par une problématique qui se manifeste par la dégradation de la qualité des eaux superficielles et souterraines, en particulier celles de la nappe phréatique. En effet, l'utilisation accrue des ressources en eaux superficielles (salinité supérieure à 1,7 g/l) couplée à une intensification de l'agriculture a entraîné une pollution excessive des eaux souterraines. La pollution diffuse générée par les intrants agrochimiques s'est amplifiée par les sources de pollution ponctuelles représentées essentiellement par les

activités humaines et agro-industrielles. Cette situation risque à terme de mettre en cause la durabilité de l'activité agricole dans son ensemble, porte atteinte à la santé publique et vient compromettre le pouvoir d'auto-épuration des ressources en eau.

C'est dans ce sens que s'établit l'objectif général de cette étude, Il consiste à déterminer la structure et la géométrie du système aquifère d'une zone particulièrement «sombre » de point de vue géologique et hydrogéologique. Il s'agit précisément la zone septentrionale de la plaine de Tadla en bordure du plateau des phosphates, par la combinaison de plusieurs outils et la réalisation des méthodes géophysique. Enfin de comprendre le comportement de ce système aquifère, apprécier sa sensibilité et déterminera la qualité hydrochimique des eaux souterraine en mesurant les paramètres physico-chimiques. Les objectifs spécifiques de ce Project consistent en 1. Analyser les données géologiques et géophysiques afin de déterminer la géométrie du réservoir, 2. Cartographie de la zone d'étude par la télédétection, 3. Caractériser l'hydrochimie des eaux souterraines du domaine prospecté.

La méthodologie de recherche vise en outre l'exploration de la zone Nord-est de la plaine du Tadla en se basant sur des techniques géologique, hydrogéologique et géophysique afin d'imager sa structure du sous-bassin et de mesurer les différents paramètres hydrogéologiques de cette zone.

Les informations géologiques recueillies ont permis de faciliter le choix des dispositifs de mesures les plus adaptées au contexte d'étude et de mieux implanter les profils d'acquisition des données. En parallèle avec cette première phase de l'étude, il a été procédé à la récolte de toutes les données relatives à l'hydrogéologie.

Dans ce sens, nous avons réalisé des campagnes de profils électriques et des mesures de gravités. En effet, les méthodes géophysiques mesurant la résistivité électrique du sous-sol et la gravimétrie traite et interprète les données gravimétriques disponibles du substratum, permettant de visualiser de façon directe la forme et la structure des formations géologiques constituant le bassin étudié.

En plus, dans cette étude, on a établi des cartes d'iso-résistivités correspondant à des longueurs différentes d'AB, des cartes d'isohypse et des cartes d'isopaques. La juxtaposition et l'interpolation entre les différents niveaux électriques mis en évidence sur les sondages électriques et la réalisation des cartes de résistivité, de profondeur et d'épaisseur, nous a permis de suivre l'évolution latérale et verticale de la résistivité apparente des dégages des

coupes géo-électrique des formations juxtaposées et de relever les caractéristiques physiques du sous-sol dans la zone Nord-est de la plaine de Tadla.

La gravimétrie concerne le traitement et la réinterprétation des données gravimétriques disponibles. En effet, nous avons calculé la carte l'anomalie de Bouger et de l'anomalie résiduelle sur lesquelles les anomalies associées aux structures peu profondes sont amplifiées, ce qui permet de mieux circonscrire les hétérogénéités de densité superficielle. Ce traitement est très utile pour la localisation des contacts géologiques du fait que la limite entre deux blocs de densités différentes correspond au maxima du gradient horizontal.

Sur le plan qualitatif, une évaluation de l'état de santé des eaux souterraines de la zone étudiée est menée pour déterminer le degré de leur vulnérabilité à la pollution et localiser les zones à haut risque en utilisant la méthode DRASTIC.

Plan du travail :

Ce mémoire de thèse s'articule en 3 parties qui sont organisés comme suit :

Le mémoire débute par une "introduction générale" qui donnera une idée sur les problématiques dans la zone d'étude, les objectifs et une esquisse des travaux réalisés, ensuite une première partie où nous présenté un aperçu général sur la plaine du Tadla et allons préciser la zone d'étude prospectée. Il s'agit de l'analyse des données géographiques, socio-économiques, géologiques, hydrologique et hydrogéologiques, À la fin de la partie, nous avons étudié la cartographie de la zone d'étude par la télédétection. Les chapitres de cette partie sont basés sur l'exploitation des données des monographies régionale de Béni Mellal-Khénifra 2015 et sur les données de l'Agence du Bassin de L'Oum Er-bia et basé aussi sur les données des images satellites. Dans la deuxième partie, on a commencé par un rappel des principes de différentes méthodes de prospection géo-électrique utilisé dans notre étude. La méthode du sondage électrique permettra d'établir des correspondances entre la nature lithologique et la résistivité électrique. Grâce au recours à la tomographie électrique nous réaliserons des sections de résistivité de différentes couches prospectées. Enfin, et pour déterminer l'allure du socle Paléozoïque de la zone étudiée et pour chercher les discontinuités présente dans le sous-sol, nous avons interprété les données de la méthode gravimétrique. La dernière partie de la thèse consiste d'une étude de vulnérabilité régionale des eaux souterraines par l'utilisation de la méthode DRASTIC (Aller et al, 1987). L'indice DRASTIC de la zone étudiée a été déterminé par la pondération et la combinaison de sept paramètres en fonction de leur d'atténuation des

pollutions est une Analyse détaillée des différents paramètres intrinsèques préconisés par la méthode DRASTIC et définition des classes de vulnérabilité correspondantes ; cette partie est finalisé par une étude physico-chimique des eaux souterraines de la zone prospecter.

Les résultats obtenus seront discutés et comparées aux différents travaux de recherches portants sur la même problématique. Cette discussion se terminera par une "conclusion générale" qui synthétisera les différents résultats obtenus et qui mettra en perspective les recommandations à suivre pour des études souhaitées.

Partie I

**CONTEXTE GENERAL DE LA PLAINE DE
TADLA**

Chapitre I : Contexte géographique et géologique

1. Cadre géographique et socio-économique de la zone d'étude :

1.1 Situation Géographique :

La zone d'étude est située au centre au Nord-Est de La plaine qui fait partie du Bassin Moyen de l'Oum Er-bia (Fig.1). Cette plaine se présente comme une vaste dépression monosynclinale orienté WNW-ESE et couvrant une superficie d'environ 3600 km² environ. Elle est limitée vers le Nord par le Plateau des Phosphates, vers l'Est la plaine se rétrécit le long de l'Oum-er-Rbia en direction des reliefs accusés des pays Zaïan. À l'Ouest, aucune limite géographique ne sépare le Tadla de la Bahira qui lui fait suite, mais le cours inférieur d'Oued El Abid sera pris comme limite régionale de cet ensemble, et au Sud, elle est limitée par la chaîne montagneuse de l'Atlas, essentiellement jurassique (Kuper, 2004).

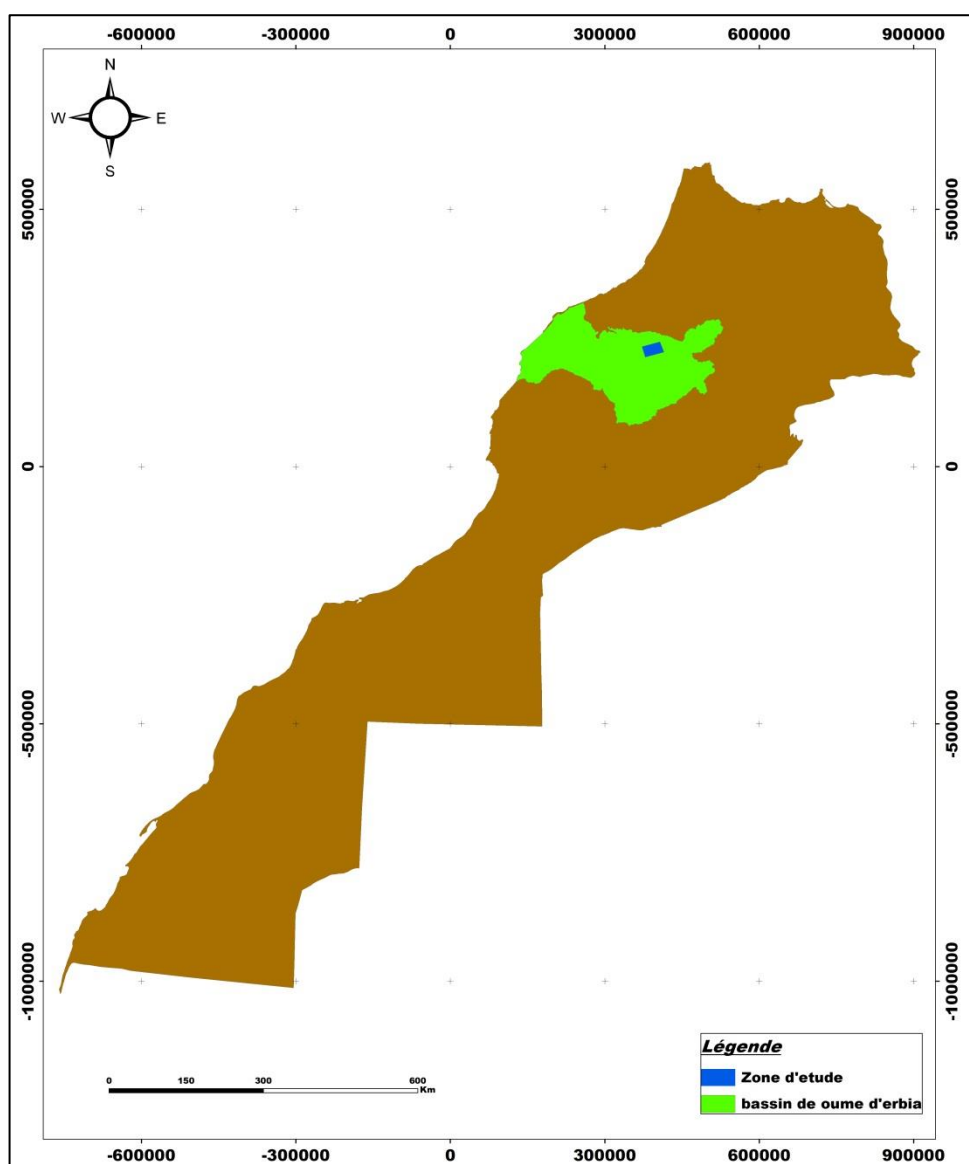


Figure 1 : Situation de la zone d'étude à l'échelle du Maroc

La longueur de la plaine ainsi définie atteint environ 125 km tandis que sa largeur maximum au centre est de 50 km environ. L'altitude moyenne varie de 350 m à 500 m avec le point le plus bas à Sidi-Driss (station hydrologique sur l'Oum-er-Rbia : 315 m) et le plus haut sur la route principale 24 aux environs de Tighboula (750 m environ) (El hammoumi, 2013).

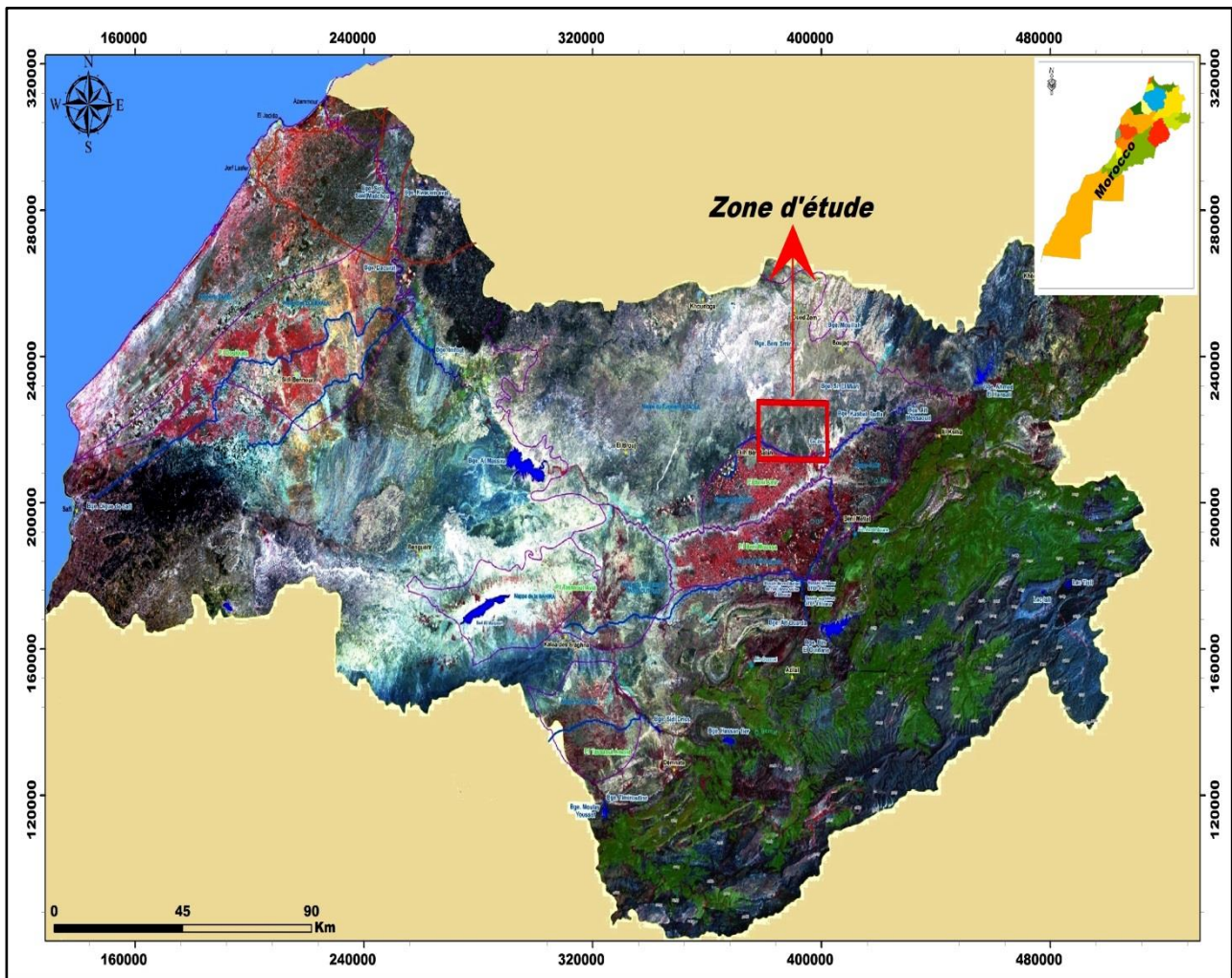


Figure 2 : Situation de la zone d'étude à l'échelle du Bassin de l'Oum Er-bia

La topographie est généralement régulière sauf dans une bande étroite de part et d'autre du lit encaissé des principaux oueds (Oum Er-bia, El Abid) et dans la zone de piedmont de l'Atlas où apparaît une série de grands cônes de déjection.

La pente est, dans l'ensemble, douce et régulière (1% orientée NE-SW dans les Béni Amir, 1 à 3% SE-NW dans les Béni Moussa). (Beaudet, 1966).

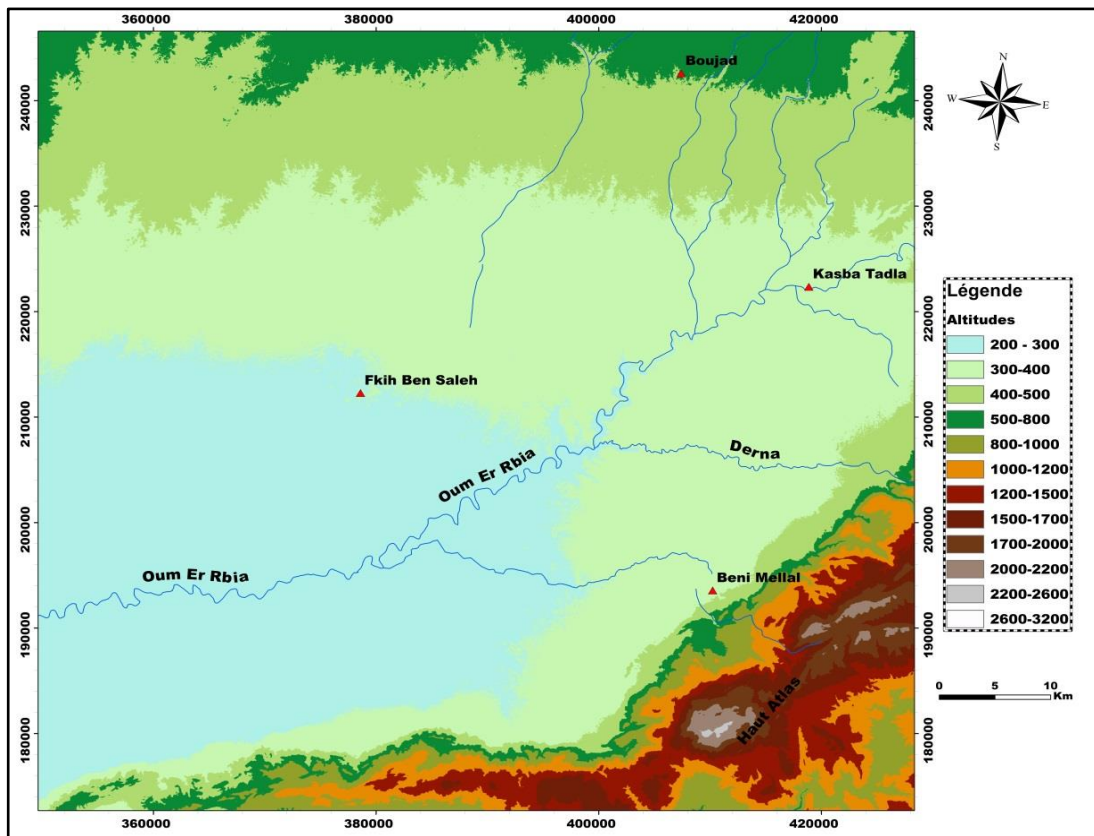


Figure 3: carte d'altitude sous forme du modèle numérique de terrain (MNT)

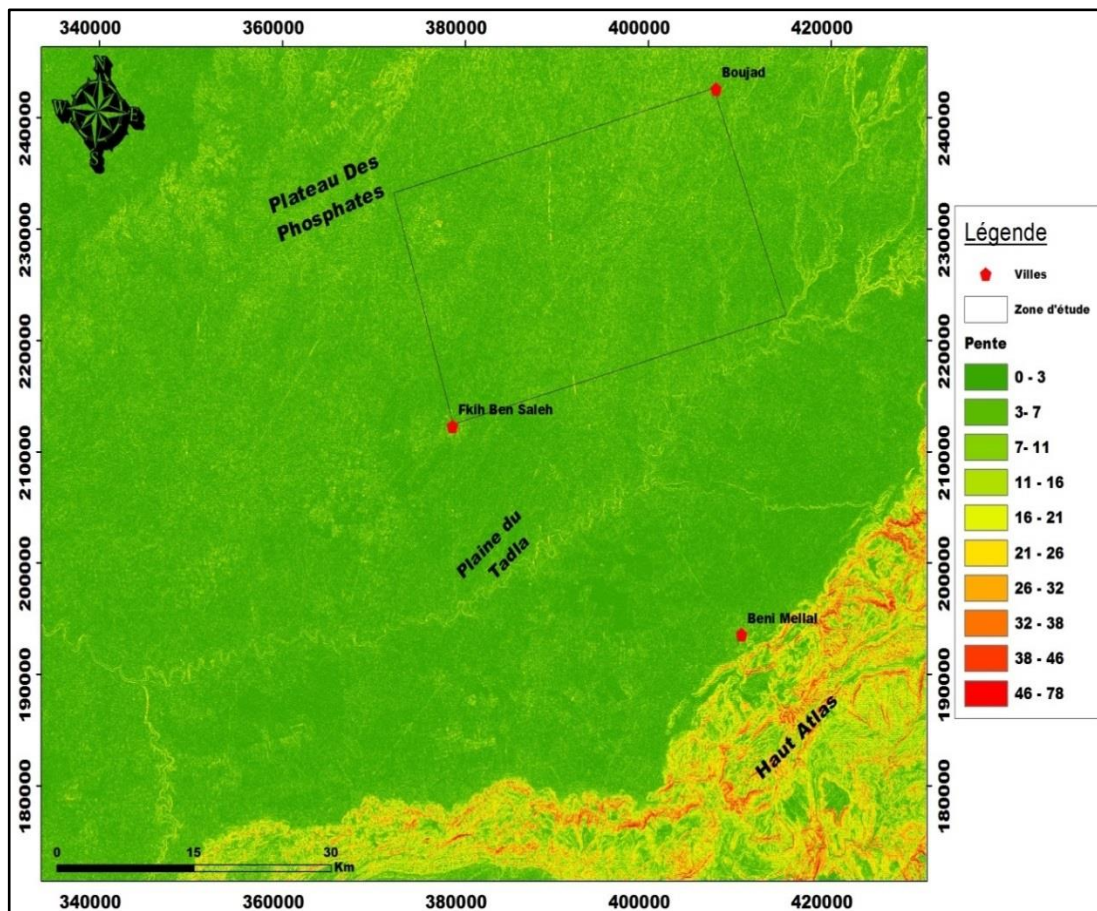
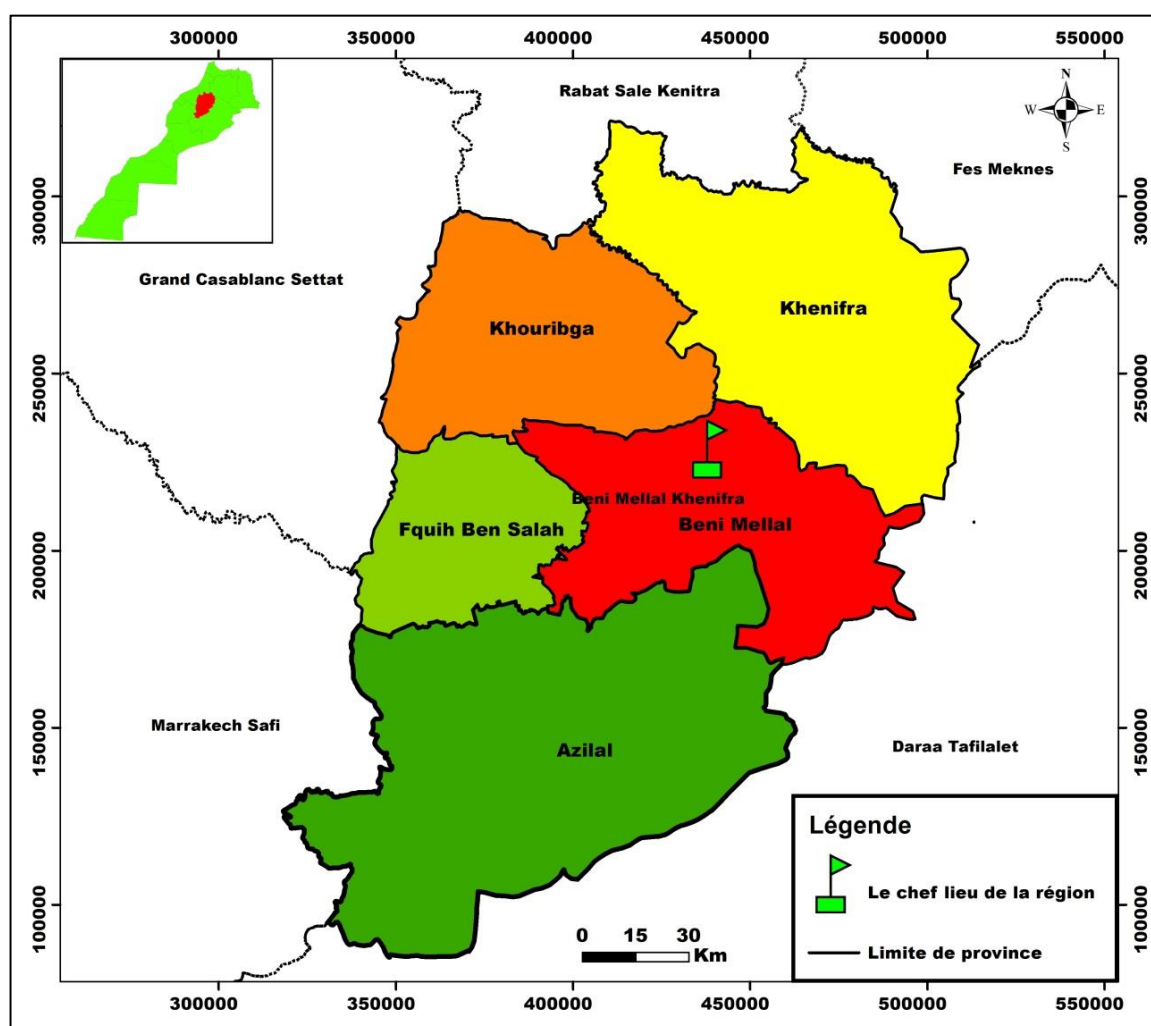


Figure 4 : Carte des pentes (en degré) dans la Plaine de Tadla

1.2 Cadre administratif

La plaine de Tadla relève administrativement de la région de Béni Mellal-Khénifra qui s'étend sur une superficie d'environ 28.374 Km² soit 3,99% du territoire national. Ses limites administratives se présentent ainsi :

- Au Nord la région de Rabat-Salé-Kenitra ;
- Au Nord-Est, la région Fès- Meknès ;
- Au Sud et au Sud-Ouest, la région de Draa-Tafilalet ;
- À l'Ouest les régions de Casablanca-Settat et Marrakech-Safi.



D'après le Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) de 2014, la région de Béni Mellal-Khénifra compte 2.520.776 habitants (tableau 1) dont 49,14% sont urbains, taux inférieur au taux national (60,36%), la densité est de 88,8 habitants au km², elle est élevée par rapport à la moyenne nationale (47,6hab/km²), occupant ainsi la 6ème position en matière de

densité après les régions de Casablanca-Settat, Rabat-Salé-Kenitra, Tanger-Tétouan-Al Hoceima, Marrakech- Safi et Fès-Meknès.

Tableau 1 : Population légale de la région de Béni Mellal-Khénifra (MG, 2015)

Région	Recensement 2014				Taux d'accroissement annuel moyen (%)
	Population	%	Étrangers	Ménages	
Béni Mellal-Khénifra	2520776	7,4	1262	520174	0,89

La région de Béni Mellal-Khénifra regroupe sur le plan administratif cinq provinces (Azilal, Béni Mellal, Fquih Ben Salah, Khénifra et Khouribga) avec 135 communes dont 16 Municipalités et 119 Communes Rurales. Le chef-lieu de la région est la province de Béni Mellal.

a) Densité de la population

La région de Béni Mellal-Khénifra, qui ne couvre que 4% de la superficie du Royaume, abrite 7,45% de la population nationale en 2014. Pour le niveau communal, la densité varie de 10 habitants/Km² (32 communes ont une densité inférieure à 30 habitants par Km²) et 12.700 habitants/Km² au niveau de la municipalité de Khénifra.

La population de la région de Béni Mellal-Khénifra est réparti d'une manière équilibrée entre les provinces, allant de 15% au niveau de Khénifra jusqu'à 22% pour Azilal et 22 pour la province de Béni Mellal, Fquih Ben Salah concentre 20% et Khouribga regroupe 21% de la population (fig.6) (MG, 2015).

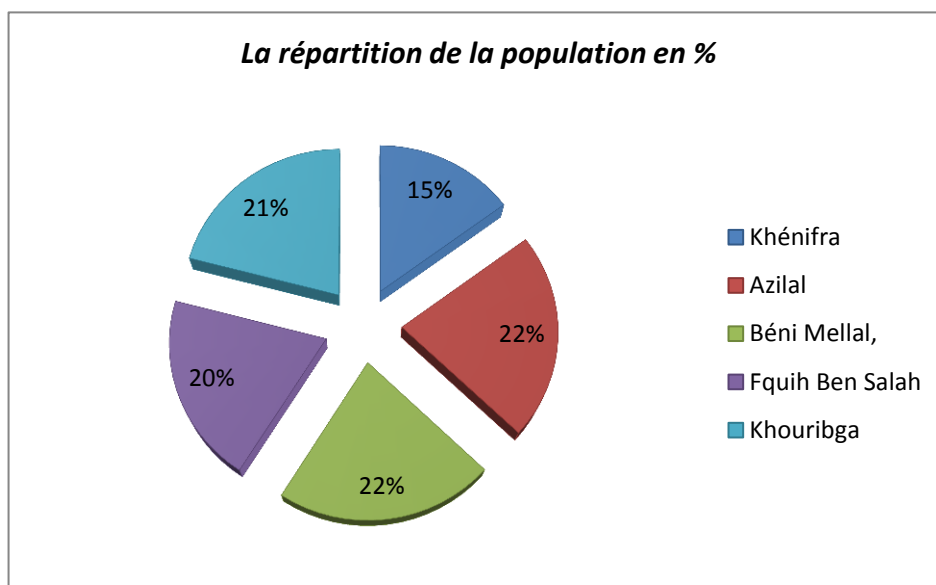


Figure 6 : Évolution de la population de la région Béni Mellal-Khénifra selon le RGPH, 2014

b) Taux d'accroissement de la population

L'accroissement démographique de la population urbaine de la région a concerné plus les provinces de Béni Mellal et d'Azilal qui ont enregistré des taux d'accroissement respectifs de 1,21% et 0,94% et qui dépassent le taux d'accroissement de la Région qui est de 0,89%. Les deux provinces de Khénifra et de Khouribga ont enregistré des taux d'accroissement entre 2004 et 2014 plus faibles 0,31% et 0,83%).

1.3 Secteurs Productifs

1.3.1 L'agriculture

Le secteur agricole est l'un des secteurs prometteurs de la région et constitue l'essentiel de l'activité économique de la région. En effet, la superficie agricole utile au niveau de la région Béni Mellal-Khénifra est estimée à 948.426 hectares, soit 11% de la superficie agricole utile nationale. La superficie totale des terres irriguées est de l'ordre de 187.483 hectares, soit 15% de la superficie totale des terres agricoles de la région. (MG, 2015).

Il y a lieu de souligner que la région (précisément la province de Béni-Mellal) dispose de deux grands périmètres d'irrigation, le périmètre de Béni Amir : d'une superficie de 27300 ha irrigués à partir du Barrage Ahmed El Hansali et le périmètre de Béni-Moussa : d'une superficie de 69600 ha irrigués à partir du Barrage Bin El Ouidane.

La région de Béni Mellal-Khénifra se distingue par une production agricole importante et diversifiée. Généralement on trouve la dominance des oliviers, agrumes, rosacées, grenadiers, caroubiers, céréales, betteraves sucrières, cultures fourragères, maraîchages. La culture céréalière a enregistré une production totale de près de 6,5 millions de quintaux. Elle est constituée du blé dur, du blé tendre, de l'orge et du maïs. Le blé tendre est de loin la céréale la plus cultivée dans la région, il représente 58% de la production céréalière dans la région, suivi par le blé dur qui occupe la deuxième place avec 22% de la production cependant la culture de l'orge représente 20% (fig. 7)(MG, 2015).

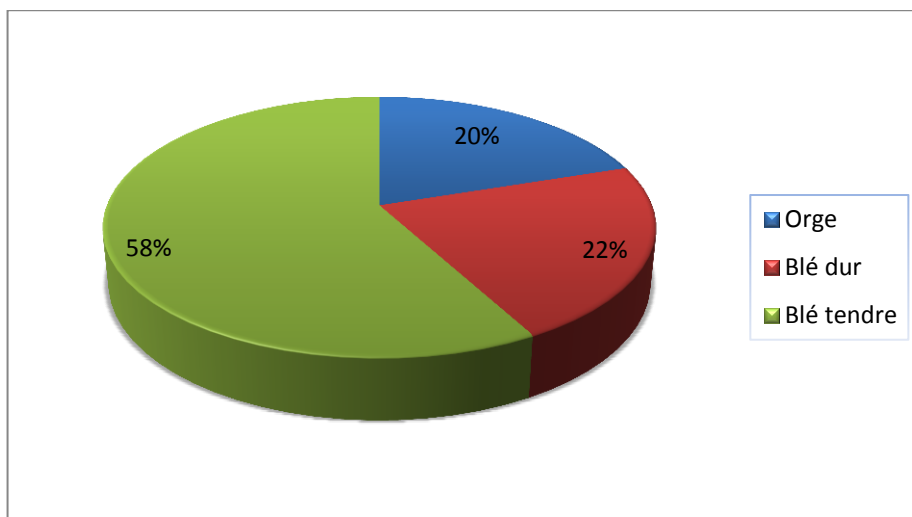


Figure 7 : Productions des principales céréales dans la région Béni Mellal-Khénifra, Diagramme à partir des données de l’HCP.

1.3.2. L'élevage

L'élevage constitue une des activités agricoles majeures de la région. En effet, à l'instar de l'agriculture, Béni Mellal-Khénifra recèle un potentiel de production animale englobant toutes les espèces du Maroc (bovin, ovin, caprin, camelin, équidé) et une longue tradition d'élevage. Cette activité se caractérise par la prédominance de l'élevage ovin et caprin de races rustiques bien adaptées au contexte local mais qui reste moins performant.

En effet, le cheptel englobe un total de 4.369,7 milliers de têtes, soit 15% du total national, dont 64% d'ovins, 26% de caprins et 10% de bovins (fig.8).

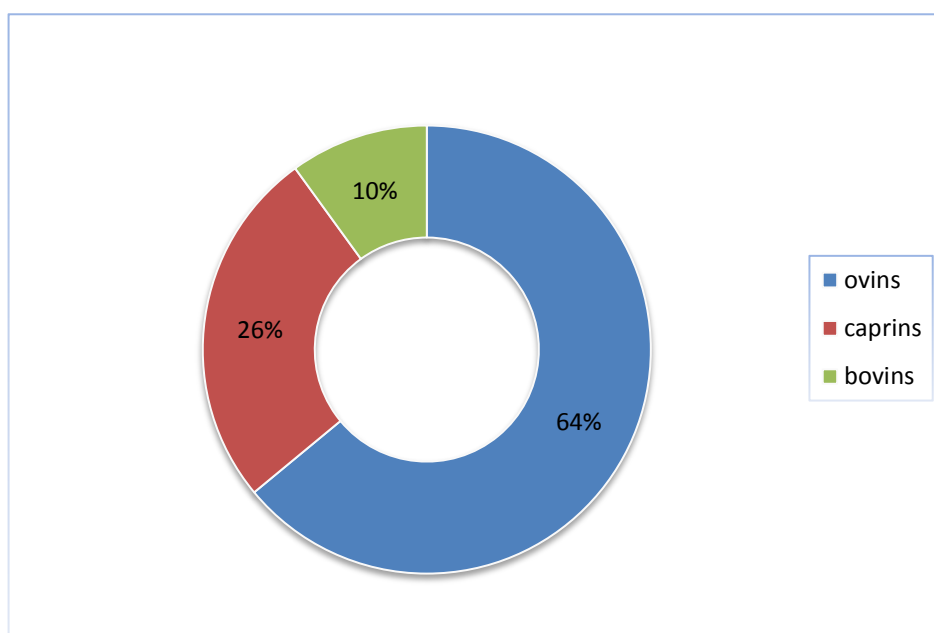


Figure 8 : la répartition d'élevage dans la région

1.3.3. L'industrie

Bien que l'industrialisation de la région de Béni Mellal-Khénifra soit naissante (début des années 90), elle a commencé peu à peu à prendre sa place sur le plan économique. Le nombre d'unités industrielles recensé en 2011 s'élève à 325, soit 4% du total national. Cependant cette activité reste modérée à l'échelle marocaine puisqu'elle ne représente qu'environ 1% de toutes les grandeurs économiques nationales.

L'industrie dans la région de Béni Mellal-Khénifra est essentiellement basée sur la transformation des produits agricoles des périmètres irrigués et les zones de Bour.

Le tissu industriel est marqué par une nette concentration dans l'ancienne province de Béni Mellal (plus de 56% des entreprises industrielles) suivie de la province de Khouribga qui en concentre 23% (fig.9). Cependant une timide délocalisation est perceptible en raison de la présence de certaines unités à travers la région (HCP, 2015)

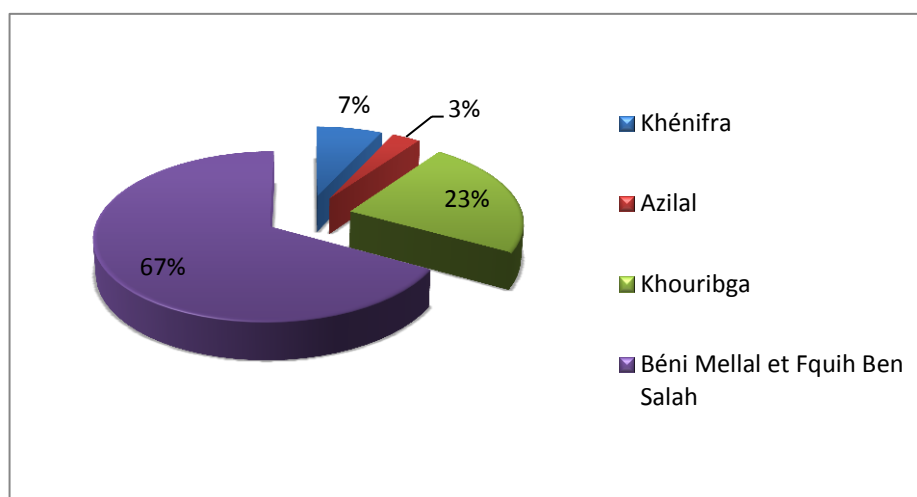


Figure 9 : Répartition du chiffre d'affaires industriel selon les provinces, diagramme réalisée à partir des données de l'HCP de 2015

1.3.4. MINES

Les ressources minières constituent une richesse pour la région de Béni Mellal-Khénifra. Le développement des activités d'extraction est favorisé par une structure géologique variée et réputée par sa concentration en minerais.

Les gisements de phosphates, dont la gestion est assurée par l'Office Chérifien du Phosphate (OCP), constituent la principale richesse souterraine régionale, abritée dans les couches du Crétacé Supérieur, du Paléocène et de l'Eocène. Si le Royaume dispose des trois quarts des réserves mondiales de phosphates, le site d'Oued Abdoun à Khouribga constitue le principal gisement, ce qui érige cette ville de capitale nationale des phosphates. (MG, 2015).

Le secteur minier est représenté aussi au niveau de la région Béni Mellal-Khénifra par trois types de gisements :

- ✚ Le phosphate à Sidi Chennane dans la province de Béni-Mellal, avec une production de près de 5.592589 T/an, ce secteur utilise quelques 800 ouvriers ;
- ✚ Le Zinc dans la province d’Azilal avec une production moyenne de 1500t/an et un effectif d’ouvriers variant de 30 à 50 ouvriers selon les campagnes ;
- ✚ Le sel dans la province d’Azilal avec une production moyenne de l’ordre de 2.000T/an et un effectif d’ouvriers variant entre 30 et 45 ouvriers.
- ✚ D’autres potentialités minières importantes ont été identifiées dans la région et dont les principaux gisements se trouvent dans les provinces de Khénifra : la barytine, le plomb, le zinc et le pyrophyllite, la fluorine, le fer, l’antimoine, l’argent, le cuivre, le manganèse

1 .3.5. Le tourisme

Malgré d’intéressantes potentialités avec sa situation stratégique, le tourisme reste peu développé dans la région de Béni Mellal-Khénifra qui reste en dehors des circuits touristiques, particulièrement dans la plaine. En effet, la région offre diverses formes de tourisme : tourisme vert, tourisme de randonnées pédestres, tourisme lié à la chasse et à la pêche etc.

La région Béni Mellal-Khénifra riche par les sites touristiques .À ces sites et selon le degré d’attractivité touristique qu’ils peuvent provoquer, on peut associer des activités de loisirs et d’autres sportives pour toucher un public diversifié, qui peut fréquenter ces sites à des périodes bien étalées dans le temps d’un autre côté, les moussem et festivals culturels constituent un véritable levier de développement dans la région.(El khalki, 2015).



Figure 10 : le jardin d’Ain Asserdoune et la Zone touristique d’Ouzoud

1.3.5- L'artisanat

L'abondance de laine naturelle, d'argile de bonne qualité et d'essences forestières variées, a naturellement favorisé le développement d'un artisanat propre à la région.

Le seul produit qui peut prétendre avoir un rayonnement national est le Bzioui sous ses différentes formes et destinations et voyait la qualité de son tissage et de son armurerie traditionnelle. En effet, certains grands couturiers commencent à l'introduire dans leurs collections ce qui va lui donner davantage d'importance et d'effets sur la filière de production au niveau de la ville de Bzou.

Les produits de poterie ont aussi atteint une certaine renommée pour leur qualité et leur usage mais c'est au niveau des grandes villes hors région Béni Mellal-Khénifra, que ces produits sont les plus prisés. (El khalki, 2015).

2. Cadre géologique :

2.1. Contexte géologique générale :

Le Maroc se situe au coin nord-ouest de la plateforme saharienne, il est entouré par les plaques mobiles de la mer Méditerranée au Nord et l'océan Atlantique à l'Ouest.

En effet, au cours de sa longue histoire géologique conditionnée par cette position de charnière, entre les continents africains, européen et américain...plusieurs cycles orogéniques se sont succédés, contribuant chacun, par son contexte géodynamique et son ampleur, à façonner les grands domaines structuraux du Maroc. (Michard, 1976)

C'est ainsi que l'on en distingue trois, définis en fonction de la localisation et de l'importance des effets des orogénèses les plus récentes. Du Sud au Nord, le domaine anti-atlasique est son prolongement saharien, le domaine atlasique et mésetien et le domaine rifain séparés les uns des autres, par l'accident sud-atlasique d'une part et la limite des charriages tertiaires venus du Nord, d'autre part. Les deux derniers domaines sont caractérisés par l'empreinte prédominante laissée par les orogénèses varisques et alpines tandis que le premier domaine a été essentiellement façonné par les orogénèses précambriennes et varisques et (Piqué, 1994).

- Le domaine rifain :

C'est la région située au Nord du Maroc. Il s'agit d'une chaîne de moyennes montagnes qui s'étend du Cap Spartel (dans le Rif occidental, à la pointe Ouest de Tanger) jusqu'à la ville d'Ahfir (dans le Rif oriental, à la frontière algérienne).

Structuralement, le Rif est constitué d'une guirlande complexe de nappes de charriage mises en place au Miocène et déversées vers le S, à peu près parallèles au littoral méditerranéen au Maroc. Pourtant, c'est surtout de l'E à l'W que les paysages morphologiques diffèrent, reflétant la disposition climatique. (Beaudet, 1970)

Cet arc montagneux à convexité orientée vers le centre du Maroc, borde la Méditerranée. On y distingue plusieurs sous régions : la Haute Chaîne, le Moyen Rif, le Prérif et le Gharb.

- Le domaine Mesétien:

C'est un massif hercynien pénéplané, recouvert de bassins de Crétacé supérieur-Eocène riches en phosphates, ces derniers sont peu déformés par les phases tectoniques alpines (Bouabdelli, 1989) comparativement à l'Atlas et au Rif.

Dans ce domaine hercynien, on distingue trois massifs : les Jebilets au Nord de Marrakech, les Rehamna au Nord de Benguerir et le "Massif Central" entre Casablanca et Azrou. Cette zone

est caractérisée par une forte tectonique hercynienne, accompagnée d'un métamorphisme régional dans l'Ouest, et la mise en place d'intrusions granitiques. Les intrusions granitiques hercyniennes forment plusieurs batholites d'âge Carbonifère moyen à Permien, les plus jeunes étant post-tectoniques. Le raccourcissement produit par le plissement hercynien est orienté en gros NW-SE.

Après pénéplanation de la chaîne hercynienne, plusieurs golfes marins venant de l'Atlantique (Haha, Doukkala, Plateau des Phosphates, Sillon Sud rifain) déposent une série transgressive du Crétacé supérieur à l'Eocène inférieur : elle inclue les bancs calcaires du Turonien (Calcaires de Boujad) et la série phosphatée du Maestrichtien-Yprésien, grande source de richesse pour le Maroc.

- **Le domaine Atlasique :**

Le socle hercynien et sa couverture sédimentaire sont très inégalement déformés ; aux chaînes du Haut et du Moyen Atlas constituant l'ossature de ce domaine, s'opposent les plateaux et les dépressions de l'E et de l'W.

- Le Haut Atlas : C'est l'élément morphologique le plus important du Maroc. Il sépare les plateaux et les plaines atlantiques, au Nord et à l'Ouest du domaine Saharien au Sud et au Sud Est. (Beaudet, 1970)

- Le moyen Atlas : Se sépare du Haut Atlas dans la région de Béni Mellal et s'étend en direction du Nord Est jusqu'à Taza.

Il regroupe deux entités structurales différentes : le Moyen Atlas tabulaire au Nord –Ouest et le Moyen Atlas plissé au Sud Est.

- **Le domaine Anti Atlasique :**

La chaîne de l'Anti Atlas prolonge en continuité celle de Zemmour vers le Nord. De l'embouchure du Draa jusqu'au Tafilalt, elle s'étend en direction ENE-WSW sur plus de 700 Km de long et environ 150 Km de large.

Elle forme une structure en relief au Nord de la plate-forme africaine, restée stable depuis la fin du Précambrien (Choubert et Marçais, 1952 ; Choubert et Faure Muret, 1962 ; Michard, 1976); façonné par l'orogénèse panafricaine (680 à 570 Ma) (Leblanc et Lancelot 1980). Mis à part de rares ondulations hercyniennes et de très faible mouvement épirogéniques. Les séries mésozoïques n'y sont préservées que dans sa partie orientale (Michard, 1976).

- **Le domaine Saharien :**

L'extrême sud saharien est établi sur des terrains cristallins précambriens. Quelques reliefs un peu plus accentués bordent le « reguibate » qui fait partie du craton Ouest africain. Il est

essentiellement formé de terrains du protérozoïque inférieur, structurés par l'orogénèse Eburnéenne (2000 Ma) (Fabre, 1971).

Au Nord, un ensemble de cuestas E-W, constituées par des couches sédimentaires paléozoïques à très faible pendage au Nord ; à l'Ouest, des séries paléozoïques plissées qui forment les reliefs appalachiens du Zemmour au-delà desquels s'étend la plaine atlantique de Tarfaya, Laayoune, Boujdour et Dakhla.

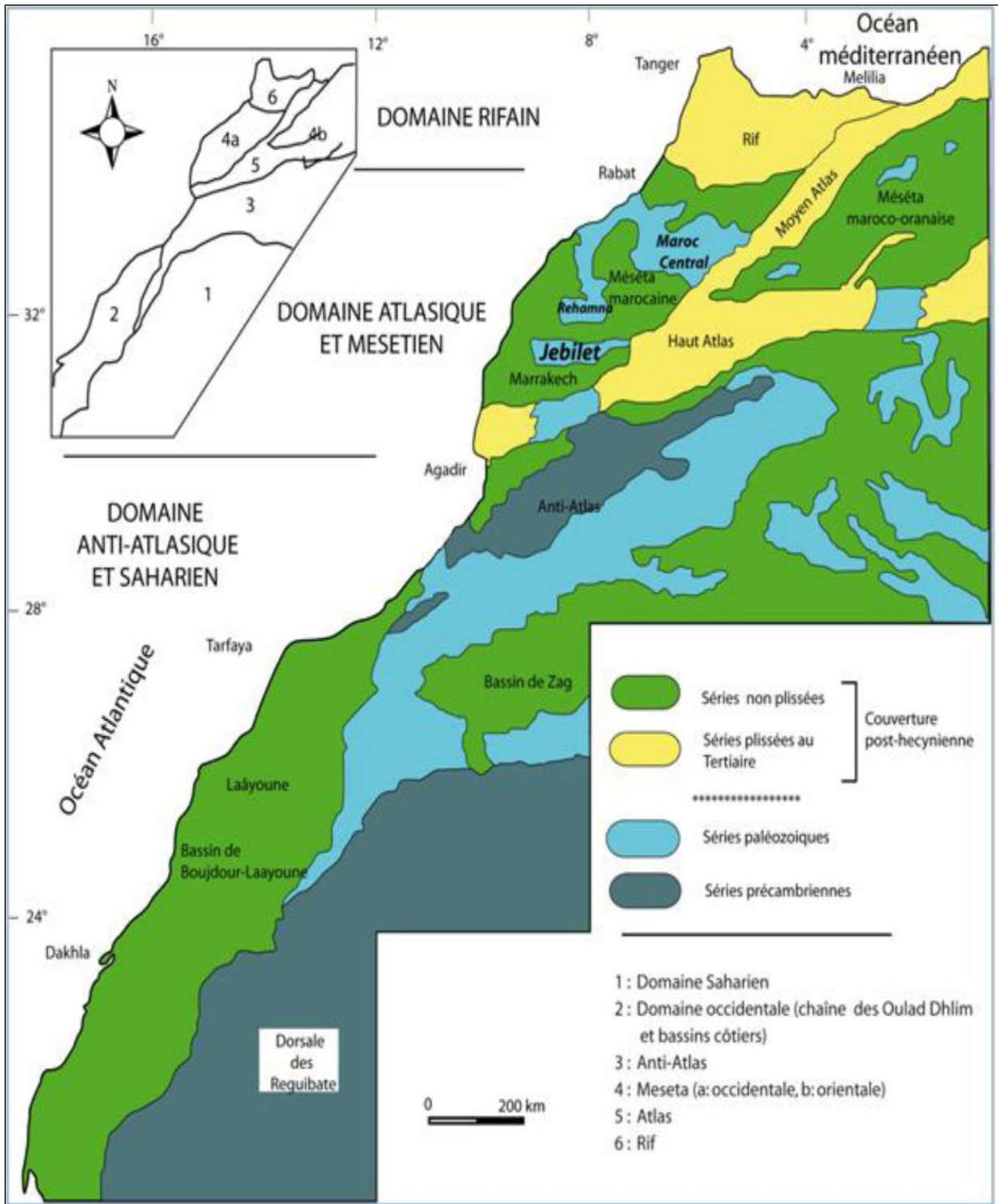


Figure 11 : Carte des domaines structuraux du Maroc (Michard, 1976)

2.2- Cadre géologique régional :

De point de vue structural, le bassin de Tadla proprement dit se présente comme une dépression monoclinale de forme semi-circulaire dissymétrique caractérisée par une faible pente au Nord (Plateau des phosphates) mais qui devient importante en s'approchant du piémont Atlasique au Sud. Cet approfondissement relatif a probablement commencé dès le crétacé. Les épaisseurs du crétacé notamment du turonien, croissent régulièrement du Nord vers le Sud. Le bassin du Tadla se rattache à la Meseta marocaine méridionale et à la zone synclinale de Bahira-Tadla (Saâdi, 1982). Plusieurs grandes unités tectoniques délimitent le bassin :

- Les massifs paléozoïques : Le massif de la Rehamna de l'Ouest, les Jbilet au Sud-Ouest, le massif hercynien de la Meseta marocaine septentrionale au Nord-Est,
- Le Haut et Moyen Atlas au Sud-Est,
- La Meseta côtière (Bassin de Doukkala) au Nord, séparée du plateau des phosphates par la flexure NE-SW de Settât.

Les informations géologiques fournies principalement par la carte géologique et les forages profonds montrent que, le Bassin du Tadla comporte globalement quatre grands ensembles :

- Un socle paléozoïque épais, de l'Infra-Cambrien au Carbonifère, on y reconnaît notamment les formations glaciaires de l'Ashgill ;
- Des formations permo-triasiques à Jurassiques localisées au Nord et au Sud ;
- Des dépôts transgressifs marins crétacés à éocènes ;
- Un comblement néogène et quaternaire discordant, principalement continental.

Le socle est marqué par un système de horsts et grabens de direction NE/SW qui détermine la superposition de plusieurs unités emboîtées. La couverture s'épaissit d'une manière très importante du Nord vers le Sud (125 m à Khouribga, 2000 m à Dar Ouled Zidouh). Dans sa partie SW, on assiste au développement d'un prisme triasique et liasique qui se poursuit dans l'Atlas où les formations du Jurassique inférieur et moyen sont très puissantes. La limite sud du bassin du Tadla correspond donc à un trait majeur non seulement structural mais aussi paléogéographique. (Michard, 1976).

Les séries secondaires et tertiaires sont les mêmes que celles du Plateau des Phosphates, mais plus épaisses et envahies au niveau du Crétacé Inférieur et Moyen par des sédiments Détritiques et lagunaires à évaporites abondantes ; il s'y ajoute en complément un Oligo-Miocène marneux et d'épaisses séries plio-quaternaires d'origine continentale et lacustre (fig.12).

La tectonique de compression dont est issu l'Atlas influe dans le même sens sur la géométrie du Bassin qui se replie pour former un sillon. Parallèlement, ce dernier est comblé au Néogène et au

Quaternaire par les produits de démantèlement de la chaîne. Ils forment des cônes alluviaux puissants appuyés contre les reliefs.

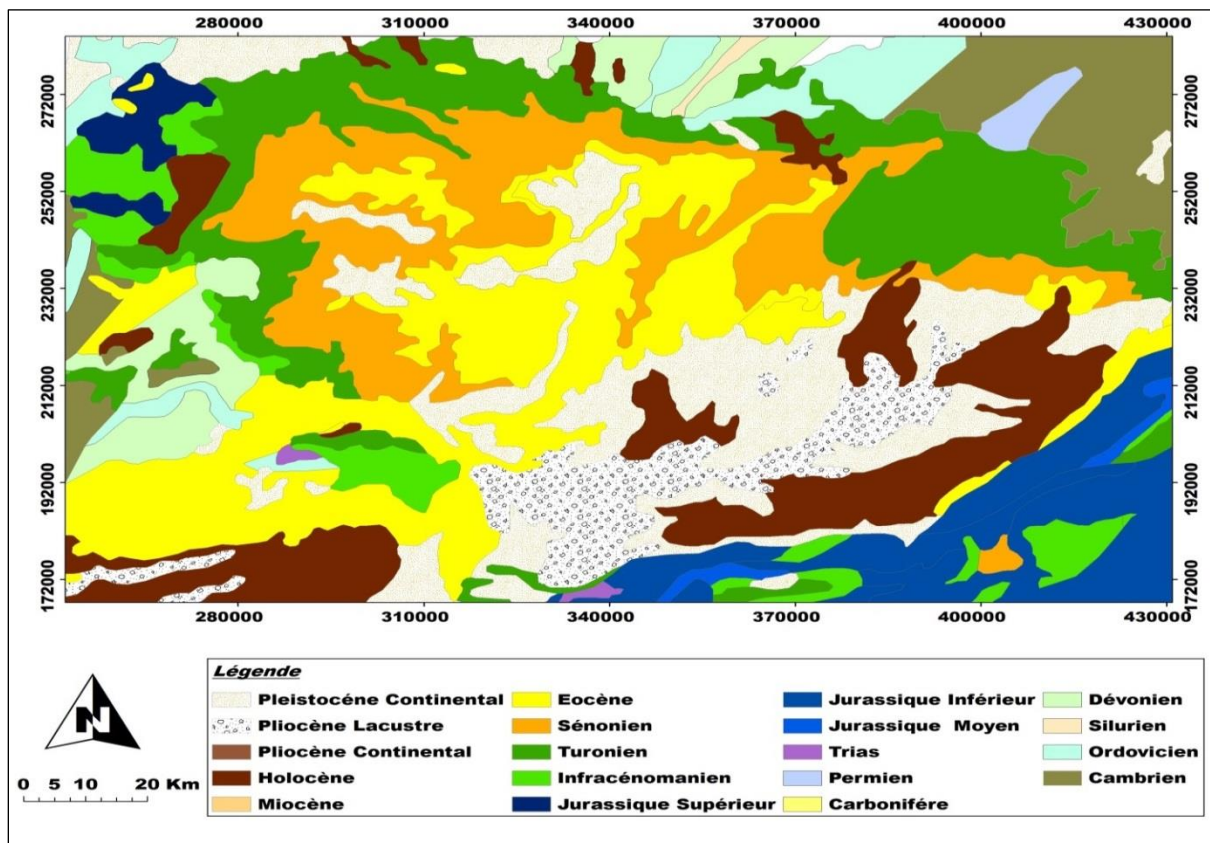


Figure 12: Schéma géologique de la Plaine de Tadla (Extrait de la carte géologique de Rabat à 1/500000)

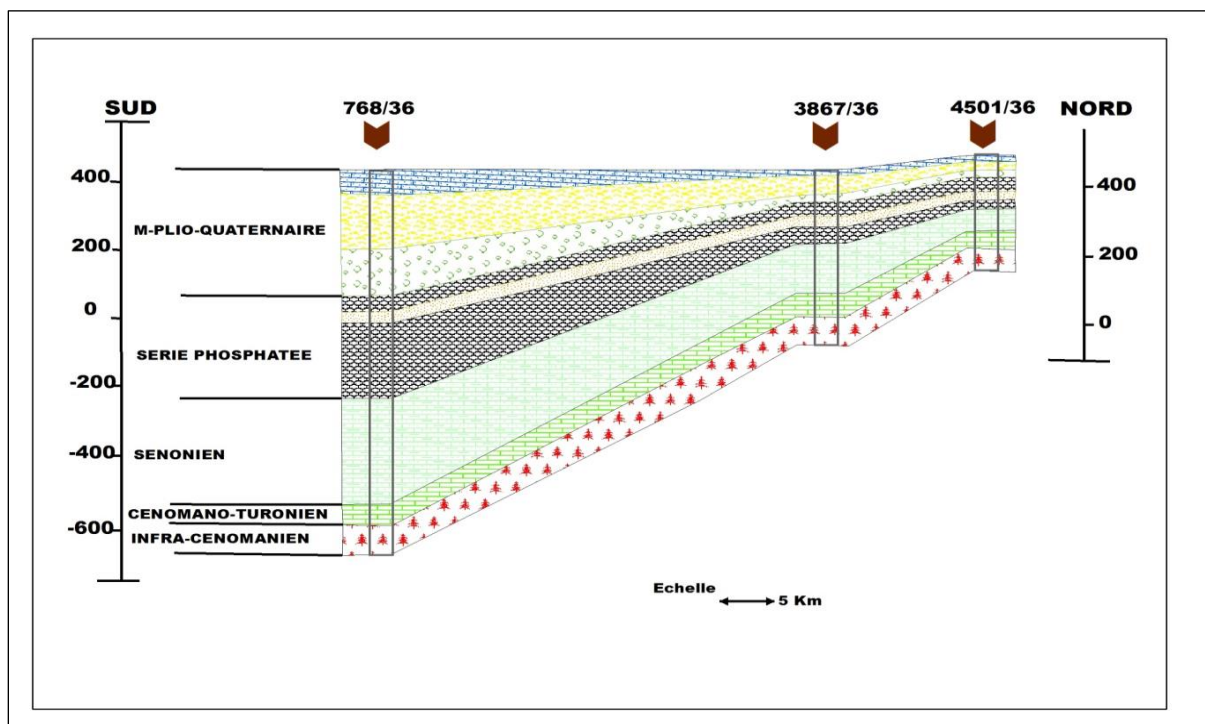


Figure 13: coupe géologique N° 1

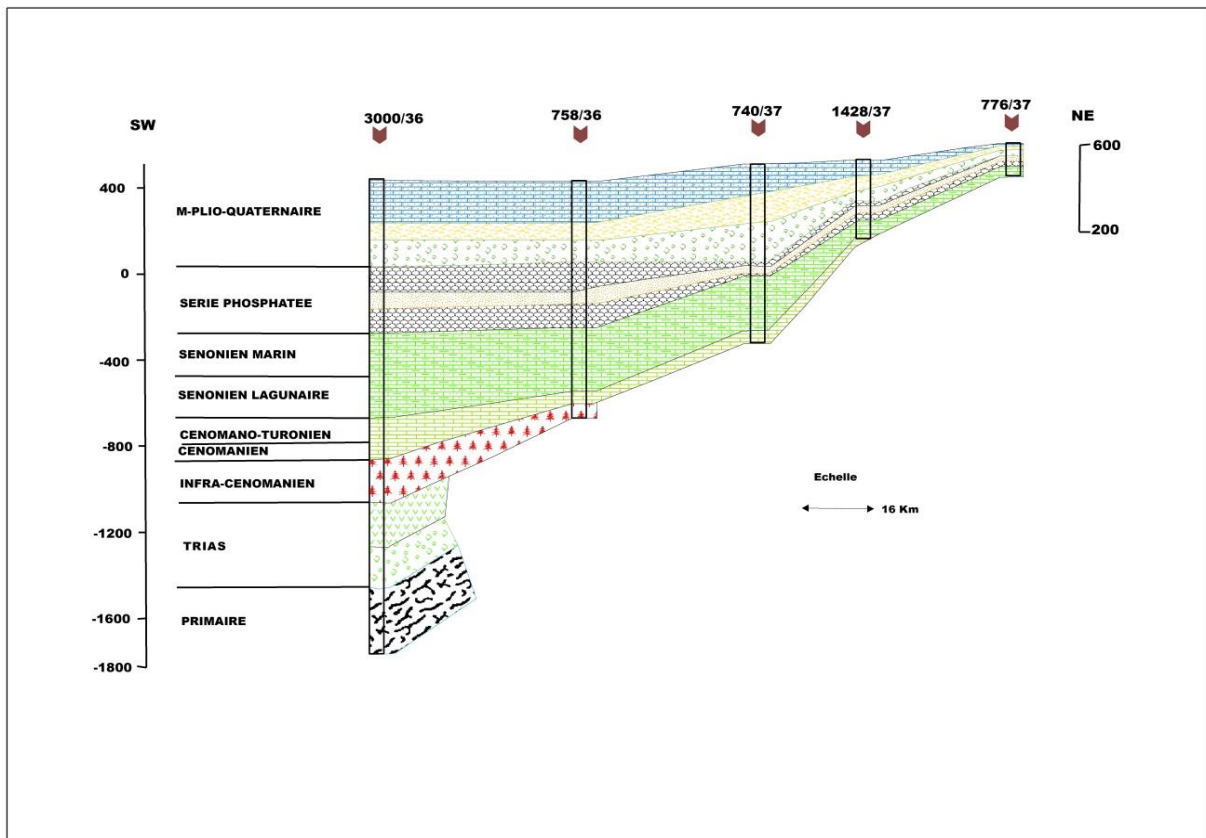


Figure 14: coupe géologique 2

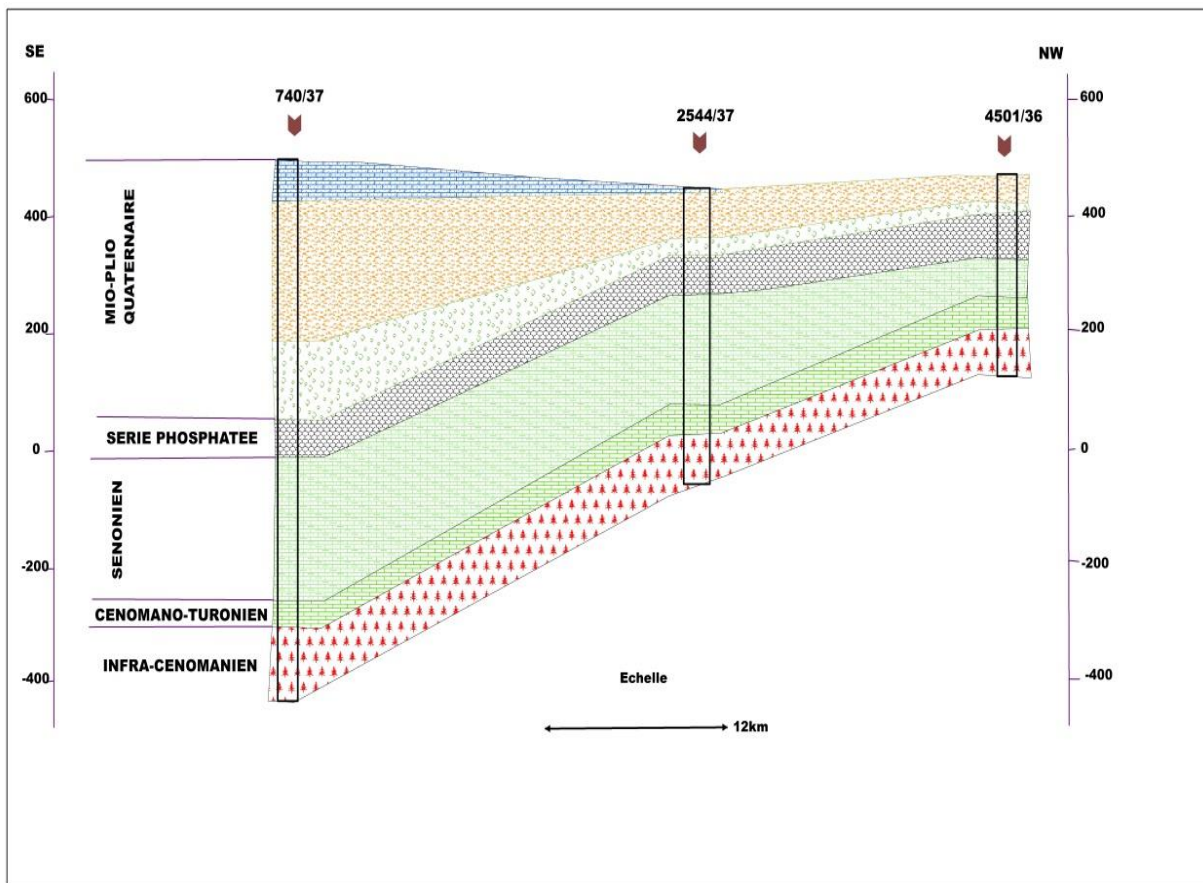


Figure 15: coupe géologique N° 3

L'interprétation de la base de données (50 forages pétroliers, forages n°IRE et puits), l'analyse de la carte géologique et le log stratigraphique synthétique montrent que la plaine de Tadla est formée des formations suivant en allant de la base au sommet :

a) Socle Paléozoïque :

Le socle Paléozoïque est représenté par des schistes et des quartzites fortement plissés et faillés. Sur ce socle primaire repose en discordance les formations du Secondaire et du Tertiaire (Choubert et Faure Muret, 1960/62).

b) Trias :

Sur des conglomérats de base se déposent des argiles rouges légèrement surmontés par des basaltes doléritiques. Ces formations sont généralement absentes sauf au Sud-Ouest dans la région de Dar Ouled Zidouh dans le forage 2269/36 où il a une épaisseur de 76 m. le forage 3000/36 représente un Trias plus puissant de 200 m, et plus au Sud vers l'Atlas. Lithologiquement, le Trias est constitué par deux termes successifs assez différents : d'abord une série de grés rouge, débutant par des conglomérats et comportant des niveaux pélitiques, puis un ensemble d'argiles rouges souvent salifères qui admettent vers leur milieu des coulées des basaltes (Chouber et Fauve Muret, 1960/62).

c) Infra-Cénomanién :

L'infra-cénomanién correspond à la première transgression, et il est caractérisé par un faciès marneux, grés rouge et gypseux. Sa puissance varie de 10 à 60 m sur le plateau des Phosphates, et est reconnu comme étant le continental intercalaire (argiles rouges), à Dar Ouled Zidouh sur 200 m d'épaisseur (Archambault et al. 1975). Les dépôts débutent par les conglomérats de base à ciment argileux suivi par des dolomies, marne dolomitique, argile sableux et anhydrite, ce sont les premières formations évaporitiques.

d) Cénomanién :

Le Cénomanién est constitué par des petits bancs très gypseux et par une alternance de marnes et de marno-calcaire blanches et jaunâtres, sa puissance varie de 20 à 100 m, il repose directement sur le Paléozoïque dans la région de Boujâad et Kasba-Tadla (Belfkira, 1980).

e) Turonien :

Il est essentiellement formé de calcaires fortement dolomitiques et peu fossilifères. Il forme un important réservoir d'eau (aquifère profond). (El Haddi, 2014) ;

f) Sénonien :

Le Sénonien est constitué le mur de la série phosphatée, il est généralement formé par des marnes à caractère régressif, sa puissance varie de 50 à 100 m. Il comprend presque partout deux séries marneuses jaunes, séparées par une barre calcaire d'épaisseur variable (Choubert et al, 1962) ;

g) Série phosphatée :

Sur le Plateau des Phosphates, on rencontre 5 à 28 m de Maestrichtien (phosphates marneux). Il débute localement par du calcaire très fossilifère à bone-bed. Dès le Maestrichtien, la phosphatogenèse fait brusquement son apparition et se poursuit jusqu'au Lutétien. (Arambourg, 1935).

h) Mio-Plio-Quaternaire :

Ils sont caractérisés dans la plaine du Tadla en général par une série de faciès : des marnes sableuses à la base, des marno-calcaires et des calcaires sableux terminée par une croûte calcaire (Hsissou, 1991). Ces terrains occupent une vaste fosse de subsidence recouverte par des dépôts continentaux du Villafranchien au Quaternaire récent.

Le villafranchien affleurant sur les rives de l'Oum-er-Rbia et dans la partie Ouest du Tadla se compose essentiellement de marno-calcaires et parfois des conglomérats à éléments calcaires du Lias, du Permo-trias et du Paléozoïque. On observe également deux niveaux de calcaires lacustres : niveau supérieur et niveau inférieur, ce dernier appartient peut-être au Pliocène (Hsissou, 1991).

On distingue ensuite le Quaternaire dit le plus ancien formé de calcaires lacustres post-villafranchiens (région de Dar Ouled Zidouh) et de conglomérats à éléments siliceux, localement consolidés (entre El-Khémis des Béni-Chegdale et Tlet des Béni-Oukil de même qu'au Nord de Fkih Ben Salah).

Le Quaternaire ancien comprend des limons (limons inférieurs roses à concrétions calcaires, à galets ou à cailloutis avec des niveaux de conglomérats fluviatiles), des calcaires, des marno-calcaires et des conglomérats lacustres ; cet ensemble appartenant à l'Amirien est bien représenté dans les Béni-Amir et vers Dar-Ouled-Zidouh. À cet âge, il faut également rattacher de nombreux cônes de déjection en bordure de l'Atlas ainsi que les terrasses moyennes et hautes de l'Oum-er-Rbia.

Du Quaternaire moyen (Tensiftien) on connaît des terrasses de l'Oum-er-Rbia et des cônes de déjection. Le Quaternaire récent (Soltanien) est constitué par des limons (limons

supérieur rouges, parfois tirsifiés), des calcaires et des marno-calcaires avec conglomérats affleurant sur de grandes surfaces dans les Béni-Moussa. À cet étage appartiennent également de basses terrasses limoneuses le long de l'Oum-er-Rbia ainsi que des cônes de déjection en bordure de l'Atlas.

Le Quaternaire moderne (Rharbien) est surtout représenté par des dépôts alluvionnaires (graviers et limons tirsifiés) et des calcaires lacustres. Il faut en effet, noter des calcaires à gastéropodes affleurant le long de l'Oued-el Arich à l'ENE de Souk Sebt des Ouled Nemma semblant ainsi représenter les derniers vestiges de l'ancien lac du Tadla.




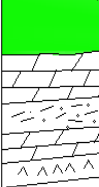




Plaine du Tadla		
FORMATION	LITHOLOGIE	EPAISSEUR
	LOG INSCRIPTION	
Formation Mio-Plio -Quaternaire	 <p>Croûte calcaire calcaires sableux Conglomérates polygéniques à ment argileux Marnessableuses</p>	0 à 400 m
Formation Phosphatée (Mastrichtien-Eocène)	 <p>Argiles dolomitiques et dolomites a silex avec débris phosphatée Niveau de calcaire et de dolomies phosphatés imprégnation de matière organique</p>	60 à 300 m
Formation Sénomien marin	 <p>Calcaires lumchelliques</p>	70 à 400 m
2ème Formation évaporitique "Sénorien lagunaire"	 <p>Anyhdrites, dolomies calcaires dolomitiques et marnen</p>	
Cénomaniien - Turonien	 <p>Dolomie et dolomies marnesuses</p>	50 à 200 m
1ère Formation évaporitique "infracénomaniien lagunaire"	 <p>Dolomie et marnes dolomitiques argiles sableuses , anhydrite</p> <p>Conglomérat de base</p>	20 à 180 m
Trias	 <p>Basaltes doléritiques Argiles rouge et vertes légèrement anhydritique conglomérats de base</p>	0 à 500 m
Primaire	 <p>Schistes et quartzites</p>	> 100 m

Figure 16: Log synthétique des formations géologique de la plaine de Tadla (Michard, 2011)

2.3- Évolution paléogéographique : (Bolelli, 1952)

Les terrains qui constituent la surface de la plaine des Béni-Amir (rive droite) d'une part et celle des Béni-Moussa (rive gauche) d'autre part, semblent être d'âge totalement différent. Alors que sur la rive droite, le Villafranchien se trouve partout sous un recouvrement très peu épais et discontinu de limons récents, sur la rive gauche, il est à une profondeur beaucoup plus grande, sous une épaisseur importante d'un complexe de poudingues, limons, marnes et calcaires roses attribuables au Quaternaire ancien, lui-même recouvert de très grandes surfaces par des limons rouges du Grimaldien dont la puissance atteint parfois 50 mètres. Les causes d'une telle dissymétrie dans la stratigraphie du Tadla sont vraisemblablement d'ordre tectonique (Bolelli, 1952).

En effet, bien que toute sédimentation marine se soit arrêtée dès la fin du Lutétien (première phase de l'orogénèse pyrénéenne), cette région ne s'est franchement individualisée qu'à la fin du Miocène (orogénèse alpine) époque à laquelle elle joua le rôle de charnière entre le horst de fond de la Méseta marocaine au Nord, et le massif plissé du Haut Atlas au Sud, celui-ci, tendant même à se déverser, vers le Nord, sur la fosse du Tadla (Bolelli, 1952).

Dès lors zone de subsidence entre la Méseta et l'Atlas, le synclinal de fond du Tadla, sera occupé en permanence depuis le Pontien jusqu'à la fin du Villafranchien par un immense lac au fond duquel s'accumuleront d'importants dépôts de conglomérats, grés, marnes et calcaires. Ces sédiments lacustres subiront des échos amortis des mouvements post-orogéniques qui affectèrent le Tadla jusqu'à la fin du Villafranchien et qui se traduiront par un léger pendage de l'ensemble des assises vers l'WSW, interrompu par quelques faibles ondulations plus particulièrement visibles sur la rive droite de l'Oum-er-Rbia.

Sur la rive gauche, il semblerait plutôt qu'un affaissement général parallèle à l'Atlas se soit produit et poursuivi jusqu'à l'époque actuelle et ait permis ainsi pendant la seule période du Quaternaire le dépôt sur plus de 150 mètres du complexe de poudingues, marnes et limons défini plus haut, ainsi que de nombreux niveaux de calcaires lacustres dans les petits bassins, témoins de l'ancien grand lac pliocène du Tadla. Le marécage actuel de l'Oued El Arich semble devoir être ainsi considéré comme le vestige de ce grand lac (EL Antaki, 1991).

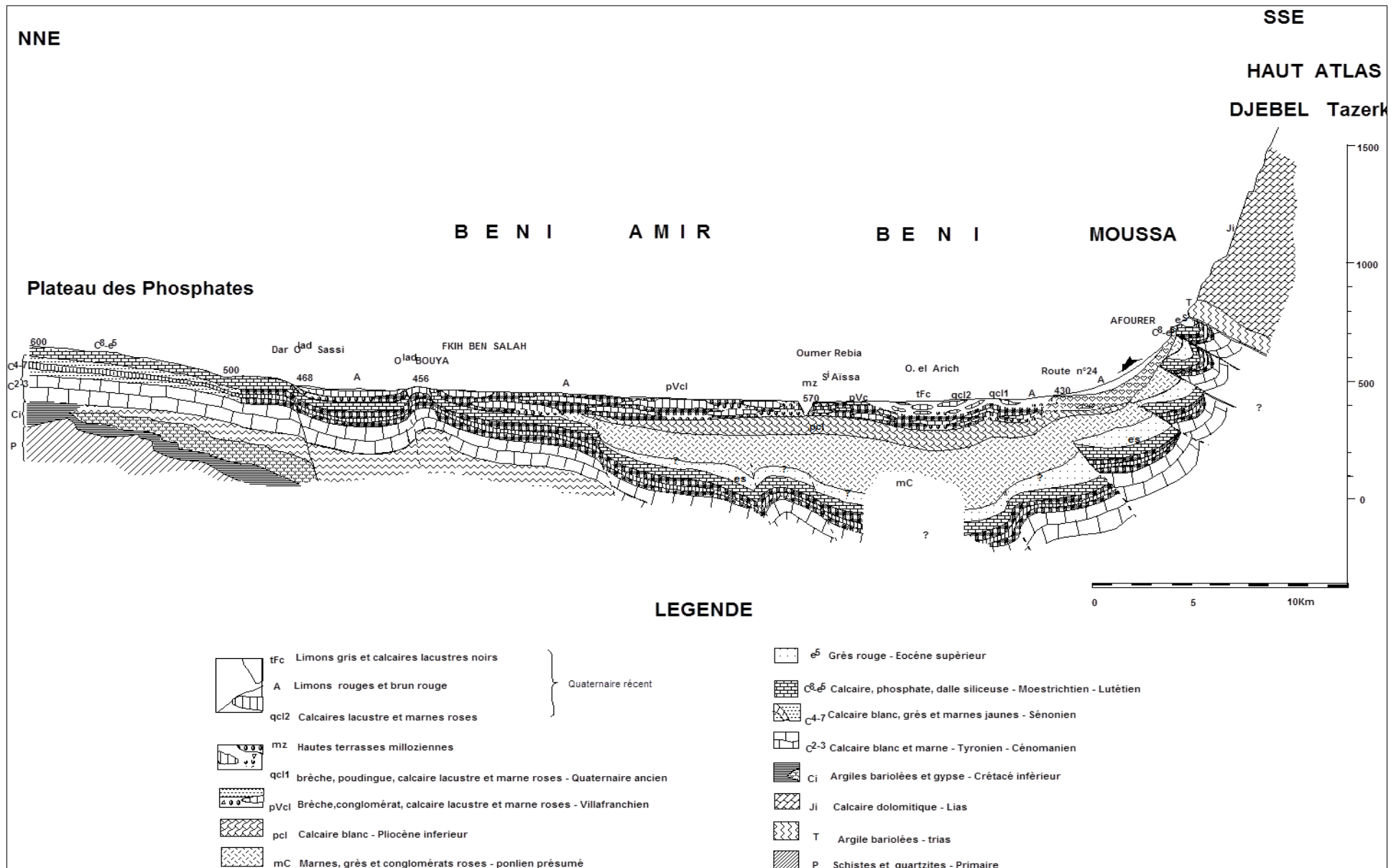


Figure 17: Coupe géologique du synclinal du Tadla. (Bouelli, 1952)

Conclusion

La plaine du Tadla couvrant une superficie de 3600 km² environ, s'étend au Nord de la chaîne du Haut Atlas à 200 Km au Sud-Est de Casablanca. Elle est limitée vers le Nord par le Plateau des Phosphates, vers l'Est la plaine se rétrécit le long de l'Oum-er-Rbia en direction des reliefs accusés des pays Zaïan. A l'Ouest, aucune limite géographique ne sépare le Tadla de la Bahira qui lui fait suite, mais le cours inférieur d'Oued El Abid sera pris comme limite régionale de cet ensemble. La longueur de la plaine ainsi définie atteint environ 125 km tandis que sa largeur maximum au centre est de 50 km environ, sa topographie est généralement régulière et présente une altitude moyenne de l'ordre de 400 m.

De point de vue géologique, le bassin de Tadla se rattache à la Meseta marocaine méridionale et, plus particulièrement, à la zone synclinale « Bahira–Tadla ». Il se présente comme une cuvette synclinale remplie par une série sédimentaire dont l'âge s'étend du Permo-Trias au Quaternaire. Dans l'ensemble du bassin, les recouvrements quaternaires masquent totalement les terrains sous-jacents.

Chapitre II : Contexte climatique, hydrologique, hydrogéologique et pédologique

1. Cadre climatique de la zone d'étude

1.1 Introduction

Les données climatologiques sont nécessaires afin d'avoir une idée sur les mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux superficielles et souterraines, par une étude détaillée des précipitations, des températures, de l'évapotranspiration et du bilan hydrique global.

Le bassin d'étude se caractérise par un climat de type semi-aride, mésothermique, chaud et sec en été et froid en hiver. Ce climat est conditionné par la présence des trois facteurs principaux suivants :

- la présence de l'Atlantique à moins de 200km à l'Ouest, qui exerce une influence tempérante mais aussi qui se manifeste par des vents pluvieux en provenance de l'Ouest ;
- la latitude dont l'effet se traduit par une aridité croissante en se déplaçant du Nord vers le Sud ;
- la combinaison de l'altitude, de la situation aux piémonts de l'atlasique et de l'exposition aux vents pluvieux de l'Ouest qui impose des microclimats régionaux et locaux.

La présente étude climatologique a été basée sur les données climatologiques (Agence du Bassin hydraulique d'Oum ER-rbia) des séries les plus complètes et actualisées (1985-2016), provenant des stations climatologiques suivantes : Béni Mellal, Mechra Edahk, Ahmed Hansali. Les principaux paramètres climatiques qui vont être étudiés dans la suite de cette partie pour estimer le bilan hydrique, sont les précipitations, la température, l'évaporation et l'évapotranspiration.

Tableau 2 : Coordonnées Lambert des stations étudiées

Station	X(m)	Y(m)	Z(m)
Béni Mellal	409165	193045	537
Ahmed Al Hansali	452750	231750	690
Mechra Edahk	394980	204800	406

1.2 Étude des précipitations

La pluviométrie est répartie irrégulièrement dans le temps et dans l'espace. En effet, l'analyse des précipitations annuelles (1985–2016), nous a permis de ressortir les P suivantes :

- l'effet de la latitude qui se traduit par une diminution des précipitations en allant l'Atlas vers la plaine.
- l'effet de l'altitude marqué par une augmentation des pluies en se dirigeant vers les chaînes atlasiques et en allant du Sud vers le Nord c'est-à-dire de la plaine vers le plateau des Phosphates.

Tableau 3 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles des stations étudiées (1982-2017).

Saisons	Automne			Hiver			Printemps			Été			M.I.A
Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	
Béni Mellal	14	35.2	73.7	52	56	51	60.6	49.9	32.9	8.3	1.5	4.1	432 .1
Ahmed Al Hansali	14.8	37.1	93.4	67.8	73	73	63.1	55	32.1	12.3	2.2	6.5	511.4
Mechra Edahk	7.1	17	45.8	31.7	37	34.5	36.3	24.3	14	4.8	7.1	1.7	256.5

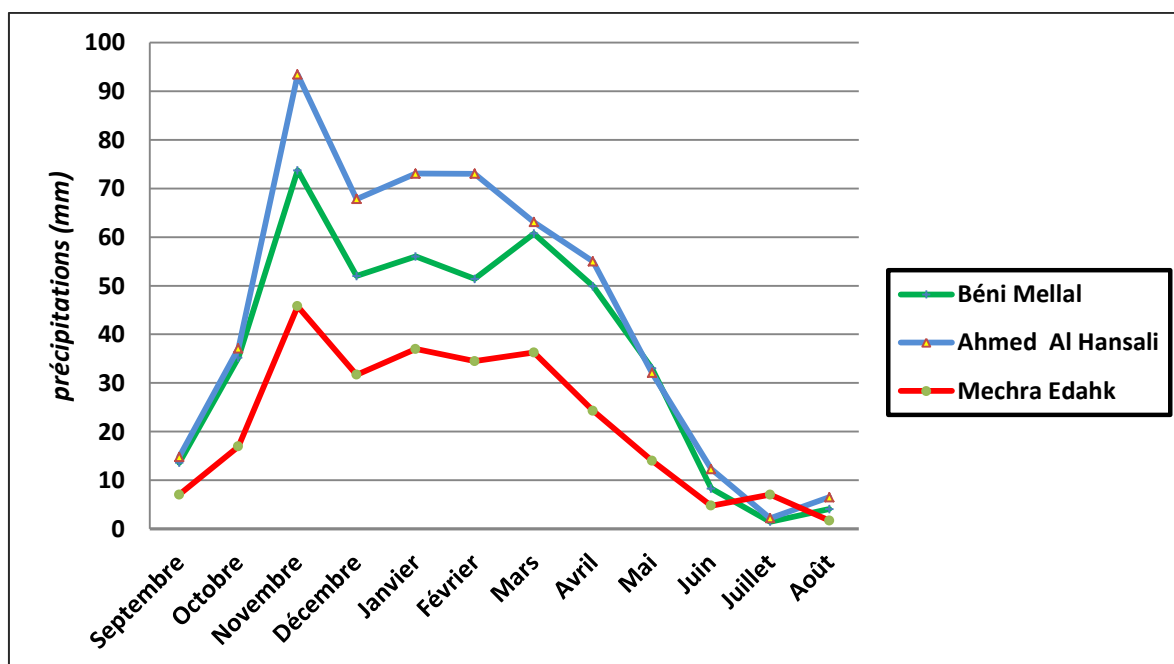


Figure 18: Évolution des précipitations moyennes mensuelles interannuelles (1982-2017)

La répartition moyenne mensuelle des précipitations des stations étudiées met en évidence deux périodes, une période pluvieuse comprise entre Octobre et Avril avec Le mois de Novembre est le mois le plus pluvieux avec une moyenne maximale de 93,4mm enregistré dans la station de Ahmed Al Hansali et une période sèche qui s'étale depuis Mai jusqu'au mois de Septembre avec des précipitations très faibles ne dépassant pas 8mm. Le nombre de jours pluvieux par ans oscille (ne dépassent pas 55 jours).

1.3 Étude de la température

Les températures connaissent de très importantes variations saisonnières. L'hiver est caractérisé par des températures diurnes peu élevées, tandis que les températures nocturnes s'abaissent aux environs de 0°C (quelques gelées nocturnes par an). Concernant le Printemps, une élévation graduelle de la température est observée à partir du mois de Juin, la température commence à prendre un caractère franchement estival. L'été est caractérisé par des températures diurnes très élevées (la moyenne des maximas dépasse 38°C) et des températures nocturnes descendant rarement au-dessous de 18°C.

Tableau 4: Températures moyennes mensuelles (en °C) enregistrées à Béni Mellal (1985-2016),(Source : ABHOE, 2017)

	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Août
T (moy)	26,1	21,4	16,0	12,4	12,3	13,7	16,3	18,1	22,0	25,8	29,8	30,4
T(max)	46,2	42,8	35,4	30,0	32,0	35,2	41,6	39,6	44,0	46,2	48,0	47,6
T(min)	8,9	5,0	2,4	-1,0	-8,2	-1,4	0,1	0,6	2,6	7,8	11,0	10,2

Tableau 5 : Températures moyennes mensuelles (en °C) enregistrées à Ahmed AL hansali (1985-2017). (Source : ABHOE, 2017)

	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juill	Août
T (moy)	24,82	20,77	16,04	12,79	11,35	12,19	15,1	17,4	21,3	25,7	30,03	30,4
T(max)	49	43,9	40,2	38,8	34,2	31,2	31,6	35,6	40	44	45,3	46
T(min)	6,5	0,8	2,0	-0,2	-1,0	0,8	1,9	2,4	6,0	10,0	10,0	6,8

L'analyse de l'évolution des températures moyennes mensuelles des stations climatologiques choisies, a montré que celles-ci augmentent progressivement à partir de Mars pour atteindre leur maximum pendant les mois de Juillet et Août (fig.12). La température

moyenne est de l'ordre de 23 °C, avec une moyenne maximale de 30.4 °C et minimale de 12.3 °C.

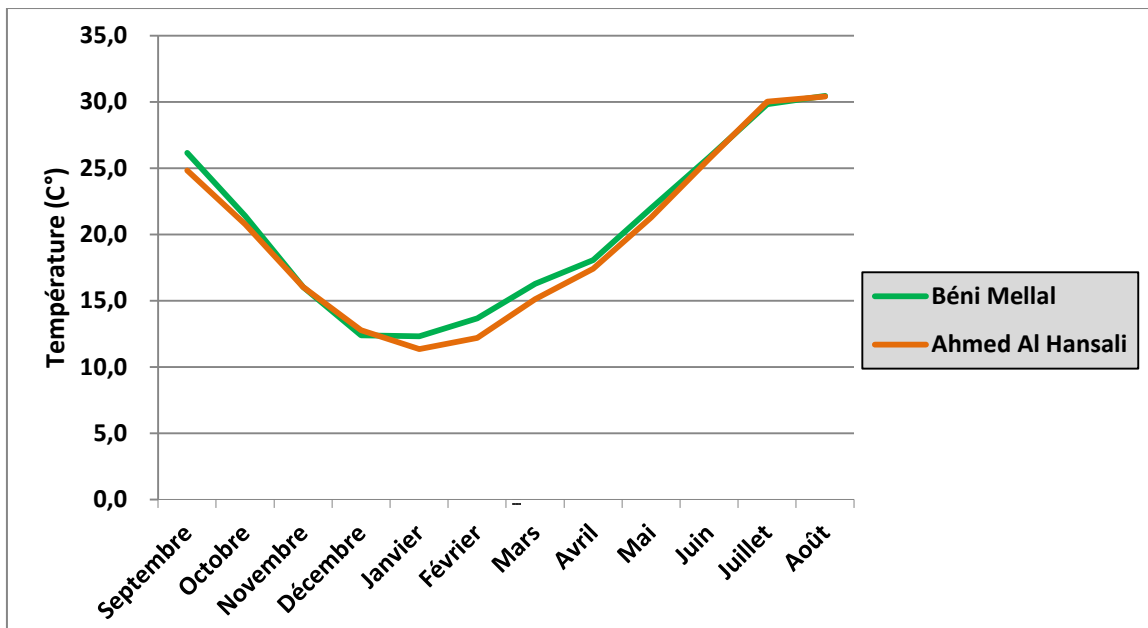


Figure 19 : Répartition de la température moyenne mensuelle des stations étudiées

-Diagramme ombro-thermique

Ce diagramme met en relief la variation des températures et des précipitations au cours de l'année (fig. 20), mais aussi la durée de la période de sécheresse qui n'est pas toujours réduite à la saison estivale. Selon Bagnouls et Gaussen (1953) la saison sèche correspond au nombre de mois dont la pluviométrie moyenne mensuelle (en mm) est inférieure à deux fois la valeur de la température moyenne mensuelle (en °C) ($P <= 2T$)

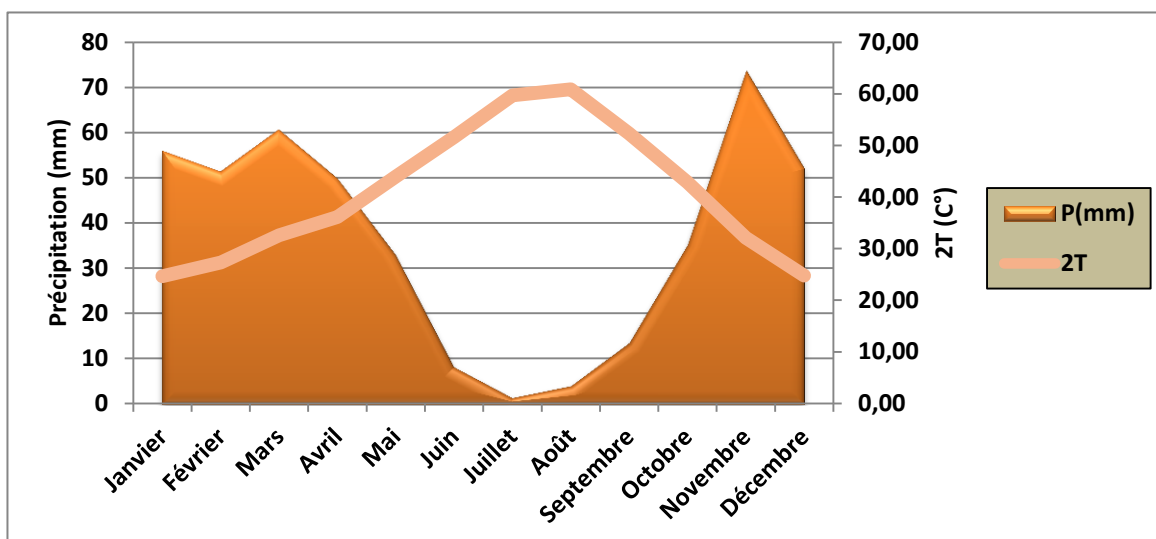


Figure 20: Diagramme Ombro-thermique (Station de Béni Mellal)

La combinaison des moyennes des températures et des précipitations dans le diagramme ombro-thermique de Bagnouls-Gausсен permet un premier dépistage de sous-ensembles basés, à ce niveau, sur l'importance de la saison sèche dans le domaine étudié. Le diagramme ombro-thermique établi montre l'importance des saisons sèches et humides en durée et en intensité : quand la courbe de températures passe au-dessus de celle de précipitations, la période est sèche, dans le cas contraire la période est humide.

1.4 Indice d'aridité

L'indice utilisé est celui de DE Martonne (1942), il est en fonction de la hauteur annuelle des précipitations P (en mm) et de la température moyenne annuelle T (en °C) :

$$I = \frac{P}{(T + 10)}$$

Avec :

I : indice d'aridité

P : précipitation annuelle en mm

T : température moyenne annuelle en °C.

Tableau 6 : La relation entre l'indice d'aridité de Martonne et le type de climat :

Indice d'aridité	Type de climat
30-20	Milieu tempéré
20-10	Milieu semi-aride
10-5	Milieu aride
<5	Milieu hyper-aride

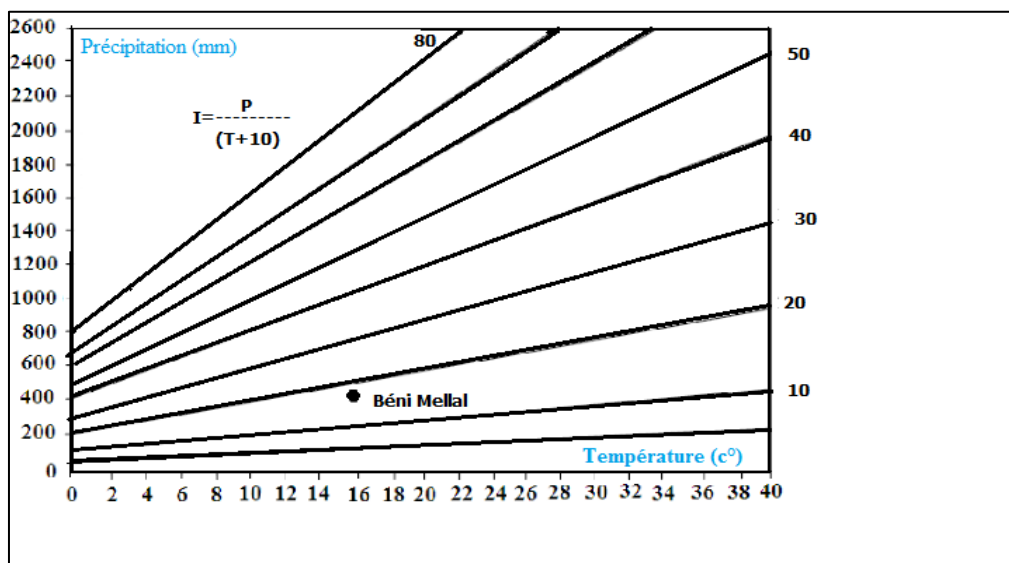


Figure 21: Indice d'aridité de Martonne (Station de béni Mellal)

Dans notre cas, l'indice d'aridité est égale à $I = 12,07\text{mm}/^{\circ}\text{C}$ (fig.21), par conséquent, cette valeur nous indique que la zone d'étude est sous l'influence d'un climat de type aride à semi-aride.

1.5 Évaporation

L'évaporation est l'une des composantes fondamentales du cycle hydrologique ; La température, l'insolation, l'hygrométrie et les vents jouent un rôle important dans les quantités annuelles évaporées.

L'étude du paramètre d'évaporation est importante pour connaître le régime climatique, il est mesuré par l'évaporomètre. Les stations climatiques de Béni Mellal et Ahmed Al Hansali ont enregistré des valeurs d'évaporation durant la période 1985-2016 par deux appareils, l'Evaporomètre Piche (en ml) et par la Bac Colorado (en mm).

-Evaporimètre type Piche : Cet appareil est constitué essentiellement par une surface poreuse, imbibée d'eau, en équilibre constant avec l'atmosphère et placé dans des conditions telles que l'évaporation soit conditionnée uniquement par les caractéristiques météorologiques : humidité de l'air, température, insolation...

-Evaporimètre type Bacs : Parallèlement aux évaporimètres, l'emploi de bacs d'évaporation est fréquent en hydrologie. Ce sont des bacs circulaires de diamètre de 1 à 2 m au max. et de faible profondeur.

L'analyse des données enregistrées dans la station de Béni Mellal montre une quantité annuelle évaporée de l'ordre de 1409mm/an par la Bac Colorado et 2365ml/an mesuré au Piche, alors que l'autre station montre une quantité annuelle évaporée de l'ordre de 2094mm/an par la Bac Colorado et 2678ml/an mesuré au Piche ;

Tableau 7 : Évaporations moyennes mensuelles de la Station de Béni Mellal (Source : ABHOR 1985-2016)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	TOT
Piche	225,9	177	122,7	98,4	101,9	120,4	154,8	165,2	233,2	280,6	347,3	321,7	2365.8
Bac	172,6	103	63,5	49,7	38,8	43,3	63,9	87,6	132,4	185,3	241,2	228,0	1409.6

Tableau 8 : Évaporations moyennes mensuelles de la Station d'Ahmed Al Hansali (Source : ABHOR 1985-2016).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	TOT
Piche	302,8	222	145,3	109,6	107,5	110,7	160,9	177,4	265,1	326,4	433,3	450,2	2678,5
Bac	254,1	169	99,4	94,9	68,2	74,2	107,2	134,3	198,8	263,8	371,0	362,3	2094,7

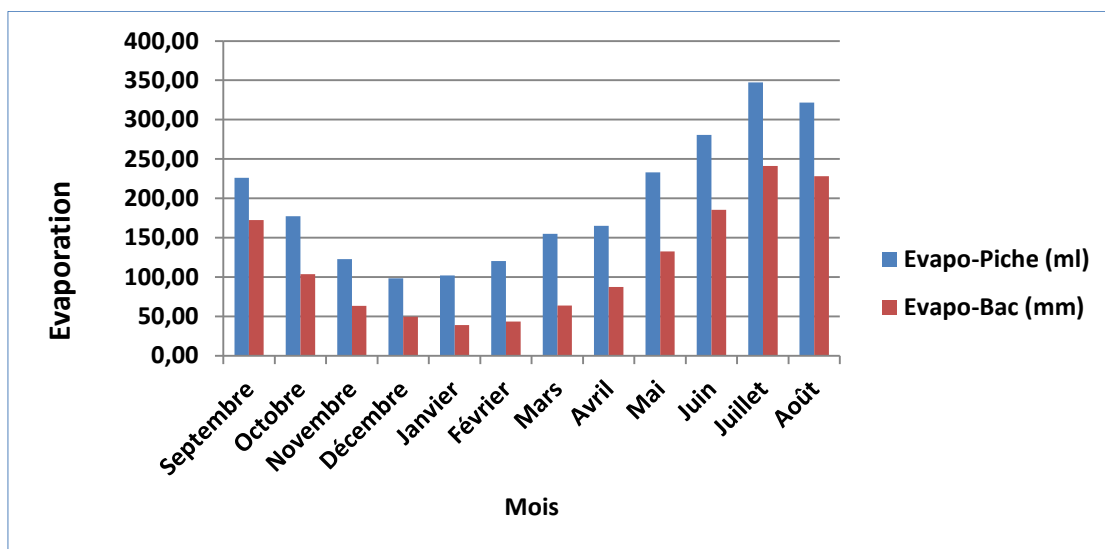


Figure 22: Variations des moyennes mensuelles d'évaporation de la station de Béni Mellal (1985- 2016)

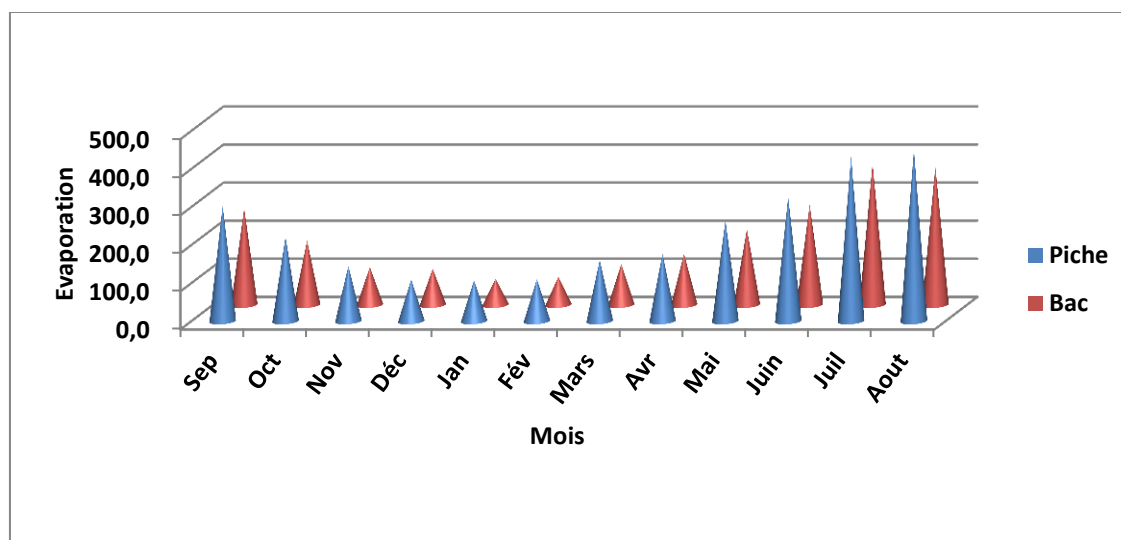


Figure 23: Variations des moyennes mensuelles d'évaporation de la station d'Ahmed Al Hansali (1985- 2016)

La moyenne mensuelle de l'évaporation enregistrée par les deux appareils présente une même variation au cours des mois, les valeurs minimales sont enregistrées pendant les mois de décembre, janvier, février et Mars alors qu'au cours des mois juin, juillet et août, les deux appareils enregistrent des valeurs maximales.

1.6 Évapotranspiration

La notion d'évapotranspiration regroupe les processus d'évaporation et de transpiration. Associée à une région particulière, elle doit tenir compte, selon le cas, de l'évaporation des nappes libre, de la neige, de la glace, des sols dénués de végétation et de la transpiration des plantes. L'étude de l'évapotranspiration exige dès le départ deux concepts essentiels :

1.6.1- Évapotranspiration potentielle ETP

L'évapotranspiration potentielle représente l'évaporation plus la transpiration qui se produisaient si l'approvisionnement en eau était suffisant pour compenser les pertes maximums et répondaient aux pleins besoins de la végétation.

Plusieurs formules classiques sont utilisées pour estimer l'évapotranspiration potentielle ETP à savoir la méthode empirique de Serra et celle de Thornthwaite.

- Méthode de Thornthwaite (1948)

D'après Thornthwaite (1948) le calcul de l'évapotranspiration potentielle se fait selon la formule suivante :

$$ETP = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a F(\lambda)$$

Avec :

t : température moyenne mensuelle (°C)

ETP : évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle (en mm)

F(λ) : Coefficient de correction tenant compte de la latitude et du mois

Tm : Moyenne interannuelle des températures du mois (en °C)

I : somme des 12 indices thermiques mensuels $I = \sum_{k=1}^{12} ik$ avec $ik = \left(\frac{tk}{5} \right)^{1.514}$

$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49$

La valeur de l'évapotranspiration annuelle est la somme des 12valeurs d'évapotranspiration potentielle mensuelles.

Tableau 9 : Calcul de l'ETP mensuelle et annuelle par la méthode de Thornthwaite pour la Station de Béni Mellal (Latitude = 32° 32'N) (Source : ABHOR 1985-2016).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
T	26,15	21,41	16	12,40	12,31	13,67	16,29	18,06	21,98	25,81	29,84	30,44	****
K	1,03	0,98	0,88	0,87	0,89	0,86	1,03	1,08	1,19	1,19	1,21	1,15	****
I	12,24	9,04	5,84	3,95	3,91	4,59	5,98	6,99	9,41	12,00	14,95	15,41	****
ETP	120,9	74,56	35,8	20,24	20,40	24,75	43,35	56,83	95,92	135,9	189,2	187,8	1005,2

Tableau 10 : Calcul de l'ETP mensuelle et annuelle par la méthode de Thornthwaite pour la Station d'Ahmed AL-Hansali (Latitude = 32° 40'N) (Source : ABHOR 1985-2016).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc.	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
T	24,8	20,8	16,0	12,8	11,4	12,2	15,1	17,4	21,3	25,7	30,0	30,4	****
K	1,03	0,98	0,88	0,87	0,89	0,86	1,03	1,08	1,19	1,19	1,21	1,15	****
I	11,31	8,64	5,84	4,15	3,46	3,86	5,34	6,62	8,96	11,93	15,09	15,39	****
ETP	110,8	72,4	37,72	23,11	18,38	20,65	38,91	55,09	92,5	137,8	194,5	189,9	991,7

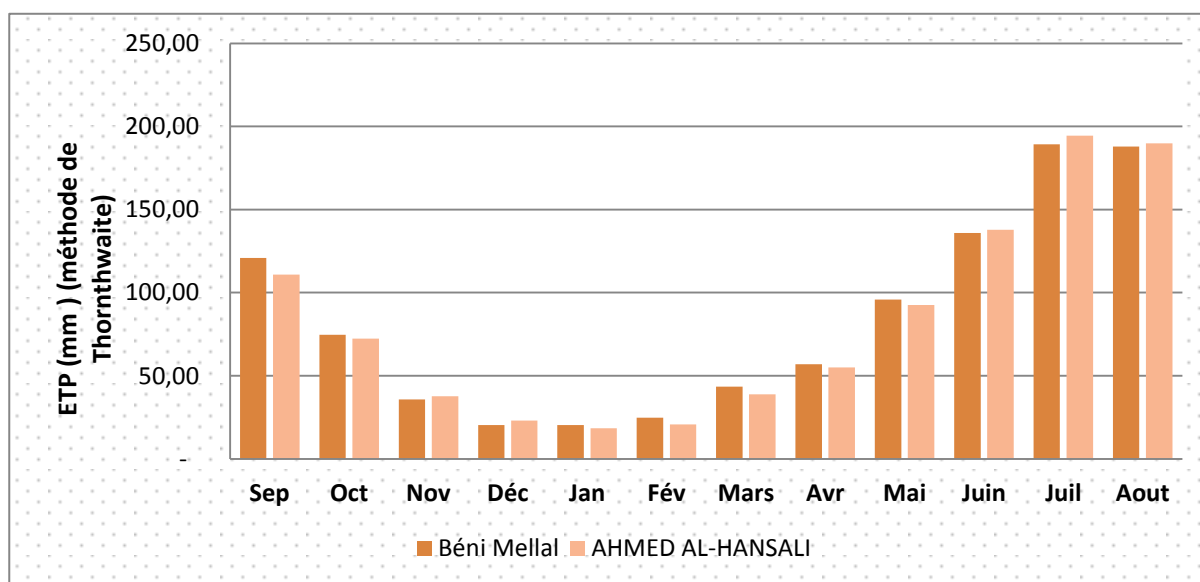


Figure 24: La variation de l'évapotranspiration potentielle mensuelle, entre 1985 et 2016, de la station d'Al-hansali et la station de Béni Mellal

L'analyse du diagramme de l'évaporation potentielle par La méthode de Thornthwaite montre que les mois de décembre à février les deux stations présentent des valeurs relativement basses d'évapotranspiration potentielle surtout à Ahmed Al-Hansali (18,38mm),

cependant les Mois de Juin à septembre présentent des valeurs relativement élevées (194,49 mm) (Tableau 10).

L'évapotranspiration reste très importante par rapport à la pluviométrie annuelle (déficit) enregistrée durant la période 1985-2016. C'est ce qui caractérise les zones arides et semi-arides.

1.6.2. L'évapotranspiration réelle (ETR) :

L'évapotranspiration réelle désigne la quantité d'eau effectivement évaporée et transpirée au-dessus de la surface étudiée. Lorsque la teneur en eau du terrain est suffisante, l'ETR=ETP En cas de déficit, l'ETR est inférieure à l'ETP

- La formule de Turc annuelle

Elle permet de calculer l'ETR en tenant compte des valeurs moyennes annuelles de la température et des précipitations.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{(0.9 + (\frac{P}{L})^2)}}$$

Avec :

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3$$

L : pouvoir évaporant de l'atmosphère.

ETR : évapotranspiration réelle annuelle en (mm)

T : température moyenne annuelle (°C).

P : hauteur de précipitation annuelle en (mm)

Tableau 11 : Calcul de l'évapotranspiration réelle mensuelle, entre 1985 et 2016, par la méthode de Turc pour l'ensemble des stations étudiées. (Source : ABHOR 1985-2016).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
Béni Mellal	14,76	39,03	74,55	56,83	57,85	57,26	63,16	51,34	34,45	9,60	1,75	4,51	465.10
Ahmed	16,47	41,70	99,10	74,62	76,75	79,32	68,02	59,45	32,00	14,31	2,45	7,58	571.77
Al-hansali													

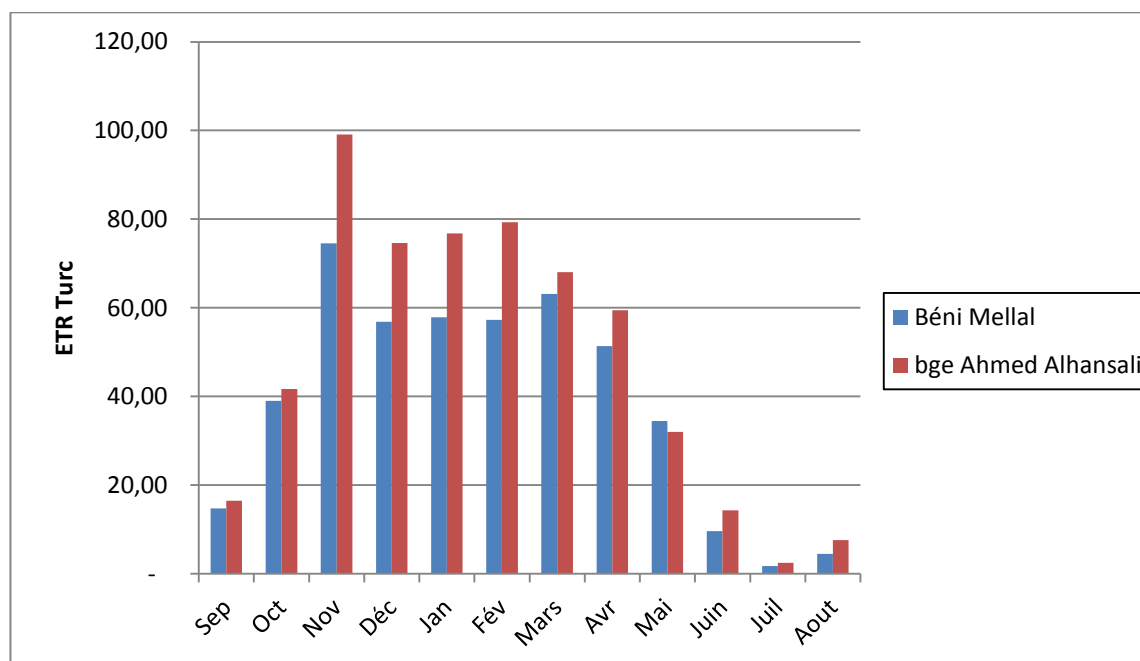


Figure 25: Évapotranspirations réelle, entre 1985 et 2016, du barrage Ahmed Al-Hansali, et la station de Béni Mellal -Méthode de Thornthwaite 1948 :

La comparaison des valeurs de l'évapotranspiration potentielle mensuelle (ETP) et des hauteurs des précipitations mensuelles (P) permet de calculer l'évapotranspiration réelle mensuelle (ETR) Plusieurs cas peuvent se présenter :

- **ETR < P**
- **ETR = ETP**

La quantité d'eau correspondant à P-ETP est emmagasinée dans le sol jusqu'à saturation de celui-ci, la partie de l'« excédent » dépassent éventuellement la réserve cumulée maximale en eau du sol, constitue le « water-surplus » et est disponible pour le ruissellement et l'infiltration.

- **ETR = ETP**
- **ETR = ETP = P**

Les réserves en eau de sol restent les mêmes que celles du mois précédent.

- **ETR > P**

ETR = P + tout ou partie de la réserve en eau du sol jusqu'à épuisement de celle-ci. Lorsque les réserves en eau du sol sont épuisées et que ETP > ETR, ETP – ETR = « water- defiiency ».

La valeur de l'évapotranspiration réelle annuelle est la somme des 12 valeurs d'évapotranspiration réelle mensuelles.

Les valeurs de l'ETR obtenues par cette méthode sont données par les tableaux ci-dessous :

Tableau 12 : Bilan de Thornthwaite, entre 1985 et 2015, pour la station de Béni Mellal

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc.	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	TOT
T °C	26,1	21,4	16,0	12,4	12,3	13,7	16,3	18,1	22,0	25,8	29,8	30,4	20,39
P	14,0	37,0	71,0	54,1	55,1	54,5	60,1	48,8	32,7	9,1	1,7	4,3	442,2
ETP (mm)	120,94	74,56	35,79	20,24	20,40	24,75	43,35	56,83	95,92	135,89	189,17	187,84	1005,7
RFU	0	0	34,91	50	50	50	50	41,17	0	0	0	0	-
ETR	14,3	37,5	35,4	18,9	19,4	26,9	43,3	52	71,4	9,2	0,9	3,1	332,3
Déficit	106,64	37,06	-	-	-	-	-	-	22,5	126,79	187,47	183,54	480,46
Excédent	-	-	-	16,77	33,7	27,6	16,6	-	-	-	-	-	94,67

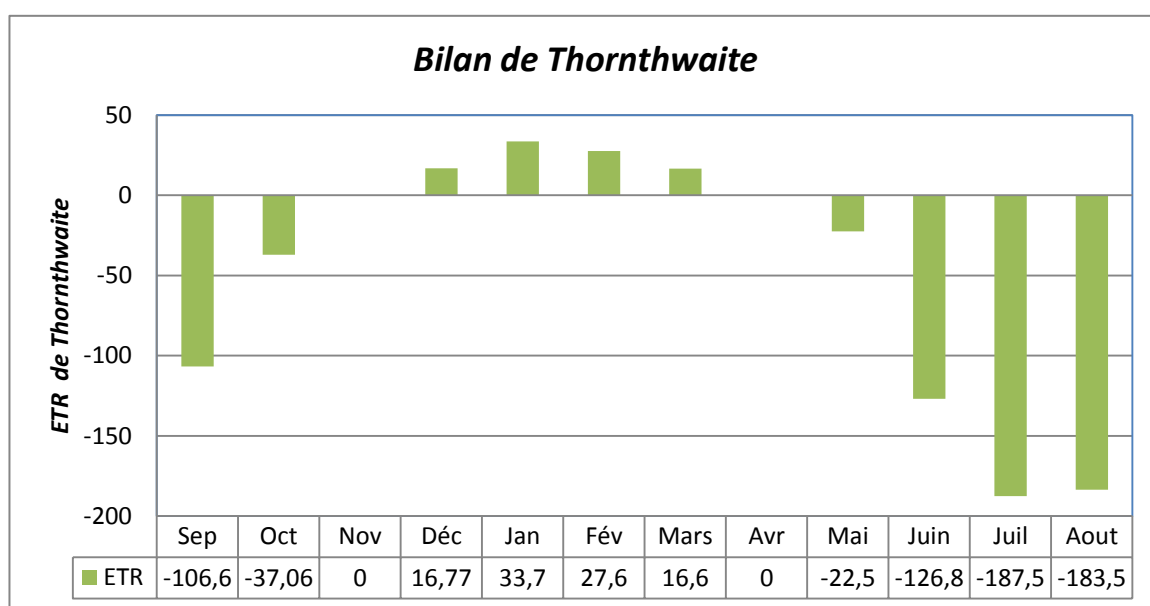


Figure 26: Bilan de Thornthwaite, entre 1985 et 2016, de la station de Béni Mellal

À partir du bilan de Thornthwaite appliqué à la station de Béni Mellal, on constate que la région connaît un excédent d'eau qui s'étend surtout de Décembre à Mars où la pluviométrie satisfait les réserves hydriques du sol (RFU) qui atteint son maximum (50mm) car le climat de la région est semi-aride, et durant la période allant de Mai à Novembre on remarque un déficit très important qui peut atteindre 480mm

1.7 Les vents

Tableau 13 : Vitesse du vent mensuel moyen (m/s) entre 1985 et 2016. (Source : ABHOR 1985-2016).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc.	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Ahmed-Al Hansali	1,52	1,31	1,18	1,13	1,23	1,40	1,43	1,54	1,60	1,64	1,71	1,76
Béni Mellal	0,4	0,35	0,23	0,21	0,24	0,28	0,31	0,43	0,40	0,48	0,56	0,49

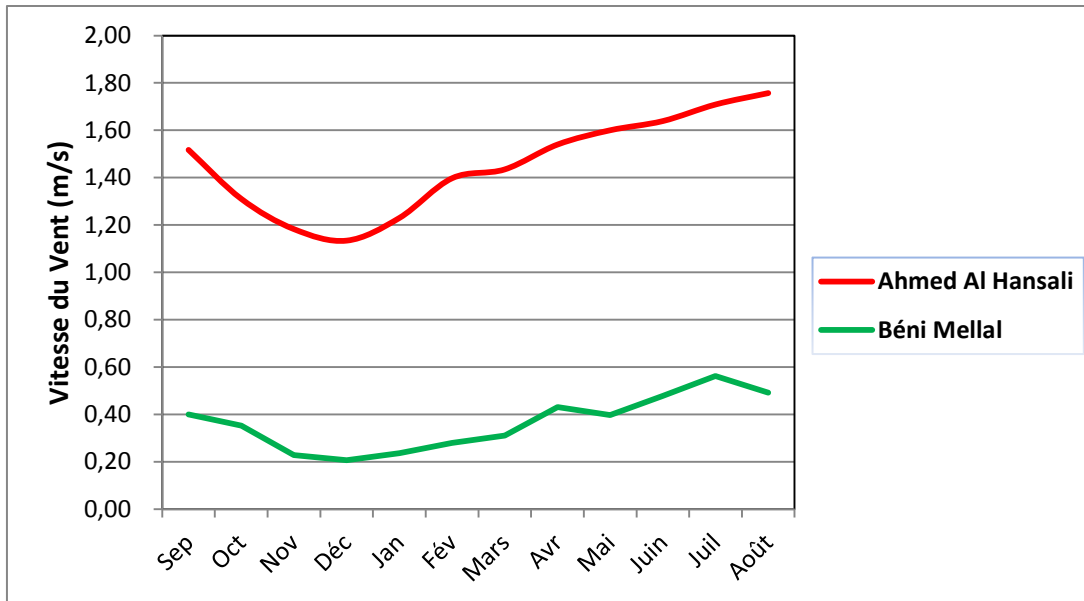


Figure 27 : Variations des moyennes mensuelles de Vent des stations étudiées (1985- 2017)

Les variations moyennes mensuelles des vents enregistrées au niveau des stations de Béni Mellal et Ahmed Al Hansali au cours de l'année montrent une augmentation des valeurs en été, et les valeurs minimales sont enregistrées pendant les mois Décembre, Janvier.

Les vents les plus fréquents d'Octobre à Mai sont les vents de Nord-est, secs et froids et les vents du Sud-ouest qui, au contraire, apportent les pluies (ABHOE, 2016).

De Mai à Octobre, les vents soufflent principalement du Sud-Ouest et de l'Ouest, le plus souvent en fin d'après-midi et sont dus à la rupture de l'équilibre thermique entre la montagne et la plaine, ils sont alors secs et chauds.

2. Cadre Hydrologique

Les ressources en eau dans la Plaine du Tadla sont irrégulières et mal réparties (fig.28). L'oued Oum Er-bia traverse le Tadla sur environ 160 kilomètres selon une orientation générale ENE-WSW jusqu'à l'amont de sa confluence avec oued El-Abid. Il divise la Plaine en deux secteurs hydrologiquement et hydrogéologiquement indépendants : les Béni-Amir en rive droite et les Béni-Moussa en rive gauche.

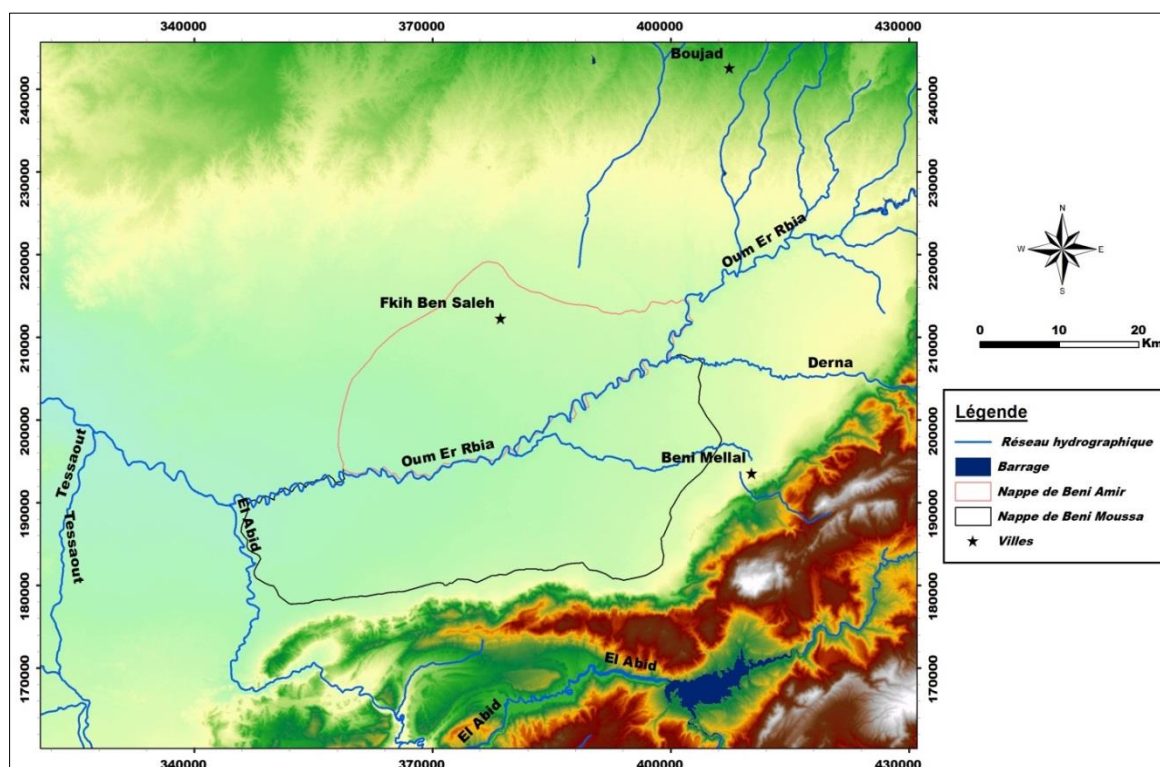


Figure 28: Réseau hydrographique couvrant la Plaine du Tadla

Sur La rive droite se caractérise par un réseau hydrographique mal organisé dont la plupart des oueds n'atteignent l'Oum Er-bia que lors de crues importantes. D'Est en Ouest on relève les cours d'eau suivants : Mellah, Bou-Begra, Tahezrit, Bou-Guerroum et Zem. Les eaux de certains de ces oueds pérennes (alimentés par des sources) sont utilisées pour l'irrigation locale : Bou-Guerroum et Zem. À l'Ouest de ces oueds sillonnant les Bni-Maâdane, s'étend une vaste région sans drainage naturel limitée arbitrairement à l'Ouest par l'oued Bou-Guerraf-Zoug aux environs d'El-Borouj : une partie de cette étendue est occupée par l'actuel périmètre du Tadla (Béni Amir). Le drainage des Béni-Amir a été fortement amélioré dans la zone irriguée grâce à la construction de nombreux drains-collecteurs qui dans quelques zones d'émergence de la nappe phréatique, ont été équipés de branches secondaires et tertiaires.

Sur la rive gauche de l'oued de l'Oum Er-bia, le réseau hydrographique est mieux organisé. D'Est en Ouest, on note :

- Oued Zemkil dont les eaux n'atteignent en général pas l'Oum Er-bia;
- Oued Derna orienté E-W et traversant le Tadla sur plus de 25 Km avant de se jeter dans l'Oum Er-bia;
- Les collecteurs du périmètre des Béni-Moussa qui ont été aménagés (Oued Derna, Day et Takerzout-El Arich dénommé aussi Rbat sur sa partie supérieure) et enfin l'Oued El Abid de direction NS parcourant plus de 20 Km en plaine avant d'atteindre l'Oum Er-bia.
- Trois rivières impriment leurs marques sur le Tadla : l'Oum-er-Rbia, le Derna et l'El-Abid.

- **L'OUED EL-ABID**

Oued El Abid est le tributaire le plus important de l'Oum Er-bia avec un débit moyen annuel de 32 m³/sec. Un débit moyen maximum de 77 m³/sec et un débit moyen minimum de 10 m³/sec, il parcourt plus de 20 Km en plaine avant de déboucher dans l'Oum Er-bia avec une orientation N-S. Les eaux de cet affluent sont régularisées par le barrage de Bin-El Ouidane d'une capacité totale de 1300 Mm³ (Aude Nuscia Taïb, 2015)

- **L'OUED DERNA**

À 41 km à l'aval de Kasba-Tadla l'Oum-er-Rbia reçoit sur sa rive gauche un affluent de type méditerranéen : l'oued Derna ou Drent. Deux stations hydrologiques sont implantées sur son cours : l'une à l'entrée dans la plaine à Taghzirt (à l'aval des séguias Tazeroualt et Aït-Habibi) fournit depuis 1963 des résultats réguliers, malheureusement peu utilisables. L'autre dénommée Moulay-bou-Zekri entièrement nouvelle est située à l'aval de l'exutoire du canal principal D des Beni-Moussa et a commencé à fonctionner régulièrement depuis 1963 également.

- **L'OUED D'Oum Er-bia**

L'Oum Er-bia prend naissance à partir d'une quarantaine de sources qui jaillissent au débit moyen de 11 à 15 m³/s au pied de la falaise calcaire de Khedoud située à 26 km au NE de Khénifra. Cet oued en position presque axiale dans la plaine du Tadla, est caractérisé par un débit annuel moyen de 35 m³/s, avec un maximum de 1700 m³/s, et un minimum de 8 m³/s, Il draine des oueds localisés pour la majorité en rive gauche des bassins versants atlasiques ou issus de sources vaclusiennes (ABHOE, 2012).

Les apports pluviométriques sur le bassin de l'Oum Er-bia sont estimés à 18.2 milliards de m³ (12.1% du Maroc) et les ressources en eau potentielles mobilisables à 4322 milliards de m³ pour le bassin de l'Oum er-Rbia, dont 3996 milliards de m³ pour les eaux de surface et 326 milliards de m³ pour les eaux souterraines (soit 21.9% des volumes mobilisables du Maroc malgré la

superficie relativement faible couverte par ce bassin). Les eaux de l'Oum er Rbia sont salées, particulièrement en été pendant les étiages. (Aude Nuscia, 2015)

Des stations de jaugeage sont installées sur l'oued Oum Er Rbia et ses affluents. Ces stations font l'objet de mesures continues et régulières, à un pas de temps journalier, par l'ABHOER ; ce qui permet de définir avec une assez bonne précision les volumes qui s'écoulent au droit des points jaugés, Le régime de l'Oum Er-bia est suivi au niveau du Tadla grâce à des stations hydrométriques suivant :

- la station située à l'amont de Khénifra qui fonctionne depuis 1927 ;
- La station de Dchar El Oued opérationnelle depuis 1953 ;
- À Kasba Tadla, le barrage de prise pour l'irrigation des Béni Amir fournit des données depuis 1937 ;
- La station de Mechra Edahk à la hauteur du pont de la route secondaire N°133 fournit des mesures depuis 1963 ;
- Enfin, le débit de l'Oum-er-Rbia est connu à sa sortie du Tadla au niveau de la station d'Ouled Sidi Driss construite en 1967 à environ 7 km à l'aval de sa jonction avec l'Oued El Abid.

Les débits moyens mensuels révèlent une nette variation saisonnière du régime de l'Oum Er Rbia. Les hautes eaux sont enregistrées pendant les mois de novembre à mai et les étiages durant la période de juin à septembre (fig. 29).

Tableau 14 : Évolution saisonnière du débit d'Oum Er Rbia de l'amont vers l'aval de AC- Mly Bouzekri (1970-2011).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
AC- Mly Bouzekri	2,39	3,17	3,87	5,97	8,38	9,89	7,84	6,8	4,13	2,5	2,31	2,59
Mechra Eddahk	7,76	10,98	18,8	26,28	42,33	53,7	40,93	35,3	21	11,7	8,52	7,32
Oulad Sidi Driss	21,4	26,49	35,28	46,94	64,8	80,2	68,9	64,65	45	27,6	20,48	18,4

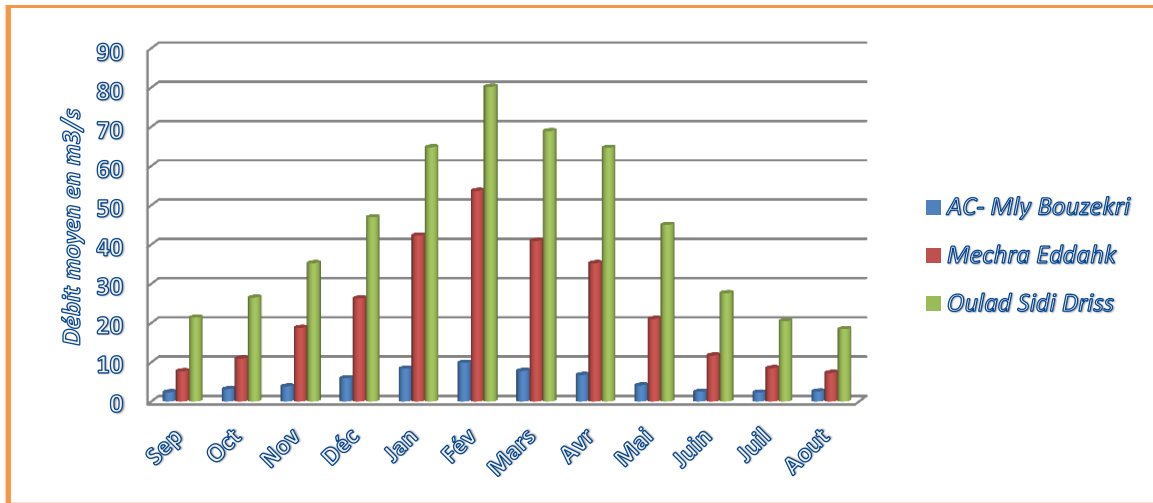


Figure 29 : Débit moyen en m³/s des stations de AC- Mly Bouzekri, Mechra Eddahk, et Oulad Sidi Driss

3. Cadre Hydrogéologique de la zone d'étude

La synthèse hydrogéologique du Système aquifère du Tadla a pour objectifs de décrire la géométrie et extension des aquifères, de caractériser les formations des épontes imperméables, de caractériser les formations aquifères à l'affleurement et leurs capacités infiltrantes, d'analyser les potentialités des réservoirs en liaison avec l'existence de réseau de fractures / fissures, zones privilégiées sur les axes tectonisés, et d'identifier des connexions possibles entre les réservoirs superposés.

L'organisation des différentes formations aquifères identifiées dans la plaine du Tadla montre une géométrie de système multicouche marqué par l'existence de quatre aquifères potentiels s'étendant sur une large portion environ 10.000 Km² du bassin moyen de l'Oum Er-bia (Aghzar 2002). Ses limites sont les suivantes :

- Au Sud et au Sud-Est le domaine Atlasique ;
- Au Nord et au Nord-Est les affleurements du Turonien ;
- À l'Ouest les affleurements du Turonien et la limite du bassin versant de la Tassaout.

Les limites ont été choisies sur des critères géologiques et surtout hydrogéologiques. En effet, la formation carbonatée aquifère du Turonien repose sur des formations quasi-imperméables et constitue l'aquifère de base.

Le système aquifère multicouche se compose :

1-De la base au sommet de quatre aquifères principaux (fig.30) :

- L'aquifère carbonaté Turonien ou localement Cénomano-Turonien ;
- L'aquifère carbonaté Sénonien ;
- L'aquifère calcaréo-sableux Éocène ;
- Les aquifères alluvionnaires Mio-Plio-Quaternaire.

2-De quatre formations semi-perméables à imperméables :

- Les marnes cénomaniennes qui constituent le substratum du système ;
- Les marnes et anhydrites du Sénonien qui constituent un semi-perméable entre les aquifères Turonien et Sénonien ;
- Les marnes bitumineuses du Maestrichtien et marnes sommitales du Sénonien entre les aquifères Sénonien et Éocène.
- Les argiles dolomitiques du sommet de l'Eocène qui séparent localement les aquifères Eocène et Mio-Plio-Quaternaire.

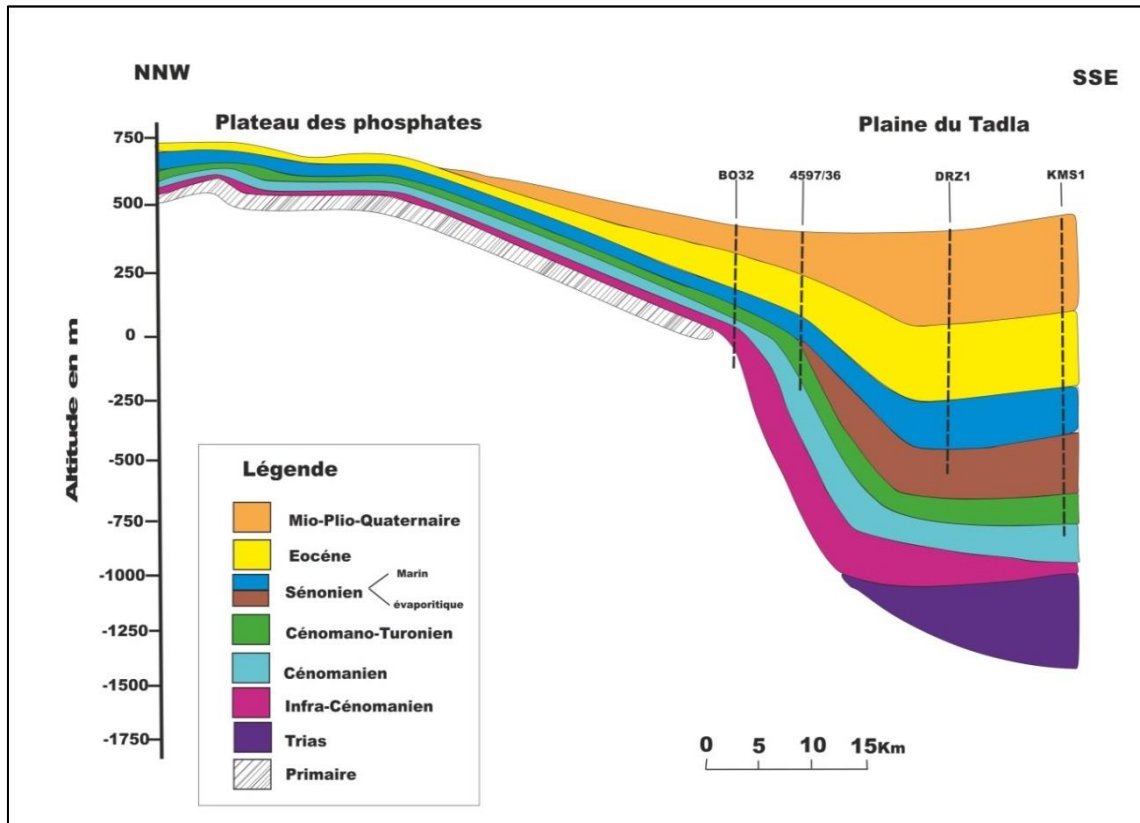


Figure 30: Coupe montrant le système aquifère multicouche de la plaine du Tadla (Najine .2005)

Les nappes de ces quatre aquifères superposées sont libres dans les zones d’affleurement au Nord, vers le Sud elles deviennent captives et sont hydrauliquement interconnectées et interdépendantes. On doit donc considérer ces quatre aquifères comme un seul système, tout prélèvement ou recharge (naturelle ou artificielle) sur un des aquifères induit des répercussions sur l’ensemble du système (Tammal, 2014).

Le contexte structural et paléogéographique du bassin influence fortement l’hydrodynamisme au sein du système, notamment par deux traits marquants :

- ❖ Une flexure principale, de direction sensiblement NE/SW, qui marque paléogéographiquement la limite plateau-sillon avec au Sud un épaissement des couches, des variations lithologiques et l’apparition d’importants niveaux d’évaporites.
- ❖ Le développement d’un puissant corps dolomitique dans la partie NE de la flexure, qui recoupe verticalement les séries sédimentaires du Turonien au Sénonien mettant en contact les deux aquifères et affectant les propriétés hydrodynamiques des deux formations.

Les cartes piézométriques établies pour chacun des aquifères mettent en évidence d'une part les zones d'alimentation des nappes par la pluie et les flux latéraux et d'autre part les relations avec les cours d'eau qui sont presque toujours drainants. (Arioua, 1994)

Les différences de potentiel des différentes cartes piézométriques permettent également d'évaluer les échanges entre aquifères à l'intérieur du système : flux descendants et flux ascendants dans les zones d'aquifères libres et captifs.

3.1 Les nappes phréatiques du Tadla

L'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire est représenté par un complexe fluvio-lacustre très hétérogène, contenant notamment une alternance de marno-calcaires, calcaires lacustres et conglomérats. Cette entité hydrogéologique bien individualisée se compose de deux nappes situées de part et d'autre de l'Oum Er-bia : nappe de Béni Amir au nord et la nappe de Béni Moussa au sud (fig. 31) (Hammani, 2008).

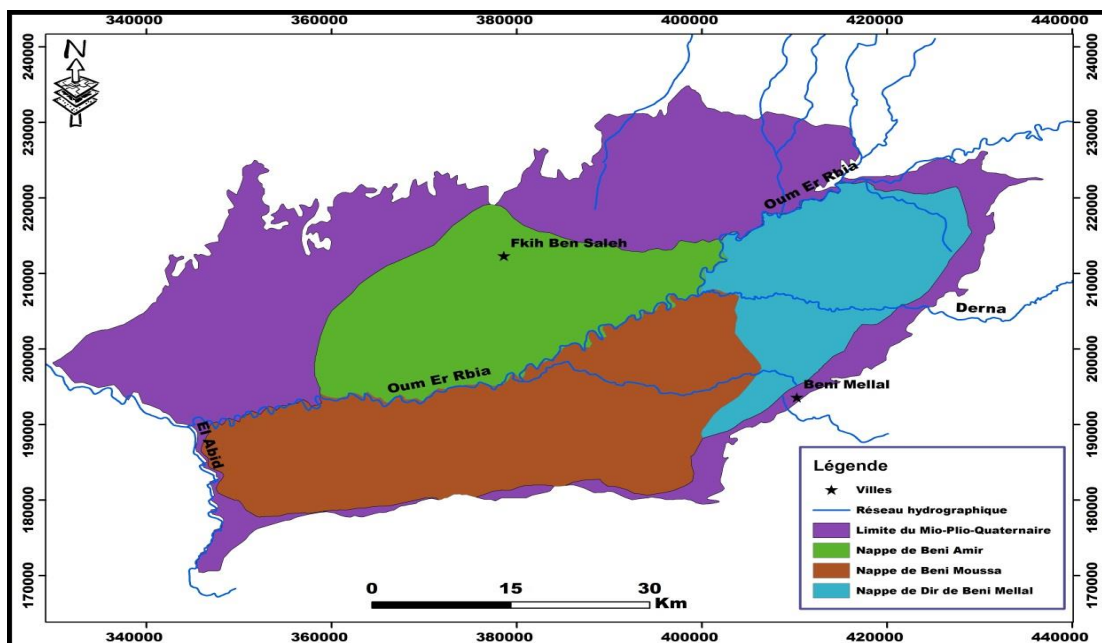


Figure 31: Nappes phréatiques de la Plaine du Tadla (d'après la carte des aquifères de la zone d'action de l'ABHOE)

3.1.1 La nappe phréatique du périmètre de Béni Amir

La nappe des Béni Amir est délimité au Nord par le contact du Quaternaire avec le Sénonien et Lutétien dans les environs de Kasba Tadla et au Sud de Boujâd et par le Lutétien au Nord de Fkih Ben Salah jusqu'à Ouled Sidi Driss sur l'Oum-er-Rbia qui constitue sa limite Sud. (Faouzi, 2001)

Cette nappe chemine dans le sens NE-SW et circule dans un complexe Plio-Quaternaire composé de calcaires francs, de marno-calcaires et d'argiles. À une profondeur d'environ 90 m on rencontre un horizon argileux qui paraît continu et peut être considéré comme substratum

imperméable (Massoni, 1966). Cet écoulement général est freiné à l'aval du périmètre irrigué dans la région de Mesgouna où il a été mis en évidence un seuil argileux qui est probablement à l'origine des remontées observées à l'amont dans des terrains parfois très transmissifs.

L'épaisseur de la nappe croît du Nord vers le Sud, elle est comprise entre 40 et 100 m sur la majeure partie de son étendue. Elle atteint des valeurs extrêmement importantes comprises entre 200 m et 250 m au sud-ouest du périmètre (Larabi, 2001)

La perméabilité varie généralement entre 10^{-5} et 10^{-3} m/s avec des valeurs extrêmes qui atteignent 8.10^{-6} (forage 2620/36) et $2.7.10^{-3}$ m/s (forage 692/36) (Faouzi, 2001).

La pente moyenne de l'écoulement est comprise entre 2.5 et $3.5 \cdot 10^{-3}$. Le gradient hydraulique moyen est de $2.5.10^{-3}$ à $3.5 \cdot 10^{-3}$, voire 2.10^{-3} aux environs de Fquih Ben Salah. En bordure de l'Oum Er-bia les isopièzes s'incurvent de façon à devenir parallèle à la rivière marquant ainsi le rôle drainant de celle-ci (Arioua, 1994). Dans cette zone le gradient augmente fortement en raison des faibles transmissivités pour atteindre 6.10^{-3} voire 1.10^{-2} m²/s. (Faouzi, 2010)

Les ressources en eau mobilisables de cette nappe sont de 190 Mm³/an. Les transmissivités mesurées en 100 points varient entre 10^{-3} et $1.5.10^{-1}$ m²/s. La plus grande partie du périmètre irrigué renferme des transmissivités se situant entre 5.10^{-3} et 5.10^{-2} m²/s. Les valeurs les plus faibles ont été observées au Nord et au Nord-Est de Fkih Ben Salah ; elles sont généralement comprises entre 10^{-4} et 10^{-3} m²/s. La valeur du coefficient d'emmagasinement varie de $1.4.10^{-2}$ à 1.10^{-1} .

3.1.2 Nappe de Béni Moussa

Elle s'étend sur une superficie d'environ 885 km². La nappe phréatique des Béni Moussa est comprise entre l'Oum Er-bia au Nord et le pied de l'Atlas au Sud. L'Oued El Abid constitue sa limite Ouest et à l'Est elle se termine par la ligne joignant Kasba Tadla à Rhorm el Alem. Cette nappe circule dans un complexe plio-quadernaire comprenant essentiellement des calcaires des marno-calcaires et des argiles (Massoni, 1976). Mais comme les calcaires sont éparpillés dans la masse marneuse sous forme de lentilles, la circulation de la nappe se fait de façon irrégulière en fonction de la perméabilité. En fait, il s'agit d'un ensemble argilo-calcaire présentant d'innombrables variations de faciès latérales et verticales dont le détail est encore loin d'être connu. Cet état confère à cette nappe les caractéristiques d'un système multicouche dont les niveaux aquifères seraient séparés par des horizons plus ou moins imperméables. Ces horizons aquifères communiqueraient entre eux soit par drainance soit par variation de faciès. Dans ces

conditions le mur de la nappe est difficile à appréhender et devrait se trouver entre 80 et plus de 120 m de profondeur suivant les zones. Concernant l'écoulement de cette nappe, il est de direction générale E-W. L'Oum Er-bia assure un rôle dans le drainage de cette nappe qui semble être canalisée sur un axe d'horizons perméables situé entre l'Oued et la montagne et passant par la Merdja d'El Arich.

La majorité des transmissivités s'étend de $1.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ à $5.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, avec toutefois de fortes valeurs dans des zones particulières. D'Est en Ouest, on observe une succession de zones de haute transmissivités séparées par des régions à faible transmissivités. Au centre du périmètre des Béni-Moussa, on note une plus forte transmissivités de $16.10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$.

Contrairement aux valeurs des transmissivités, celles du coefficient d'emmagasinement sont très peu nombreuses. À l'échelle de la nappe, ces valeurs demeurent insuffisantes et peu représentatives. La majeure partie des chiffres est comprise entre 1 et 5.10^{-2} avec près de 50 % se trouvent entre 1.5 et $3.5.10^{-2}$. Les valeurs du coefficient d'emmagasinement oscillent généralement entre 3.10^{-2} et 6.10^{-2} .

Les sorties de ces nappes sont constituées principalement par le drainage artificiel par l'intermédiaire du réseau de drains (d'une longueur de 1 703 km), le drainage naturel par l'Oued Oum Er-bia, les prélèvements agricoles, d'eau potable et industriels et par l'évaporation directe.

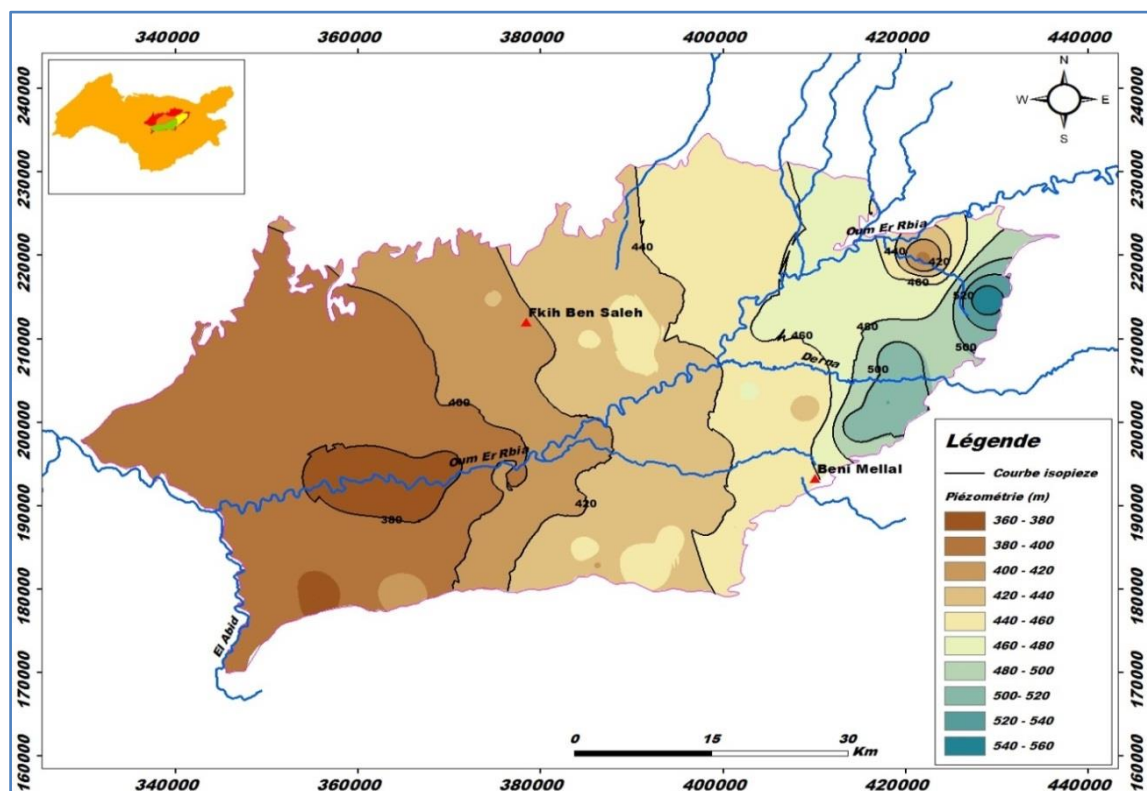


Figure 32 : Carte piézométrique de la nappe phréatique du Mio-Plio-Quaternaire de Tadla (2.2.2016)

a) Recharge

L'alimentation des nappes phréatiques de Béni Amir et Béni Moussa se fait par deux types de recharge :

- Une recharge naturelle.
- Une recharge artificielle

-La recharge naturelle : Plusieurs études ont comporté des calculs de pluie efficace, les résultats conduisaient à retenir une lame d'eau infiltrée moyenne de 5 à 7 mm dans les Beni Amir de 3 mm dans les Beni Moussa avec de fortes variations d'une année sur l'autre (0 à 25 mm dans les Beni Amir 0 à 22 mm dans les Beni Moussa) (ABHOE, 2008).

-La recharge artificielle : Elle est due à l'infiltration des eaux d'irrigation, localisée aux zones irriguées et aux adducteurs quand ceux-ci ne sont pas revêtus, cette recharge qui a débuté avec la mise en place des grands aménagements a suivi évidemment l'évolution des apports d'eaux superficielles dont on a vu les fortes variations.

3.2 Les nappes profondes du Tadla

La nappe captive de Tadla englobe l'aquifère les calcaires-sableux de l'Eocène, les carbonates du Sénonien et les carbonates du Turonien. Les nappes profondes semblent être libres dans la partie Nord et deviennent captives tout en passant vers le Sud. (Lbouh, 2016)

3.2.1 Nappe de l'Eocène

D'une extension de 6500km² dont 2300km² environ sont en affleurement et 4200 km² environ sont sous couverture Mio-Plio-Quaternaire, l'aquifère de l'Eocène représente la deuxième ressource en eau souterraine du bassin après le Turonien. Elle est rencontrée en affleurement en grande partie sur le Plateau des Phosphates, du secteur El Borouj-Fkih Ben Salah jusqu'au secteur de Houribga. Elle affleure également de l'Oum Er-bia jusqu'au Nord de Fkih ben Salah, en passant par Kasba-Tadla où la nappe Eocène devient captive, l'Eocène affleure également dans le secteur de la Tessaout aval, entre Mzizoua et Bou Ghazi. (AbhorABHOER, 2008).

Sous le plateau des phosphates, l'aquifère de la nappe Eocène est composé d'alternances de phosphates sableux et de calcaires phosphatés à silex fissurés. Au Sud sous la plaine du Tadla, la série Maastrichtien-Eocène se présente dans cette région sous forme de sables phosphatés alternant avec des niveaux aquifères de calcaires, de dolomies phosphatées et de dolomies à silex. Elle se termine par un niveau d'argile dolomitique (BRGM, 1993).

a) Les paramètres hydrodynamiques :

Les paramètres hydrodynamiques de cette nappe ne sont pas bien connus à l'exception de quelques forages très espacés pour être représentatifs de l'aquifère. A Kasba-Tadla par exemple la perméabilité horizontale est de $2.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. À l'Ouest de la zone Fkih Ben Salah- Dar Ouled Zidouh, La distribution spatiale de la transmissivité est mal précisée et varie dans une fourchette de $1.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, à $9.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, sa valeur moyenne est de $5.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. (Ettazarini, 2006).

En dehors de cette zone, les valeurs de transmissivité rencontrées sont rares : $0.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ dans le forage 1914/37 au Sud de Kasba- Tadla ; $0.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ dans le forage 2660/37 ; $4.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ dans les forages 2628/37 et 2644/37 au Nord de Béni Mellal ; et $7.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ au forage 1574/36 au Nord de Kelaa des Sraghna, La seule valeur du coefficient d'emmagasinement disponible est 7.10^{-4} (ABHOE. 2008)

b) Piézométrie de la nappe

La carte de la figure 33, représente la piézométrie de la nappe, elle montre que l'écoulement général de la nappe se fait globalement du Nord vers le Sud,

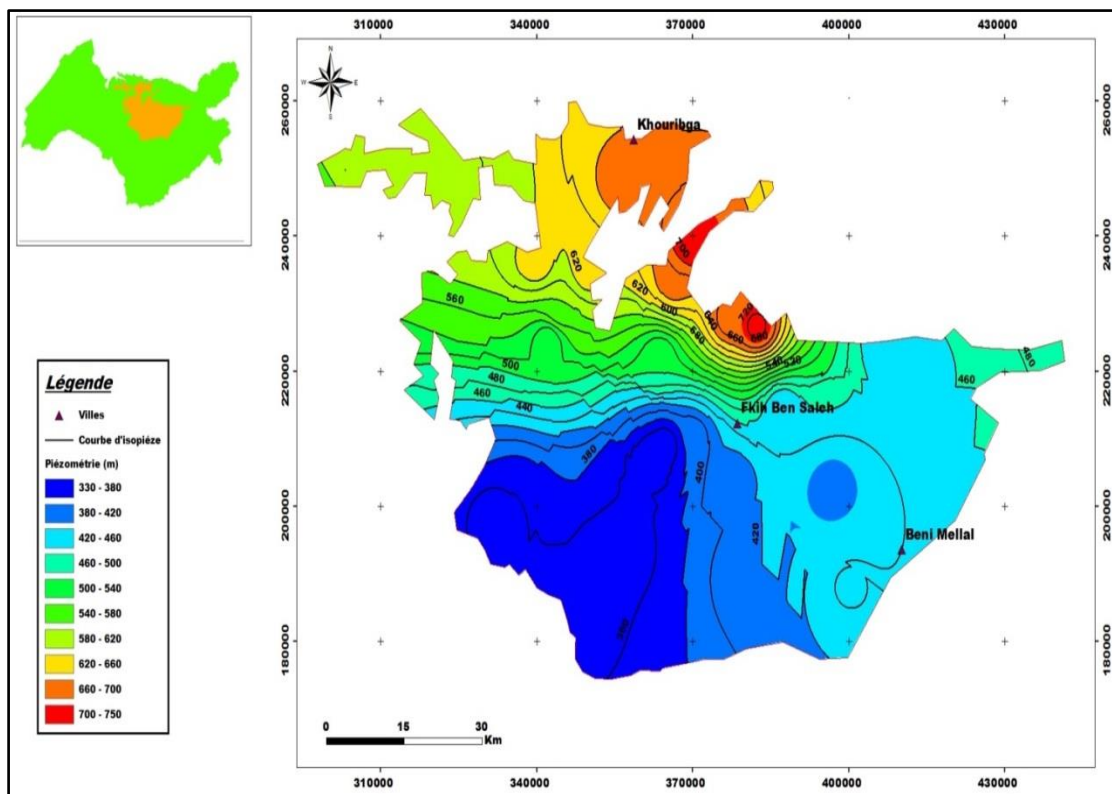


Figure 33 : Carte piézométrique de la nappe profonde de l'Eocène de Tadla (2.2.2016)

c) Structure générale de l'écoulement :

L'écoulement de la partie libre de la nappe Eocène se fait en général du Nord vers la Sud. La pente de la surface piézométrique y est de 0.6% à 0.8%, cette pente diminue pour être de 0.4 % dans la partie captive et devient de plus en plus faible 0.1 % par endroits au Sud de la zone d'étude. L'écoulement de la partie captive de la nappe Eocène se fait vers l'Ouest selon un axe de drainage orienté ENE-WSW dans le secteur compris entre Fkih Ben Salah et Dar Ouled Zidouh et il se dirige vers le NE et converge sur l'Oum Er-bia dans le secteur compris entre les Oueds Tassaout et El Abid (Ettazarini, 2006).

d) La qualité chimique

La qualité chimique de l'eau de cette nappe est variable et moins bonne que celle de la nappe de Turonien. (Hammani, 2004). En général le faciès est bicarbonaté chloruré (parfois sulfaté) calco-magnésien avec un résidu sec à 110 °C compris entre 500 à 1500 mg/l. Parfois l'eau est plus salée et atteint 9050 mg/l. Des teneurs en fluor variant de 1 à 3 mg/l ont été notées dans la partie occidentale (Belhacene, 1992)

e) Recharge de la nappe

La recharge de la nappe profonde de l'Eocène s'effectue de plusieurs façons :

- toute la pluie efficace est susceptible de s'infiltrer compte tenu du caractère karstifié des affleurements ;

-la recharge par les crues de l'Oum Er-bia en amont de Kasba Tadla où les calcaires éocènes affleurent dans le lit de l'oued sur une dizaine de km est jugée probable mais non quantifiée. Une telle recharge vraisemblable avant la création du barrage d'Ahmed El Hansali se trouverait aujourd'hui probablement supprimée par le stockage des crues dans le réservoir.

-L'alimentation par drainance ascendante à partir de la nappe du Turonien au travers du Sénonien semi-perméable

3.2.2 L'aquifère du Sénonien

Le Sénonien est le deuxième aquifère de la zone d'étude avec une superficie de 9100 Km², les formations sénoniennes affleurent surtout le pourtour du Plateau des Phosphates, depuis Kasba-Tadla à l'Est jusqu'à El Brouj à l'Ouest. L'aquifère de Sénonien est constitué de niveaux calcaires intercalés dans une série calcaréo-marneuse peu épaisse au Nord et au Nord-Ouest, la partie utile de la série augmente vers l'est, où elle peut atteindre 30m et exceptionnellement 60 m dans le secteur de Boujad. En dessous de cette série calcaréo-marneuse on trouve une

série évaporitiques (Sénonien lagunaire) dont l'épaisseur augmente vers le Sud pour atteindre 200 à 300 m au pied de l'Atlas.

a) Les paramètres hydrodynamiques :

Les caractéristiques hydrodynamiques sont médiocres dans l'endroit où elles ont été mesurées : transmissivités entre 2.10^{-4} et 2.10^{-5} m²/s, la perméabilité est de l'ordre de 3.10^{-5} et 3.10^{-7} m/s et les débits exhaures sont toujours inférieurs à 2 ou 3 l/s pour les rabattements importants.

L'alimentation de la nappe du Sénonien est assurée principalement par l'infiltration efficace des eaux de pluies au niveau des zones d'affleurement des niveaux calcaires (plateau des phosphates), ou par drainance à partir des autres aquifères du complexe.

Pour la qualité des eaux de la nappe, les valeurs disponibles montrent une salinité basse avec un résidu sec variant de 300 à 800 mg/l. Ces éléments s'avèrent également insuffisants pour caractériser une ressource qui subit certainement de fortes variations dans l'espace.

b) Piézométrie de la nappe

La carte de la figure 34, représente la piézométrie de la nappe, elle montre que l'écoulement général de la nappe se fait globalement du Nord-Est vers le Sud-ouest,

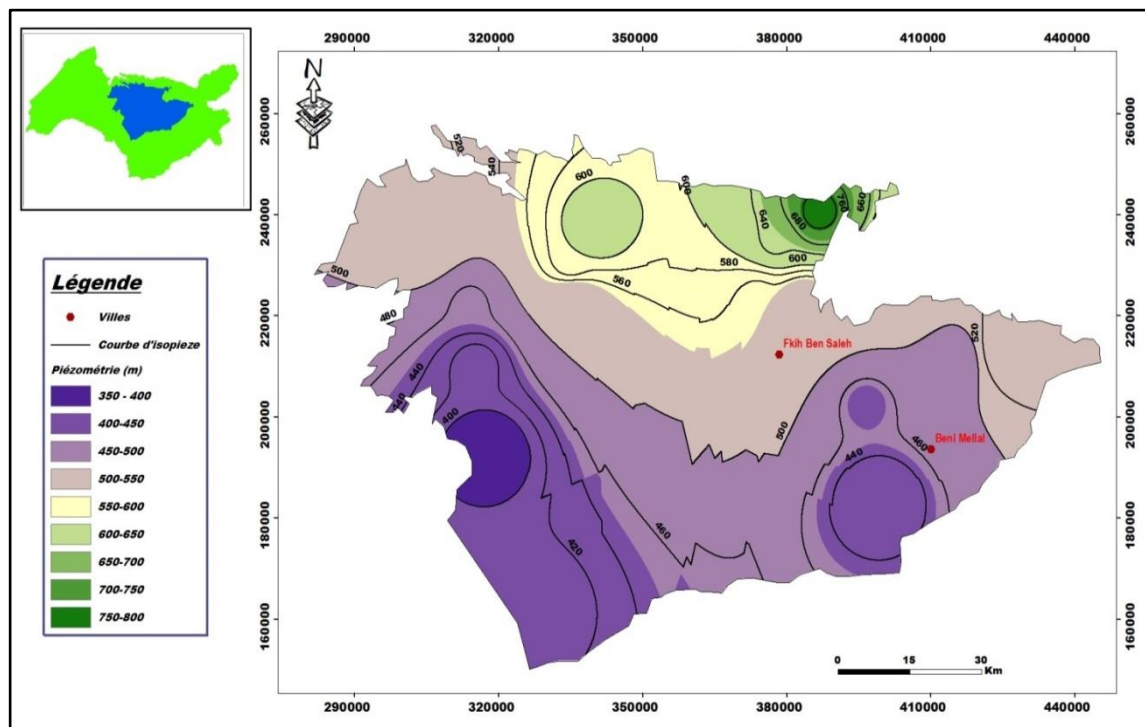


Figure 34: Carte piézométrique de la nappe profonde du Sénonien de Tadla (2.2.2016)

c) Structure générale de l'écoulement : La partie libre de la nappe sénonienne s'écoule du Nord vers le Sud jusqu'aux environs du Secteur Fkih Ben Salah- El Brouj, puis elle s'écoule vers le Sud-ouest. À

l'Oued du secteur Khouribga–El Brouj, la morphologie de la surface piézométrique indique une ligne de partage des eaux orientée NE-SW. De ce fait, la partie située à l'Ouest de cette ligne, s'écoulant vers le Sud-Ouest ne participe pas à l'alimentation de la nappe du côté de la plaine du Tadla. À l'Est de cette ligne l'écoulement s'effectue vers le SSE.

3.2.3 L'aquifère du Turonien

L'aquifère s'étendant sur une superficie de 10 000 km², elle est libre dans le plateau des phosphates et captive sous la plaine de Tadla (Hsissou, 1996). Cette nappe joue un rôle très important surtout dans la zone de Tadla où elle assure l'alimentation en eau potable des villes de Fquih Ben Saleh et Khouribga notamment (Hammani 2004), il est délimité :

- ❖ à l'Ouest par les Rhamna.
- ❖ au Sud-ouest par le massif des Jbilet.
- ❖ au Sud et au Sud-est par le domaine Atlasique.
- ❖ au Nord par la Meseta côtière séparée du plateau des phosphates par la flexure NE-SW de Settat.
- ❖ au Nord-est par le massif hercynien de la Meseta marocaine septentrionale.

Il représente l'aquifère le plus généralisé et le plus productif de toute la zone d'étude, il constitue le château d'eau du bassin puisqu'il participe de plus de 90% à l'alimentation en eau potable des principales agglomérations de la région.

Le réservoir est constitué par des calcaires et des calcaires dolomitiques du Turonien au nord et par des dolomies marneuses voire évaporitiques du Cénomano-Turonien au sud ((Hsissou, 1996). L'aquifère du Turonien est d'une épaisseur qui varie de 20 m au niveau des affleurements à 80 m au Sud en bordure du domaine Atlasique voire localement 100m. Le réservoir présente une structure sub-tabulaire au Nord alors que vers le Sud, il s'enfonce progressivement avec une augmentation de sa puissance dans la partie subsidence (Zarhloule).

a) Piézométrie de la nappe

La carte de la figure 35, représente la piézométrie de la nappe, elle montre que l'écoulement général de la nappe se fait globalement du Nord vers le Sud, La surface piézométrique apparaît complexe et permet de distinguer trois régions à comportements piézométriques différents.

La partie Nord du bassin correspondant au plateau des phosphates où la nappe circule du Nord vers le Sud, à partir des calcaires affleurant au niveau d'Oued Zem et de Boujaad. Elle se caractérise par des courbes parallèles et serrées, indiquant un gradient hydraulique fort, ce gradient reflète la

remontée rapide du mur de l'aquifère vers les affleurements accompagnée par une réduction de l'épaisseur de l'aquifère (le niveau piézométrique est situé entre 580m et 660m).

Dans la partie Ouest et Sud-Ouest du plateau les points d'eau même de reconnaissance sont rares. Ceci est dû à la faible productivité de la nappe à cet endroit du bassin liée à la faible recharge de l'aquifère, dont l'affleurement est très réduit.

La région Sud du bassin correspondant à la plaine du Tadla où la nappe circule approximativement du Nord-Est vers le Sud-Ouest. Les courbes isopièzes sont beaucoup plus espacées et les gradients hydrauliques sont relativement trop faibles témoignant d'une bonne perméabilité et de l'augmentation de la puissance des calcaires turoniens, dans cette région le niveau piézométrique est situé entre 260 m et 400m.

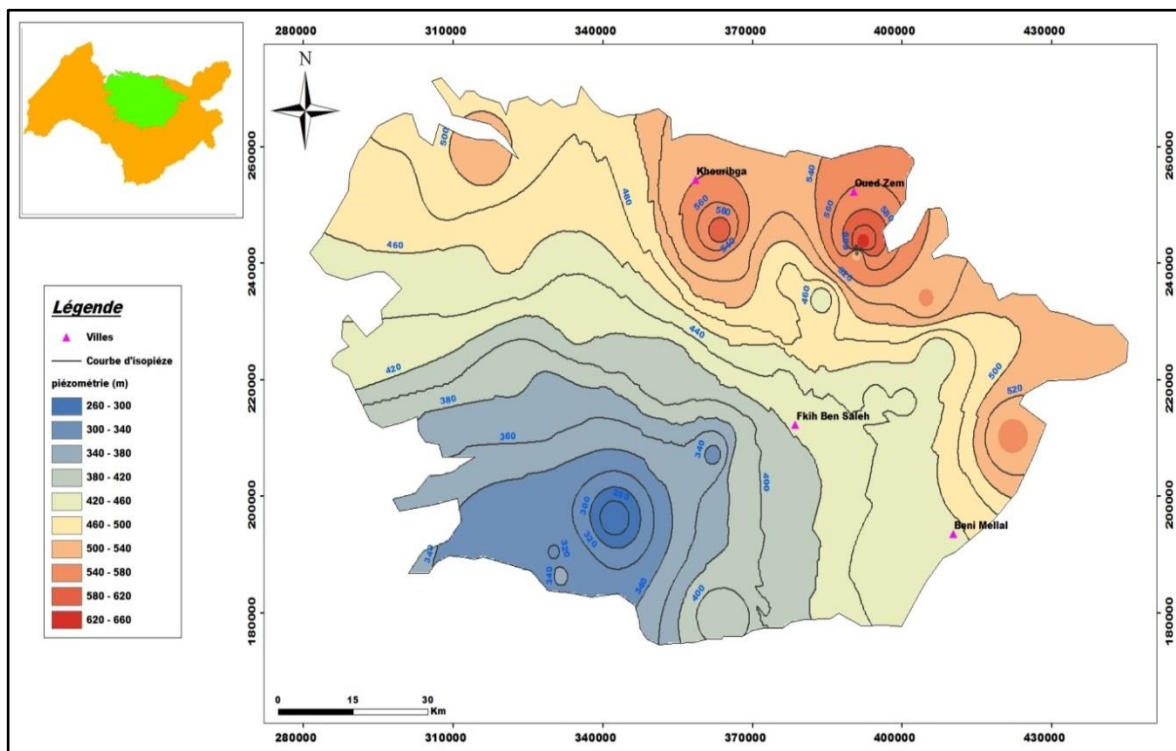


Figure 35 : Carte d'évolution de la piézométrie de la nappe du Turonien (2.2.2016)

b) Caractéristiques hydrodynamiques

Dans le bassin d'étude, les caractéristiques hydrodynamiques du Turonien sont relativement fragmentaires et peu disponibles. D'autant plus que la densité des points de mesures existants est généralement faible, ce qui rend leur interprétation relativement délicate.

-**La transmissivité** : Pour le réservoir du Turonien, il y a lieu de caractériser la distribution géologique des valeurs du paramètre « Transmissivité » selon l'état de la nappe, libre ou captive. En général, les caractéristiques hydrodynamiques du réservoir sont bonnes.

- ❖ des zones à transmissivités faibles généralement comprises entre 10^{-6} et 10^{-3} m²/s. mesurées dans la majeure partie du plateau des phosphates et dans la partie septentrionale de la plaine du Tadla où la nappe circule dans des niveaux calcaires marneux. Dans ces deux secteurs les gradients hydrauliques sont relativement forts.
- ❖ des zones de bonnes transmissivités, généralement supérieures à 10^{-3} m²/s, correspondant aux secteurs situés entre Kasba Tadla et Fkih Ben Salah et au Sud-Est d'El Borouj. Ces valeurs sont liées à la bonne perméabilité de fissure de l'aquifère turonien à ces endroits (Boukdir, 1994)

-Les coefficients d'emmagasinement

Les valeurs disponibles montrent une très grande variation de la capacité d'emmagasinement de l'aquifère. Elles sont généralement comprises entre 10^{-5} et 10^{-1} avec une moyenne de l'ordre de 10^{-3} .

L'analyse des productivités hydrauliques de la nature lithologique du degré de fracturation et de l'épaisseur saturée de l'aquifère turonien ; nous a permis de nous prononcer sur la capacité d'emmagasinement de certaines zones du bassin d'étude de la manière suivante :

- Zone 1 : dans la zone Sud de la plaine du Tadla, là où la nappe captive circule généralement dans des formations calcaires marneuses puissantes avec des productivités moyennes, le coefficient d'emmagasinement accuserait les valeurs les plus importantes ;
- Zone 2 : dans le plateau des phosphates là où la nappe libre circule dans des calcaires relativement fissurés et faiblement épais et où les productivités hydrauliques sont assez moyennes, le coefficient d'emmagasinement ou la porosité efficace montre des valeurs généralement moyennes ;
- Zone 3 : dans la zone Nord de la plaine du Tadla (axée sur Fkih Ben Salah et El Borouj) là où la nappe captive circule dans des calcaires fortement fissurés et faillés et où les productivités hydrauliques sont les plus importantes, le coefficient d'emmagasinement accuse les valeurs les plus faibles.

c) Recharge

Ce paragraphe portera sur la description des origines possibles de l'alimentation de la nappe du Turonien. On distingue plusieurs origines dont l'importance relative varie selon les régions du bassin :

- ❖ infiltration efficace des eaux de pluie à partir de la surface qui constitue un impluvium considérable ;

- ❖ infiltration des eaux de surface particulièrement à partir de l'oued Oum Er-bia, drainages verticaux à partir des aquifères sus ou sous-jacents ;
- ❖ drainages latéraux en provenance des bordures notamment atlasiques.

Le plateau des phosphates présente des conditions hydrologiques de type endoréique avec un ruissellement de surface inexistante ou ne se manifestant qu'à l'échelle locale (Hsissou, Chauve et Mania, 1996). La fracturation et la faible profondeur des formations turoniennes favorisent une infiltration puis une percolation rapide et importante des eaux de pluies. Ces conditions d'infiltration sont très favorables dans les secteurs où ces formations affleurent en surface sur de très grandes superficies principalement au niveau des régions d'Oued Zem et de Boujaad.

Dans la zone comprise entre Dcher El Oued et Kasba Tadla là où le Turonien affleure en surface. Il a été démontré que la nappe est alimentée par l'Oued Oum Er-bia (Boukdir, 1994).

Les études structurales et géoélectriques ont montré que l'aquifère turonien présente une communication hydraulique avec les aquifères sous et sus jacents par l'intermédiaire des failles drainantes.

Au niveau de la limite atlasique située au Nord-Est de la ville de Béni Mellal. La piézométrie semble montrer une alimentation de l'aquifère turonien à partir des calcaires karstiques aquifères du Lias atlasique.

d) Qualité des eaux

❖Température

Les valeurs de la température des eaux de la nappe varient entre 21 et 39°C avec une moyenne de 25.5°C, les faibles valeurs sont marquées dans le plateau des phosphates (Boujaad-Oued Zem) et à l'ouest de la Tassaout aval (anticlinaux Mzizoua et Bou Ghazi) là où l'aquifère turonien affleure en surface. Ce qui confirme la recharge de la nappe en ces endroits du bassin, Cependant, Les valeurs les plus élevées sont notées dans la région de Fkih Ben Salah et dans le Nord de Dar Ould Zidouh. (Boukdir, 1994)

❖Conductivité électrique

L'analyse des données de la conductivité électrique (CE) de l'ensemble des points d'eau captant le Turonien, montre que les valeurs de la conductivité électrique varient généralement entre 450 et 3000 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

4. Étude pédologique

Le sol est considéré comme une interface principale de la biosphère, c'est une ressource naturelle fondamentale pour le développement durable (Robert. 1996). Il forme la partie meuble de la lithosphère qui constitue une composante majeure de la biosphère continentale. Cette partie meuble forme une couche superficielle dont l'épaisseur varie de quelques centimètres à quelques mètres couvrant les substrats géologiques, elle est essentielle aussi bien pour la vie végétale que pour la vie animale. Les sols se forment de manière très lente par l'altération des matériaux géologiques sous l'action de l'air, de l'eau et de la vie (Legros, 2007). Ils sont de natures et de types très divers, distribués en fonction de la topographie des roches, des végétaux, des climats et des activités humaines (Badraoui, 2000).

D'après les études de cartographie et de caractérisation des sols qui ont été faites dans la plaine de Tadla (Loukili et al. 1999 ; Bellouti et al. 2002 ; Badraoui, 2003), les principaux types des sols qui dominent le périmètre irrigué de Tadla sont :

- Sols isohumiques
- Sols calcimagnésiques
- Sols fersiallitiques.
- Sols hydromorphes.
- Sols peu évolués.

4.1 Sols isohumiques

Les sols isohumiques sont répandus dans la majorité des plaines du Maroc, ils ont en commun certains caractères qui les séparent nettement des autres sols du Maroc. D'après Billaux et Bryssine (1970), ce sont une argilisation en profondeur (teneur en argile plus forte que celle qu'en soit l'origine) une faible rubéfaction et un profil organique isohumique. C'est-à-dire, une matière organique faible en surface (ne dépassant que 3% rarement) et augmente progressivement en profondeur. Ainsi, cette classe de sols se caractérise avec un profil calcaire qui se décalcarise en surface avec une accumulation en profondeur sous forme de nodules individuelles de par leur profondeur et leur structure équilibrée ; ils sont favorables à l'irrigation, ils représentent dans les zones irriguées près de 83% des sols répartis en trois sous-ensembles :

1. **Sols bruns subtropicaux modaux (74%)** : profonds de texture équilibrée argileuse, ils ont une réserve en eau utile de plus de 60 mm et un gradient de calcaire croissant avec la profondeur (10 à 20%).

2. **Sols bruns subtropicaux salins et/ou alcalins (7%)** : profonds à moyennement profonds calcaires dès la surface, ils reposent sur une dalle épaisse ou croûte friable. Leur réserve en eau utile est comprise entre 40 et 50 mm et sont de texture argileuse et argilo limoneuse.

3. **Sols châtaîns modaux (2%)** : sont plus argileux plus rubéfiés et ils sont totalement décalcarisés en surface. Leur structure est prismatique en profondeur, leur accumulation de calcaire par rapport à la roche-mère est importante. Ces sols sont caractérisés par une faible teneur en matière organique à la surface environ 2 à 3%.

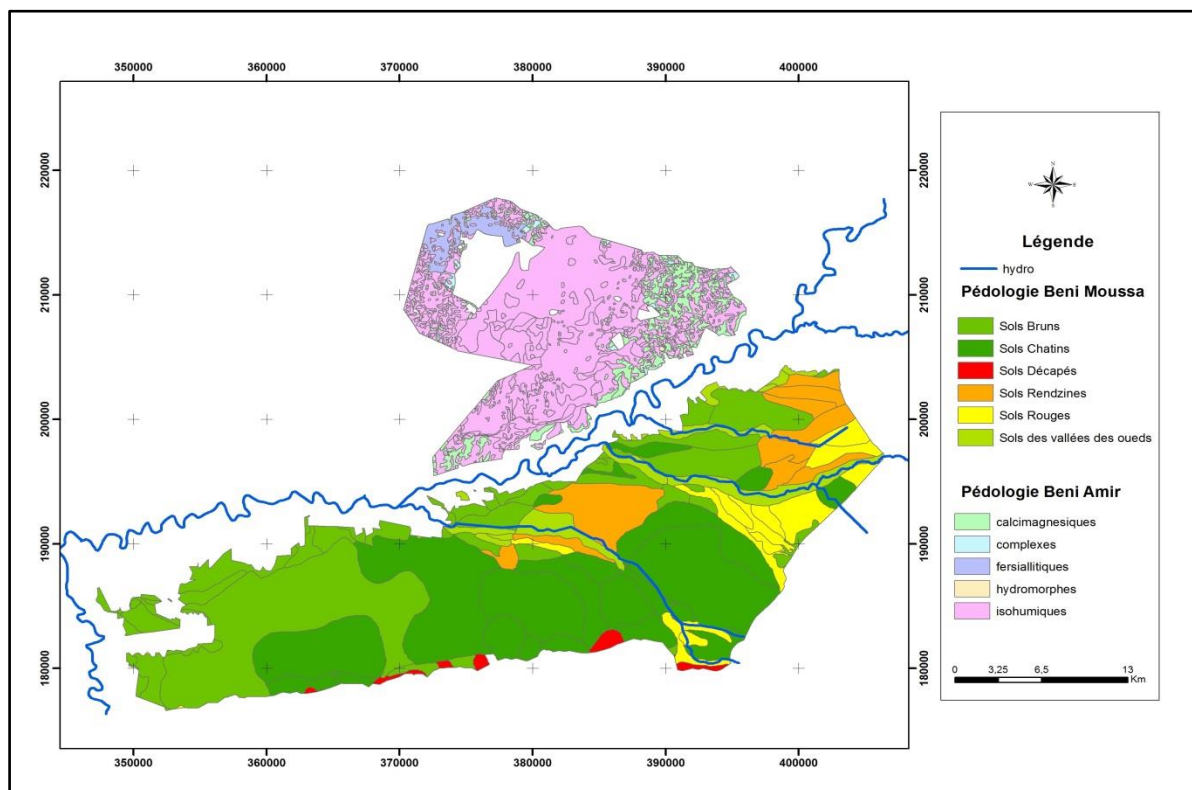


Figure 36: Carte pédologique de la plaine de Tadla (Source : ORMVAT)

4.2 Sols calcimagnésiques

Les sols calcimagnésiques sont formés généralement sur des roches calcaires à pente plus ou moins forte, ou sur des dépôts de pente recouvrant ces mêmes roches. Dans cette classe les sols sont formés sur des alluvions calcaires : suivant leur degré d'évolution ils font partie soit des sols peu évolués d'apport soit des sols isohumiques. Ces sols se caractérisent par une décalcarisation partielle relativement à la roche-mère, ce qui les différencie des sols peu évolués, et par l'absence d'accumulation et d'individualisation du calcaire, ce qui les différencie

des sols isohumiques (Billaux et Bryssine, 1970 ; Badraoui et al. 1989). Ce type représentant environ 11% des sols et localise généralement le long de l'Oued Oum Er-Rbia et Derna. On y rencontre les rendzines et les bruns calcaires.

- **Rendzines**

Il s'agit de sols très peu profonds, très calcaires, caillouteux et ayant une réserve facilement utilisable de moins de 25 mm.

- **Bruns calcaires**

Ils sont peu caillouteux reposants sur une dalle ou une croûte calcaire et ils ont une réserve en eau facilement utilisable qui ne dépasse pas les 24 mm ;

4.3 Sols fersiallitiques

Les sols fersiallitiques (sols à sesquioxydes de fer) sont très vieux par rapport aux autres types des sols. La particularité de leurs profils texturaux sont sablonneux en surface et argileux en profondeur avec une abondance en fer libre (Badraoui, 1989). Globalement dans notre région d'étude, on retrouve les sols fersiallitiques en bordure du plateau des phosphates, ils sont rougeâtres non calcaires, argileux, caillouteux, riches en oolithes phosphatés, ils représentent 1% des sols. (Massoni et al. 1970).

4.4 Sols hydromorphes

Les sols hydromorphes existent partout au Maroc lorsque les conditions locales de topographie le permettent. Toutefois, ils ne sont largement représentés que dans le Maroc atlantique où ils sont surtout localisés sur les bas plateaux littoraux de la Meseta côtière sur le pourtour de la plaine du Gharb et un peu dans la plaine de Tadla. Dans cette dernière un type particulier de sols hydromorphes sur alluvions fortement calcaire se développe dans de petites vallées mal drainées. Ces sols sont moyennement ou peu organiques. Ces sols ne couvrent que de petites surfaces (représentent 1% des sols) (Massoni et al. 1970 ; Billaux et Bryssine, 1970).

4.5 Sols peu évolués

Ces sols se caractérisent par une faible altération, ils sont les résultats de l'érosion alluvio-colluvial (Badraoui et al. 1989), ils sont formés sur les alluvions récentes originaires du Moyen Atlas ou en bordure du plateau des phosphates à relief accidenté.

Les sols sont brun-clair, très calcaires, argilo-sablonneux avec parfois quelques lits caillouteux. (Massoni et al. 1970), ils représentent 4% des sols.

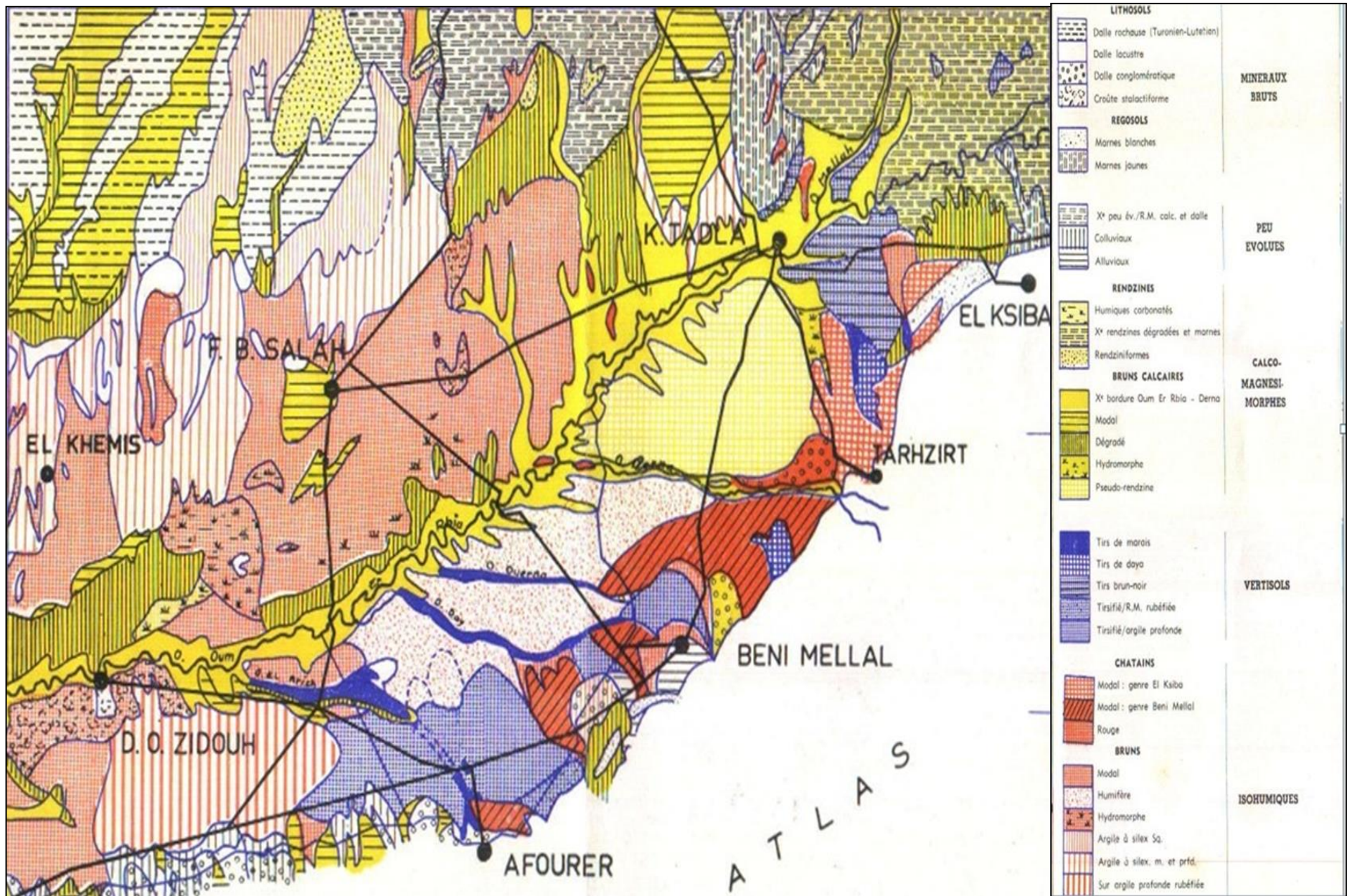


Figure 37: Répartition schématique au 1/500000 des sols de Tadla (Missante, 1963)

Conclusion

La zone d'étude est située dans la partie Nord du bassin de l'Oued Er R'Bia (figure 2). Globalement ce bassin est caractérisé par un climat de type méditerranéen semi-aride à hiver froid avec une moyenne annuelle des précipitations de 393,1 mm. La répartition moyenne mensuelle des précipitations met en évidence deux périodes, une période pluvieuse comprise entre Octobre et Avril avec Le mois de Novembre est le mois le plus pluvieux avec une moyenne maximale de 74 mm enregistré dans la station de Béni Mellal et une période sèche qui s'étale depuis Mai jusqu'au mois de Septembre avec des précipitations très faibles ne dépassant pas 8mm. Les moyennes mensuelles des températures maximales sont de 37,8 et 37,5 °C respectivement pour juillet et août. En revanche les mois les plus froids sont décembre et janvier avec des températures minimales mensuelles respectivement de 3,9 et 3,4 °C .

Hydrologiquement ce bassin est caractérisé par un réseau hydrographique relativement dense dont le cours d'eau principal est l'Oued Oum Er R'Bia, un des plus importants fleuves du royaume. Il prend naissance à partir d'une quarantaine de sources dit Oum Er R'Bia d'où le nom de l'oued Oum Er R'Bia. Ce cours d'eau traverse le bassin sur environ 160km de l'Est à l'Ouest, pour se jeter dans l'océan atlantique au niveau d'Azemmour. Les principaux affluents de ce cours d'eau sont : Oued El Abid, Oued Tassaout et Oued Lakhdar à écoulement permanent ; Oued Derna et Oued Day à écoulement temporaire.

Le bassin hydrogéologique de la zone d'étude renferme un système aquifère multicouche important. Il s'agit du haut vers le bas du complexe aquifère Mio-Plio-Quaternaire, de l'aquifère de l'Eocène, de l'aquifère sénonien, de l'aquifère du Turonien et de l'aquifère du Primaire altéré.

D'après les études de cartographie et de caractérisation des sols qui ont été faites dans la plaine de Tadla, les principaux types des sols qui dominent le périmètre irrigué de Tadla sont : Sols isohumiques, sols calcimagnésiques, sols fersiallitique et sols hydromorphes.

Partie II
ETUDE GEOPHYSIQUE

Chapitre III : Généralités sur les méthodes géophysiques

Introduction :

La géophysique appliquée étudie les phénomènes physiques relatifs à la croûte terrestre et en particulier à sa partie superficielle, afin d'en déduire sa nature et sa structure. De telles études sont généralement menées à des fins d'exploration pétrolière, Minière, hydrogéologique, etc. De nos jours, les méthodes géophysiques sont de plus en plus utilisées dans le domaine de l'environnement de la géologie de l'ingénieur et du génie civil.

La géophysique appliquée offre une panoplie de méthodes de reconnaissance du sous-sol. Chacune fournit des indications sur la nature du sous-sol par le biais de l'étude de la variation d'un paramètre physique.

Les méthodes géophysiques fournissent une information de haute résolution sur les propriétés physiques d'un milieu. Ces propriétés physiques sont souvent caractéristiques d'un hydrofaciès.

Les méthodes les plus communément utilisées en caractérisation environnementale sont la méthode électrique de surface, les méthodes électromagnétiques, Sismiques, gravimétriques et magnétiques...

Le choix d'une méthode géophysique et du programme technique doit être établi après examen du problème posé, des données géologiques et des conditions d'environnement. Ce choix conduit à retenir le ou les paramètres physiques susceptibles de présenter un contraste suffisant pour répondre aux objectifs.

Dans ce chapitre, nous allons détailler la théorie relative aux différentes méthodes géophysiques utilisées lors de ce projet. Il s'agit de la méthode de résistivité électrique, la méthode gravimétrique. Les méthodes électriques ont été largement utilisées dans ce travail. De ce fait, elles sont présentées avec plus de détails dans ce chapitre.

Principes des méthodes géophysiques :

1. Méthodes électriques

Les méthodes électriques sont largement utilisées en prospection des eaux souterraines. Elles sont basées sur l'étude de la résistivité des matériaux qui est la propriété physique qui détermine la capacité de ces derniers à laisser passer le courant électrique. Ces méthodes sont fondées sur la répartition inégale en profondeur des résistivités qui conditionnent l'allure des phénomènes électriques mesurés en surface. Parmi ces méthodes, nous avons choisi la technique des sondages électriques qui est bien adaptée au contexte des bassins sédimentaires

peu déformés dans lesquels les couches sont stratifiées sub-horizontalement et la résistivité varie verticalement.

Notion de la résistivité électrique

La résistance électrique R est définie par la loi d'Ohm en mesurant la différence de potentiel ΔV induite entre deux points d'un conducteur par la circulation d'un courant électrique d'intensité I entre ces deux points :

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

D'après la loi d'Ohm la différence de potentiel ΔV induite dans un conducteur est proportionnelle au courant électrique I qui traverse ce conducteur, La résistance R est la constante de proportionnalité entre ces deux paramètres, La résistance R est exprimée en ohm (Ω), l'intensité du courant électrique I en Ampères (A) et la différence de potentiel en ΔV en Volts (V) (Chapellier, 2005)

La résistivité électrique est définie comme étant la mesure de la difficulté qu'a un courant électrique à traverser un milieu conducteur, elle vraie d'un volume cubique d'un matériau conducteur isotrope et homogène mesuré entre deux plaques conductrices et parallèles est donnée par :

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

Où ρ est la résistivité électrique du matériau exprimée en $\Omega.m$, A est l'aire de la section transversale des plaques conductrices (m^2) et L est la distance de séparation entre les deux plaques conductrices (m).

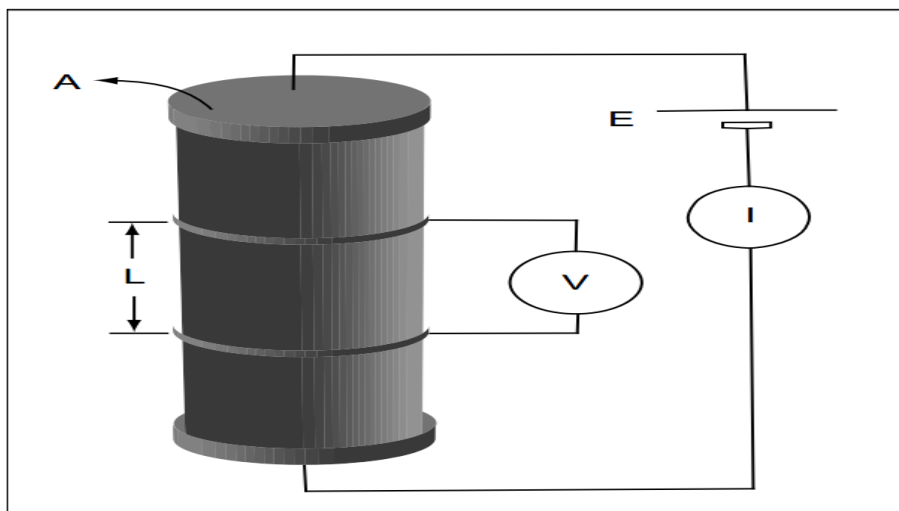


Figure 38: la résistivité électrique

La résistivité électrique est une propriété intrinsèque du matériau conducteur et elle ne dépend donc pas des dimensions des plaques conductrices et de leur distance de séparation.

La réciproque de la résistivité électrique ρ est la conductivité électrique σ et s'exprime en Siemens par mètre (S/m) :

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

De toutes les propriétés physiques des roches et des minéraux, la résistivité électrique est celle qui présente les plus grandes variations.

On a noté précédemment que la résistivité électrique d'une roche dépend essentiellement de sa teneur en eau et de la qualité de cette eau. Ces paramètres ont été pris en compte dans une loi expérimentale établie pour les milieux saturés : il s'agit de la "loi d'Archie" (Archie, 1942) qui lie la résistivité de la roche à la porosité à la résistivité de l'eau d'imbibition et au type de distribution de celui-ci.

$$\rho_r = a \cdot \rho_w \cdot \phi^{-m}$$

Avec :

ρ_r : Résistivité de la roche

ρ_w : Résistivité de l'eau de formation

ϕ : Porosité totale

a. m : Paramètres du système notamment de la texture et de la nature de la roche

Le tableau suivant illustre quelques ordres de grandeur de la résistivité électrique pour quelques formations géologiques.

Tableau 15 : Valeurs usuelles de la résistivité électrique des formations géologiques (Parasnis. 1962 ; Meyer de stadelhofen. 1991)

Formations géologiques	Résistivités électriques Moyennes (en Ohm.m)
Argile et vase	2 à 30
Marne	10 à 50
Sable et graviers sec	>303
Sables et graviers saturés en eau douce	80 à 350
Sables et graviers saturés en eau salée	0.5 à 10
Calcaires compacts	2000 à 5000
Calcaires fissurés	500 à 1500
Schistes compacts	100 à 1500
Schistes fissurés	150 à 200
Roches cristallines altérées	50 à 300
Roches cristallines saines	>1000

1.1-Le sondage électrique

Le sondage électrique consiste à établir la variation de la résistivité, en fonction de la profondeur (reconnaissance verticale) des terrains prospectés en surface à l'aide d'un dispositif quadripôle (4 électrodes) ce qui permet une investigation verticale du terrain prospecté.

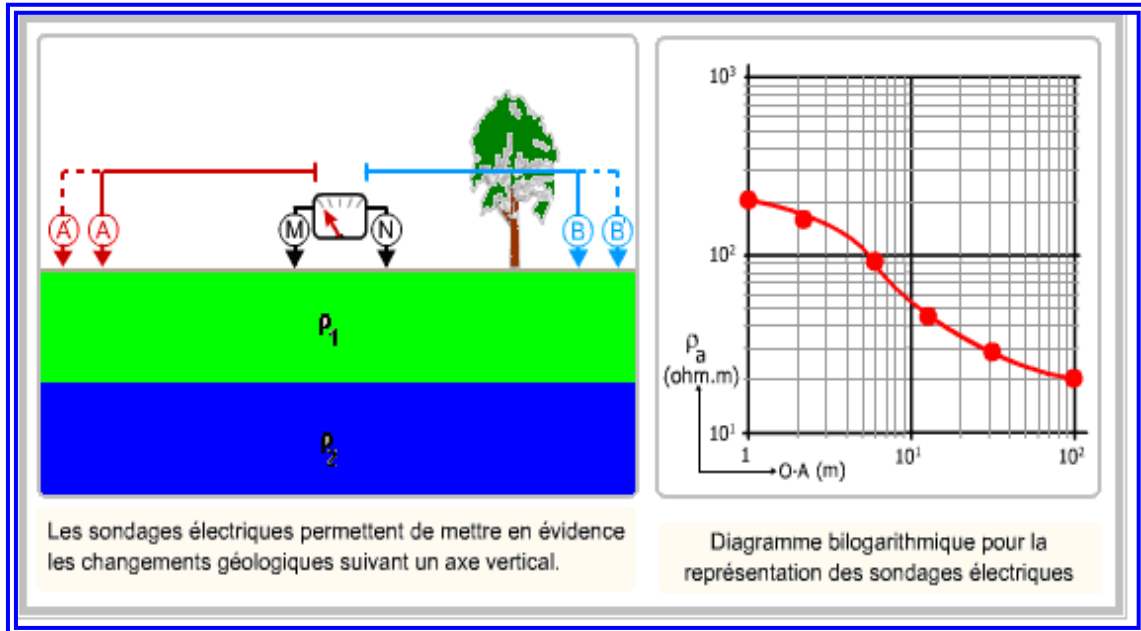


Figure 39: Technique de sondage électrique diagramme bi logarithmique

Un courant électrique continu est injecté dans le sol au moyen des électrodes externes A et B dites d'injection de courant et la différence de potentiel (d.d.p) correspondante ΔV est mesurée entre deux électrodes internes M et N dites de réception ce qui permet de déterminer la résistivité apparente ρ_a par la formule $\rho = K \frac{\Delta V}{I}$ pour différentes valeurs d'espacement AB entre les électrodes de courant.

Où K est appelé le facteur géométrique qui dépend de la configuration des électrodes.

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$

On obtient ainsi une bonne visualisation de la succession des couches lorsque le terrain est stratifié horizontalement.

Les lignes de courant pénètrent plus en profondeur dans le sous-sol au fur et à mesure que l'on augmente l'écartement (AB) des électrodes de courant, les valeurs de résistivités apparentes mesurées caractérisent des terrains de plus en plus profonds. Dans ce cas la distribution du potentiel électrique est influencée par les niveaux géologiques de plus en plus profonds.

1.1.1 Propriétés physiques des matériaux qui affectent la résistivité électrique

Un des chemins les plus importants et dans certains cas l'unique chemin du courant électrique à travers le système eau-sol est l'eau contenue dans les pores. Ainsi, plus la conductivité de l'eau des pores est forte, plus la conductivité du système n'est pas forte. La conductivité du fluide des pores dépend du type du fluide, des sels présents et de leur concentration et de la température. La mobilité des ions dans la solution augmente quand la température augmente et ainsi augmente la conductivité de la solution.

a) La porosité

La porosité d'un matériau contrôle sa résistivité électrique mais d'une façon moindre que la concentration des minéraux dissous dans l'eau interstitielle. La porosité Φ d'un matériau est définie par le rapport du volume des vides sur le volume total d'un échantillon :

$$\Phi = \frac{V_v}{V_t}$$

V_v : volume des vides ; V_t : volume total et où le volume des vides V_v correspond à la somme des volumes occupés par l'air et l'eau contenu dans les pores d'un matériau.

La résistivité électrique augmente avec la diminution de la porosité. Lorsque la porosité diminue, la taille des grains du matériau ainsi que la taille des pores diminuent et la longueur des capillaires qui relient les pores augmente. La longueur effective L du trajet parcouru par le courant électrique est ainsi augmentée et la section transversale effective A est diminuée puisque les pores sont d'une taille plus petite puisque la résistance électrique est directement proportionnelle à la longueur du trajet suivi par le courant et inversement proportionnelle à la section transversale à la circulation du courant, la diminution de la porosité augmente donc la résistance et la résistivité électrique. En effet, la résistivité électrique est directement proportionnelle à la résistance.

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

b) La teneur en eau

Le contenu en eau peut être exprimé en terme du degré de saturation en eau S_e d'un matériau qui est défini par la fraction d'eau contenue dans les pores :

$$S_e = \frac{V_e}{V_v}$$

Où V_e est le volume occupé par l'eau dans les pores d'un matériau et V_v est le volume total occupé par les pores ou le volume des vides.

La résistivité électrique est inversement proportionnelle au contenu en eau d'un matériau (b). La circulation du courant s'effectue au travers de l'électrolyte plus ou moins conducteur qui est présent dans les pores. Il ne peut pas circuler dans les particules isolantes du matériau. Par conséquent, plus le contenu en eau est élevé, plus les ions peuvent circuler facilement dans le matériau et plus la résistivité électrique du matériau est faible.

$$\rho = \frac{\rho_w a \Phi^{-m}}{S_e^n}$$

Avec : ρ_w = résistivité de l'eau d'imbibition ; Φ = porosité ; a = facteur qui dépend de la lithologie, m = facteur de cimentation, S_e degré de saturation en eau

c) La présence d'argile

Les argiles possèdent une structure composée de feuillets microscopiques dont certaines surfaces sont chargées négativement. Des cations peuvent être adsorbés sur les faces des feuillets d'argiles en étant peu liés et libres de se déplacer. Lorsque les argiles se retrouvent en présence d'eau, même en très faible quantité, les ions qui sont contenus dans l'eau peuvent être échangés avec les cations peu liés à aux argiles. Le courant électrique peut donc passer librement à la surface de l'argile et la résistivité électrique est alors très faible.

Par ailleurs, une argile complètement sèche possède une faible conductivité électrique car les échanges ioniques sont presque impossibles en absence d'eau. Tous les matériaux qui contiennent une certaine quantité d'argile possèdent une conductivité électrique plus élevée qu'en son absence.

d) La salinité du fluide interstitiel

La salinité de l'eau interstitielle du milieu poreux est importante puisque le déplacement des ions des sels en solution, des charges électriques est le médium par lequel le courant électrique se déplace dans le matériau. La conductivité électrique d'un électrolyte dépend de la quantité d'ions présents dans l'eau mais également de la viscosité de l'eau qui affecte la vitesse de déplacement des ions dans l'eau.

e) Température et viscosité

Les variations de résistivité électrique de l'électrolyte en fonction de la concentration des minéraux et de la température sont importantes. La viscosité du fluide varie en fonction de la température, une augmentation de la température diminue la viscosité de l'eau. Les ions contenus dans l'eau deviennent alors plus mobiles. Cette augmentation de la mobilité des ions

augmente leur vitesse de déplacement sous une différence de potentiel et il s'ensuit une augmentation de la conductivité électrique.

1.1.2 Dispositifs et acquisition des données

Les quadripôles (4 électrodes alignées) sont les dispositifs les plus utilisés en prospection par méthodes géoélectriques. Il existe cependant plusieurs types de dispositifs quadripôles (Wenner, Schlumberger ou double dipôles) et chaque quadripôle possède son propre pouvoir de résolution et profondeur d'investigation.

Le choix du dispositif de mesure dépend des objets géologiques étudiés et des objectifs recherchés (résolution spatiale, sensibilité au bruit...). Chaque dispositif présente en effet des avantages et des inconvénients qui lui sont propres (Reynolds. 1997). Ils peuvent être illustrés par son «diagramme de sensibilité» également appelé «section de contribution au signal» (Barker. 1979)

De plus, la représentation de la fonction de sensibilité (Fig. 45) pour chaque dispositif nous permet de voir l'effet des variations de la résistivité dans une région du sous-sol sur la mesure de la différence de potentiel. Plus la valeur de cette fonction est élevée, plus elle aura de l'influence sur la mesure du potentiel. Chaque dispositif sera donc plus approprié qu'un autre selon les caractéristiques du sous-sol en présence (structures. distribution des anomalies...)

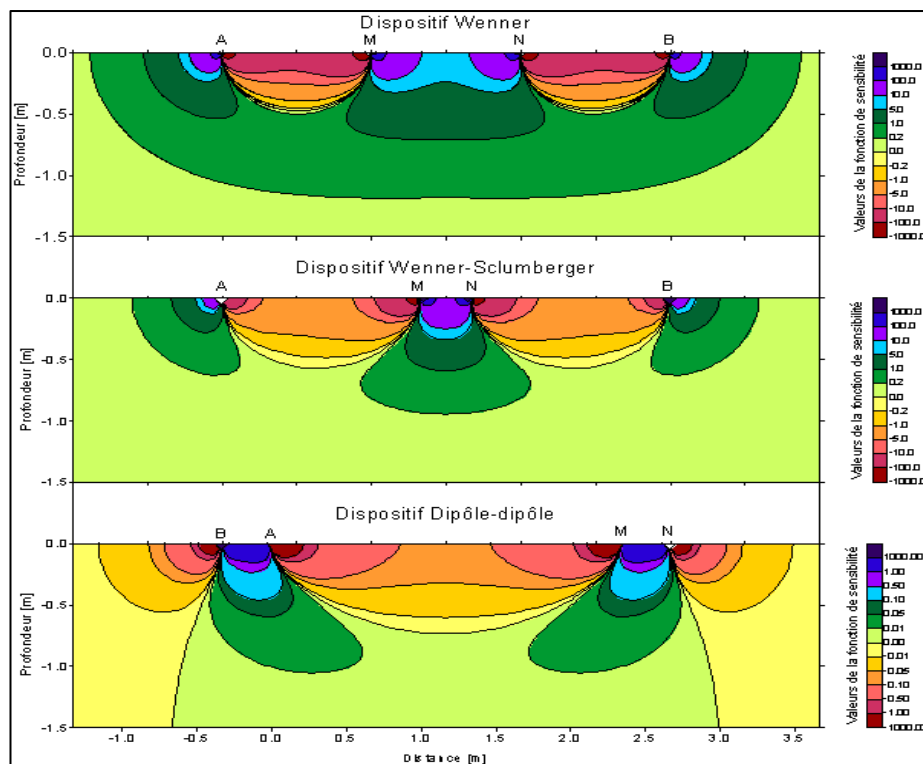


Figure 40: Diagrammes de sensibilité des principaux dispositifs 2D utilisés pour mesurer la résistivité électrique d'un sous-sol. D'après Dalhin et Zhou (2004))

a. le dispositif Schlumberger des sondages électriques verticaux

Dans ce dispositif les électrodes d'injection de courant sont beaucoup plus espacées que les électrodes de potentiel.

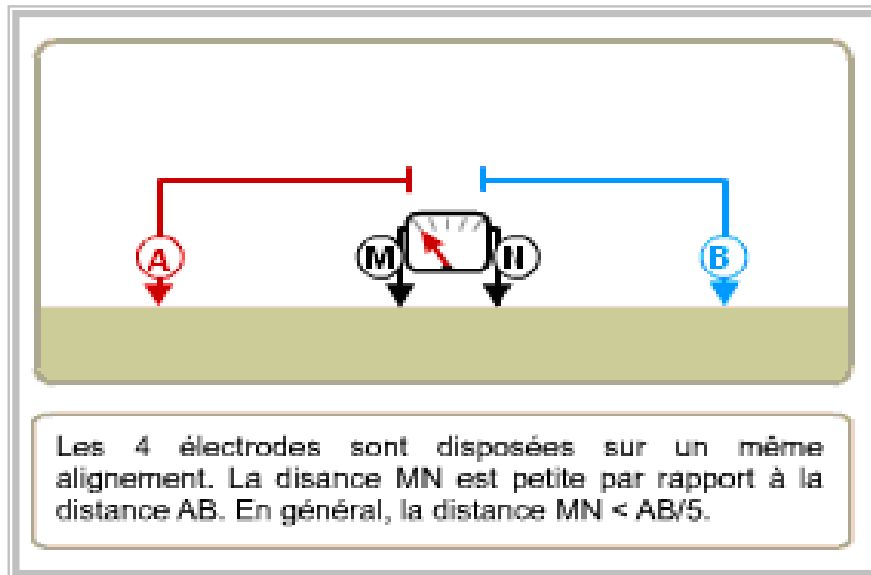


Figure 41: Dispositif de Schlumberger

Ainsi on a; $OA=OB=L$; (O c'est le centre du dispositif)

$OM=ON=l$;

$MN \ll AB$

La résistivité apparente est :

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Avec} \quad K = \frac{\pi(L^2 - l^2)}{2l}$$

Quand on étudie le terrain en fonction de la profondeur, les électrodes de potentiel restent fixes alors que l'on déplace les électrodes d'injection A et B symétriquement par rapport au centre de dispositif. Pour les grandes valeurs de AB ($AB/2=L$), il peut être nécessaire d'augmenter l'écartement MN des électrodes de potentiels ($MN/2=l$) pour que le potentiel reste mesurable.

Cette méthode est plus pratique que celle de Wenner car il n'y a que deux électrodes à déplacer. De plus, l'effet des variations de la résistivité superficielle est constant puisque les électrodes de potentiel sont fixes.

b. Dispositif Wenner :

C'est un quadripôle avec une distance identique entre les électrodes, le dipôle de mesure de tension est au centre. Ce dispositif est recommandé pour les structures horizontales. La profondeur d'investigation plus faible que celle du Dipôle-Dipôle. Le nombre de points à

l'acquisition est inférieure à celui du Dipôle-Dipôle et du Wenner-Schlumberger ; cet effet se fait surtout sentir sur les bords. (Chapellier.2005)

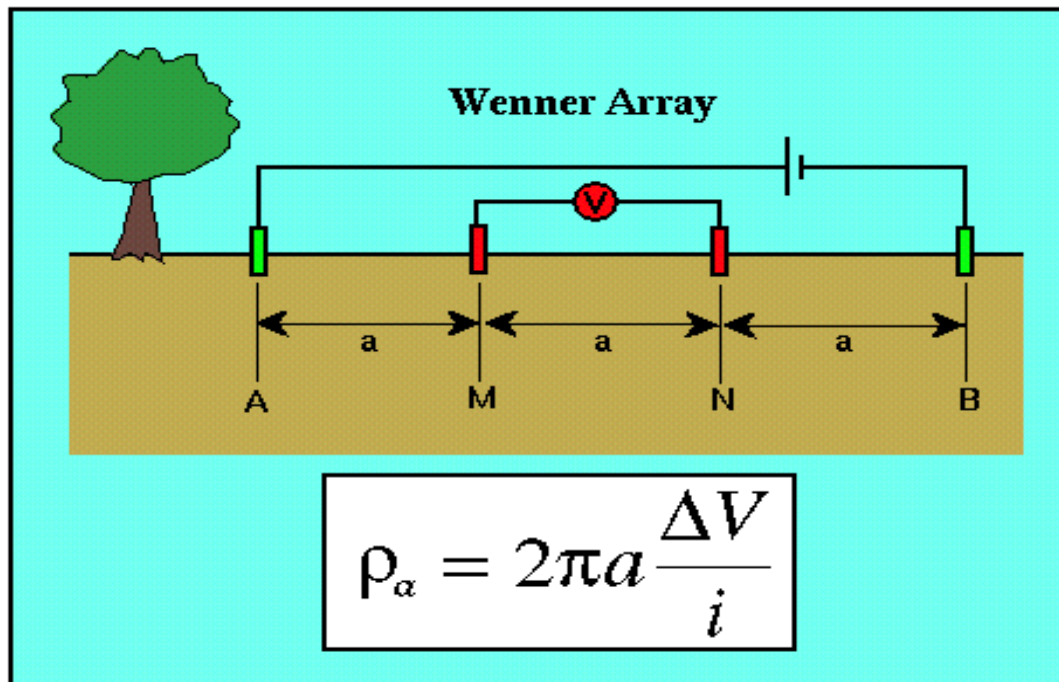


Figure 42: dispositif de Wenner

c. Le dispositif Dipôle-Dipôle :

Ce dispositif est très sensible aux variations horizontales de la résistivité et donc idéal pour détecter des structures verticales. La profondeur d'investigation dépend fortement des paramètres a et n (nommé niveau). Pour des valeurs faibles de n , la profondeur d'investigation est inférieure à un dispositif Wenner, alors que pour des grandes valeurs de n , elle devient supérieure. Mais dans tous les cas, la densité de points est nettement supérieure à celle d'un dispositif Wenner. Malheureusement, ce dispositif possède un inconvénient majeur. Les électrodes de mesure du potentiel (MN) étant situées en dehors des électrodes de courant, la force du signal est très faible. En effet, le voltage est inversement proportionnel au cube du facteur n . Pour utiliser ce dispositif ; Il faut donc de bonnes conditions d'acquisition (peu de bruit de fond) et un résistivimètre très sensible.

d. Le dispositif Pôle-Dipôle :

C'est un dispositif asymétrique pouvant créer des artéfacts, profondeur d'investigation intermédiaire entre le Dipôle-Dipôle et le Pôle-Pôle, sensible au bruit, nécessité de mettre une électrode à l'infini. (Chapellier.2005)

e. Le dispositif Pôle-Pôle :

Profondeur d'investigation la plus profonde, faible résolution, nécessité de mettre deux électrodes à l'infini, Très sensible au bruit, Surtout utile en 3D car grand nombre de points à l'acquisition.

Quel que soit le dispositif employé, il est caractérisé par une certaine profondeur d'investigation et un certain pouvoir de résolution. La figure suivante donne pour quelques dispositifs les profondeurs d'investigation et le pouvoir de résolution. On remarque que pouvoir de résolution et profondeur d'investigation varient en sens inverse. Pour le dipôle-dipôle la profondeur d'investigation dépend de l'espacement entre les deux électrodes les plus externes.

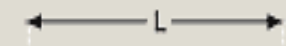



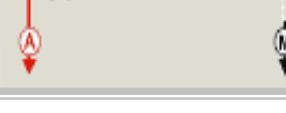
Dispositifs		Prof. d'investigation		Pouvoir de résolution
		Roy (1971)	Barker (1989)	
Wenner		0.11L	0.17L	1/2.25
Schlumberger		0.125L	0.19L	1/2.45
Dipôle-Dipôle		0.195L	0.25L	1/3.45
Pôle-Pôle		0.35L		1/8.4

Figure 43: Profondeur d'investigation et pouvoir de résolution (d'après Ray, 1971 ; Barker, 1989)

1.1.3 Interprétation des sondages électriques

L'interprétation d'un sondage électrique vertical consiste à déterminer les résistivités réelles et la puissance des différents terrains à partir d'un diagramme en coordonnées bi logarithmiques représentant les résistivités apparentes en fonction des valeurs de la demi-longueur (AB/2) du dispositif de mesure.

Cette interprétation est basée sur l'hypothèse de l'horizontalité des formations prospectées mais dans la nature ce cas n'est pas toujours valable on admet des valeurs de pendage de l'ordre de 15 à 20° (Essahlaoui, 2000).

La méthode d'algorithme d'inversion qui est la plus efficace qui permet une interprétation plus rapide. Cette méthode se fait sur un ordinateur ; La méthode des abaques plus ancienne que l'autre des abaques sont des séries de courbes de types calculées pour divers contrastes de

résistivité et d'épaisseur pour les différentes couches du sol. L'interprétation consiste à trouver la courbe qui s'ajuste le mieux à la courbe mesurée et on obtient les paramètres du sous-sol.

Chaque courbe de cet abaque correspond à la courbe d'un sondage électrique exécuté sur un sous-sol composé de deux terrains ou le premier terrain à une épaisseur et une résistivité unité.

La méthode graphique était souvent utile dans l'interprétation des résultats obtenus par les méthodes géo-électriques, elle est basée sur l'utilisation d'abaques mais avec le développement de l'outil informatique les géophysiciens utilisent des programmes informatiques performants. Dans notre cas, nous avons utilisé le programme qui s'intitule IPI2WIN. Ce dernier interprète les données en partant d'un modèle de départ proposé par l'utilisateur, il permet d'élaborer des modèles du sous-sol en rapprochant les courbes expérimentales à des courbes théoriques selon un processus itératif. On modifie à chaque fois le nombre de couches, leur épaisseur et leur résistivité afin d'obtenir un résultat compatible avec les données recueillies sur le terrain. Comme plusieurs solutions sont possibles, on impose au modèle certaines limites fondées sur les données géologiques de la région étudiée et le modèle qui donne la meilleure allure de ces deux courbes est retenu pour l'interprétation du sondage électrique. L'utilisateur a la possibilité de modifier le modèle pour mieux ajuster l'allure des deux courbes.

1.1.4 Règles d'interprétation des sondages électriques

L'interprétation des données de mesures et généralement qualitative. Il est souvent limité par les principes d'équivalence et de suppression :

- **Principe d'équivalence :**

Le principe d'équivalence concerne des couches dont la résistivité est soit inférieure soit supérieure à celle des deux terrains entre lesquels elles sont comprises. Prenons le cas d'un terrain résistant entre deux terrains plus conducteurs. Le terrain 2 se manifestera par sa résistance transverse produit de sa résistivité par son épaisseur. Tant que ce produit reste constant et dans certaines limites le sondage électrique reste inchangé.

$$R = \rho \cdot h$$

Avec : (R : Résistivité apparente, ρ : Résistivité réelle, h : L'épaisseur de la couche)

- **Principe de suppression :**

Il s'applique à des diagrammes en escalier montant ou descendant c'est-à-dire à des couches dont la résistivité est croissante ou décroissante avec la profondeur. Dans ce cas, des couches de faible épaisseur ne modifient pas l'allure des diagrammes. Cette disparition d'une couche intermédiaire conduit à des grosses erreurs d'interprétation. Ce principe énoncé succinctement dans ce paragraphe sera développé et appliqué à l'interprétation des sondages électriques.

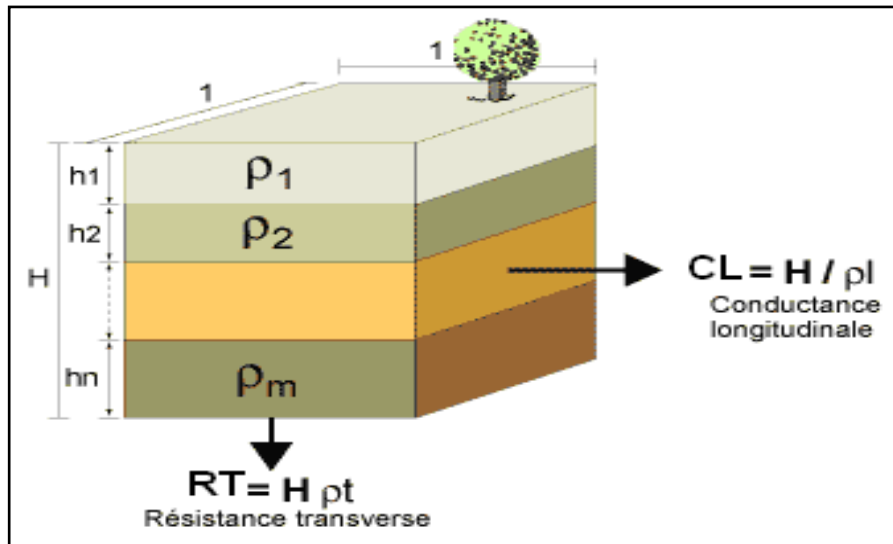


Figure 44: Conductance longitudinale et Résistance transverse

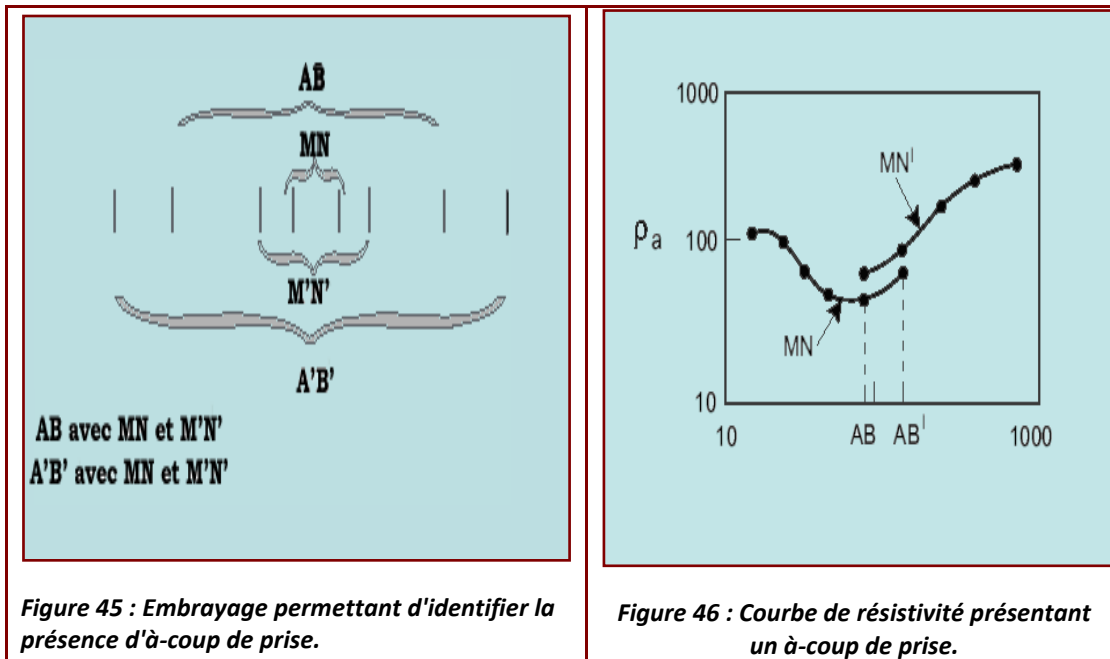
- **Le phénomène des à-coups de prise :**

Le phénomène des à-coups de prise se produit lorsqu'une électrode d'injection se trouve en contact avec une petite masse très conductrice dans le sol. Le courant est alors canalisé par ce conducteur et on observe une brusque augmentation de ρ_a . Cela a une incidence sur les profils et sur les sondages.

À mesure que l'on augmente l'écartement $AB/2$, le voltage mesuré à MN diminue jusqu'au moment où on doit augmenter la distance MN . On effectue alors un embrayage. Si en déplaçant les électrodes, on frappe un petit conducteur superficiel, il y a à-coups de prise et une discontinuité apparaît dans la courbe de sondage

- **Précaution à prendre**

Au point d'embrayage on fait 4 mesures : AB avec MN et MN' et AB' avec MN et MN' .



1.2. La tomographie électrique :

Une des limitations des sondages électriques vient du fait qu'ils ne prennent pas en compte les variations latérales de la résistivité du sous-sol. La méthode d'imagerie électrique 2D fut mise au point dans le but d'obtenir un modèle du sous-sol où la répartition de résistivité varie verticalement et horizontalement le long du profil. Dans ce cas, on suppose que la résistivité ne change pas dans la direction perpendiculaire au profil. Cette supposition est raisonnable pour beaucoup de corps géologiques allongés et dans ce cas la méthode pourra être appliquée. Il faudra alors tenter de placer les profils perpendiculairement au corps à étudier ce qui nous permettra également de déterminer les vraies dimensions de ce corps. En théorie, une étude 3D devrait être encore plus précise. Si pour un sondage, on emploie quelques dizaines de points, il en faudra entre 100 et 1000 pour un profil 2D et plusieurs milliers pour une acquisition 3D. Cette évolution bien qu'elle permette une amélioration considérable de notre connaissance du sous-sol pose différents problèmes : le temps d'acquisition important le coût du matériel toujours plus élevé et l'interprétation des données de plus en plus nombreuses. L'imagerie 2D semble donc être actuellement un bon compromis entre obtenir des données fiables tout en maintenant un coût d'acquisition et de traitement raisonnable.

La tomographie (ou imagerie) de résistivité électrique est une technique géophysique apparue à la fin des années 1980 dérivant des méthodes classiques du sondage et du traîné électrique et permettant une imagerie continue 2D ou 3D des variations de résistivité électrique du sous-sol (Dahlin, 2001). Grâce au développement récent d'outils performants

d'acquisition automatisée (Dahlin, 1993) et d'inversion mathématique (Loke et Barker, 1996a et 1996b), cette technique est devenue relativement facile à mettre en œuvre et largement utilisée pour des applications géologiques, hydrogéologiques et environnementales (Dahlin, 1996). Le but d'un panneau électrique est de relever les résistivités apparentes du sol le long d'un tracé rectiligne, pour ensuite traiter ces données par inversion et concevoir un modèle d'une coupe géoélectrique (2D) avec les valeurs de résistivités et des épaisseurs réelles. Par sa forte densité de mesure un panneau électrique permet de localiser avec précision une anomalie latérale de résistivité. Une faille verticale ou sub-verticale peut ainsi être détectée. Il permet aussi de déterminer la profondeur du substratum et de distinguer les différentes couches constituant le sol.

La profondeur d'investigation des méthodes électriques dépend ainsi de la résistivité des formations en présence, le courant passant plus facilement dans les milieux conducteurs

Les méthodes électriques sont des méthodes très utilisées en hydrogéologie. Elles se basent sur la mesure de la résistivité des formations géologiques. Selon le procédé nous distinguons entre les sondages, les traînés et le profilage électrique. Il s'agit surtout d'étudier la structure de l'aquifère par l'établissement des profils et des cartes géoélectrique]. Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une meilleure compréhension de la structure de surface et de subsurface des aquifères par l'acquisition des données les plus pertinentes.

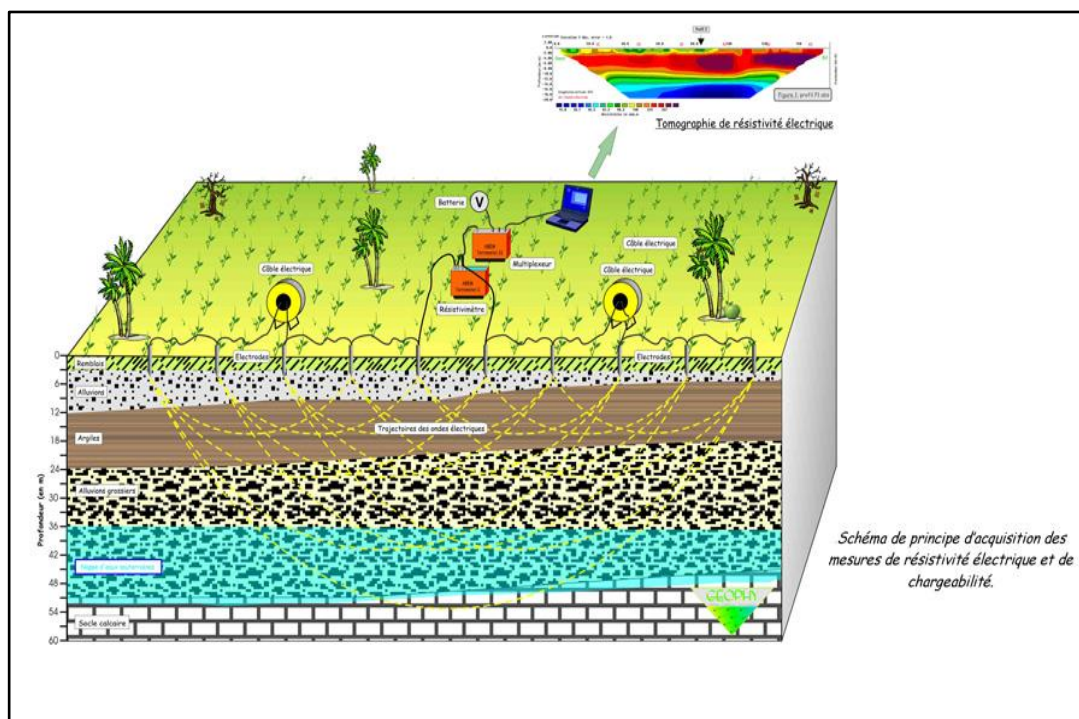


Figure 47: principe de la tomographie électrique

1.2.1 Acquisition des données

La tomographie électrique est une méthode de prospection géophysique qu'on utilise pour imager la résistivité électrique des terrains de subsurface. Elle consiste en la mise en œuvre d'un dispositif multi-électrodes permettant d'acquérir un grand nombre de mesures correspondant aux différentes combinaisons de quatre électrodes. Dans la présente étude la configuration Wenner-shlamberger a été adoptée. Le dispositif de mesures est constitué d'un résistivimètre de type Syscal Junior de la société Iris Instruments connecté à un agencement de 16 électrodes espacées de 10 m et reliées entre elles par un câble électrique 8 voies. Un courant d'intensité (I) est injecté par l'intermédiaire de deux électrodes A et B. au moyen d'une batterie de 12 Volts ou de groupe électrogène. On mesure, à l'aide d'un potentiomètre (lecture directe) ou d'un enregistreur, la différence de potentiel (d.d.p.) qui se produit entre deux autres électrodes M et N de mesures du ΔV de chaque combinaison de quatre électrodes. Chacune des électrodes du dispositif peut être utilisée comme électrode d'injection de courant (A. B) ou comme électrode de mesure (M.N). Des niveaux d'acquisitions de plus en plus profonds sont obtenus en augmentant progressivement la distance interélectrode.

L'application de la loi d'ohm permet de calculer, pour chaque longueur de ligne AB une valeur de résistivité apparente définie par la formule suivante :

$$\rho = K. \Delta V / I$$

Avec K étant un coefficient qui dépend de la géométrie du dispositif AMNB.

La durée d'acquisition sur un profil composé de 15 électrodes est d'environ une 50 minute, plus le temps d'installation du dispositif à peu près équivalent. L'acquisition terminée, les données sont ensuite transférées sur un ordinateur pour être traitées à l'aide du logiciel RES2DINV.

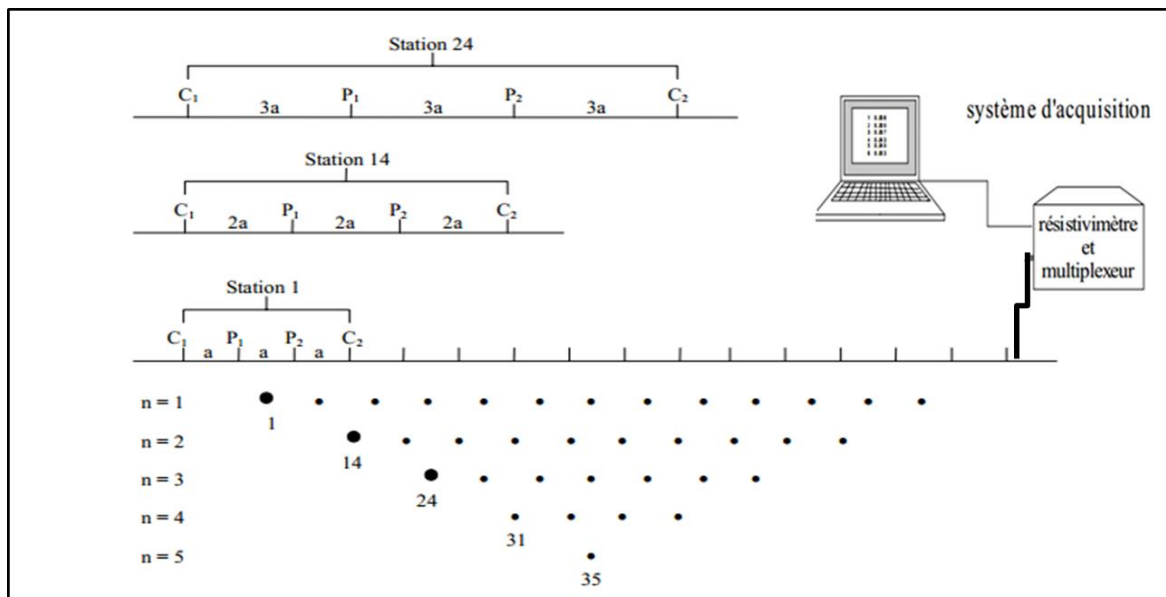


Figure 48: Principe de construction d'une pseudo-section [d'après BARKER. 1992]

1.2.2 Modélisation des mesures

Le traitement des données est effectué à partir de logiciels d'inversion pour déterminer les résistivités électriques vraies à partir de la pseudo-section obtenue sur le terrain. Nous avons utilisé le programme d'inversion RES2DINV de Loke et Barker (1996) basé sur une méthode d'optimisation par moindres carrés généralisés. La pseudo-section obtenue avec les données de terrain est divisée en un certain nombre de blocs rectangulaires dont la taille augmente avec la profondeur. Cette augmentation est généralement de 10 à 25 % selon le type d'acquisition (Wenner, Schlumberger, Pôle-Pôle ...).

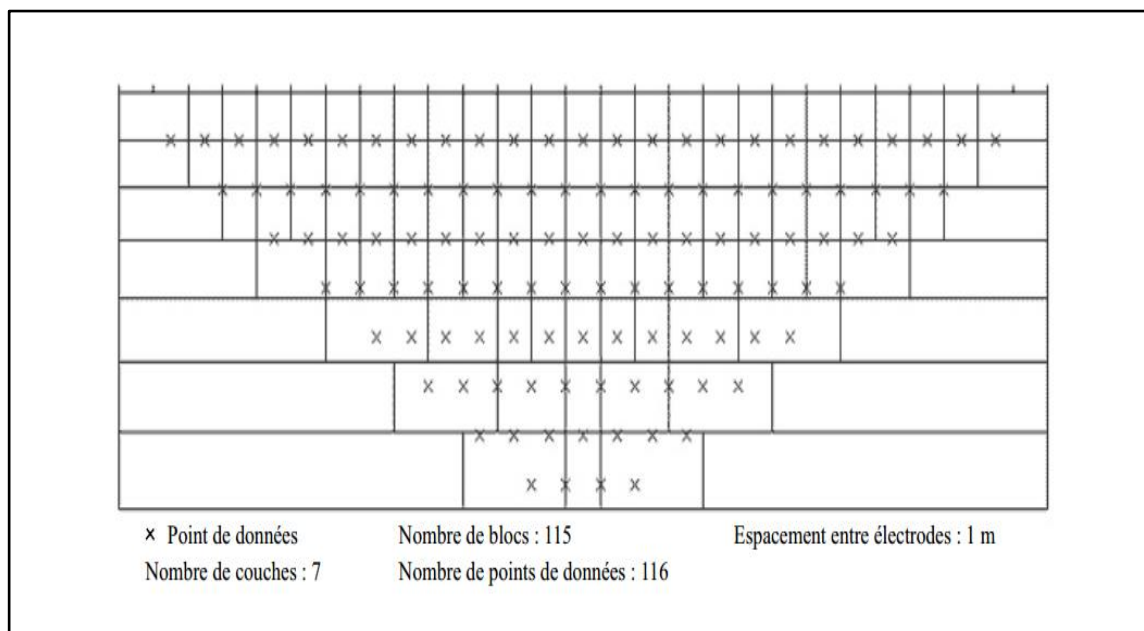


Figure 49: Représentation des blocs et des points de mesure de la résistivité électrique apparente

À chaque bloc est associée une valeur de résistivité apparente. De façon itérative, en ajustant la résistivité vraie de chaque bloc du modèle, le logiciel d'inversion tente de minimiser une fonction coût basée sur l'écart entre les valeurs calculées et mesurées de résistivité apparente. Cette minimisation peut se faire selon une norme L1 ou L2. L'erreur RMS (Root-Mean-Square) donne une estimation de cette différence. Ce paramètre est une bonne indication de la qualité d'un profil cependant ce n'est pas l'itération qui présente une valeur RMS la plus faible qui donne le modèle le plus juste. Quatre à six itérations suffisent habituellement pour converger vers le modèle de résistivité électrique vrai qui rend le mieux compte des observations de terrain. Sur un microprocesseur Pentium. L'inversion d'une pseudo-section prend quelques minutes avec RES2DINV. L'inversion reste malgré tout non-univoque. La non-unicité de la solution a été discutée par Gibert & Pessel (2001) qui présente une méthode plus élaborée de tomographie de données de résistivité électrique. Différents modèles peuvent expliquer les mesures de terrain et il est parfois difficile de savoir lequel correspond à la réalité en l'absence d'information complémentaire. La connaissance préalable du terrain est donc souhaitable pour déterminer le modèle le plus fiable.

1.2.3 Instruments de mesure

- ❖ Un système d'acquisition : qui contient les protocoles de mesure ;
- ❖ Un résistivimètre qui mesure la résistivité apparente du milieu ;
- ❖ Un central d'acquisition ;
- ❖ Une batterie de 12V (chargée) ;
- ❖ 16 électrodes en acier inoxydable ;
- ❖ 4 câbles (jaunes) pour relier les électrodes au système d'acquisition avec leurs bobines
- ❖ Deux connecteurs de câbles ;
- ❖ Un câble noir pour relier le résistivimètre à la centrale d'acquisition.

Les tensions utilisées peuvent atteindre plusieurs centaines de volts et l'intensité du courant peut atteindre 500 mA, il faut donc faire attention aux risques d'électrocution mortelle.

La méthode géo-électrique est largement utilisée dans différents secteurs à savoir l'hydrogéologie, le génie civil et la géologie de l'ingénieur pour détecter les anomalies affectant le sous-sol. Selon le dispositif utilisé et l'écartement des électrodes AB choisi, la méthode des SEV a une profondeur d'investigation très importante. Parfois, lors de l'interprétation des SEV, on rencontre des équivoques dues aux règles des principes d'équivalence et de suppression.

On s'est appuyé également sur les résultats des puits et sondages existant dans la zone d'étude, on s'assure pour chaque hypothèse faite de la compatibilité de la courbe résultante de l'hypothèse faite avec la courbe mesurée sur le terrain. Des ajustements ont été réalisés tout en restant dans les limites d'équivalence. En effet, l'interprétation a été complétée en fonction de la comparaison de chaque diagramme avec ceux des autres diagrammes de la zone. Ceci conduit à une représentation en coupes géo-électriques où l'on peut par corrélation montrer l'allure du développement de chaque couche, les variations d'épaisseur et/ou de résistivité et de mettre en évidence soit la continuité soit la présence de discontinuités qui pourraient les affecter (changement de faciès, failles...). Par la suite, les résultats obtenus par ces courbes géo-électriques sont utilisés pour établir des cartes qualitatives et quantitatives qui donnent des informations sur la structure profonde de la zone étudiée.

1.3 Gravimétrie

La prospection gravimétrique est une méthode d'investigation géophysique qui permet de résoudre plusieurs problèmes d'ordre géologique ou structural ; et ce à des échelles locales ou régionales (Blakely et Simpson. 1986). Elle est également très utilisée en combinaison avec d'autres méthodes géophysiques (prospection sismique) pour l'étude de la structure de la croûte terrestre.

1.3.1 Principe de La méthode gravimétrique :

La prospection gravimétrique s'intéresse à la cartographie de la densité du sous-sol par mesure de l'accélération gravitationnelle g . Dans la pratique, il faut absolument corriger les données brutes du terrain des variations non géologiques liées à la dérive instrumentale, à la différence de dénivelé entre les stations de mesure, de la topographie avoisinant ces dernières et de l'effet dit de Bouguer. Une fois minutieusement corrigées, les mesures de terrain reflètent fidèlement la variation de la densité du sous-sol. On peut ainsi identifier des hauts structuraux (anticlinaux), des bas structuraux (synclinaux), des cavités souterraines, des corps denses, des cuvettes dans le socle remplies de sédiments moins denses distinguer la zone altérées de la zone saine, etc.

Les causes de ces variations sont de deux types ; Certaines sont d'origine non géologiques tandis que d'autres sont liées à la géologie. C'est ce deuxième type de variations qu'on cherche à mettre en évidence en prospection gravimétrique afin d'en déduire une cartographie des contrastes (anomalies) de densité des roches constituant le sous-sol La figure ci-dessous (fig.50) illustre un exemple d'objectif que l'on peut étudier par la gravimétrie.

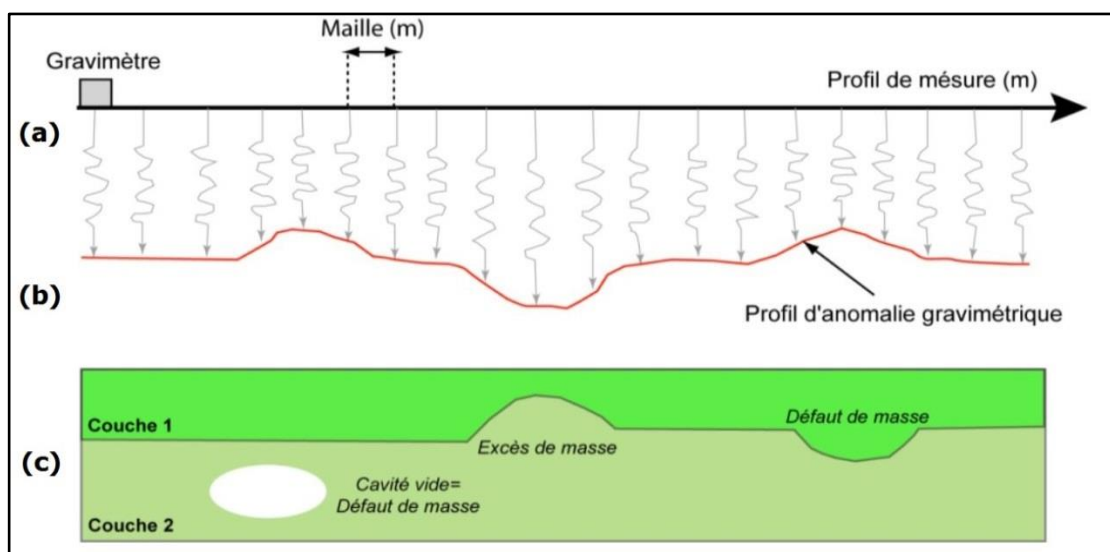


Figure 50: Exemple de modèle géologique que l'on peut étudier par un levé gravimétrique (Knödel, 2007).

a) L'hétérogénéité de densité provoquée par ce modèle engendre des variations latérales de l'attraction de gravité exercée sur la petite masse suspendue au ressort. b) Les variations de la longueur du ressort se traduisent par une anomalie gravimétrique $\Delta g(x)$. (Knödel, 2007). c) Modèle géologique montrant une structure de densité ρ_1 encaissée dans un matériel de densité plus élevée ρ_2 .

La gravimétrie ou la prospection gravimétrique est une méthode utilisée pour déterminer la répartition des divers types de roches caractérisées par leur densité à travers des mesures du champ de pesanteur. Cette méthode permet de repérer les anomalies suivant la répartition des masses (corps denses, corps légers) au sein du sous-sol, Mechler (1982), Milsom (1989), Torge (1989), Telford (1990), Kearey et Brooks (1991) et Dubois et Diament (2001) constituent des références en ce qui concerne la théorie de la gravimétrie. Cette méthode a pour but la mesure et l'étude des variations dans le temps et dans l'espace du champ de pesanteur de la Terre et des autres corps du système solaire. Ses applications sont multiples. La gravimétrie a été utilisée pour déterminer la structure ou la géométrie des réservoirs dans le cas des implications hydrogéologiques (le cas de cette étude).

1.3.2 Champ gravitationnel

La méthode gravimétrique est basée sur la mesure des perturbations produites par hétérogénéités souterraines sur le champ gravitationnel de la Terre. Il est donc une méthode de terrain naturels géophysiques ou de passif (Telford et al. 1990).

Le champ gravitationnel est un champ de potentiel, c'est à dire qu'il obéit à l'équation de Laplace. Leurs magnitudes sont fonction d'un changement d'énergie potentielle et (Parker, 1972), par conséquent les quantités dépendent de la position relative entre les corps anormal et le point de mesure.

La méthode gravimétrique est basée sur la loi de Newton à partir d'observations empiriques, dont l'expression est :

$$F_g = G \frac{M \cdot m}{r^2}$$

Où :

F_g : Force d'attraction entre deux points.

M et m : Deux masses en deux points différents(g)

R : La distance entre les deux points (cm) centimètres

G : La constante de l'attraction universelle dans le système CGS dont la valeur est 667310^{-8}

1.3.3 Calcul de l'anomalie de Bouguer

Le résultat d'une prospection gravimétrique est l'établissement d'une carte de l'anomalie de Bouguer qui donne en chaque point, la différence entre la valeur corrigée de g relative au point considéré et celle d'une station servant de référence pour l'ensemble de l'étude.

La carte de l'anomalie de Bouguer est influencée aussi bien par les anomalies de densité situées dans les terrains sédimentaires et d'extension relativement limitée que par celles affectant le socle cristallin ou cristalloyallien et couvrant de très vastes étendues (BRGM, 1997).

Les variations non géologiques de la gravité sont liées à plusieurs causes. On les élimine grâce à une série de corrections qu'on applique aux mesures brutes

Correction de la dérive instrumentale : Compense les variations temporelles des lectures, elle permet d'éliminer l'effet de la dérive résultant de la fatigue de l'ensemble des composantes du gravimètre. En général, les mesures du début et de la fin à la station de base ne sont pas semblables (Garci, 2001).

Correction de marée : L'objectif de cette correction est d'éliminer les variations temporelles dues au déplacement de la terre par rapport au soleil et à la lune qui engendrent une variation de g de forme globale périodique

Correction d'air libre ou de Faye (δg_F) : Elle consiste à corriger les mesures gravimétriques de l'effet de la différence d'élévation (ΔZ) en mètre entre la station et la surface de référence. Son objectif est donc de ramener toutes les mesures à une même altitude. Elle est obtenue à l'aide de l'expression suivante :

$$\delta g_F = 0.3086 * \Delta Z$$

Correction de Bouguer δg_B : Si ρ est la densité moyenne de la couche comprise entre la station de mesure et la surface de référence, la valeur de g devra être corrigée pour éliminer l'effet de cette couche qu'on considère comme infinie. C'est ce qu'on appelle correction de tranche plate ou simplement de plateau. La correction à apporter est :

$$\delta g_B = -0.042\rho * \Delta Z$$

Correction de latitude : Cette correction tient compte des variations de g avec la latitude dues à la rotation de la terre et à son aplatissement.

Correction topographique δg_t : Elle tient compte du déficit ou du surplus de masse autour de la station de mesure qui a un effet sur la mesure au niveau de la station.

Pour faciliter l'élimination de cet effet indésirable on subdivise la masse en prismes dont on calcule le volume et l'effet gravimétrique. Pour se faire, on se sert d'abaques et de tableaux empiriques tels que celui de Hammer. Après la correction des données brutes, les valeurs deviennent comparables entre elles et on peut alors calculer ce qu'on appelle l'Anomalie de Bouguer (g Bouguer) qui représente la différence entre la gravité observée g_{Obs} et la gravité théorique g_{th} .

$$g_{\text{Bouguer}} = g_{\text{Obs}} - g_{\text{th}} + \delta g_F - \delta g_B + \delta g_t$$

1.3.4 Traitement des données

Afin de mieux exploiter ces données et de faire ressortir davantage d'informations que ce qu'on peut tirer de l'examen de la carte résiduelle, on peut faire appel à la technique d'analyse des contacts. Celle-ci consiste à appliquer aux données gravimétriques une procédure de traitements mathématiques combinant les calculs du gradient horizontal et du prolongement vers le haut. L'intérêt de ce type de transformation des cartes gravimétriques a été évoqué depuis longtemps (Gérard et Griveau, 1972). Le succès de l'application de ces traitements a été démontré par de nombreuses études (Gérard et Griveau, 1972).

Le principe de cette technique d'analyse consiste à calculer le gradient horizontal de la carte de l'anomalie résiduelle. Ce traitement est très utile pour la localisation des contacts géologiques du fait que la limite entre deux blocs de densités différentes correspond au maxima de ce gradient (Blakely et Simpson, 1986). En effet au-dessus d'un contact vertical entre des roches de densités différentes, le champ gravimétrique se manifeste par un changement de niveau marqué par le passage des valeurs faibles au-dessus des roches de faible densité vers des valeurs plus élevées à l'aplomb des roches de forte densité. Le point d'inflexion marquant le passage entre les deux zones se situe à la verticale du contact entre les deux types de roches. Cette caractéristique des anomalies gravimétriques peut être utilisée pour localiser les changements abrupts de densité. Les maxima locaux des gradients horizontaux constituent des rides étroites au-dessus des contacts géologiques marqués par des contrastes de densité.

Par ailleurs, afin d'analyser les pendages des contacts et des structures mis en évidence, on procède au calcul du prolongement vers le haut de la carte de l'anomalie résiduelle à plusieurs altitudes. Ensuite, on calcule le gradient horizontal de chaque niveau de prolongement et on

détermine ses maxima locaux. La migration de ces maxima, lorsque l'altitude du prolongement augmente indique le sens du pendage. Pour une structure verticale, l'ensemble des maxima se superposent (Archibald et al. 1999).

Conclusion

La géophysique est une discipline des Sciences de la Terre, basée sur l'application des lois et principes de la physique pour résoudre des problèmes relatifs à la terre. La géophysique appliquée s'intéresse à l'étude des formations géologiques de subsurface, elle utilise des techniques de mesures indirectes telles la gravimétrie, la résistivité électrique, etc .

La méthode géo-électrique est largement utilisée dans différents secteurs à savoir l'hydrogéologie, le génie civil et la géologie de l'ingénieur pour détecter les anomalies affectant le sous-sol. Selon le dispositif utilisé et l'écartement des électrodes AB choisi, la méthode des SEV a une profondeur d'investigation très importante. Parfois, lors de l'interprétation des SEV, on rencontre des équivoques dues aux règles des principes d'équivalence et de suppression.

La tomographie électrique est une méthode géophysique qui permet d'obtenir des images de la résistivité électrique du sous-sol. Elle repose sur une combinaison des deux techniques électriques classiques : traîné et sondage. La tomographie électrique consiste à réaliser simultanément des profils multiples de résistivité correspondant à des espacements d'électrodes de plus en plus grands.

La gravimétrie ou la prospection gravimétrique est une méthode utilisée pour déterminer la répartition des divers types de roches caractérisées par leur densité à travers des mesures du champ de pesanteur. Cette méthode permet de repérer les anomalies suivant la répartition des masses (corps denses. corps légers) au sein du sous-sol. La gravimétrie a été utilisée pour déterminer la structure ou la géométrie des réservoirs dans le cas des implications hydrogéologiques (le cas de cette étude).

Chapitre IV : Apport des Méthodes géophysique à l'étude des ressources en eau dans la zone Nord-est de la plaine de Tadla

La prospection géoélectrique par les sondages électriques verticaux (SEV) et la méthode gravimétrique sont des méthodes géophysiques qui appliquée en hydrogéologie permettra d'avoir des informations sur la géométrie des réservoirs possibles sur leur nature lithologique et l'évolution spatiale de ses caractéristiques.

L'interprétation des résultats des données des sondages électriques verticaux réalisés dans la zone d'étude, en corrélation et calage par les sondages et forages mécaniques réalisés par l'ABHO dans le secteur d'étude, a permis de faire une synthèse sur le développement de chaque couche, de déterminer leur géométrie, leur nature, leur épaisseur ainsi que la nature et la profondeur de leur substratum et de mettre en évidence les anomalies qui pourraient les affecter.

1. Sondages électriques

1.1.Méthodologie de travail

L'enchaînement des différentes étapes programmées dans la présente étude avaient respecté certaines règles de façon à couvrir d'une manière systématique l'ensemble de la zone d'étude.

L'étude géophysique entreprise dans la zone Nord-Est de la plaine de Tadla a commencé par une reconnaissance géologique du terrain à prospector, cette phase initiale consistait à récolter toutes les informations relatives aux caractéristiques du sol et du sous-sol. En effet, l'étude géologique a permis de mieux identifier le type de roche ou de matériau, la structure des différentes formations, l'environnement sédimentologique, le mode de formation ou de genèse des différents faciès et aussi d'identifier l'état d'altération et de fracturation. Ces données géologiques obtenir permettent d'établir des corrélations avec les informations hydrologiques, lithologiques et pétrographiques et également de faciliter le choix des dispositifs de mesures les plus adaptées au contexte d'étude et de mieux implanter les profils d'acquisition des données.

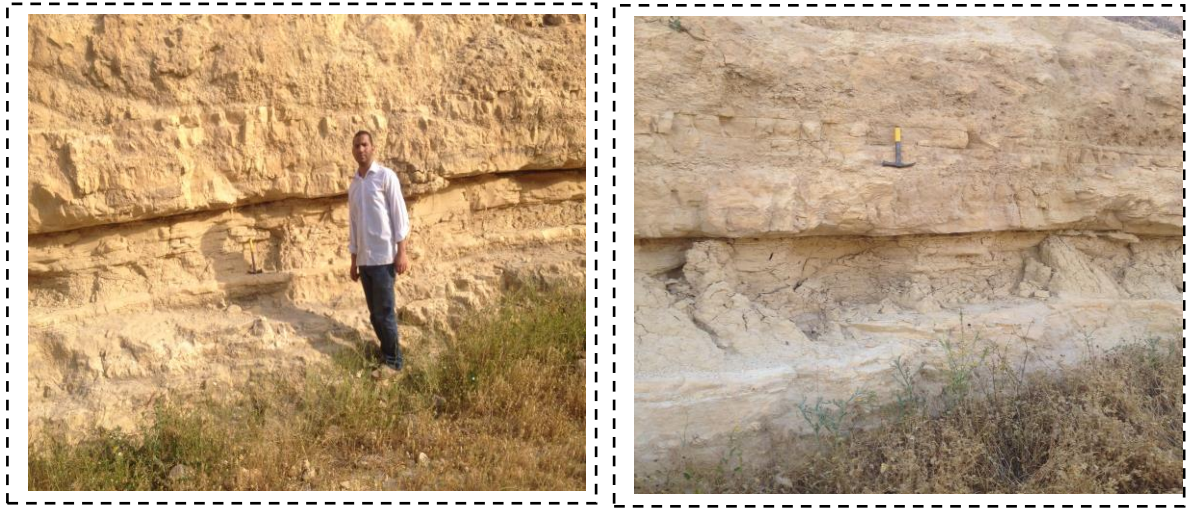


Figure 51 : Étude géologique

En parallèle avec cette phase de l'étude, il a été procédé à la récolte de toutes les données relatives à l'hydrogéologie de la zone d'étude. Ces données ont été recueillies à partir des fiches de nombreux forages implantés dans la plaine. Ces forages sont de trois types :

- Les puits hydrogéologiques qui constituent le réseau de surveillance de la nappe phréatique ;
- Les forages pétroliers ; bien que peu nombreux, ils sont profonds et fournissent des données intéressantes sur les différents horizons de la série stratigraphique ;
- Les sondages de reconnaissance réalisés par l'Office Chérifien des Phosphates (O.C.P).

1.2. Matérialisation de la grille de mesure :

Il consistait en un piquetage et une matérialisation sur le terrain des différents profils et stations de mesure. Cette opération a été suivie d'un levé topographique et un nivellement ayant pour origine des altitudes et la configuration spatiale des stations de mesures a été choisie de manière à collecter le maximum d'informations tout en tenant compte des conditions de terrain.

Le programme de reconnaissance comportait la réalisation plus de 40 sondages électriques répartis sur Sept profils différents entre eux par le nombre de sondages électriques. L'inter-profil est de 5km alors que la distance entre les centres des sondages est de 5 km. Ces sondages électriques sont alignés selon la direction N-S (fig.52).

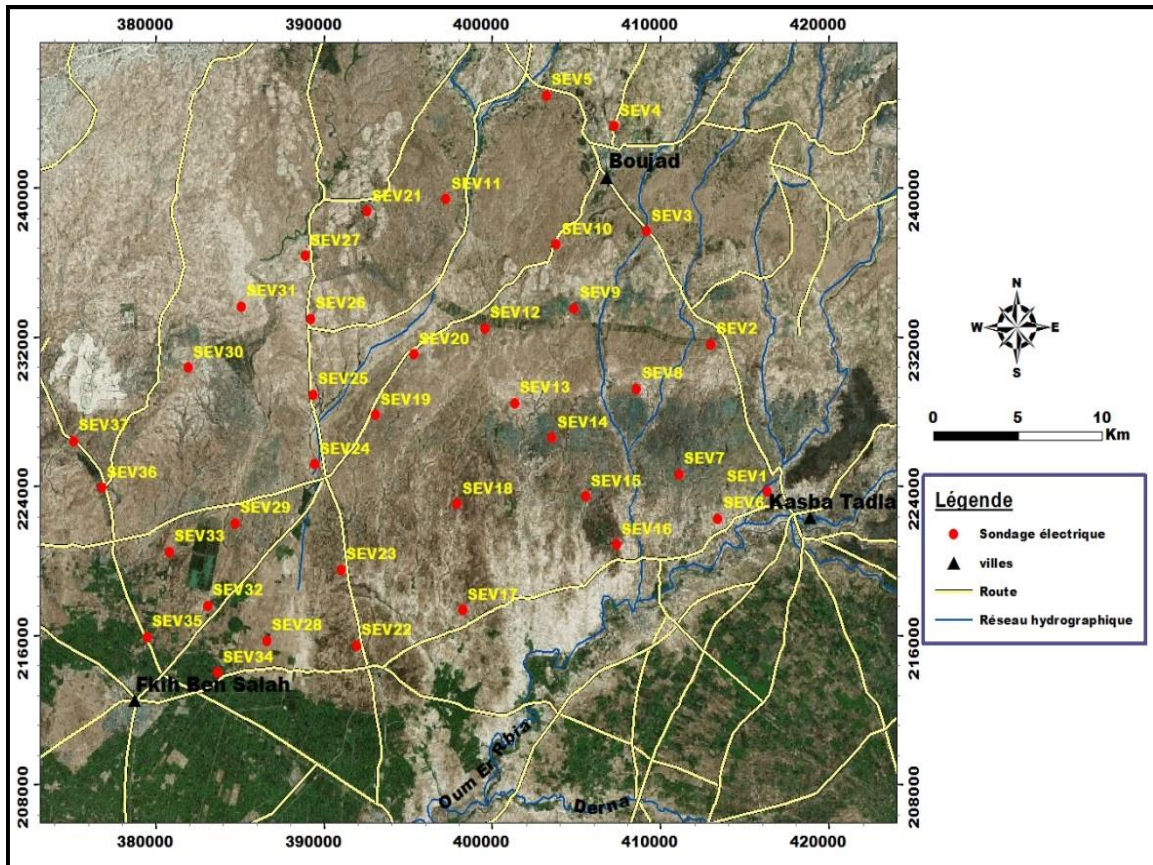


Figure 52: Emplacement des sondages électriques verticaux

Cette étude a commencé par quelques sondages électriques d'étalonnage sur des affleurements et au droit de certains forages, par la suite une trentaine de sondages électriques ont été réalisées dans des endroits présélectionnés avec le dispositif Schlumberger de longueur de ligne AB qui égale à $AB=1000\text{ m}$; $AB=1500\text{ m}$; $AB=2000\text{ m}$, ces sondages ont été répartis sur l'ensemble de la zone en fonction du contexte géologique et des conditions de terrain.

1.3. Moyens mis en œuvre

➤ Personnel ou Équipe de terrain

Une équipe de mesures a été déplacée sur les lieux pour la réalisation des 40 sondages électriques. Le personnel constituant cette équipe est composé de :

- ✚ un Ingénieur géophysicien ; chef de mission ;
- ✚ cinq doctorantes ;
- ✚ deux techniciens ;

➤ Matériel de mesure électrique

Le matériel utilisé est un résistivimètre Syscal R1 plus spécialement conçu pour la prospection des terrains superficiels et souterrains et parfaitement adaptés aux études

hydrogéologiques et structurales. Il permet tout aussi bien d'étudier les variations de résistivité en fonction de la profondeur (sondages électriques) que les variations latérales de résistivité le long d'un profil (traînés électriques). Il est conçu pour travailler avec différents types de dispositifs tels que les sondages et profils Schlumberger et Wenner, le dipôle-dipôle, le pôle-dipôle, le pôle-pôle, le gradient et la mise à la masse. Les mesures sont effectuées d'une manière entièrement automatique par l'intermédiaire d'un microprocesseur qui permet une correction automatique de la polarisation spontanée une accumulation numérique pour l'amélioration du rapport signal sur bruit et l'affichage des erreurs opératoires

Le matériel comprend les unités suivantes :

- ❖ deux voitures de terrain type Land-Rover et 4x4 ;
- ❖ GPS permettant de déterminer les coordonnées X. Y et Z de chaque station ;
- ❖ résistivimètre Syscal R1 ;
- ❖ six caisses de piles de 120V chacune pour les GRM ;
- ❖ Km de câbles pour l'envoi du courant ;
- ❖ des électrodes en acier pour AB et en cuivre pour MN ;
- ❖ deux chevalets pour le support des bobines du centre ;
- ❖ Un groupe de batteries d'accumulateurs pour alimentation ;
- ❖ des accessoires de terrain (boussoles. caisse à outils etc.) ;



Figure 53: Matériels de prospection utilisée

1.4. Traitement des données

Le traitement des données acquises a été effectué à l'aide d'un programme de modélisation IPI2Win conçue par l'université de Moscou pour interpréter des magnétotelluriques 1D de données de sondages. Ce programme permet de déterminer le nombre de couche en présence, les épaisseurs et les résistivités de chacune de ces couches, 40 courbes géo-électriques ont été établies à partir des données de la résistivité et de la longueur de la ligne AB.

À partir des données de la résistivité apparentes, on a établi quatre cartes d'iso-résistivités correspondant à quatre longueurs différentes de la ligne AB (200, 600), c'est-à-dire à des profondeurs croissantes. La juxtaposition et l'interpolation entre les différents niveaux électriques mis en évidence sur les sondages électriques et la réalisation des cartes de résistivité, cartes d'épaisseur et cartes de profondeur, nous ont permis de suivre l'évolution latérale et verticale de la résistivité apparente, de dégager des coupes géo-électriques des formations juxtaposées et de relever les caractéristiques physiques du sous-sol dans la zone Nord-Est de la plaine de Tadla.

1.5. Analyse des diagrammes des sondages électriques

L'analyse et la comparaison des résultats d'interprétation de tous les sondages électriques réalisés ont montré que les diagrammes présentent une ressemblance en termes de succession de niveaux, les différences sont constatées plutôt au niveau des valeurs des résistivités. Cette différence est expliquée par la variation latérale de faciès de tous les niveaux aquifères du Tadla en allant du Nord vers le Sud.

Selon la forme et l'allure des courbes de sondages électriques réalisés et la succession des niveaux conducteurs et résistants, on peut distinguer quatre Familles :

Famille I :

Cette famille est représentée par les courbes des sondages électriques (SEV1, SEV6, SEV7, SEV13, SEV14, SEV15, SEV16, SEV17, SEV18, SEV19, SEV22, SEV23, SEV24, SEV25, SEV28, SEV29, SEV32, SEV33, SEV34, SEV35).

Tableau 16 : caractéristiques géoélectriques du SEV 15

Sondage électrique	Coordonnées Lambert et côtes		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
	405526	223445	511
Niveau électrique	Profondeur(m)		Age
Résistant (RMPQ)	0-36m		Mio-Plio-Quaternaire
Conducteur (CMPQ)			
Résistant (RMPQ)			
Conducteur (CMPQ)			
Résistant (C _M -R _E)	36-67		Eocène Maestrichtien
Conducteur (C _S)	67-187		Sénonien
Résistant (R _T)	>187		Turonien

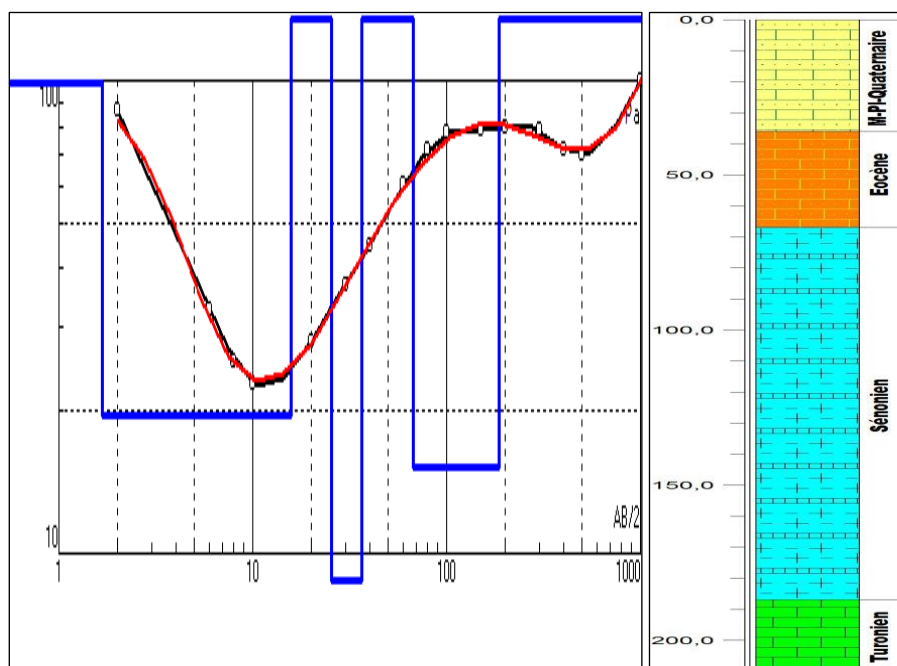


Figure 54 : Sondage électrique type I

Les données recueillies au niveau de ces sondages électriques ont permis d'aboutir à des courbes de sondages identiques. Leur interprétation a conduit pratiquement à un modèle de terrain constitué de haut en bas par les entités suivantes :

- Un recouvrement hétérogène de résistivité variable allant de 5 Ohm.m à plus de 250 Ω.m, ce terrain correspond vraisemblablement au remplissage Mio-Plio-Quaternaire. Il

englobe toute ou partie du substratum argileux imperméable. Les résistivités très basses rencontrées en certaines stations (moins de 5 Ohm.m) sont significatives de passées argileuses très peu perméables ou d'une salinité élevée des eaux interstitielles. Les résistivités plus élevées sont aux contraires caractéristiques de niveaux de calcaires lacustres incorporés dans la masse alluvionnaire.

- Une formation résistante (120 à 280 Ω .m) d'épaisseur et de profondeur variables. Ce terrain correspond vraisemblablement aux calcaires de la série phosphatée.
- Un niveau conducteur de grande épaisseur et de résistivité comprise entre 10 et 20 Ω .m. Il s'agit des marnes grises et dolomies du Sénonien marin et argiles sableux à anhydrite du Sénonien évaporitique.
- Une formation très résistante profonde a été attribuée au Turonien qui constitue le réservoir le plus important dans la région. Cette formation correspond le calcaire dolomitique, sa résistivité dépasse 500 Ω .m.

Famille II :

Pour cette famille, la courbe du sondage représentant l'évolution de la résistivité apparente en fonction de la demi-longueur AB/2 du dispositif de mesure présente une forme en « fond de bateau » qui se traduit d'abord par une diminution des valeurs de la résistivité apparente suivie d'une augmentation légère de celle-ci. Cette forme du diagramme de sondage électrique est typiquement celle d'un modèle du sous-sol à trois couches correspondant à la superposition de deux terrains résistants séparés par un troisième relativement conducteur.

Cette famille est représentée par les courbes des sondages électriques SEV 36 et SEV37

Tableau 17 : caractéristiques géoélectriques du SEV 37

Sondage électrique	Coordonnées Lambert et côtes		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
	375165	226422	521
Niveau électrique	Profondeur(m)		Age
Résistant (C_M-R_E)	0-27		Eocène Maestrichtien
Conducteur (C_S)	27-85		Sénonien
Résistant (R_T)	>85		Turonien

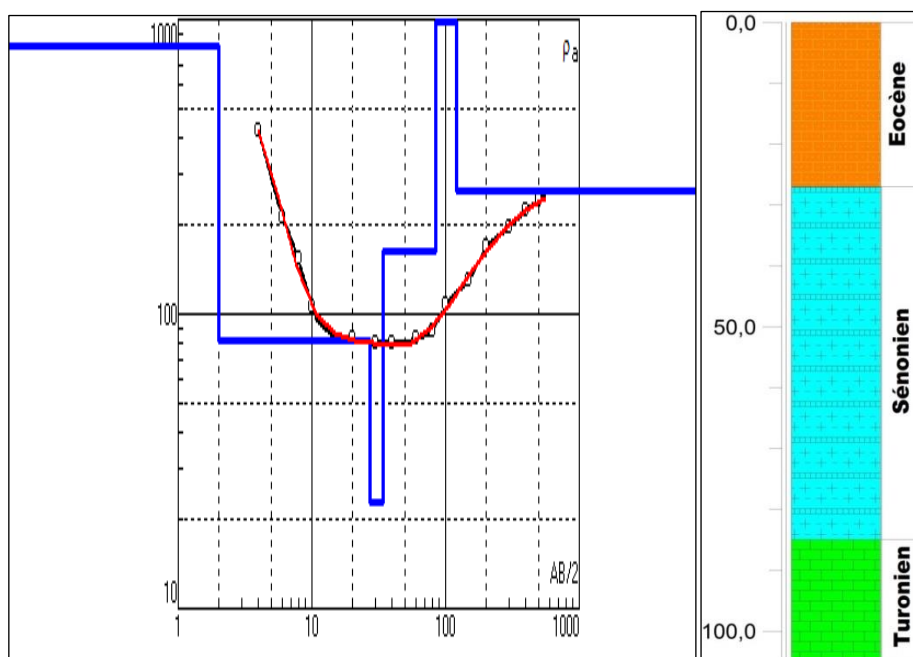


Figure 55 : Sondage électrique 37(Famille 2)

L'interprétation de ce type de couche montre une structure de Trois couches de terrain électriquement distinct :

- ❖ Une formation résistante (170 à 400 $\Omega.m$) d'épaisseur faible. Ce terrain correspond vraisemblablement aux calcaires de la série phosphatée.
- ❖ Un niveau conducteur de grande épaisseur et de 28 $\Omega.m$. Il s'agit des marnes grises et dolomies du Sénonien marin et argiles et argiles sableux à anhydrite du Sénonien évaporitique
- ❖ Une formation très résistante profonde. Cette formation correspond le calcaire dolomitique, sa résistivité dépasse 1000 $\Omega.m$

Famille III :

Cette famille est représentée par les courbes des sondages électriques (SEV2, SEV8, SEV12, SEV20, 30).

Tableau 18 : caractéristiques géoélectriques du SEV 8

Sondage électrique	Coordonnées Lambert et côtes		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
	408503	229332	556
Niveau électrique	Profondeur(m)		Age
Conducteur (C _s)	0-85		Sénonien
Résistant (R _T)	>85		Turonien

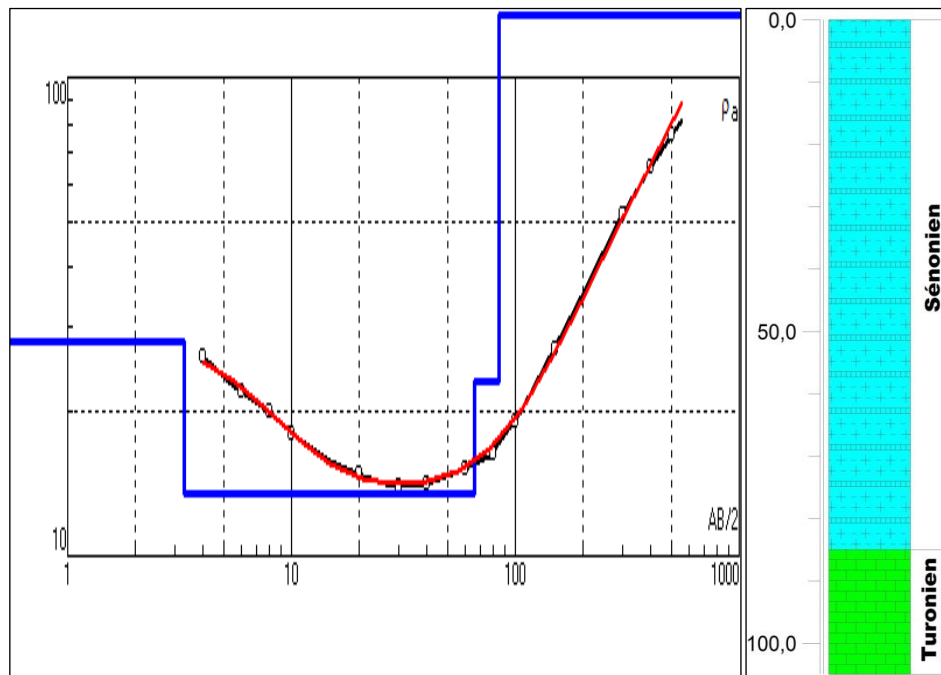


Figure 56 : Sondage électrique 8(Famille 3)

Les données recueillies au niveau de ces sondages électriques ont permis d'aboutir à des courbes de sondages dont l'interprétation a conduit pratiquement à un modèle de terrain constitué de haut en bas par les entités suivantes :

- Un terrain très conducteur de résistivité intrinsèque qui peut atteindre 30 Ohm.m et d'épaisseur variable. Ce terrain correspond les terrains marno-gréseux et argiles et des argiles sableux de sénonien.
- Un niveau résistant selon la géologie locale, il correspond niveau important de calcaire massif du Turonien. La résistivité apparente (vraie) dépasse parfois 1300 Ohm.m.

Famille IV :

Cette famille est représentée par les courbes des sondages électriques (SEV3, SEV4, SEV5, SEV10, SEV11, SEV21, SEV26, SEV27, SEV31).

Tableau 19 : caractéristiques géoélectriques du SEV 27

Sondage électrique	Coordonnées Lambert et côtes		
	X (km)	Y (km)	Z (m)
	389122	236410	566
Niveau électrique	Profondeur(m)		Age
Résistant (R _r)	0-71		Turonien
Conducteur (C _i)	>71		infra-cénomanién

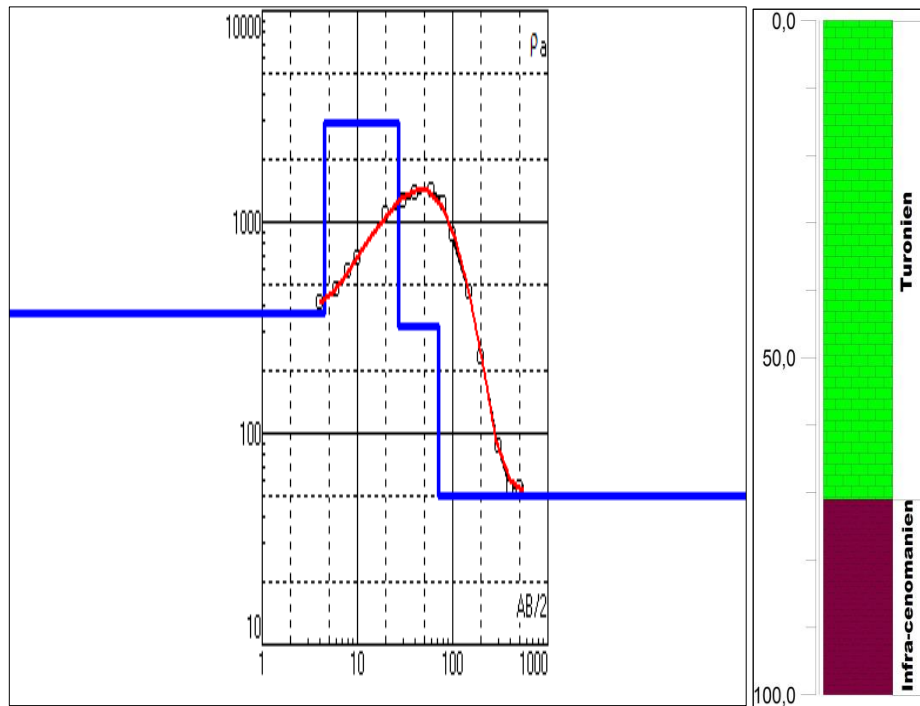


Figure 57 : Sondage électrique 27(Famille 4)

L'interprétation de ce type de couche montre une structure de Trois couches de terrain électriquement distinct :

- Un terrain très résistant R_t superficiel de résistivité intrinsèque qui peut dépasser 3000 Ohm.m et d'épaisseur variable. Ce terrain correspond niveau important de calcaire massif du Turonien.
- Un terrain conducteur de résistivité électrique qui peut atteindre 50 Ohm.m et d'épaisseur variable. Ce terrain correspond les terrains marno-gypseux de infra-cénomanién.

1.6. Interprétation qualitative des SEV

La méthode des cartes des résistivités a eu de très nombreuses applications et elle continue à être largement utilisée. Ces principaux avantages résident dans la rapidité de sa mise en œuvre et dans la simplicité de l'interprétation qualitative des résultats. Les valeurs de résistivité apparente obtenues par les sondages électriques verticaux peuvent être représentées sous forme de cartes d'isoresistivité, caractérisant une couche à une profondeur constante proportionnelle à l'écartement $AB/2$. Elles rendent compte de la variation de la résistivité dans le sens horizontal (Harmouzi, 2010)

Les cartes de résistivité apparente sont interpolées par Krigeage ordinaire sous Arc gis, pour les écartements $AB = 200$ m, 600 m, 1000 m.

-Carte de résistivité pour AB= 200 m.

La carte de résistivité apparente de AB=200 m correspond à une pseudo-profondeur d'environ 34 m, elle montre très larges variations des valeurs mesurées entre la partie nord et la partie sud du bassin (3 et 1600 $\Omega.m$),

L'analyse de la carte d'iso-résistivité montre un élargissement de la masse conductrice (3 et 80 $\Omega.m$) qui occupe le centre et la totalité de la partie sud de la zone d'étude. L'examen de la comparaison avec les données géologiques disponibles, montre que ces faciès correspondent Le complexe hétérogène du Mio-Plio-quaternaire représenté essentiellement par des argiles, des marnes, et des marno-calcaires, et marnes grises et dolomies du Sénonien (SEV 2, SEV 8 et SEV 12).

Vers le NW et au Centre de la carte, on note la présence des terrains résistants dont la résistivité dépasse 90 $\Omega.m$. Ces faciès correspondent d'après les données géologiques disponibles aux matériaux de la série phosphatée (Maestrichtien-Eocène).

Des zones très résistantes avec des résistivités supérieures à 400 $\Omega.m$, couvrant la majorité Nord de la zone d'étude et dont le maximum est de l'ordre 1600 $\Omega.m$, au Nord-Est surtout au Nord de Boujad. En corrélation avec les forages mécaniques et les cartes géologiques, ces zones pouvant être corrélées aux calcaires de Turonien.

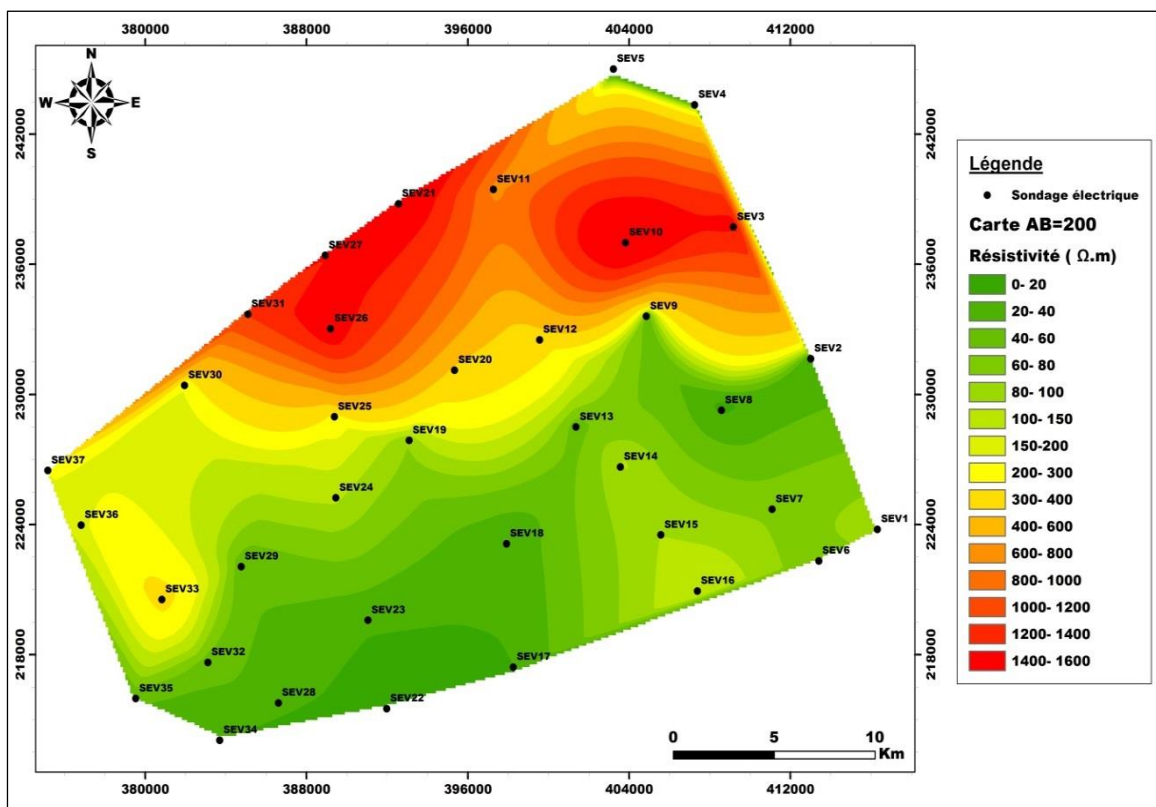


Figure 58: Carte de la répartition spatiale de la résistivité apparente pour une ligne AB= 200m.

-Carte de résistivité pour AB= 600 m.

Lorsqu'on augmente la ligne d'injection de courant AB les effets des terrains sub-affluent deviennent négligeables. L'examen de la carte des résistivités apparentes obtenue montre une croissance de la résistivité du Sud vers le Nord du secteur d'étude (3 et 1300 $\Omega.m$),

D'après l'interprétation de la carte d'iso-résistivité pour la longueur AB=600 m, on note la présence d'une large masse conductrice (<70 $\Omega.m$). La comparaison avec les données géologiques disponibles, montre que ces faciès correspondent toujours au complexe hétérogène du Mio-Plio-quaternaire indiqué essentiellement par des argiles, des marnes, et des marno-calcaires, et aussi par des marnes grises et dolomies du Sénonien (SEV 2, SEV 8). D'autre part, on note la présence d'une anomalie résistante au niveau du sondage électrique 14, cette augmentation indique la remonté de la série phosphatée.

Vers le NW et au Centre de la carte, on note la présence de terrains résistants dont la résistivité dépasse 120 $\Omega.m$. Ces faciès correspondent d'après les données géologiques disponibles aux matériaux de la série phosphatée (Maestrichtien-Eocène). D'autre part, on note la présence d'une anomalie résistante au niveau du sondage électrique 33, cette augmentation indique le début des calcaires de turonien.

Des zones très résistantes avec des résistivités supérieures à 400 $\Omega.m$, couvrant la majorité Nord de la zone d'étude et dont le maximum est de l'ordre 1300 $\Omega.m$, au Nord-Est surtout au Nord de Boujad. En corrélation avec les forages mécaniques et les cartes géologiques disponibles, ces zones corrélées aux calcaires de Turonien.

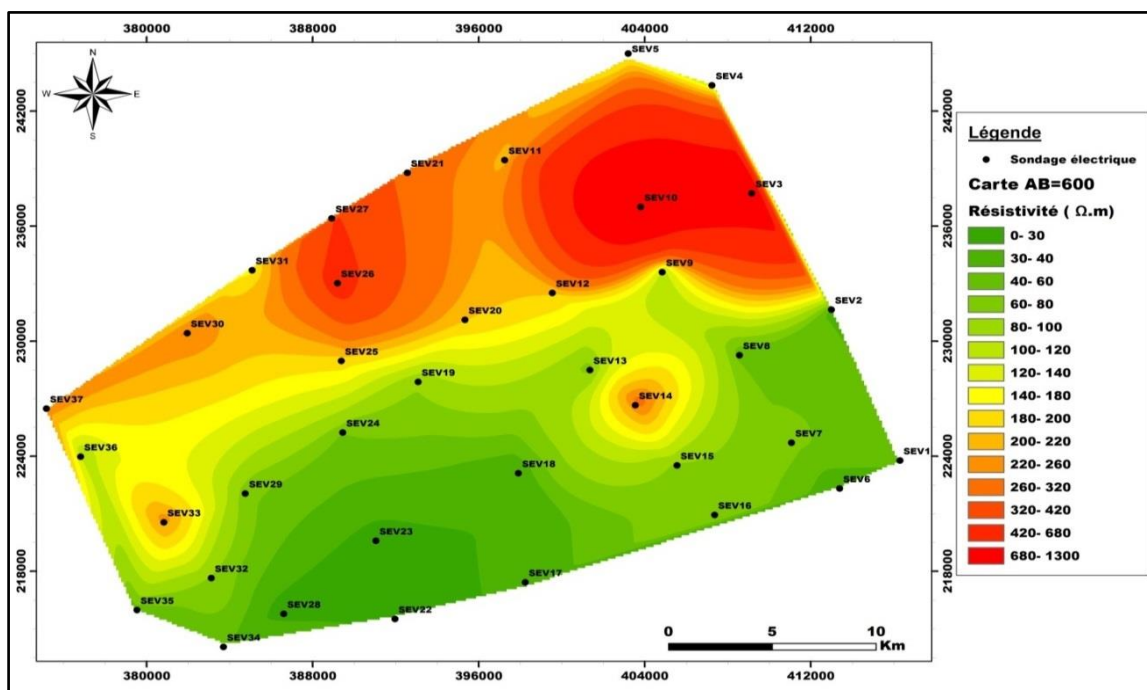


Figure 59: Carte de la répartition spatiale de la résistivité apparente pour une ligne AB= 600m

-Carte de résistivité pour AB= 1000 m.

La carte de résistivité apparente de AB=1000 m correspond à une pseudo-profondeur d'environ 160 m, elle montre très larges variations des valeurs mesurées entre la partie nord et la partie sud du bassin (20 et 1400 $\Omega.m$),

L'analyse de la carte d'iso-résistivité montre un élargissement de la masse conductrice (20 et 90 $\Omega.m$) qui occupe la totalité de la partie sud de la zone d'étude. L'examen de la comparaison avec les données géologiques disponibles, montre que ces faciès correspondent au complexe hétérogène du Mio-Plio-quaternaire représenté essentiellement par des argiles, des marnes, et des marno-calcaires.

Au Nord de la zone d'étude, on note la dominance des terrains très résistants ($\rho > 400$ $\Omega.m$), Ces faciès correspondent d'après les données géologiques disponibles aux calcaires du Turonien.

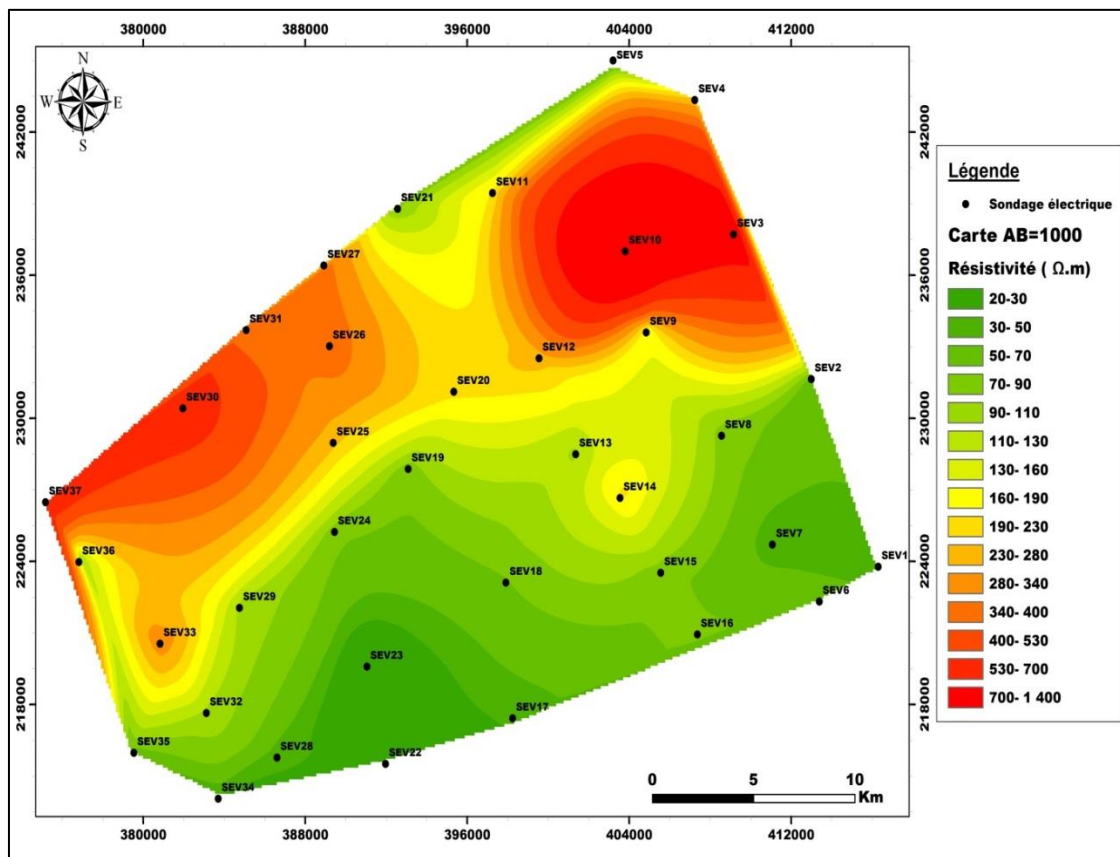


Figure 60: Carte de la répartition spatiale de la résistivité apparente pour une ligne AB/2= 1000m

1.7. Interprétation quantitative des résultats des SEV

À partir de la description des forages mécaniques et des résultats quantitatifs des sondages électriques, il a été possible de dresser des cartes des isopaques et des isohypses des

toits de ces niveaux. L'exploitation des résultats ainsi obtenus nous a permis de dévoiler un ensemble des points liés à la structure du bassin dans les zones prospectées.

-Carte des isohypses du toit du substratum de la formation Eocène-Maestrichtien :

La cartes des isohypses du toit du résistant d'âge Éocène donne la structure de la zone Septentrional de la plaine de Tadla. Elle définit le comportement des terrains résistants qui représentent l'aquifère profond de cette zone, c'est la nappe parfois captive ou/et semi-captive et parfois libre.

Cette carte des isohypses fait ressortir le plongement du résistant généralement vers le Sud-Ouest de la zone d'étude. L'analyse de la carte des isohypses conduire également à subdiviser la région d'étude en trois zones bien distinctes séparées par des discontinuités électriques :

-Les zones les plus déprimées se situent au sud- ouest de la zone d'étude à proximité de la ville de Fkih ben Salah, où le toit du niveau résistant atteint une cote de 180 m (sondage électrique 28), ainsi la série phosphaté est déprimée dans la région de kasbat Tadla où Le résistant d'âge Éocène est situé à des profondeurs plus élevés à l'échelle de la zone étudiée et peut dépasser 100 m (sondage électrique 16).

- les zones les Moins déprimées se situent au centre et la partie Nord-Ouest de la zone d'étude (région Tlete Aoulad Azouz) où les valeurs des isohypses sont plus élevées (dépassent 400m).

- les régions de Ain kaicher et Boujad où la profondeur de la formation résistante d'âge Éocène est faible voire nulle.

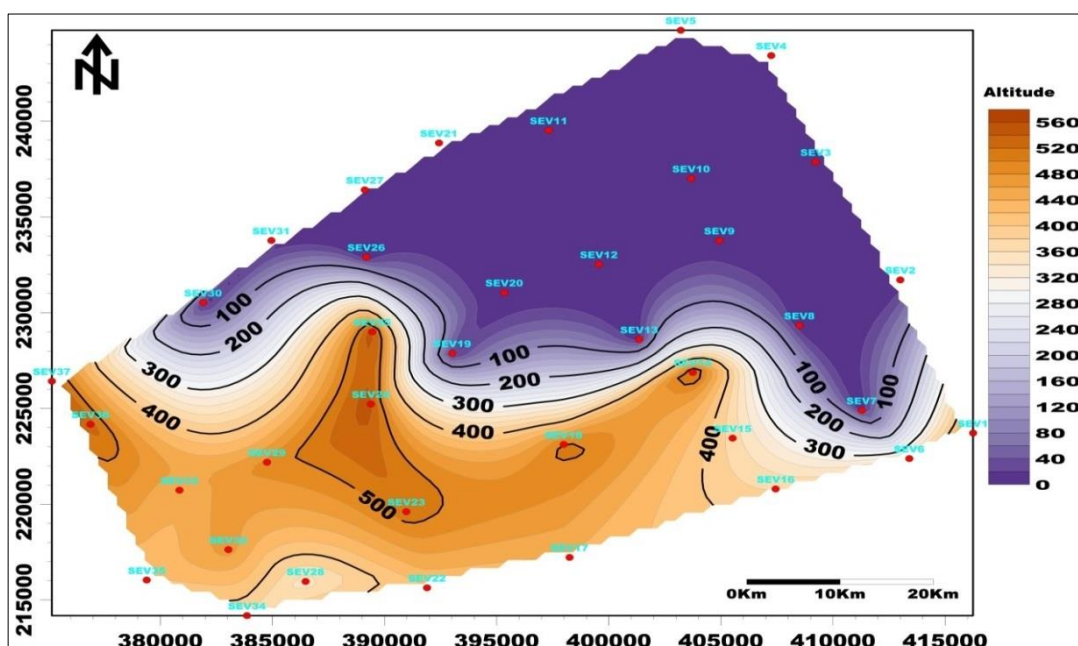


Figure 61: Carte des isohypses du toit de la formation Éocène

-Carte des isohypses du toit du substratum de la formation sénonien

L'analyse de cette carte permet de se faire une idée sur l'allure du toit de la formation du Sénonien, ce toit dessine une vaste dépression vers le sud et plus précisément vers la zone sud-ouest de la zone d'étude (la région de Fkih ben Salah où les valeurs des isohypses sont faibles). L'analyse de la carte des isohypses conduits également à subdiviser la région d'étude en trois zones bien distinctes séparées par des discontinuités électriques :

-Les zones les plus déprimées se situent au sud et sud- ouest de la zone d'étude, où le toit du niveau conducteur atteint une cote de 240 m (SE 28-SE 17),

-les zones les moins déprimées se situent au centre et la partie Nord-Ouest de la zone d'étude (région Tlete Oulad Azouz) où les valeurs des isohypses sont plus élevées (dépassent 500m).

- les régions de Ain kaicher et Boujad, la profondeur de la formation conductrice marno-gréseuse de sénonien est faible ou nulle.

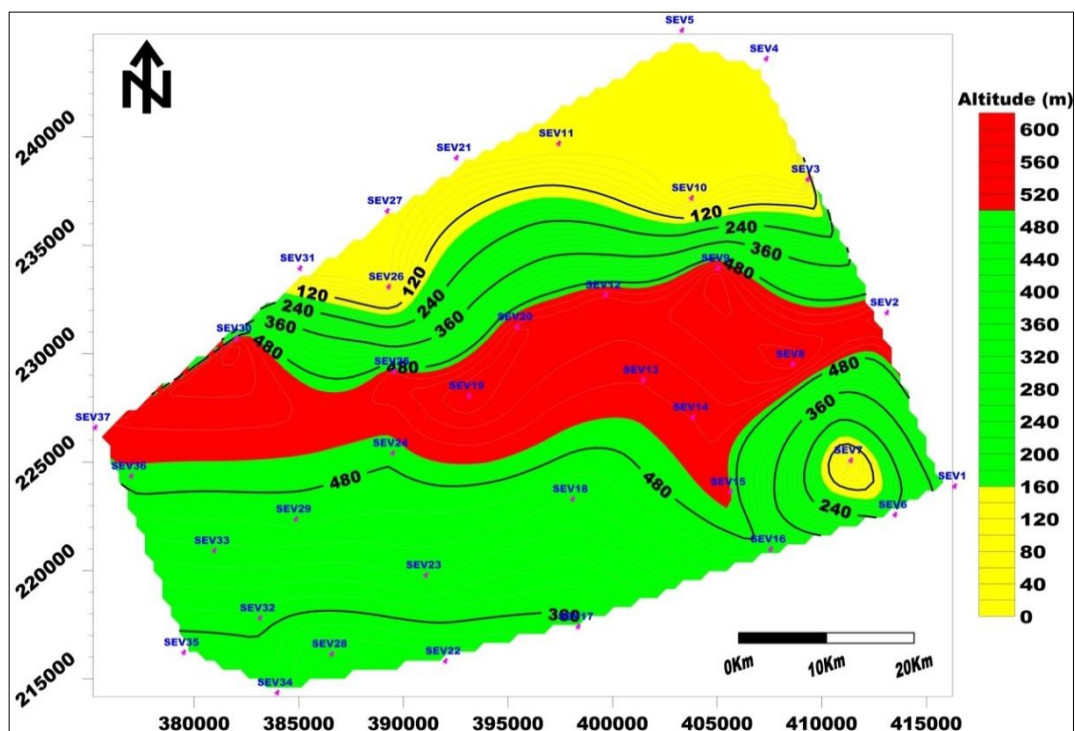


Figure 62: Carte des isohypses du toit de la formation Sénonien

Carte des isohypses du toit du substratum de la formation Turonien

La carte des isohypses de Turonien représente l'altitude de l'horizon calcaire dolomitique obtenue à partir de l'interprétation des sondages électriques réalisés dans le domaine étudié. Cette carte permet d'éliminer les effets de la topographie.

L'analyse profonde de la carte montre que les formations calcaires dolomitiques d'âge turonien sont généralisés dans la région étudiée telle que :

-Les profondeurs les plus élevées, correspondant aux isohypses les plus faibles, sont localisées dans la zone Sud et la zone sud-ouest.

-Les profondeurs les plus faibles, correspondant aux isohypses les plus élevées sont observées dans la partie Nord et plus particulièrement la zone Nord-Est (vers la région de Boujad).

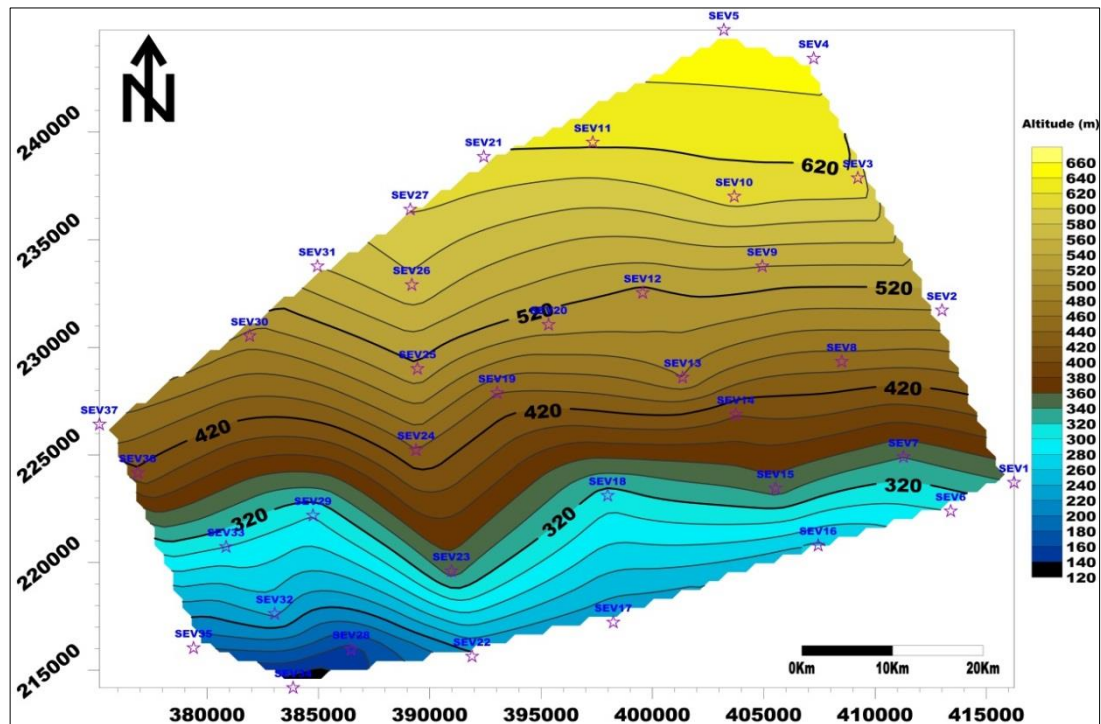


Figure 63: Carte des isohypses du toit de la formation Turonien

-Carte des isopaques de l'aquifère Moi- Plio-Quaternaire

La corrélation des logs stratigraphique des forages mécaniques et l'analyse des résistivités des niveaux électriques affleurant et sub-affleurant, ont permis de déterminer l'épaisseur de l'aquifère superficiel d'âge Plio-Quaternaire (Fig. 64).

L'analyse de la carte des isopaques des formations superficielles d'âge Plio-Quaternaire, montre une augmentation graduelle d'épaisseur en allant de Nord-Est vers le Sud-Ouest de la zone d'étude, avec des valeurs maximales de l'ordre de 180 m observées généralement au Sud-Ouest précisément au niveau du sondage électrique 28 (sud-est Fkih Ben Salah) . Cependant, les valeurs minimales sont observées au centre et Nord-ouest de la zone d'étude avec une épaisseur de 8 à 30 m, et vers la région de Kasbat Tadla où l'épaisseur du Plio-Quaternaire varie de 40 à 80 m avec parfois des valeurs supérieures à 80 m.

Vers le Nord et Nord-est (la région d'Ain-kaicher et Boujad) l'épaisseur des formations superficielles d'âge Plio-Quaternaire est nulle.

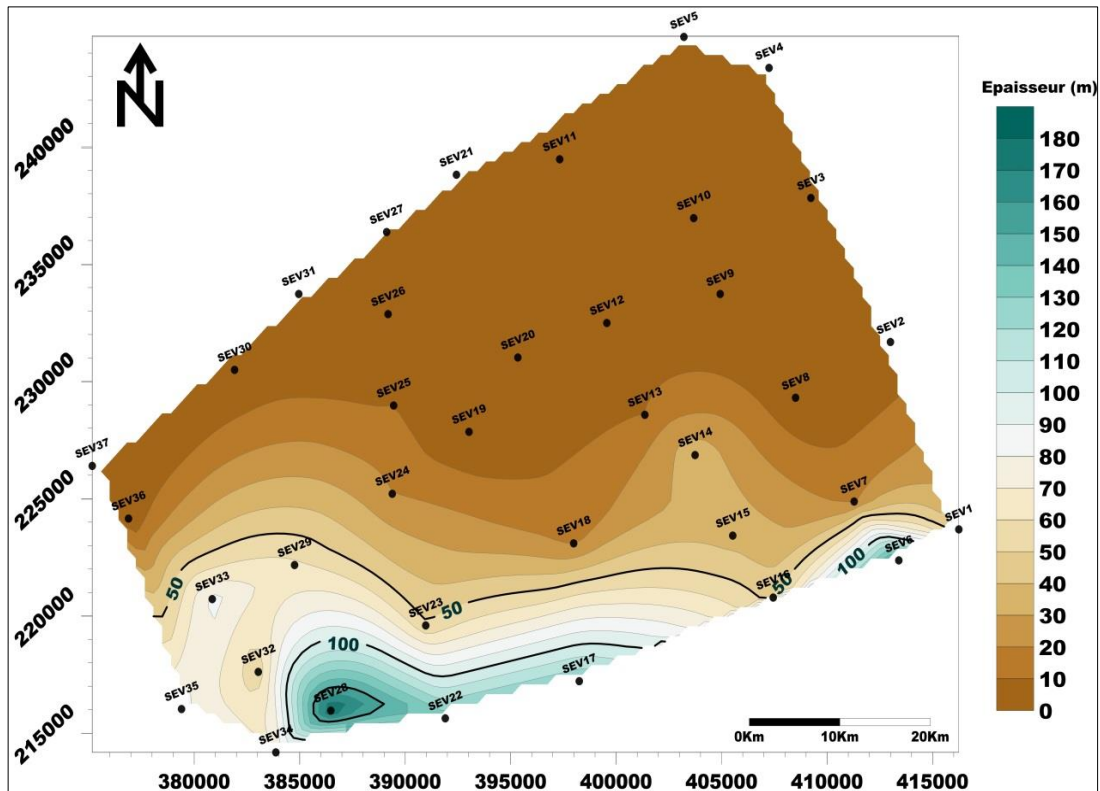


Figure 64: Carte des isopaques de l'aquifère Mio- Plio-Quaternaire

-Carte des isopaques de la formation de l'Éocène

Les valeurs des isopaques représentés sur cette carte correspondent à la différence entre la profondeur du mur de l'aquifère du Plio-Quaternaire et celle du toit de l'aquifère de l'éocène. L'analyse des niveaux résistants issus de l'interprétation des sondages électriques et les corrélations entre les logs des forages mécaniques nous ont conduits à déterminer en chaque position de sondage électrique, l'épaisseur des terrains résistance d'âge éocène qui peuvent correspondre vraisemblablement aux calcaires de la série phosphatée.

L'analyse de la carte des isopaques des formations résistance (Fig.65), montre un épaissement graduel de la série phosphatée du NE vers le SW dans la région, avec des épaisseurs maximales observées au Sud -Est de la ville de Fkih ben Salah où l'épaisseur de la série phosphatée peut dépasser 120 m d'épaisseur (SE22-23 et SE17).

Au NW de la zone d'étude dans la région Tlete Oulad Azouz, on remarque un épaissement Moyen de la couche résistance où l'épaisseur de la série phosphatée peut dépasser 50m. Par contre dans le reste de la partie Nord et Nord-est de la zone d'étude l'épaisseur de la couche résistance devient faible ou nulle surtout au niveau de la région d'Ain-kaicher et Boujad.

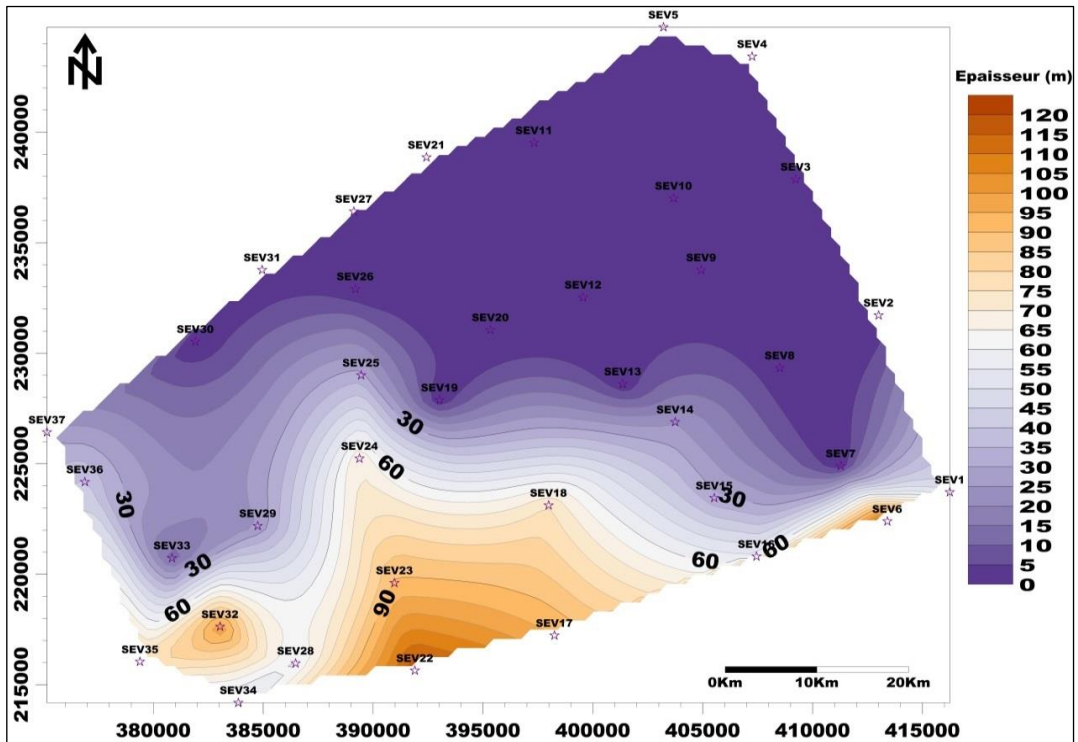


Figure 65: Carte des isopaques de la formation résistante de l'éocène

-Carte des isopaques de la formation conductrice de sénonien

Les valeurs des isopaques représentées sur cette carte correspondent à la différence entre la profondeur du mur de la formation résistante de l'éocène et celle du toit de la formation conductrice de sénonien. L'analyse des niveaux conducteurs issus de l'interprétation des sondages électriques et les corrélations entre les logs des forages mécaniques nous ont conduit à déterminer en chaque position de sondage électrique, l'épaisseur des terrains conducteurs d'âge sénonien qui peuvent correspondre vraisemblablement aux terrains marno-gréseux et argiles et des argiles sableux.

L'analyse de la carte des isopaques des formations conductrices (Fig.66), montre un épaissement graduel de la série phosphatée du NE vers le SW dans la région, avec des épaisseurs maximales observées au Sud-est de la ville de Fkih ben Salah où l'épaisseur de la formation conductrice peut dépasser 150 m d'épaisseur (SE28 et SE17).

Au centre de la zone d'étude dans la région étudiée, on remarque un épaissement moyen de la couche résistante où l'épaisseur peut dépasser 80m. Par contre dans le reste de la partie Nord et Nord-est de la zone d'étude l'épaisseur de la couche résistante devient faible ou nulle surtout au niveau de la région de Ain kaicher et Boujad.

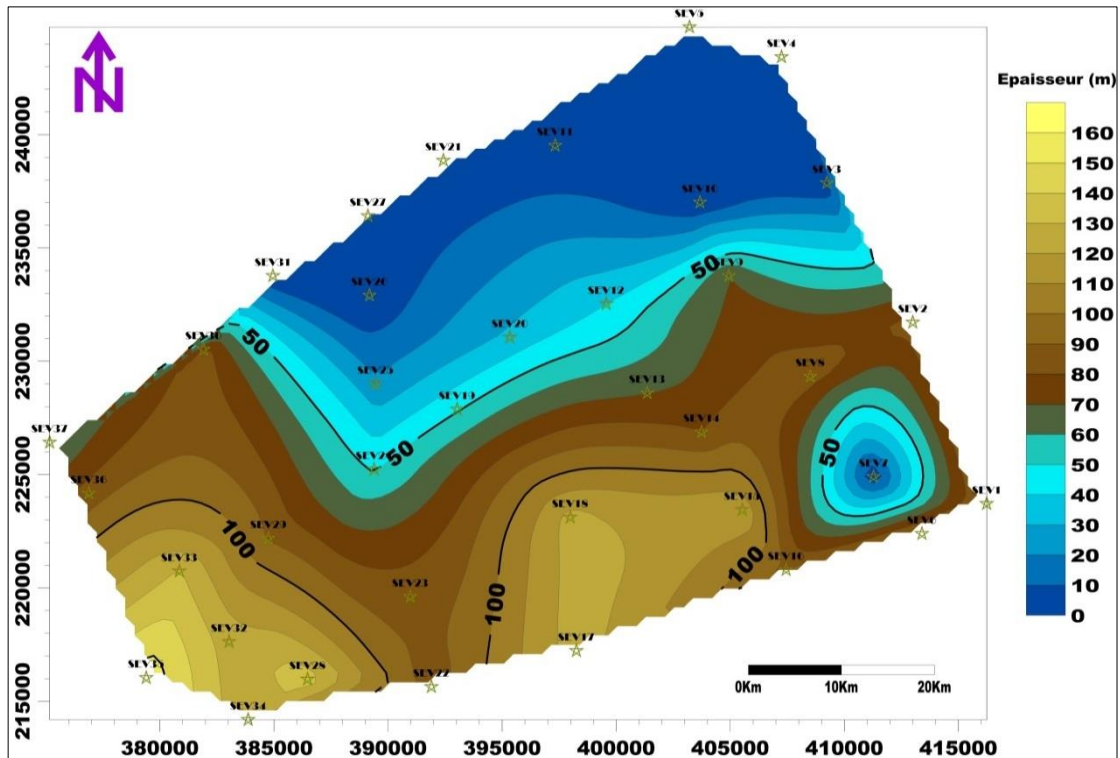


Figure 66 : Carte des isopaques de la formation conductrice de sénonien

1.8. Coupe Géo-électriques :

Dans le but de suivre l'évolution de la structure des aquifères de la zone d'étude dans toutes les directions, des profils orientés Nord-Sud, Est-Ouest et ENE-WSW ont été réalisés (fig. 67-71). Nous présentons, dans ce qui suit, une description relativement détaillée de ces coupes.

1. Le profil Nord-Sud

Cette coupe est réalisée sur environ 25km, à partir des affleurements du Turonien dans la région de Ain kaicher au Nord jusqu'à khalfiya au sud (fig.67). Elle traverse un certain nombre de forages présentant des coupes lithostratigraphiques permettant de mieux caler les données électriques.

Elle montre la structure en synclinal asymétrique du bassin où les formations des aquifères s'enfouissent progressivement depuis les zones d'affleurement en direction du Sud.

De point de vue géologique, les formations géologiques (Conglomérat polygénique, sable, alluvions, marne, marne sableuse, grès et calcaire blanc) d'âge Plio-Quaternaire deviennent très importantes du Nord vers le Sud de la zone avec une épaisseur totale pouvant atteindre 100 m parfois plus (SE22) et deviennent minces vers le Nord jusqu'au SE 25 où l'épaisseur devient nulle. Les résistivités de cette unité varient de 10 à 30 Ω .m pour les niveaux conducteurs et de 70 à 180 Ω .m, pour les niveaux résistants.

Les formations d'âge Éocène sont très développées à cette zone sur une large superficie recouverte par le Plio-Quaternaire, ces formations deviennent minces vers le Nord jusqu'à le SE 26 où l'épaisseur devient nulle. Les résistivités de cette unité varient de 70 à 200 Ω .m.

Les formations conductrices d'âge sénonien deviennent très importantes du Nord vers le Sud de la zone avec une épaisseur totale pouvant atteindre 80 m parfois plus (SE22) et deviennent très minces vers le Nord jusqu'à l'épaisseur devient nulle.

Les formations résistantes de Turonien s'enfouissent progressivement depuis les zones d'affleurement en direction du Sud, la coupe montre aussi que les résistivités électriques de l'aquifère du Turonien diminuent en direction du Sud. Ceci a été expliqué par la variation latérale du faciès lithologique du Turonien qui devient de plus en plus marneux vers le Sud. Les résistivités du Turonien de l'ordre de 3000 à 4000 Ω .m (les SE 26-27) au Nord, passent à des valeurs faibles, de l'ordre de 400 Ω .m au Sud (450 Ω .m au SE 22).

De point de vue structurale la coupe géoélectrique étudié est affectée par une grande faille située au sud de la zone d'étude où la structure du bassin plonge rapidement (Zone affaissée),

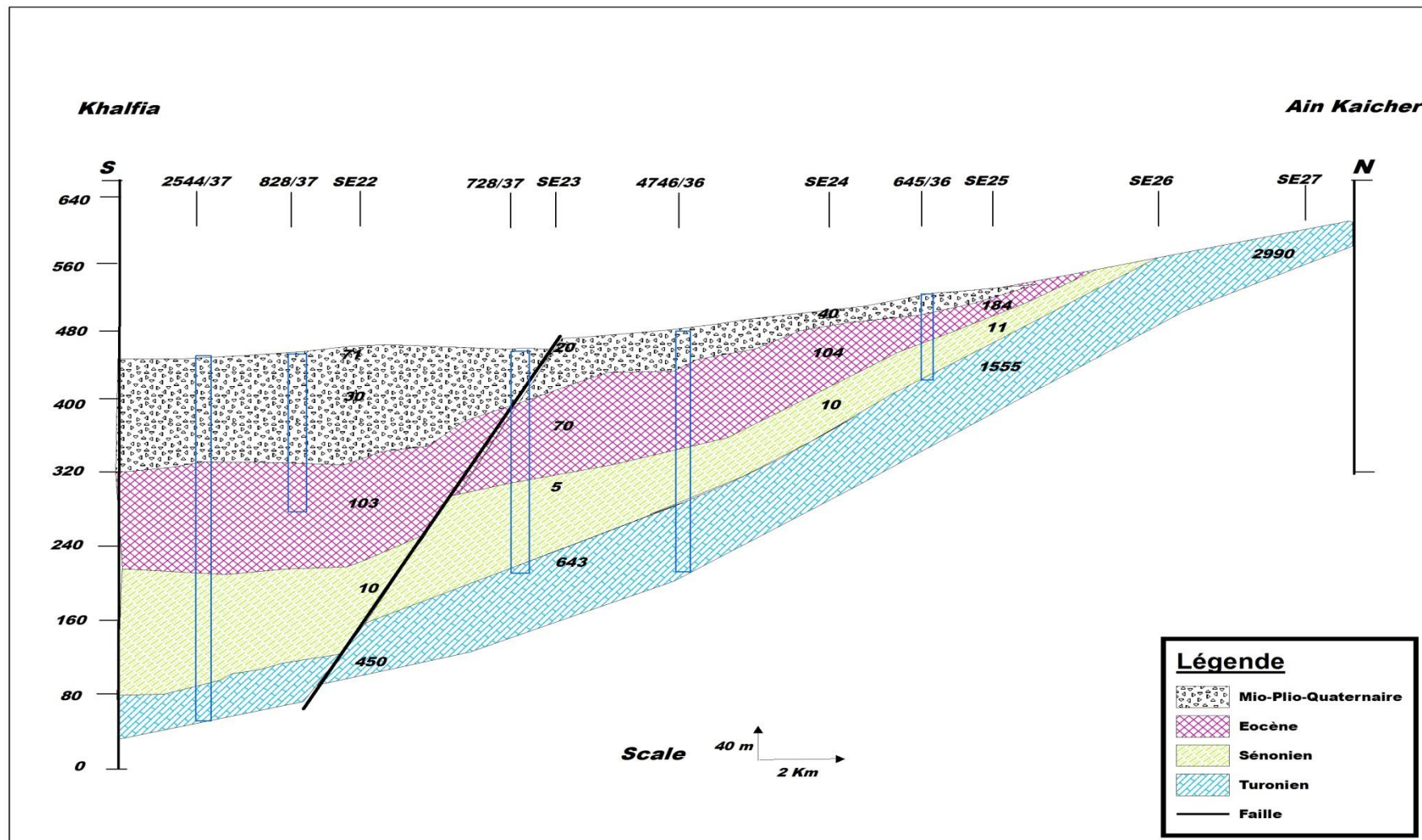


Figure 67: coupe géoélectrique N_S

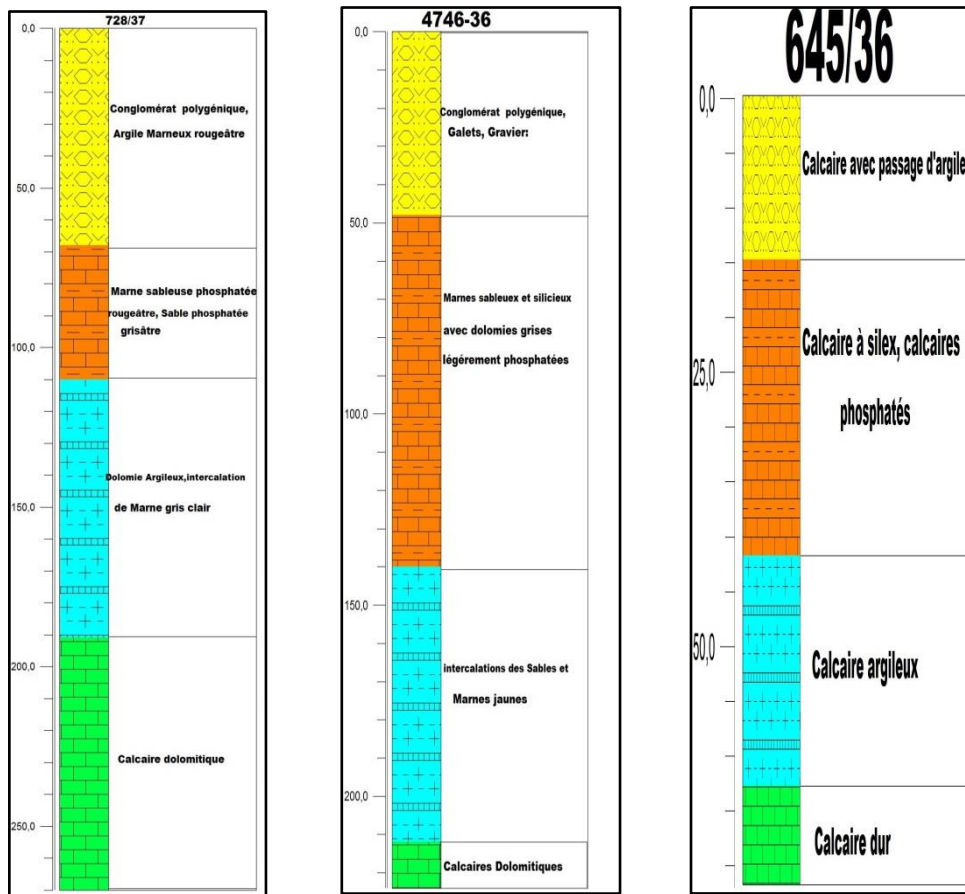


Figure 68: Sondages carottés de la coupe synthétique N-S

2. Le profil ENS-WSW

Cette coupe est réalisée sur environ 22km, à partir des affleurements du Turonien dans la région de Boujaad jusqu'au Nord d'Ouled Saïd El oued (fig. 69). Elle traverse un certain nombre de forages de calage (les BJ des pétroliers et certains forages n°IRE).

D'après l'analyse de cette coupe, on note la présence d'un ensemble correspondant à une succession de couches résistantes et conductrices attribuées aux formations du Quaternaire et du Tertiaire, cet ensemble présente un plongement de vers le WSW.

Le recouvrement hétérogène (Conglomérat polygénique, sable, alluvions, marne, marne sableuse, grès et calcaire blanc) d'âge Plio-quaternaire est constitué pratiquement par une alternance de niveaux résistants et de niveaux conducteurs d'épaisseurs variantes de 50 m à 40 m au WSW de la coupe et de 3 à 0 m au centre (SE 9). Les résistivités de cette unité varient de 10 à 40 Ohm.m pour les niveaux conducteurs et de 70 à 200 Ohm.m pour les niveaux résistants.

La résistance d'âge Éocène est très développée dans cette zone sur une large superficie recouverte par le Plio-Quaternaire, ces formations deviennent minces vers le ENE jusqu'au SE 9, où l'épaisseur devient nulle.

Les formations conductrices d'âge Sénonien deviennent très importantes sur la totalité de la zone avec une épaisseur totale pouvant atteindre 80 m.

Les formations résistantes de Turonien s'enfouissent progressivement depuis les zones d'affleurement (Boujad) en direction du WSW. Là aussi, la coupe montre que le Turonien change de résistivité électrique. En effet, dans la partie d'affleurement, les résistivités sont importantes et elles sont relativement trop faibles dans la partie WSW. Les forages existents dans cette partie montrent que cette variation est due au changement de faciès lithologique de la formation du Turonien.

De point de vue structurale la coupe géoélectrique étudiée est affectée par deux grandes failles, Ces dernières sont à l'origine de l'affaissement des compartiments situés au Sud de notre zone d'étude.

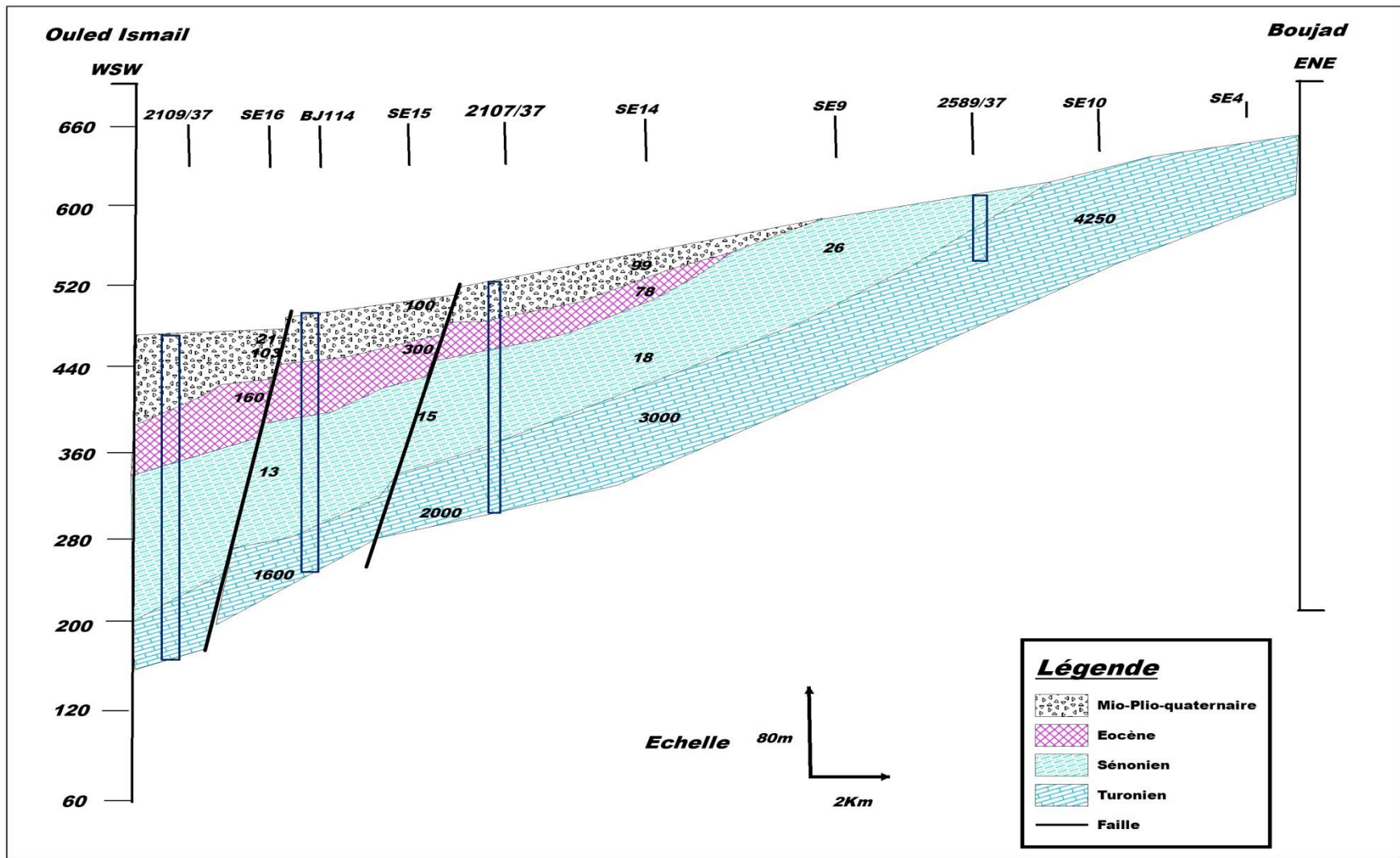


Figure 69: coupe géoélectrique N°2

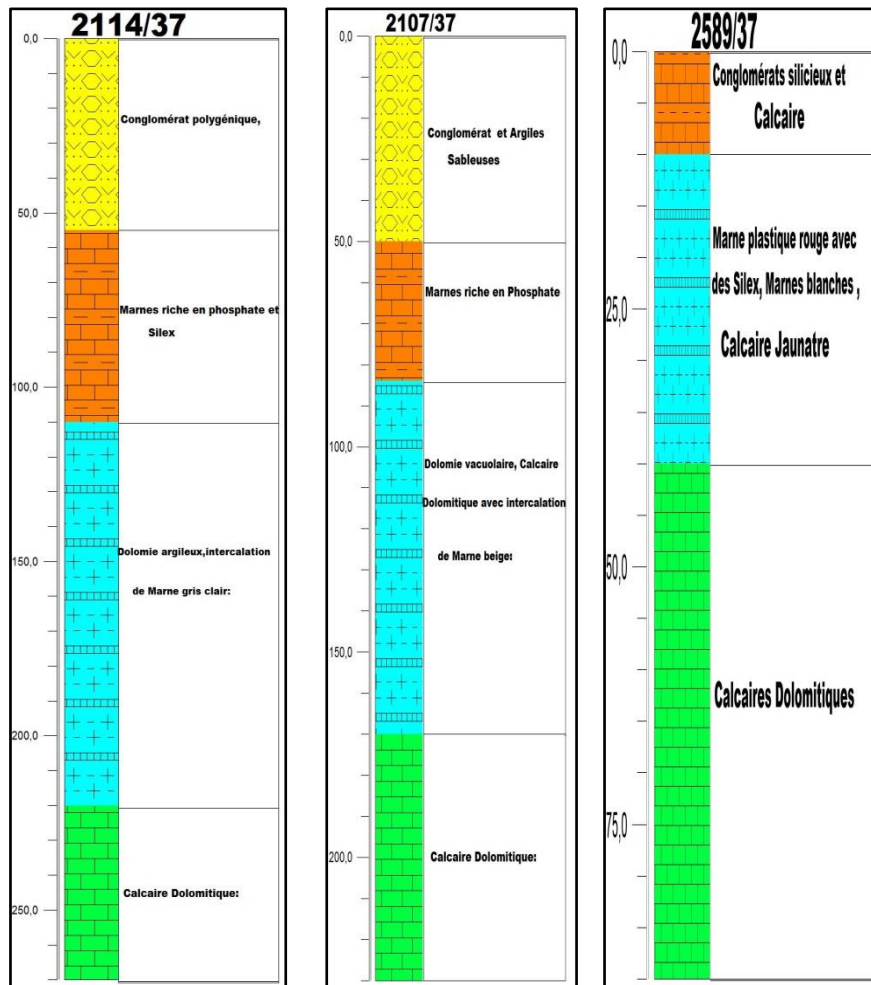


Figure 70: Sondages carottés de la coupe synthétique WSW-ENE

3. Coupe géoélectrique E-W

Cette coupe est réalisée à partir des sondages électriques sur environ 40 km, à partir des affleurements du Turonien dans la région de Boujad (Est de la région étudiée jusqu'à la ville de Fkih ben Salah (fig. 71). Elle traverse un certain nombre de forages de calage (forages n°IRE : 4746/36 et 4499/36), elle montre les variations lithologiques suivantes :

Le recouvrement hétérogène d'âge Plio-quaternaire est constitué pratiquement par une alternance de niveaux résistants et de niveaux conducteurs d'épaisseurs variantes de 70 m à 80 m à l'Ouest et de 10 à 0 m au centre de la coupe (SE 24). Les résistivités de cette unité varient de 11 à 30 Ohm.m pour les niveaux conducteurs et de 70 à 200 Ohm.m pour les niveaux résistants.

La résistance d'âge Éocène est très développée à cette zone sur une large superficie recouverte par le Plio-Quaternaire, ces formations deviennent minces vers le L'Est (SE19) jusqu'à l'épaisseur deviennent nulle.

Les formations conductrices d'âge sénonien deviennent très importantes sur la totalité de la zone avec une épaisseur pouvant atteindre 150 m à l'ouest et deviennent minces vers le L'Est (SE 12) jusqu'à l'épaisseur où deviennent nulle.

La formation résistante de Turonien s'enfouit progressivement depuis les zones d'affleurement (Boujad) en direction Ouest. Là aussi, la coupe montre que le Turonien change de résistivité électrique. Ceci a été expliqué par la variation latérale du faciès lithologique du Turonien. Les résistivités du Turonien de l'ordre de 3000 à 4000 $\Omega.m$ (les SE 3-10) à l'Est, passent à des valeurs faibles, de l'ordre de 400 $\Omega.m$ à l'Ouest (395 $\Omega.m$ au SE 35).

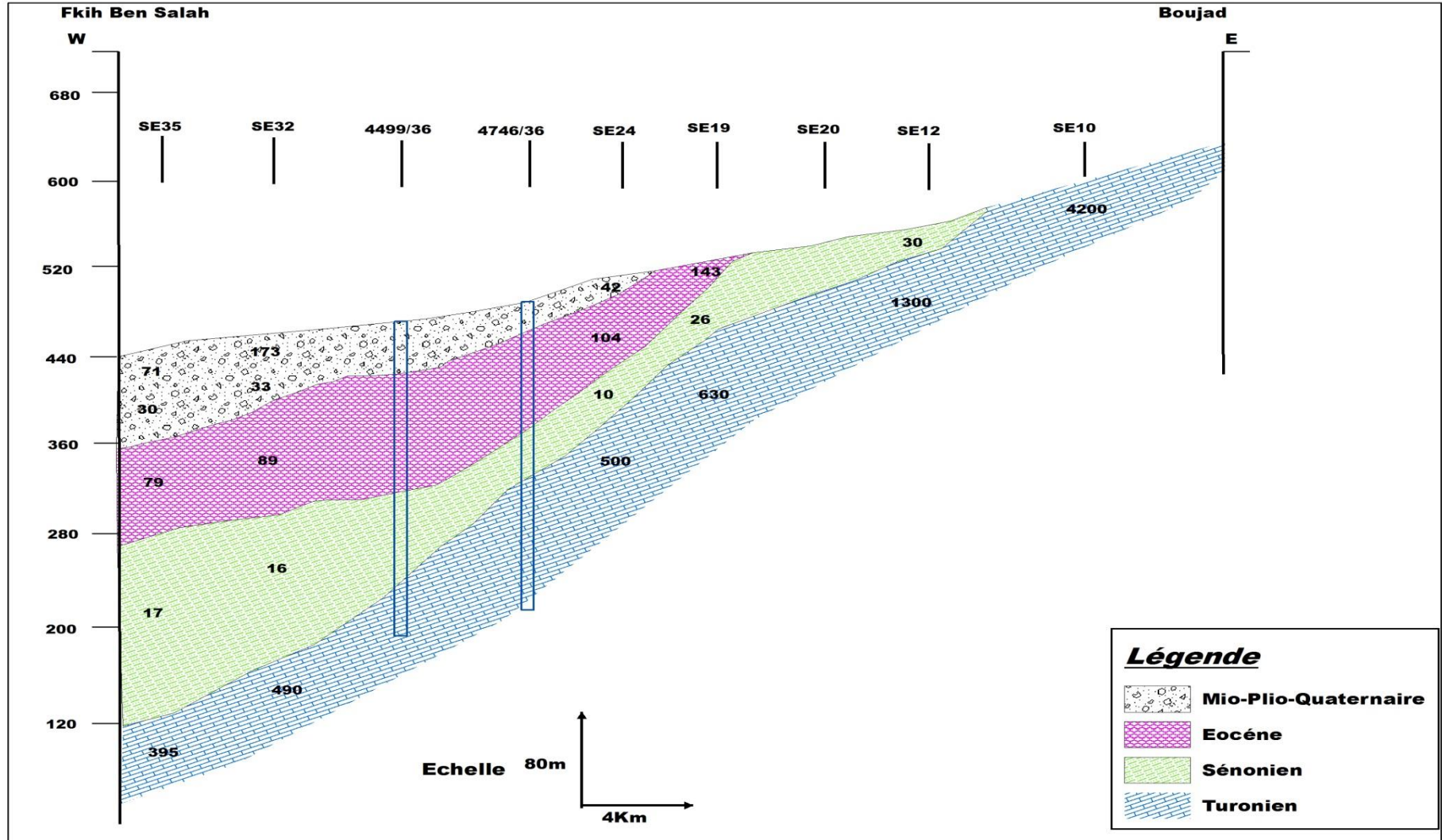


Figure 71: Coupe Geoélectrique N°3

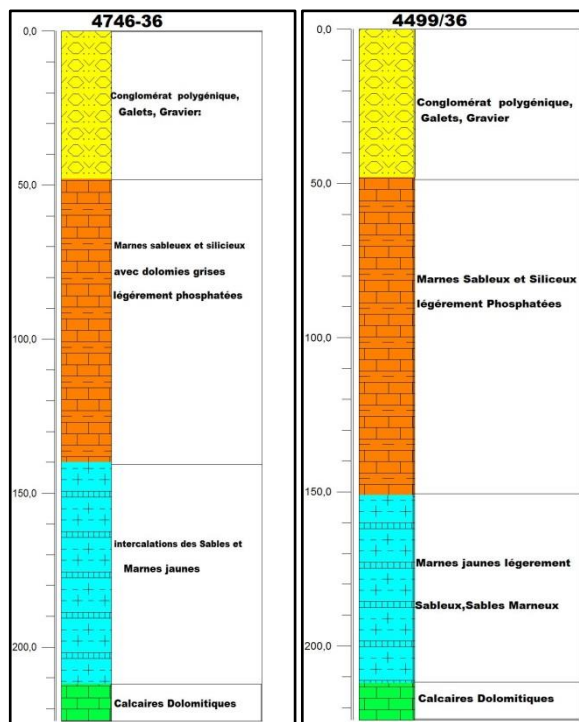


Figure 72: Sondages carottés de la coupe synthétique E-W

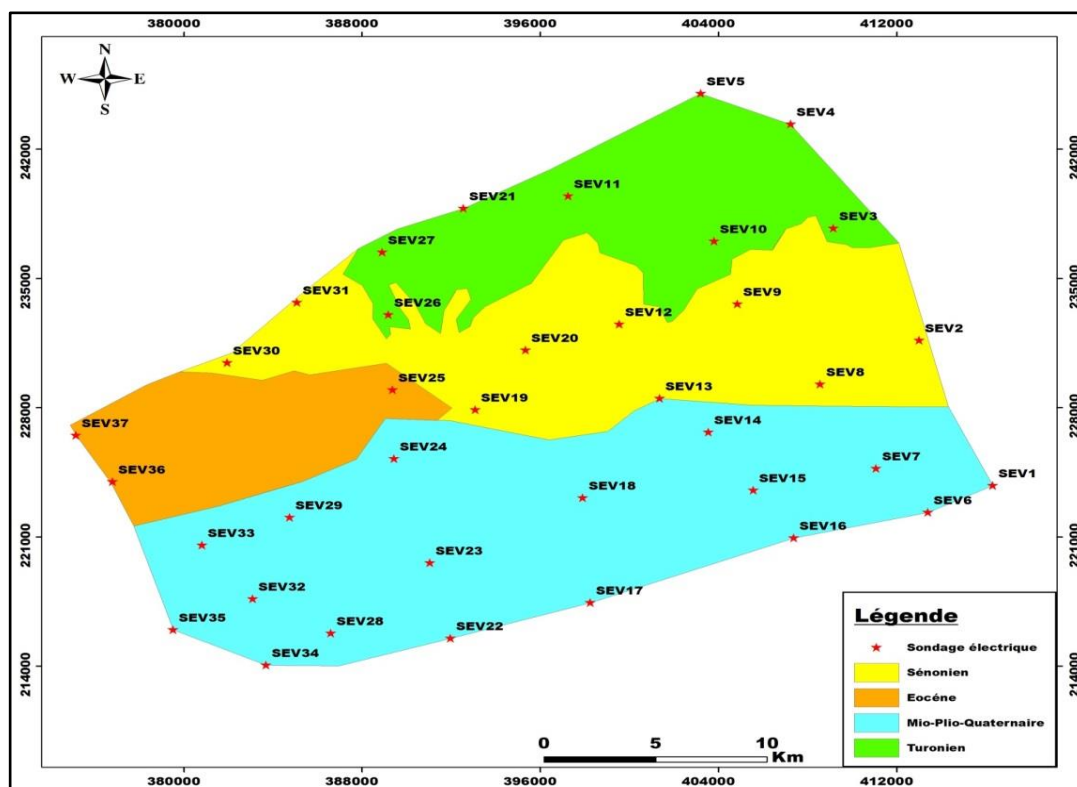


Figure 73: Carte des affleurements des formations aquifères

2. Tomographie électrique

2.1. Programme, acquisition, traitement et inversion des données

La campagne d'imagerie électrique réalisée dans la partie Septentrionale de la plaine de Tadla comprenait plus de 90 profils électriques implantés le long de certaines artères.

Le choix de l'emplacement de ces profils a été conditionné par deux éléments importants :

- possibilité de mise en œuvre et d'installation du dispositif de mesure.
- Les différents terrains sont stratifiés horizontalement ou subhorizontalement.

Le matériel utilisé est constitué d'un agencement de 16 électrodes espacées de 5 m, connecté à un résistivimètre du type Syscal R1 + de la société Iris Instruments, une batterie 12V pour l'injection du courant. Le programme Prosys II est utilisé pour charger la séquence dans le résistivimètre puis télécharger les données de celui-ci une fois la mesure terminée. Étant donné que la résistivité est fonction de l'épaisseur, de la nature des roches, il est nécessaire d'effectuer un processus de calcul inverse des données du terrain pour obtenir la résistivité réelle. Le calcul final des modèles en deux dimensions est réalisé à l'aide du logiciel spécialisé développé par Loke et Barker (1996), c'est le programme RES2Dinv fournie par GEOTOMO SOFTWARE.

Ce dispositif multi-électrode permet, comme il a été dit ci-dessus, d'acquérir un grand nombre de mesures correspondant aux différentes combinaisons de quatre électrodes. Dans la présente étude la configuration Wenner-Schlumberger a été adoptée pour garantir une meilleure résolution latérale et verticale.

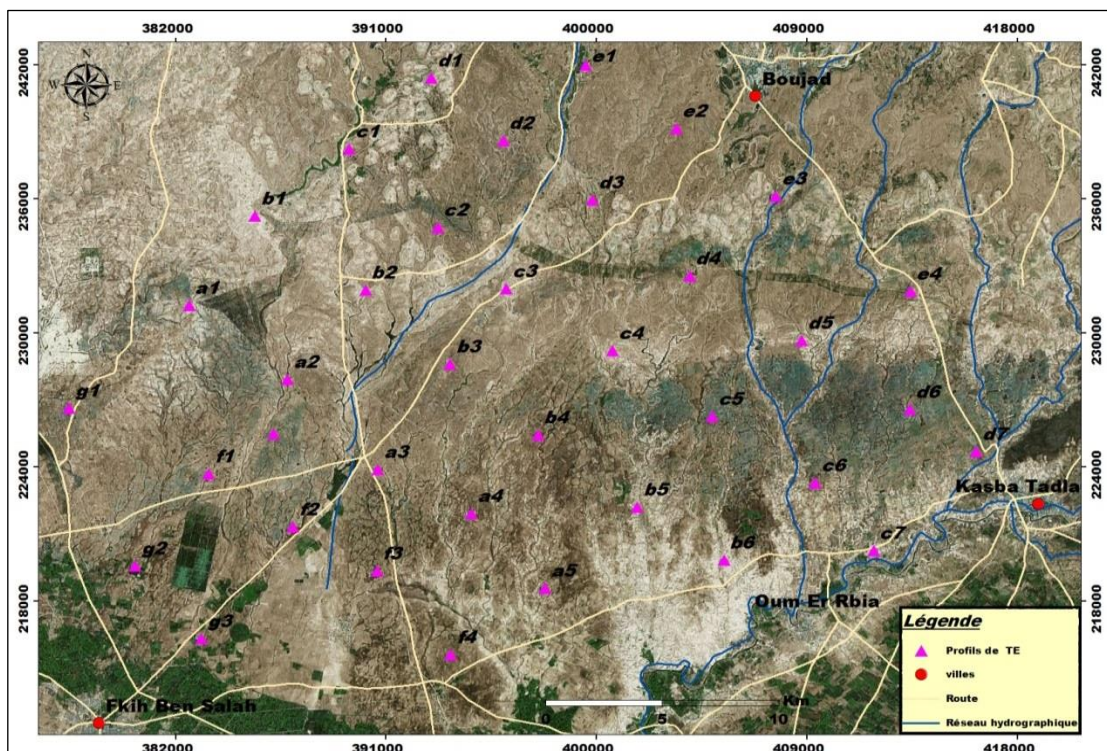


Figure 74: Localisation des profils de tomographie électrique



Figure 75: Matériel de la tomographie

2.2. Interprétation des données de tomographie électrique (TRE)

La première étape de l'interprétation des données de tomographie électrique (TRE) a été effectuée à l'aide de la méthode d'inversion de Loke et Barker (1996). L'efficacité de cette méthode de modélisation a été largement prouvée dans de multiples cas d'étude de prospection géophysique appliquée à la reconnaissance géologique et la cartographie structurale des aquifères superficiels. Cette méthode a été systématiquement appliquée à l'ensemble des profils de tomographie implantés au niveau de la zone d'étude selon une direction N-S. Ceci nous a permis d'obtenir des modèles du sous-sol sous forme de section de la résistivité réelle des terrains investigués.

2.2.1 Interprétation des résultats du profil e3

Le modèle de résistivité du sous-sol obtenu le long du profil de la tomographie électrique e3 montre une variation importante de la résistivité électrique témoignant de son hétérogénéité latéralement et verticalement. Il présente de forts contrastes de résistivité électrique qui augmente de la surface vers la profondeur.

La résistivité est comprise entre 1 et 10000 $\Omega.m$. La description du forage 2599/37 le plus proche du profil, explique la variation de la résistivité qui augmente de la surface vers la profondeur. À la surface, on a une couche conductrice de résistivité intrinsèque qui peut atteindre 30 $\Omega.m$ et d'épaisseur variable (3-5 m). Ce terrain correspond aux terrains marno-gréseux et argiles et des argiles sableux du Sénonien, à partir de 5 m une formation très résistante a été attribuée au Turonien qui constitue le réservoir le plus important dans la région, cette formation correspond au calcaire dolomitique, sa résistivité dépasse 6000 $\Omega.m$.

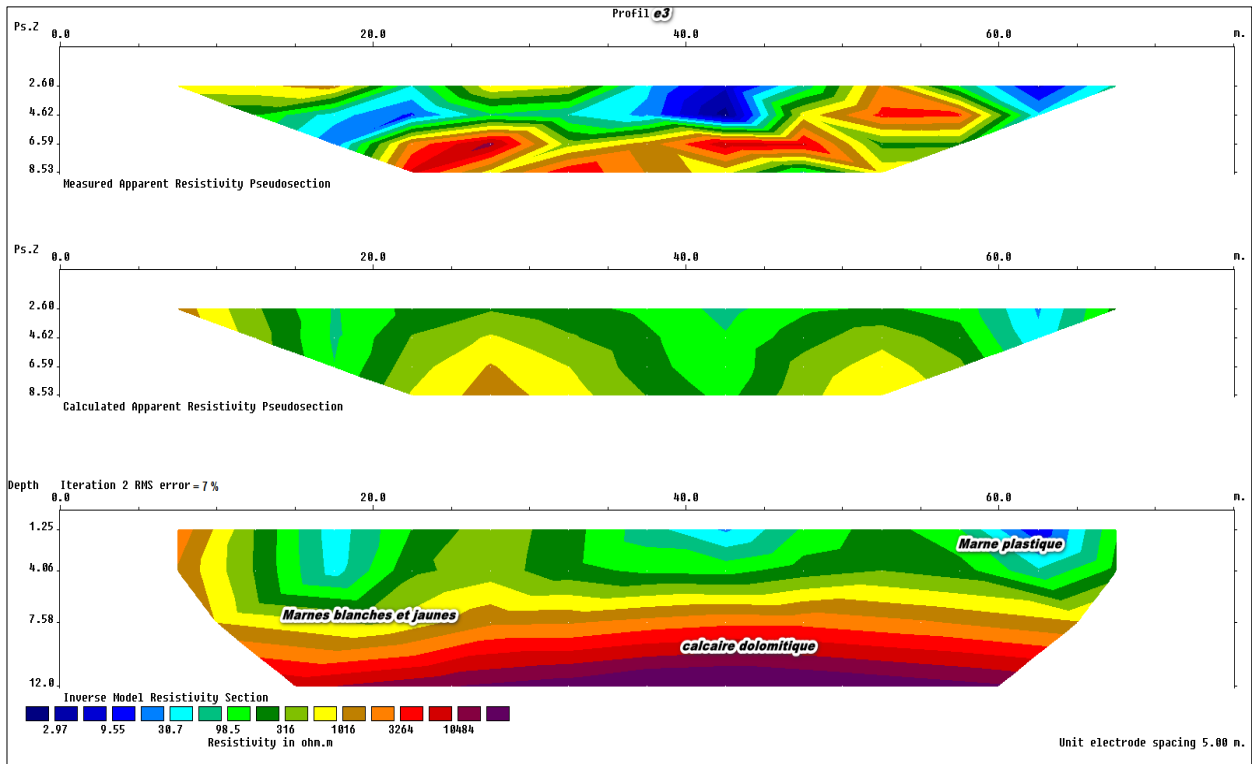


Figure 76: Section d'imagerie électrique 2D de la ligne tomographique e3

2.2.2 -Interprétation des résultats du profil a3

Les résultats du levé géophysique montrent des données mesurées sous forme d'un modèle de résistivité réelle du sous-sol obtenu par inversion de ces données. Un premier examen de l'ensemble des résultats obtenus révèle l'existence d'importantes variations de la résistivité électrique du sous-sol témoignant de son hétérogénéité.

La résistivité est comprise entre 1 et 900 Ω .m. La description du forage 4555/36, le plus proche du profil a3, explique la variation de la résistivité qui augmente de la surface vers la profondeur. À la surface, on a une couche conglomératique, de 1 à 6 m il y'a des argiles limoneuses et des marnes caractérisées par une résistivité faible entre 1 et 50 Ω .m, à partir de 6m, on a les calcaires gréseux caractérisés par une résistivité moyenne (400 Ω .m).

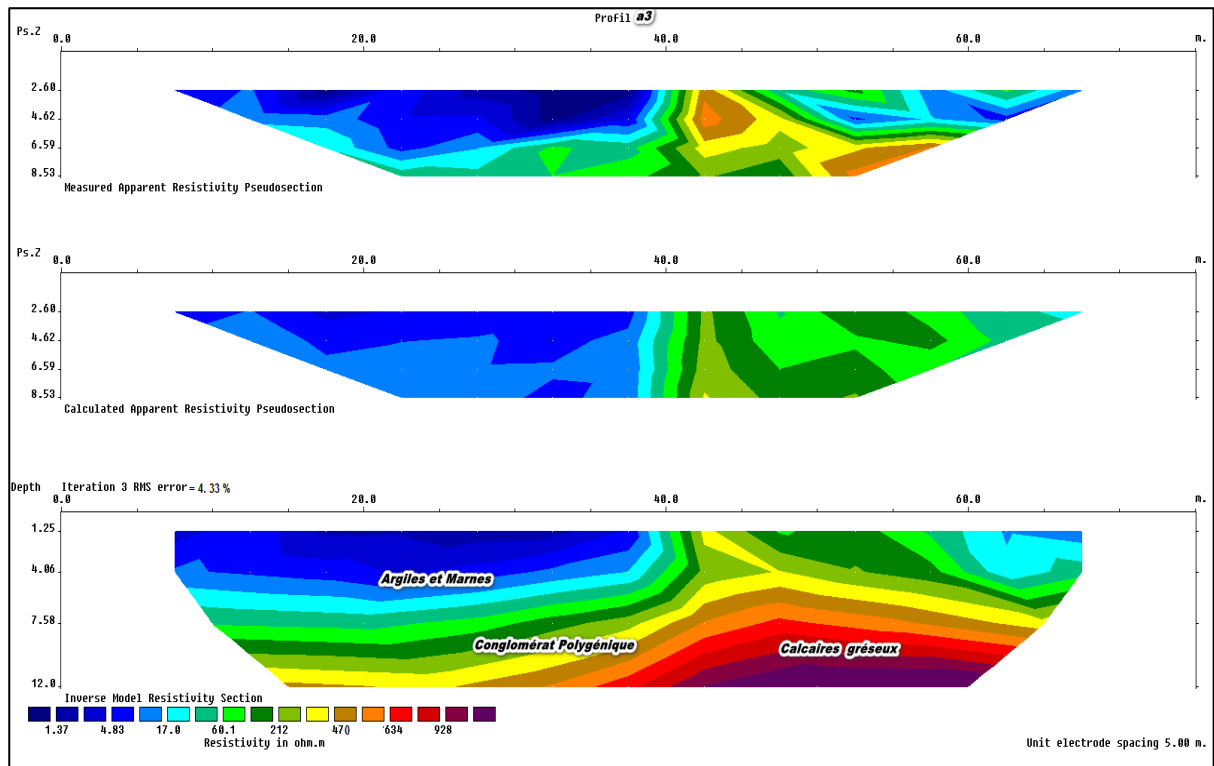


Figure 77: Section d'imagerie électrique 2D de la ligne tomographique a3

2.2.3 -Interprétation des résultats du profil F1

La pseudo-section de résistivité obtenue le long de cette ligne montre un gradient croissant de la résistivité vers la profondeur (de 1 à 800 $\Omega.m$) témoignant de son hétérogénéité.

Géologiquement, le forage 4713/36, utilisé pour le profil f1 explique la variation de la résistivité qui augmente de la surface vers la profondeur. À la surface, on a une couche conductrice de résistivité intrinsèque qui peut atteindre 10 $\Omega.m$ et d'épaisseur variable (2-4 m). Ce terrain correspond les terrains marno-gréseux et argiles et des argiles sableux de éocène, à partir de 5 m on a une formation résistante (120 à 800 $\Omega.m$), Ce terrain correspond vraisemblablement aux calcaires de la série phosphatée.

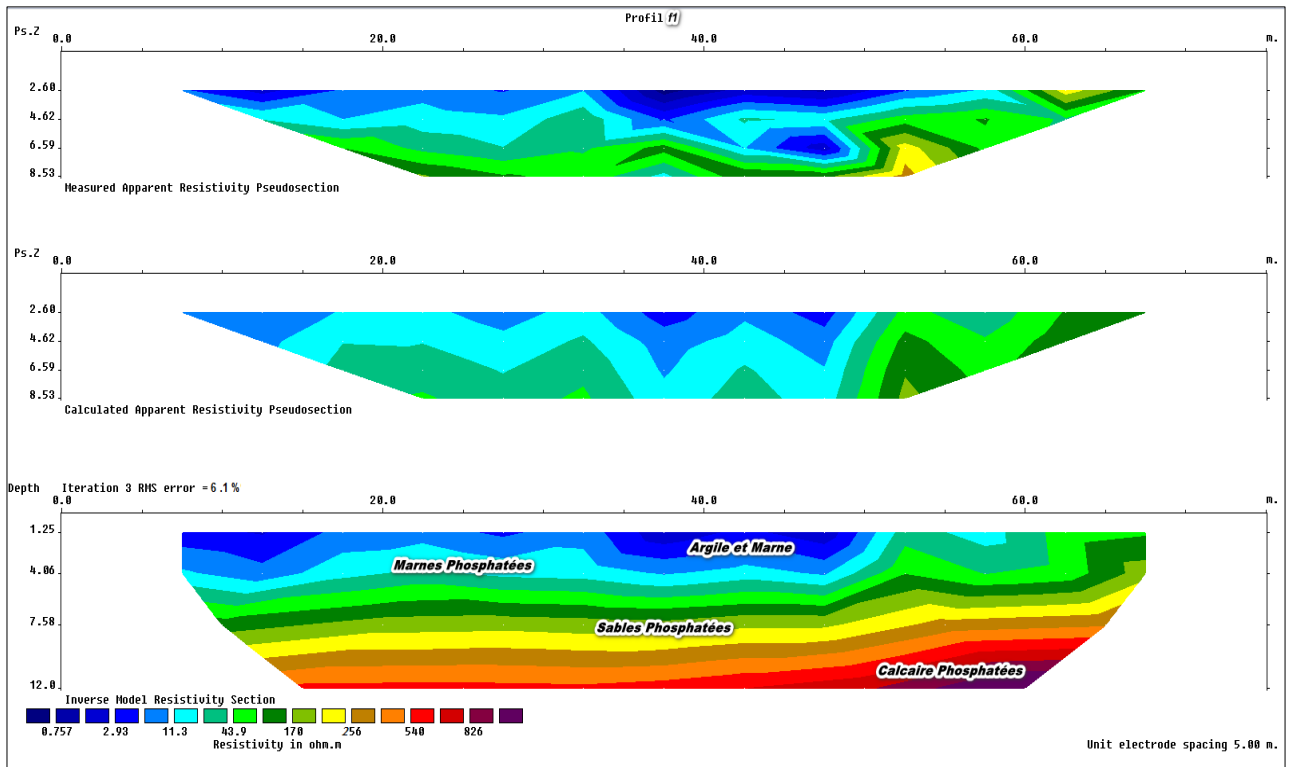


Figure 78 : Section d'imagerie électrique 2D de la ligne tomographique F 1

- **Modèle du Profils inversés en direction Nord-Sud (partie Est de la zone d'étude)**

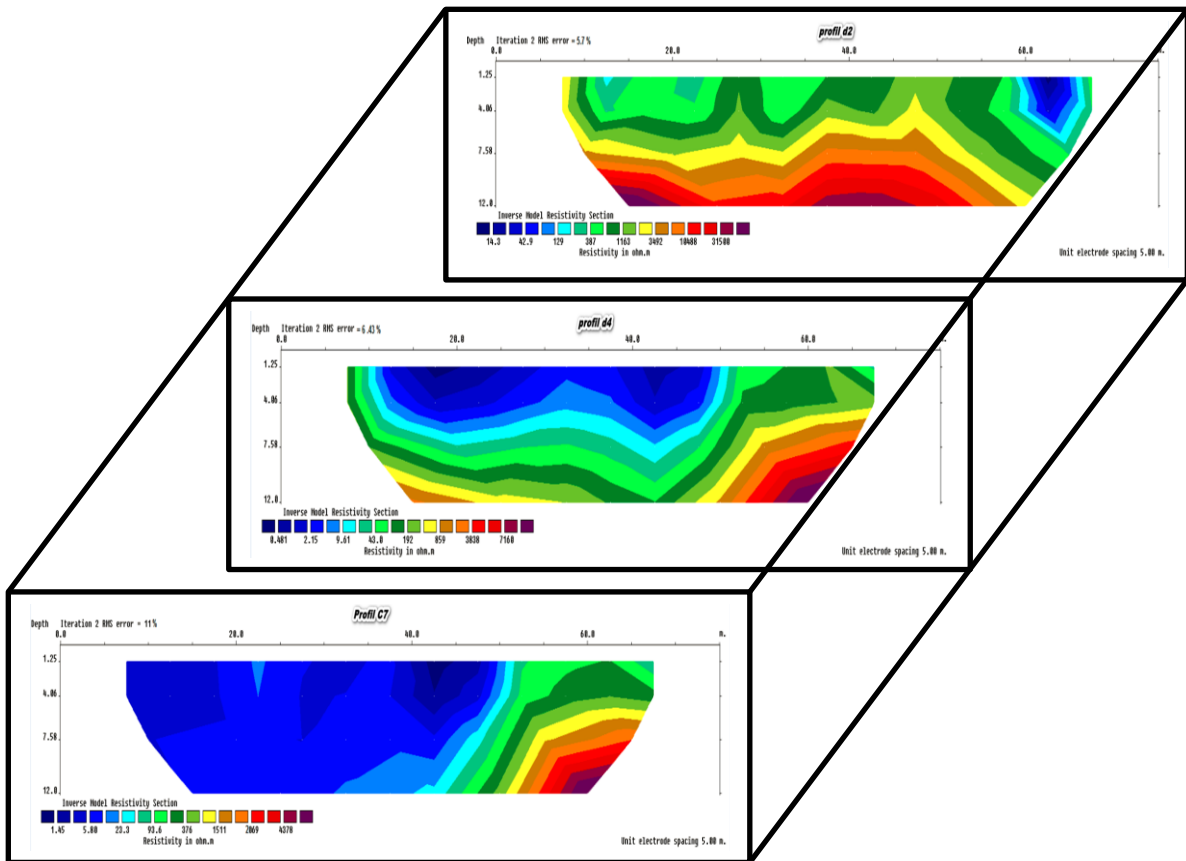


Figure 79 : Profils inversés de tomographie électrique 2D du Nord vers le sud de la zone d'étude

- **Modèle du Profils inversés en direction Nord-Sud (partie Ouest de la zone d'étude)**

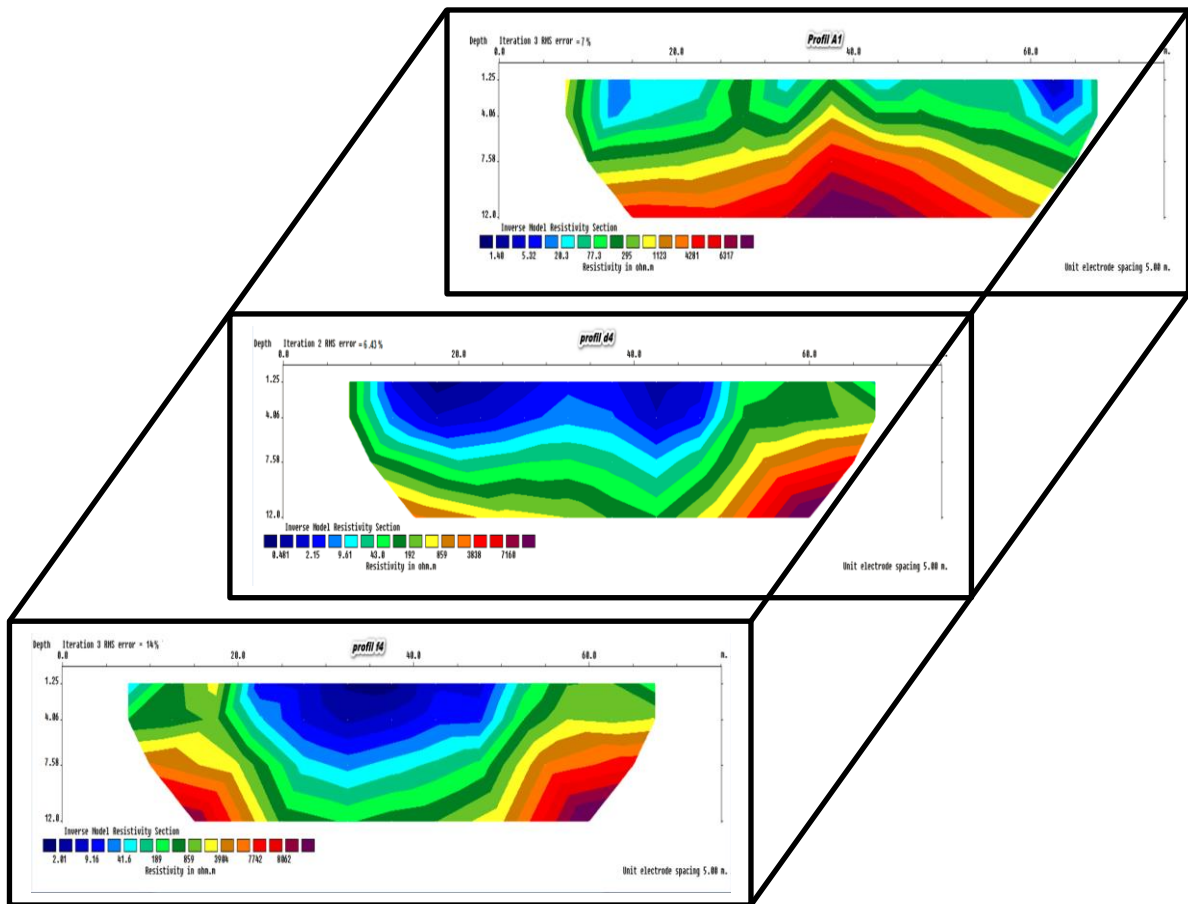


Figure 80 : Profils inversés de tomographie électriques 2D du Nord vers le sud de la zone d'étude

3. Gravimétrie :

La gravimétrie est une discipline fondamentale de la géophysique qui consiste à mesurer et à étudier les variations spatiales et temporelles du champ de pesanteur de la terre. Les applications des mesures gravimétriques sont très nombreuses, on cite par exemple ; l'exploitation de ressources minières et la connaissance de la structure des différentes unités géologiques en particulier la présence d'hétérogénéités de masse dans le sol.

Le bassin du Tadla a été le siège de nombreuses campagnes de prospection géophysique en raison de ses perspectives pétrolières d'une part et de son potentiel en ressources en eau d'autre part. Le présent travail vise à améliorer la connaissance de la structure de ce bassin en ayant recours à deux techniques géophysiques : les méthodes géo-électriques et la gravimétrie. Cette dernière concerne le traitement et la réinterprétation des données gravimétriques disponibles par le service géologique du Maroc.

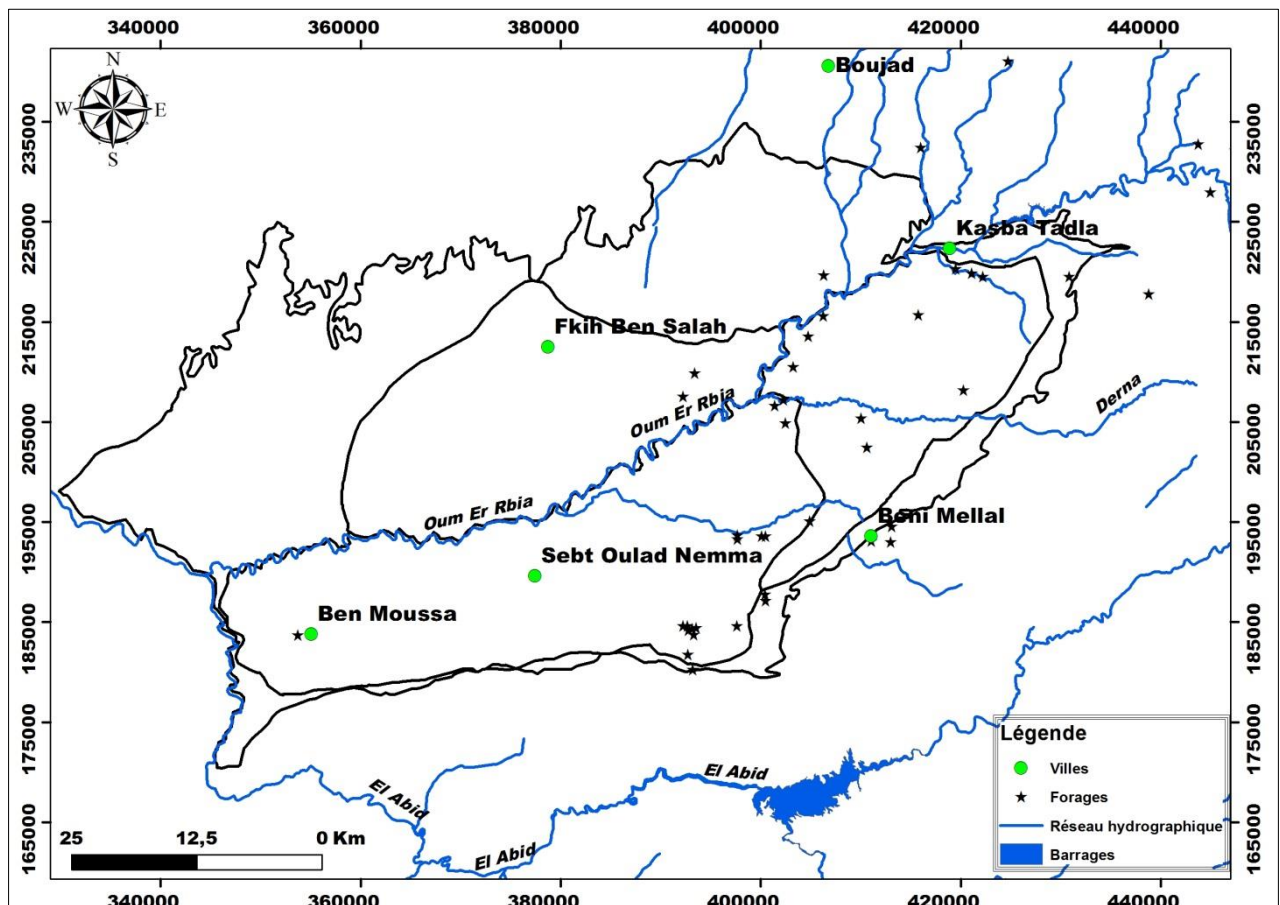


Figure 81: Localisation des puits au niveau du bassin de Tadla

3.1. Moyens et méthodes :

Les données gravimétriques utilisées dans la présente étude sont disponibles publiées par le service géologique du Maroc sous forme d'une carte de l'anomalie de Bouguer ($d = 2,67 \text{ g cm}^{-3}$). Cette carte qui s'étend au-delà des limites du bassin de Tadla a d'abord été établie à

partir de 3312 points de mesure selon des stations bien espacées et disposées le long des routes et des pistes selon un réseau qui offre une bonne couverture de la plaine de Tadla.

La carte du bassin de Tadla a été établie à partir de 3312 points de mesure, réalisés en 1961 par la Compagnie de prospection géophysique nord-africaine (CPGNA) pour le compte de la direction des mines et de la géologie du Maroc. Comme on peut le constater, la carte de l'anomalie de Bouguer est affectée par un fort gradient régional. Nous avons commencé par soustraire ce gradient et calculer une carte de l'anomalie résiduelle (Fig.83). Afin de mieux exploiter ces données et de faire ressortir de nouveaux éléments par rapport à l'information fournie par la carte résiduelle, nous leur avons appliqué une série de traitements mathématiques. Il s'agit d'opérations de filtrage du signal gravimétrique dans le domaine des fréquences.

L'extraction du gradient horizontal de la carte de l'anomalie résiduelle est très utile pour la localisation des contacts géologiques, du fait que la limite entre deux blocs de densités différentes correspond au maxima de ce gradient (Cordell, 1982). En effet, au-dessus d'un contact vertical entre des roches de densités différentes, le champ gravimétrique se manifeste par un changement de niveau marqué par le passage des valeurs faibles au-dessus des roches de faible densité, vers des valeurs plus élevées à l'aplomb des roches de forte densité. Le point d'inflexion marquant le passage entre les deux zones se situe à la verticale du contact entre les deux types de roches. Cette caractéristique des anomalies gravimétriques peut être utilisée pour localiser les changements abrupts de densité. Les maxima locaux des gradients horizontaux constituent des rides étroites au-dessus des contacts géologiques marqués par des contrastes de densité. Par ailleurs, afin d'analyser les pendages des contacts et des structures mis en évidence, nous avons procédé au calcul du prolongement vers le haut de la carte de l'anomalie résiduelle à plusieurs altitudes (0,5, 1, 2 et 4 km). Les maxima locaux du gradient horizontal ont ensuite été localisés pour chaque niveau. La migration de ces maxima, lorsque l'altitude du prolongement augmente, indique le sens du pendage. Pour une structure verticale, l'ensemble des maxima se superposent (Archibald, 1999).

3.2. Interprétation des résultats

L'examen de la carte gravimétrique de la plaine de Tadla révèle l'existence d'un gradient régional souligné par des valeurs croissantes de -100 mGal au Sud à -30 mGal au Nord (Fig. 82). Compte tenu de l'état de connaissance actuelle de la structure de ce bassin, cette diminution

peut être expliquée par un épaissement très important de la série sédimentaire en se rapprochant de la bordure de la chaîne du Haut Atlas.

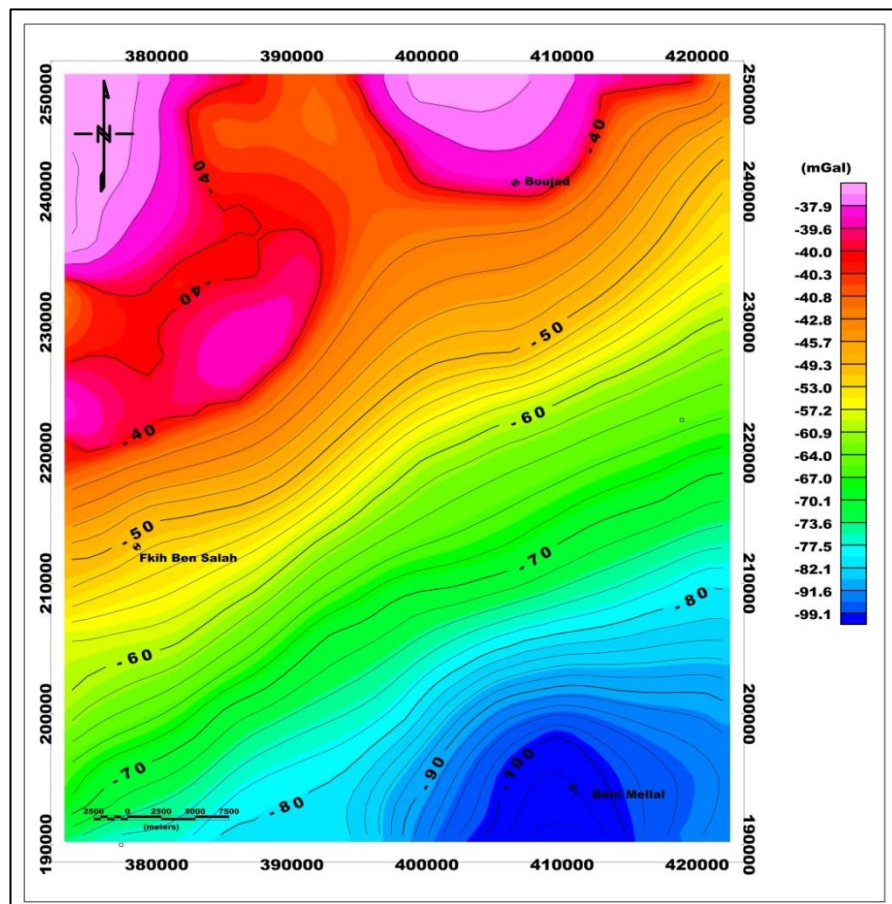


Figure 82: Carte gravimétrique de l'anomalie de Bouguer du Bassin de Tadla

Comme on peut le découvrir la carte de l'anomalie de Bouguer est affectée par un fort gradient régional. Ce gradient a été déterminé puis soustrait des données initiales, ce qui a permis d'obtenir une carte résiduelle (Fig 83) sur laquelle les anomalies sont plus clairement.

L'examen détaillé de la carte d'anomalie résiduelle révèle l'existence de plusieurs anomalies positives (Ap1 à Ap3) et des anomalies négatives (An1 à An4) (Fig. 83). Ces anomalies sont bien corrélées aux grands traits structuraux du secteur étudié. De plus, lorsqu'elle est superposée à la carte géologique elle met en évidence les observations suivantes :

- le plateau des phosphates est signalé par un relief gravimétrique assez calme. avec de faibles variations de l'anomalie résiduelle (entre -2 et -10 mGal). Comme son nom le dévoile, ce domaine est formé par une couverture méso cénozoïque sub-tabulaire, ce qui explique les faibles variations du champ de pesanteur constatées. Le plateau des phosphates est toutefois encadré par de petites anomalies négatives (An3, An4) qu'on pourrait expliquer par des

épaississements locaux du remplissage sédimentaire qui seraient engendrés par des dépressions du toit du socle paléozoïque.

- vers le centre de la carte, le bassin de Tadla est caractérisé par une diminution progressive des valeurs de l'anomalie résiduelle du nord vers le sud.
- Les résultats des nombreux forages réalisés dans ce bassin plaident en faveur de cette explication. En effet, la figure 96 montre clairement que la corrélation latérale des faciès recoupés par des sondages profonds, selon une coupe NE-SW révèlent l'approfondissement du toit du socle paléozoïque du Nord vers le Sud du bassin de Tadla.

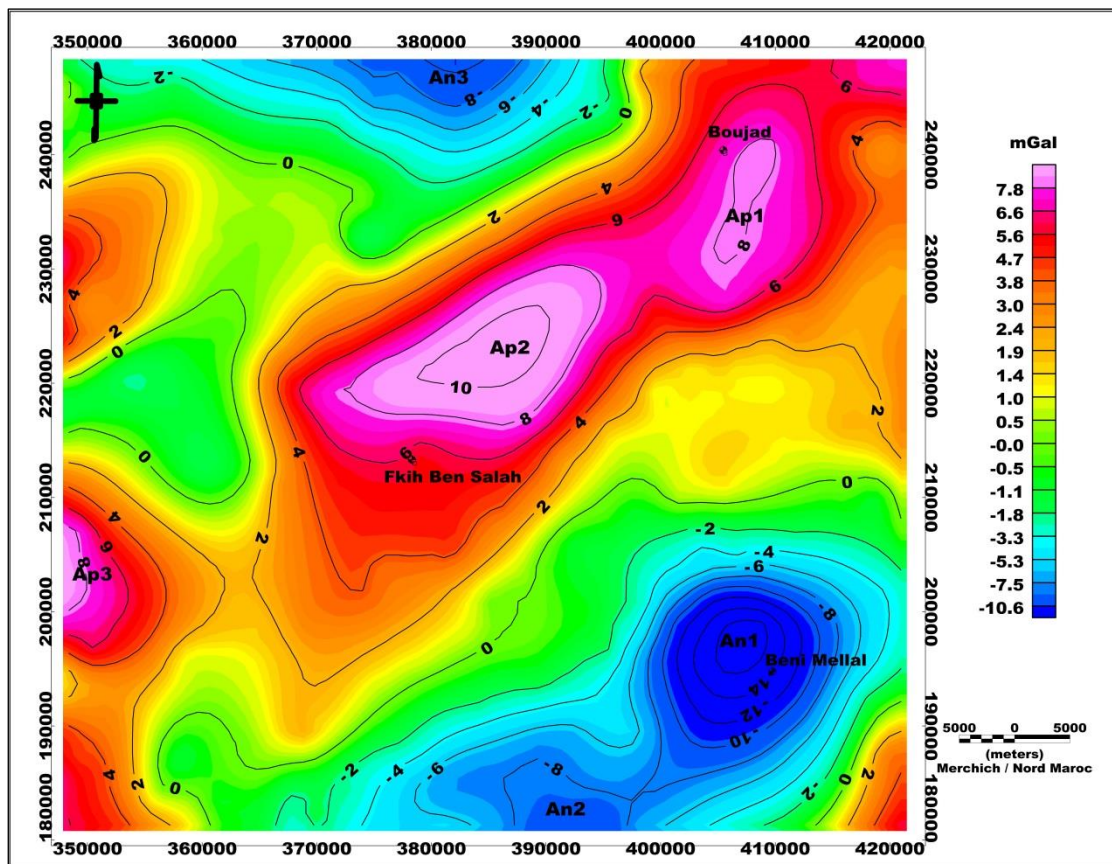


Figure 83: Carte gravimétrique de l'anomalie résiduelle de la zone d'étude

Ce résultat confirme ceux des études géologiques et hydrogéologiques antérieures, qui concluent que le système aquifère du bassin de Tadla s'épaissit du nord vers le sud, comme le montre la Figure 98.

L'alignement des deux anomalies négatives An1 et An2, qui se mettent près de la limite méridionale de la plaine, matérialise l'axe de celui-ci, c'est-à-dire la zone où la série sédimentaire est la plus épaisse.

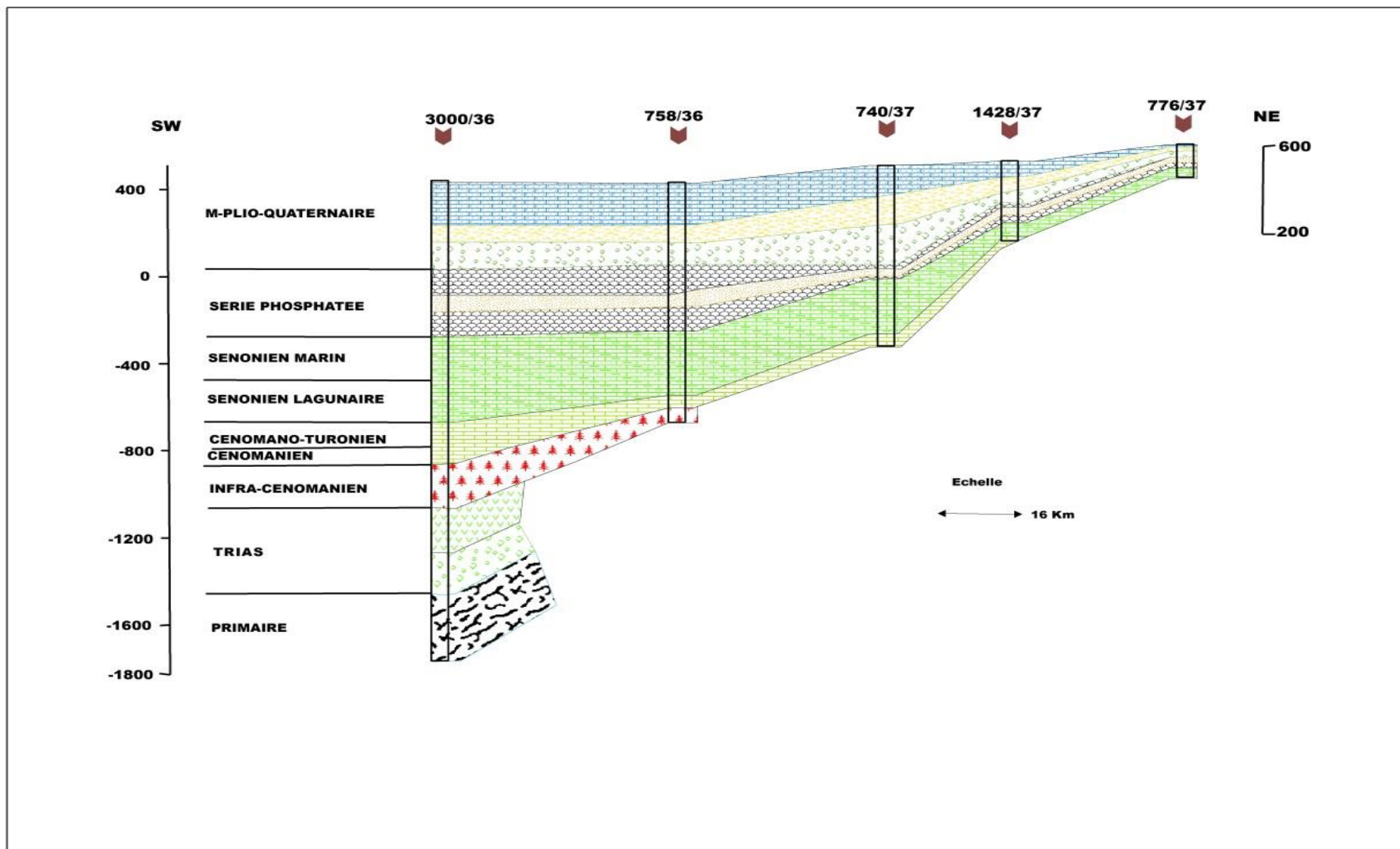


Figure 84: illustration de l'épaissement de la couverture sédimentaire du Nord vers le Sud à travers le bassin de Tadla.

La carte d'anomalies résiduelles montre plusieurs zones de gradients gravimétriques qui peuvent correspondre à des contacts ou des discontinuités (failles, flexures, etc.) pour étudier ces zones particulièrement intéressantes pour la caractérisation structurale du bassin de Tadla, nous avons appliqué la méthode d'analyse décrite précédemment.

Les données gravimétriques sont généralement riches en renseignements sur les structures géologiques. Elles sont notamment très utiles pour l'identification des failles profondes, et la caractérisation de leur extension et de leurs ramifications (Everaerts, 2001). Ces failles, qui mettent en contact des blocs de densités différentes, se présentent sur une carte gravimétrique sous forme de zones de gradients qui marquent la transition entre les deux blocs. L'application de la technique d'analyse des contacts fondée sur le calcul du gradient horizontal couplé au prolongement vers le haut permet la localisation de ces discontinuités et la détermination de leur pendage (Archibald et al. 1999).

Les zones de gradient qui correspondent à des points d'inflexion se transforment en maxima après calcul du gradient horizontal. La méthode de Blakely et Simpson (1986) permet la localisation automatique de ces maxima (Fig. 85). L'application de cette technique à une carte gravimétrique montre que les maximums locaux des gradients horizontaux forment des rides étroites au-dessus des changements abrupts de densité. Pour déterminer le sens du pendage des contacts mis en évidence, on part du principe que plus on prolonge les données gravimétriques vers le haut, plus on met en évidence des structures profondes. La procédure consiste donc à réaliser une série de continuations analytiques vers le haut des données gravimétriques. Ensuite, pour chaque niveau, on calcule le gradient horizontal et on détermine ses maximums. Si les structures sont verticales, tous les maximums issus des différents niveaux se superposent. En revanche, le déplacement de ces maximums, lorsque la hauteur des prolongements vers le haut augmente, indique le sens du pendage. Cette démarche est valable pour des structures en deux dimensions correspondant à des contacts linéaires qui séparent des blocs de densités différentes, ce qui est le cas des structures qu'on cherche à mettre en évidence.

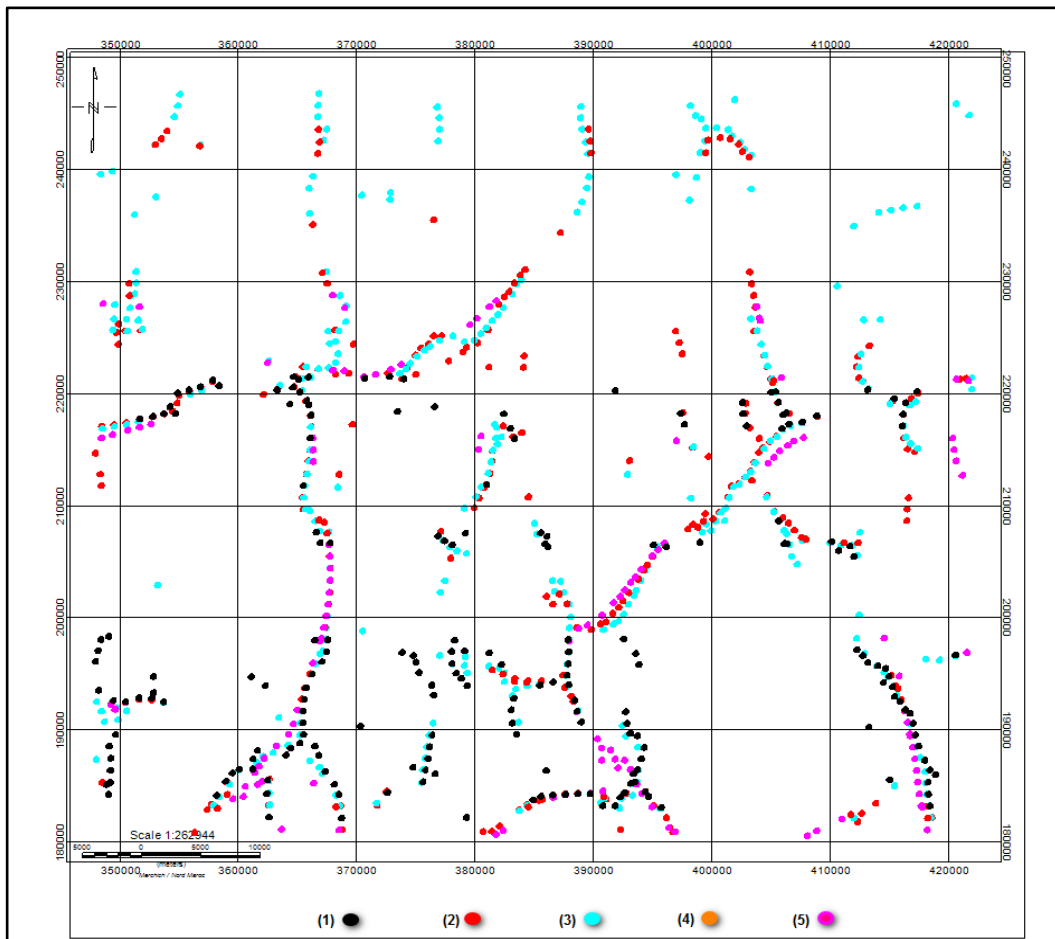


Figure 85 : Contacts gravimétriques obtenus à partir des maxima du gradient horizontal calculé pour la carte d'anomalies résiduelle et pour ses prolongements vers le haut à différentes altitudes : 200 m (1), 500 m (2), 1000 m (3), 2000 m (4) et 3000 m (5).

La représentation sous forme de rosace des linéaments, interprétés comme des failles, montre que ces derniers sont organisés en trois familles, de directions N30, N95 et N135 (Fig. 86). L'analyse de la carte géologique de la zone d'étude et celle du Maroc au 1/1 000 000 autour du bassin de Tadla permet de se rendre compte que, mise à part la direction N95, qui n'existe que très localement, la première direction (N35) et la dernière (N135) est très largement représentée à l'échelle de la région.

Discontinuité

L'analyse et la superposition des coupes et des cartes géophysique et géologique nous a permis de déterminer les discontinuités présentes dans notre zone d'étude (fig.87). L'assemblage de ces modèles montre l'existence de deux familles de failles, celles de direction NE-SW, la plus abondante, et une autre de direction NW-SE, moins abondante

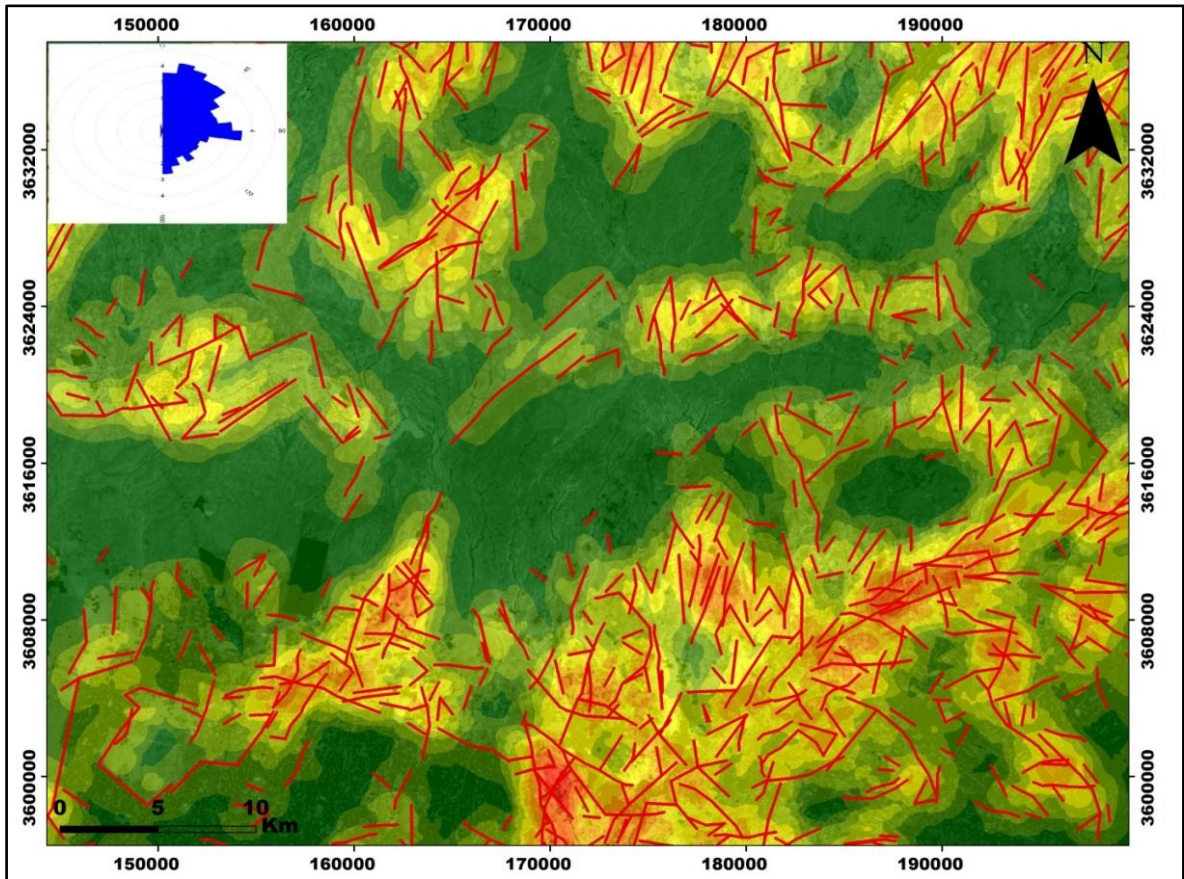


Figure 86: Schéma structural de la zone d'étude et rosace des failles mises en évidence

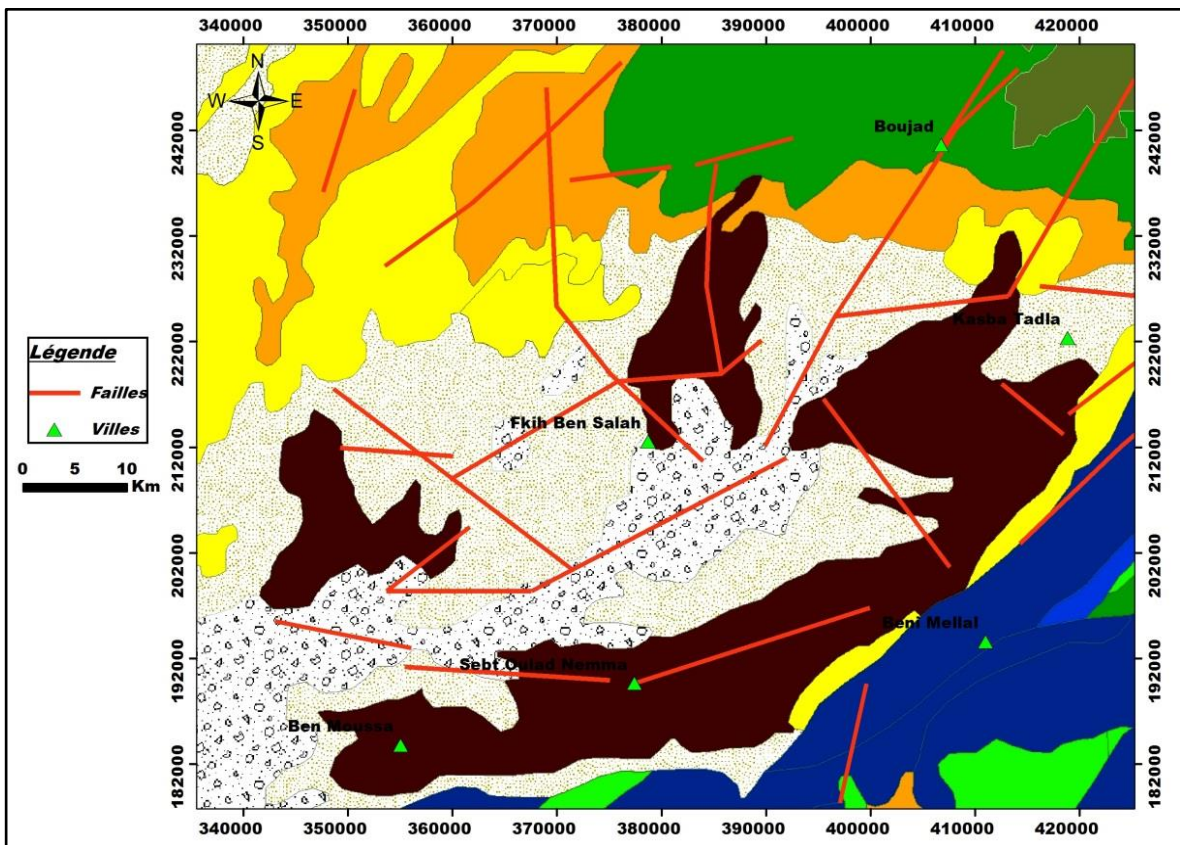


Figure 87 : carte des discontinuités géophysique

Conclusion

L'application de trois méthodes d'investigation (gravimétrie, Sondage et tomographie électrique) nous ont permis de bien comprendre la succession et l'extension des formations géologiques et la géométrie du réservoir de la zone Nord-est de la plaine de Tadla. Cette série devient plus profonde et plus épaisse en allant vers le sud pour dessiner un héli synclinal ou une dépression asymétrique remplie d'un complexe hétérogène d'âge Mio-Plio-Quaternaire.

La reconnaissance géophysique par les sondages électriques (SEV) et par imagerie électrique (TRE) a permis de mettre en évidence la superposition de plusieurs terrains de résistivités électriques différentes : (1) un recouvrement hétérogène de résistivité variable allant de 10 à environ 250 $\Omega.m$; (2) un niveau résistance (120 à 280 $\Omega.m$) d'épaisseur variable, correspond la série phosphatée ; (3) Un niveau conducteur de grande épaisseur et de résistivité comprise entre 10 et 20 $\Omega.m$. Il s'agit des marnes grises et dolomies du Sénonien marin et argiles sableux à anhydrite du Sénonien évaporitique ; (4) Une formation très résistante profonde a été attribuée au Turonien qui constitue le réservoir le plus important dans la région. Cette formation correspond le calcaire dolomitique, sa résistivité dépasse 700 $\Omega.m$.

La technique d'analyse des contacts appliquée aux données gravimétrique a permis de mettre en évidence un important réseau de structures qui indique que la zone d'étude a été fortement influencée par la tectonique atlasique. L'examen de la carte gravimétrique du bassin de Tadla montre une diminution des valeurs de l'anomalie de Bouger du Nord vers le Sud. Compte tenu de l'état de connaissance actuelle de la structure de ce bassin, cette diminution peut être expliquée par un épaissement de la série sédimentaire en allant vers le Sud. On aperçoit que la diminution progressive des valeurs du Nord vers le Sud sur la carte d'anomalie de bouger est localement perturbée par des zones à forts gradients gravimétriques. Ces zones correspondent vraisemblablement à des failles ou à des flexures qui indiquent des affaissements brutaux de la série sédimentaire vers le Sud.

PARTIE III :
ETUDE DE VULNERABILITE PAR
LA METHODE DRASTIC, ET
L'HYDROCHIMIE DE LA NAPPE

Chapitre V : Étude de la vulnérabilité intrinsèque de la zone d'étude du bassin du Tadla

1. Concept de vulnérabilité :

La notion de vulnérabilité à la pollution des aquifères est un terme intégré dans l'hydrogéologie dans les années soixante par Albinet et Margat, qui étudient la possibilité d'un polluant de contaminer une nappe souterraine. Elle est relative, non mesurable et sans dimension et elle dépend essentiellement de la nature, de la quantité et de la crédibilité des données utilisées.

Foster et al. (1988) ont défini la vulnérabilité comme étant la susceptibilité de la qualité des eaux souterraines à une charge polluante artificielle. Cette susceptibilité reste liée aux propriétés intrinsèques de l'aquifère.

L'Association Internationale des hydrogéologues emploie le terme de vulnérabilité comme propriété intrinsèque du système hydrogéologique qui dépend de la sensibilité du système aux impacts d'origine naturelle ou anthropique (Vrbea et Zaporozec, 1994).

Une synthèse détaillée de l'ensemble de ces définitions montre nettement que le concept de vulnérabilité a pour objectif de montrer quelles seraient les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans ces terrains, suivant les terrains rencontrés en surface et plus précisément suivant les réservoirs contenant la première nappe d'eau souterraine (généralement libre), les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans ces terrains.

Cette vulnérabilité à la pollution doit être considérée sous trois aspects :

➤ L'introduction de polluants dans les nappes phréatiques, c'est-à-dire le passage suivant un trajet vertical de corps polluants entraînés par les eaux d'infiltration ou de fluides polluants, depuis la surface du sol jusqu'à la nappe souterraine à travers le sol et la zone non saturée ;

➤ La propagation de la pollution, c'est-à-dire le déplacement de l'eau ainsi polluée entraînés par l'écoulement de la nappe ; elle peut-être plus ou moins rapide selon les caractéristiques hydrauliques du réservoir et le gradient. Son extension à partir du foyer contaminant est plus ou moins grande suivant les conditions de drainage de la nappe et aussi selon la nature du polluant fixable dans certains cas par le terrain ;

➤ La persistance plus ou moins prolongée après la suppression du foyer de pollution ; cette durée de séjour étant fonction du renouvellement naturel de l'eau dans l'aquifère, la nature physico-chimique de la roche et également la nature du polluant.

On distingue deux types de vulnérabilité à la pollution comme elle est décrite dans la littérature (Schnebelen et al. 2002) :

- La vulnérabilité intrinsèque est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution par les activités humaines.
- La vulnérabilité spécifique est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un polluant particulier ou à un groupe de polluants. Elle prend en compte les propriétés des polluants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

2. Les critères de vulnérabilité

2.1. Critères de vulnérabilité intrinsèque

La vulnérabilité intrinsèque est basée sur la détermination de critères ou facteurs variés intervenants soit sur la nature et/ou la concentration de la contamination, soit sur son temps de transfert comme les sols, la zone non saturée, les propriétés de l'aquifère et le taux de recharge qui entrent dans la vulnérabilité des eaux souterraines (Vrba et Zaporozec, 1994). Les différents critères ou facteurs qui contribuent à l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque essentielles et secondaires sont affichés ci-dessous :

a) Facteurs liés au sol

Les paramètres des sols superficiels comme la texture, la structure, l'épaisseur, la perméabilité verticale des sols régulent la nature et la quantité d'échanges entre la surface et la zone non saturée et la teneur en matière organique et en argile sont les facteurs naturels liés à la vulnérabilité. Le sol présente un facteur essentiel et critique pour la détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines (fertilisants, produits phytosanitaires, dépôts acides), il a une position spécifique par rapport aux autres critères de vulnérabilité des eaux souterraines vue que lui-même est vulnérable.

b) Facteurs liés à la zone saturée

L'hétérogénéité de la zone saturée a une influence sur sa vulnérabilité qui varie dans l'espace et avec la profondeur. Les principaux paramètres qui déterminent la vulnérabilité d'un aquifère comprennent sa nature (libre, captive ou semi captive), la géométrie, la porosité, la perméabilité, la propriété d'emménagement, la transmissivité et le gradient hydraulique des eaux souterraines. (Schnebelen. 2002)

c) Facteurs liés à la recharge

La recharge correspond à la quantité d'eau annuelle nette infiltrée traversant la zone non saturée et atteignant l'aquifère (zone saturée) pendant un certain temps spécifique donné. Elle dépend de l'infiltration efficace et de sa répartition spatiale dans l'espace et dans le temps. Par conséquent, elle dépend des précipitations et de l'évapotranspiration (ETP) de la zone étudiée, mais également de la topographie et de la nature des formations. Donc elle constitue un facteur de transfert des polluants vers les eaux souterraines.

d) Facteurs complémentaires

D'autres critères influencent sur la vulnérabilité des eaux souterraines mais d'une importance inégale, et varient d'une région à l'autre, ceux sont des facteurs naturels secondaires incluant la topographie, l'interaction entre eau de surface et eau souterraine, la nature de la formation recouvrant l'aquifère et aussi des discontinuités verticales telles que les failles pouvant, dans certaines conditions, jouer le rôle de drain et augmenter très sensiblement les vitesses d'infiltration de la surface vers la nappe.

2.2. Critères de vulnérabilité spécifique

- Comportement du polluant potentiel (milieu fixe) : selon leur nature, les polluants se comportent dans le milieu de manière spécifique. Ce comportement dépend des caractéristiques du milieu mais également des propriétés physico-chimiques du composé lui-même. Les principaux phénomènes susceptibles d'intervenir sont géochimiques (réactions acides bases, d'oxydoréduction, de désorption, etc...), biochimiques (biodégradation, synthèse cellulaire) physiques (diffusion, évaporation, filtration, etc....) ou biophysiques (transport de germes, etc....).
- Capacités dispersives et épuratoires des sols : face à un polluant donné, les sols ont des propriétés épuratoires plus ou moins développées et spécifiques de ce polluant ;
- -Intrusions marines (présence ou non de biseau salé) : dans le cas de la présence d'un biseau salé en équilibre avec une nappe d'eau souterraine, la salinisation de la nappe liée à une surexploitation constitue une pollution potentielle ;
- Qualité du réseau hydrographique : dans le cas où il alimente les eaux souterraines et selon son extension, sa vulnérabilité et la qualité de ses eaux, le réseau hydrographique peut être vecteur de contaminations vers les eaux souterraines ;
- Typologie de l'occupation du sol : l'occupation du sol conditionne les volumes et la nature des polluants potentiels. Elle peut être de type naturel (forêt/nature) ou agricole (cultures, élevage) ou urbain (habitat, tissu industriel, etc....) ;
- Points sensibles : sur certains sites de par l'activité à risque qui y est pratiquée, la vulnérabilité de la nappe est augmentée significativement. Ce sont les surfaces agricoles, les décharges (aux normes ou non), les rejets des établissements classés, les voies de circulation, les prélèvements dans la nappe (modifiant ou non localement les écoulements et favorisant localement les transferts surface/nappe).

3. Méthodes de cartographie de la vulnérabilité :

Il existe différentes méthodes permettant la cartographie de la vulnérabilité des systèmes aquifères, parmi lesquelles on cite :

3.1. Méthode " GOD" de Foster et Hirata (1989) :

Cette méthode est utilisée quand certaines données font défaut, sont insuffisantes et/ou couvrent mal la zone d'étude.

- G** : Groundwater, nature de l'aquifère (libre, semi-captive, captive) ;
- O** : Ovealle, nature lithologique et degré de consolidation de la zone non saturée ;
- D** : Depth, profondeur jusqu'au niveau phréatique.

Chacun des trois paramètres reçoit une valeur comprise entre 0 et 1. L'indice de vulnérabilité globale s'obtient en multipliant les trois valeurs. La note finale ainsi obtenue est comprise entre 0 (pas de vulnérabilité) et 1 (grande vulnérabilité).

3.2. Méthode NRA. National River Authority Britannique (1991) :

Cette méthode prend en considération lors de l'évaluation du risque lié à la pollution, deux facteurs en relation avec la nature des terrains de recouvrement.

Trois principales classes de vulnérabilité relative à la perméabilité, à la nature du sol et à l'extension de l'aquifère ont été retenues

3.3. Méthode de Suais et Dubar (1993) :

Lors de l'évaluation de la carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe de Guatemala, ces deux auteurs se sont essentiellement basés sur l'analyse des trois compartiments à savoir : le sol, la zone non saturée et la zone saturée.

➤ Le sol : Le compartiment "sol" a été analysé en tenant compte de sa nature, sa profondeur, son épaisseur et sa capacité à retenir et/ou à dégrader les polluants.

➤ La zone non saturée : Différentes classes de vulnérabilité liées à l'épaisseur de la zone non saturée ont été adoptées par Suais et Dubar. Ces classes au nombre de 17 varient en fonction de l'épaisseur de cette zone et d'autres paramètres notamment :

- La variation verticale de faciès en fonction des contrastes de perméabilité avec les couches encaissantes ;
- La nature des discontinuités de faciès ;
- L'épaisseur relative et la position de la couche la moins perméable à l'intérieur du massif non saturé.

➤ La zone saturée :

D'après la méthode de Suais et Dubar, la détermination de la vulnérabilité intrinsèque, liée à la zone saturée, est essentiellement basée sur l'analyse des facteurs hydrodynamiques, à savoir la perméabilité, la transmissivité, la piézométrie, les fluctuations piézométriques et la relation nappe-cours d'eau.

3.4. Méthode EPIK (J-P.Tripet et al ; 1997) :

C'est la première méthode dédiée spécifiquement à l'aquifère karstique sensu stricto (Doerfliger et Zwahlen, 1997). Elle a été développée dans le but de délimiter les périmètres de protection des captages, conformément à la législation suisse, à partir d'une base cohérente et rigoureuse. Un des avantages de cette méthode est de traduire la sensibilité des eaux souterraines vis-à-vis de tout type de contaminant. La méthode est systématique puisqu'elle propose une analyse détaillée du bassin d'alimentation de la source karstique découpé en un maillage régulier. Elle est basée sur quatre critères :

Les quatre critères pris en compte dans la méthode "EPIK" sont :

E : Zone intensément karstifiée à perméabilité très élevée (Epikarst) ;

P : Propriété de la couverture (Protectives Cover) ;

I : Condition d'Infiltration (Infiltration Condition) ;

K : Développement du réseau karstique (karstique Network).

3.5. La Méthode GALDIT

Elle a été développée par Chachadi et Lobo Ferreira en 2001, elle utilise les données d'entrée en fonction des situations locales de chaque cellule, avec la possibilité d'utiliser des classifications différentes suivant les conditions pour évaluer l'intrusion marine sur les aquifères côtiers. Elle utilise six paramètres hydrogéologiques : Type d'aquifère [G], la conductivité hydraulique de couche aquifère (Perméabilité de la zone saturée) [A], la Profondeur de la nappe [L], la distance du rivage, l'impact d'intrusion d'eau de mer [I] et enfin l'épaisseur de la couche aquifère [T]. Ces facteurs combinés se trouvent à inclure les exigences de base nécessaires pour évaluer leur potentiel d'intrusion d'eau de mer (Schnebelen et al., 2002).

3.6. La méthode RISK

Cette méthode s'inspire de la méthode suisse EPIK et de la méthode dérivée de cette dernière en raison de leurs spécificités envers les aquifères karstiques. Elle repose sur quatre critères caractéristiques du fonctionnement et de la structure des aquifères karstiques [R] pour la roche aquifère [I] pour les conditions d'infiltration [S] : pour le sol et la couverture protectrice et [K] pour le degré de développement de la karstification (fig. 99). La caractérisation des critères est décrite pour chacun des critères ; ces derniers sont identifiés à l'aide d'éléments de définition et sont classés en 5 classes, d'indice de 0 à 4, du moins au plus vulnérable, la classe intermédiaire 2 correspondant à l'alternative moyennement vulnérable.

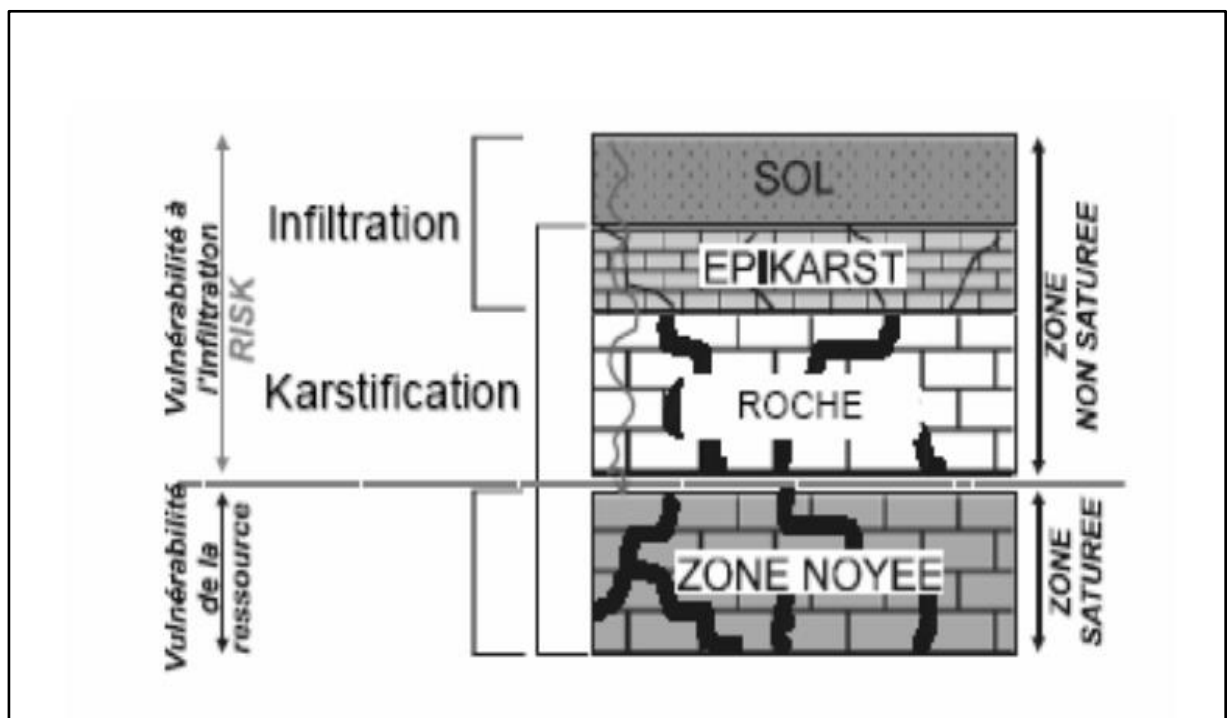


Figure 88: Les critères de la vulnérabilité intrinsèque de la méthode RISK (modifiée d'après Petelet Giraud et al, 2001)

3.7. Méthode DRASTIC :

La méthode DRASTIC prend en compte uniquement les facteurs hydrogéologiques qui influent sur la vulnérabilité intrinsèque, c'est-à-dire les propriétés physiques qui ont un rôle dans la migration et l'atténuation d'un contaminant au sein du complexe sol-zone aérée-aquifère et s'applique à des unités hydrogéologiques de superficie supérieure à 400 000 m² (40 Ha). Elle repose sur quatre hypothèses fondamentales :

- La source de contamination potentielle est située à la surface du sol ;
- Les contaminants sont entraînés depuis la surface du sol jusqu'à l'aquifère par infiltration ;
- Le contaminant a la même mobilité que l'eau souterraine ;
- Le type de contaminant n'intervient pas dans la définition de la vulnérabilité.
- La méthodologie DRASTIC considère en fait que le comportement du polluant depuis la surface du sol jusqu'à la zone saturée est le même que celui d'une eau de précipitation soumise à l'infiltration.

Cette méthode exige dans un premier temps la caractérisation détaillée des unités hydrogéologiques du territoire à étudier, notamment la définition de sept paramètres physiques qui sont d'ailleurs à l'origine de l'appellation DRASTIC et qui interviennent dans les phénomènes de transport et d'atténuation des contaminants.

4. Application de la méthode DRASTIC à la zone Nord-est de la plaine de Tadla

La méthode DRASTIC est une méthode développée par Aller et al. (1987), elle génère un indice ou 'score' pour le potentiel de pollution des ressources en eau souterraines. Cet indice s'étale sur un intervalle d'entiers allant de 23 à 230, il faut noter que la vulnérabilité à la pollution est plus importante pour des notes plus élevées. Elle utilise sept paramètres hydrogéologiques : la profondeur du plan d'eau de la nappe souterraine [D], la recharge nette [R], la nature lithologique de l'aquifère [A], la texture du sol [S], la topographie -pente du terrain [T], l'impact de la zone non saturée [I] et enfin la conductivité hydraulique ou perméabilité de la zone saturée [C]. Chaque critère est cartographié avec un index appelé aussi note (n), allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération (p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en termes de vulnérabilité. L'index de vulnérabilité final (ID) est la somme pondérée des sept paramètres selon la formule suivante :

$$\text{Indice DRASTIC} = DpDn + RpRn + ApAn + SpSn + TpTn + IpIn + CpCn$$

Où D. R. A. S. T. I. C. sont les paramètres cités plus haut.

n : notation accordée à chaque paramètre ;

p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

Les cartes obtenues donnent une visualisation du degré relatif de vulnérabilité d'un secteur de la zone d'étude. Le potentiel de pollution augmente dans le même sens que l'indice de vulnérabilité calculé (ID). Les valeurs obtenues de cet indice représentent la mesure de la

vulnérabilité à la pollution de l'aquifère. Leur gamme possible se retrouve entre 23 et 226 dans le cas de la version standard. Selon la littérature de l'application de la méthode DRASTIC standard (Aller et al. 1987. Schnebelen et al. 2002) les valeurs sont donc regroupées en 8 classes.

Tableau 20 : Classification de la vulnérabilité dans DRASTIC standard (Aller et al. 1987)

<i>Intervalles de l'indice</i>	<i>Indice DRASTIC</i>	<i>Degré de Vulnérabilité</i>
23-79	8	Très Faible
80-99	7	Faible
100-119	6	
120-139	5	Moyenne
140-159	4	
160-179	3	Élevé
188-199	2	
200-226	1	Très élevé

4.1. Système de pondération (poids)

Selon l'importance de chaque paramètre dans la méthode DRASTIC, chacun de ces sept paramètres est affecté à un poids multiplicatif reflétant son degré d'influence (Tableau 23)

Tableau 21 : Poids des paramètres dans la méthode DRASTIC standard (Aller et al. 1987)

Symbole	Paramètre	Propriétés	Poids
D	Profondeur de la nappe	<i>Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met beaucoup de temps pour atteindre la surface piézométrique.</i>	5
R	Recharge nette	<i>Véhicule principal pour le transport du contaminant, plus cette recharge est grande, plus le risque de contamination est élevé.</i>	4
A	Lithologie de l'Aquifère	<i>Caractérisée par la granulométrie des terrains saturés. Elle intervient dans le piégeage du polluant qui peut s'échapper au pouvoir d'absorption du sol. Plus la granulométrie est fine, plus le piégeage du polluant est grand.</i>	3
S	Sol	<i>Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des métaux lourds est importante et plus la protection des eaux souterraines est grande.</i>	2
T	Topographie	<i>Plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible.</i>	1
I	Zone non saturée	<i>Son impact est déterminé à partir de la texture des terrains qui la constituent. La percolation du polluant jusqu'à la surface piézométrique est d'autant plus grande que cette texture est favorable (graviers, sables grossiers ...)</i>	5
C	Perméabilité	<i>Plus ce paramètre est grand, plus le transfert du polluant est rapide.</i>	3

4.2. Système de notation (cotes)

Dans la méthode DRASTIC standard, on a accordé une cote à chaque classe de chaque paramètre parmi les sept constituants cette méthode. Les notes attribuées à chacun des critères de vulnérabilité peuvent varier selon les conditions et les objectifs prioritaires. Le tableau ci-dessous présent les notations accordées aux paramètres, la cote 10 est accordé au degré plus élevé de la vulnérabilité (Tableau 24).

Tableau 22 : Cotes accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC dans la zone d'étude

Paramètre DRASTIC	Classe /Lithologie	Cotes
D profondeur de la nappe en m	0-2	10
	2-4	9
	4-6	8
	6-8	7
	8-11	6
	11-14	5
	14-18	4
	18-25	3
	25-33	2
R (Recharge nette en m)	2-5	1
	5-10	3
A (Lithologie de l'aquifère)	Sol	1
	Argile	2
	Argile Sableuse	3
	Sable Argileux	4
	Sable	6
	Grés	8
	Gravier, Calcaire	9
S (nature de sol)	Marne, Argile	2
	Marno-calcaire	4
	Limon	5
	Sable fine, Argile sableuse	7
	Grés	9
	Alluvions	10
	0-3	10
	3-6	9

T (Pente en %)	6-8	8
	8-10	7
	10-12	5
	12-17	4
	17-25	2
	>25	1
I (Lithologie de la zone non saturé)	Sol, argile et marne	1
	Argile sableuse	2
	Limon	3
	Marno-Calcaire	4
	Calcaires	5
	Sable	7
	Grés, Conglomérat	8
	Dépôt des oueds, Gravier	9
C (Perméabilité de la zone saturé en m/s)	$<10^{-9}$ Sol	1
	10^{-9} - 10^{-7} Argile Sableuse	3
	10^{-7} - 10^{-5} Sable argileux	4
	10^{-5} - 10^{-3} Sable	6
	10^{-3} - 10^{-1} Grés	7
	10^{-1} - 10^1 Gravier	9

5. Données utilisées

L'étude de la vulnérabilité de la nappe à la pollution fait appel à plusieurs disciplines et de diverses données. Ces informations sont le plus souvent contenues dans des rapports ou des banques de données existantes. Ainsi, avant de déployer des efforts coûteux dans la réalisation des travaux de terrain, on a établi l'inventaire de ces données, jugé de leur fiabilité et les a analysé afin de s'en servir.

Le tableau suivant indique les types et les sources d'informations géo-scientifiques disponibles.

Tableau 23 : Types et sources d'informations disponibles.

Type d'information	Banque de données	Organismes dépositaires
Données géologiques	Cartes géologiques Log de puits et forages Données géophysiques	Sorties de terrain Universités ABHOER ORMVAT
Données pédologiques	Cartes de faciès Données des coupes des puits et des forages Carte pédologique du périmètre	Universités ABHOER.
Données hydrologiques et hydrogéologiques	Piézométrie Paramètres hydrodynamiques Recharge PH, T°, Salinité et Conductivité	Mesures sur terrain Universités ABHOER
Occupation des sols	Classes d'occupation Sources de pollution	H.C.P A.B.H.O.E.R.

6. Collecte des données

Pour chacun des sept paramètres considérés par la méthode DRASTIC, on réalise une carte thématique sur laquelle, sont délimitées des zones en fonction des intervalles établis par le système de cotation DRASTIC.

La superposition des sept cartes thématiques ainsi obtenues, donnera la carte finale celle de la vulnérabilité ; le tracé des cartes peut se faire manuellement ou par ordinateur en utilisant les systèmes d'information géographique (SIG).

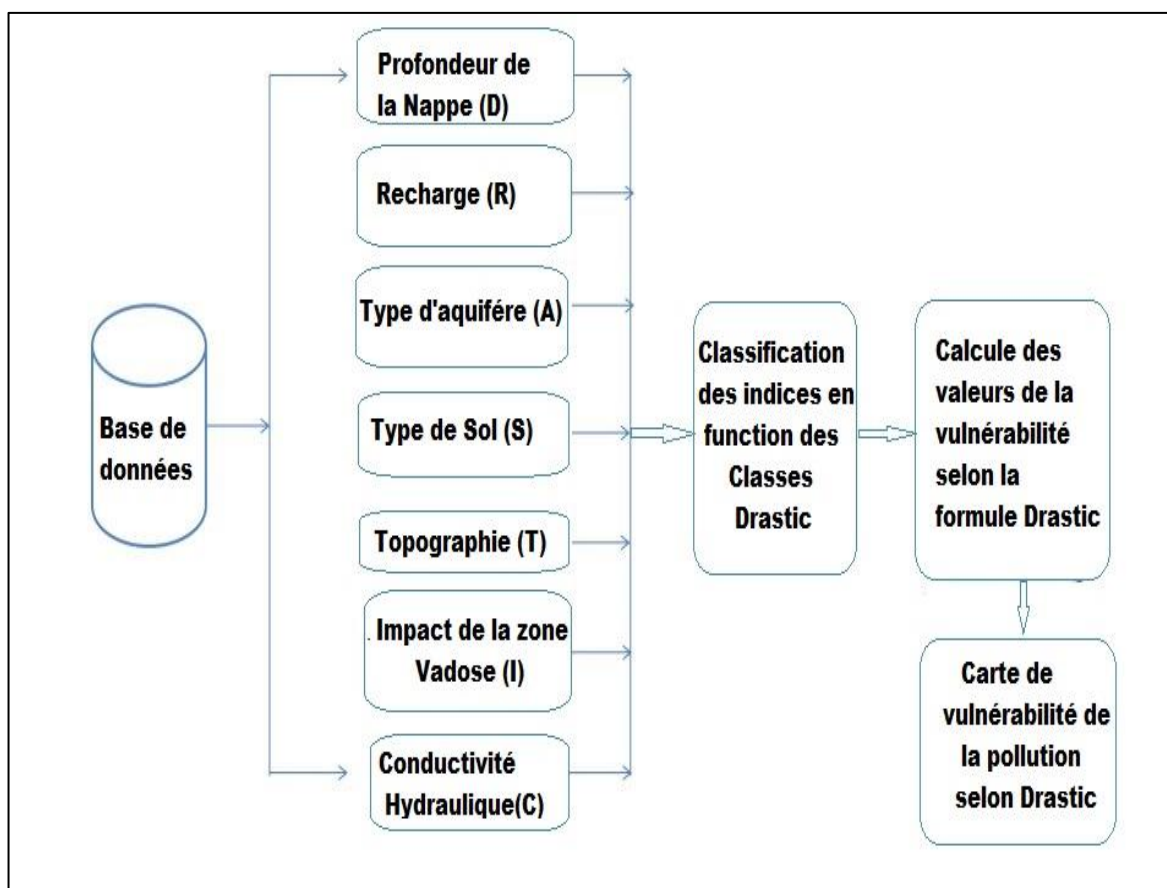


Figure 89: organigramme présentant l'intégration des sept paramètres principaux de la méthode DRASTIC

7. Cartographie et évaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères (unicritères)

La fiabilité de la méthode DRASTIC repose sur une caractérisation détaillée des unités hydrogéologiques (en sous unités) de la zone d'étude ainsi qu'en l'exactitude des sept paramètres utilisés. (Kachi, 2007) Dans cette logique, on a subdivisé notre zone d'étude en cellules régulières de 2,5 km².

Un système de notations prédéfini est appliqué pour chaque paramètre dans la zone d'étude. Les résultats sont présentés sous forme de cartes thématiques qui permettent de visualiser le degré relatif de vulnérabilité. La notation la plus forte correspond au degré de vulnérabilité le plus élevé pour toutes les cartes thématiques

7.1. Carte thématique du critère D (Profondeur de la nappe)

Une campagne des mesures piézométriques a été réalisée en août 2015. Ces mesures ont été utilisées dans la cartographie et à l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère relative à la profondeur de la nappe (D).

La profondeur de la nappe est l'un des paramètres les plus importants (poids=5) dans la cartographie et l'évaluation à la pollution de l'aquifère

Tableau 24 : Classes et notes retenues pour D

Classe	Profondeur	Notation	Poids	Valeur
I	0 – 1,5	10	5	52
II	1,5 – 4,5	9		45
III	4,5 – 9	7		35
IV	9 – 15	5		25
V	15 – 23	3		15
VII	23 – 31	2		10
VIII	>31	1		5

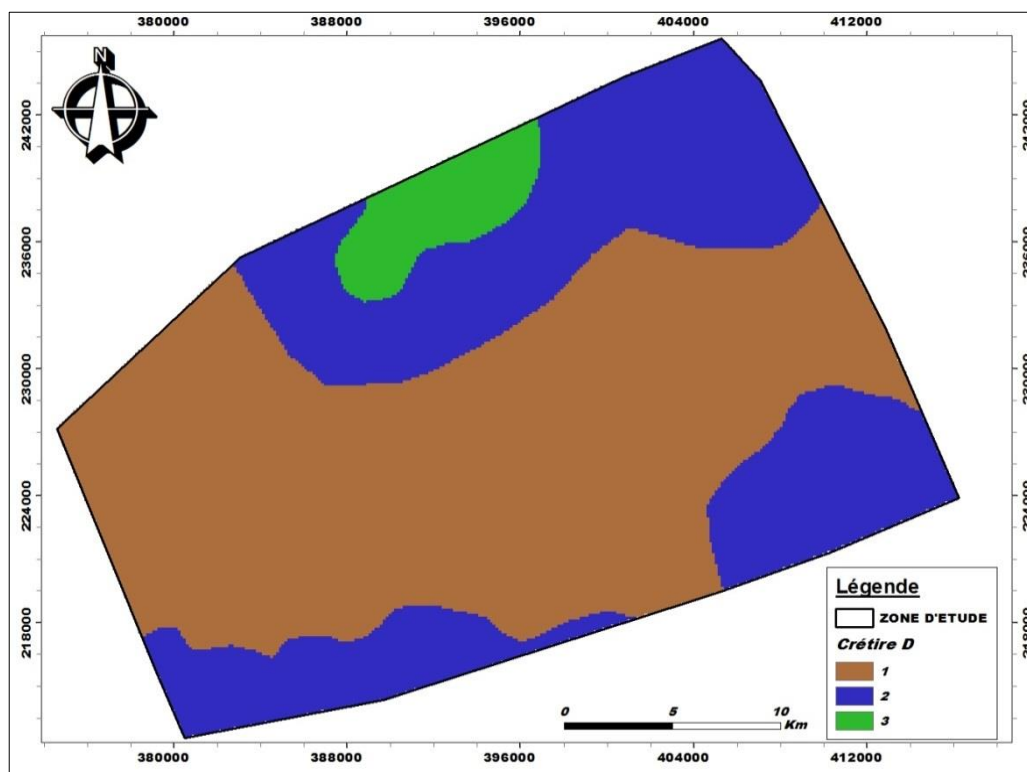


Figure 90 : Carte de vulnérabilité de la nappe phréatique relative à la profondeur de l'eau (D)

7.2. Carte thématique du critère R (Recharge efficace)

L'estimation de la recharge d'un aquifère est un paramètre qui est difficile à déterminer à cause de la multiplicité des facteurs qui l'affectent. La présence de terroirs irrigués et non irrigués (Badraoui et Stitou, 2003) constitue le facteur ayant le plus d'effet sur le taux de recharge.

Elle définit la quantité de l'eau par unité de surface qui s'infiltré et rejoint l'aquifère. Cette eau permet de transporter les polluants de la surface de la terre vers la zone saturée en traversant la zone vadose. Généralement, plus la quantité d'eau est importante, plus la possibilité de contaminer la nappe est élevée.

Le calcul de la fraction infiltrée se fait par plusieurs méthodes selon la nature de l'aquifère et le type de climat qui caractérise la région. Dans notre région, les nappes phréatiques sont rechargées par infiltration directe des eaux météoriques. Nous avons exploité la base des données de L'ABHOER entre 1985-2016, les coupes des puits et la carte géologique de la zone d'étude pour calculer le taux de recharge nette des nappes. La formule d'estimation de la recharge nette est citée ci-dessous :

$$R_{\text{nette}} = (P - \text{ETR}) * W = (E + I) * W$$

Tableau 25 : Classes et notes retenues pour R

Classe	Recharge (cm/an)	Notation	poids	Valeur
I	5 – 10	3	4	4
II	10-17	5		6
III	17-25	8		12
IV	<25	9		24

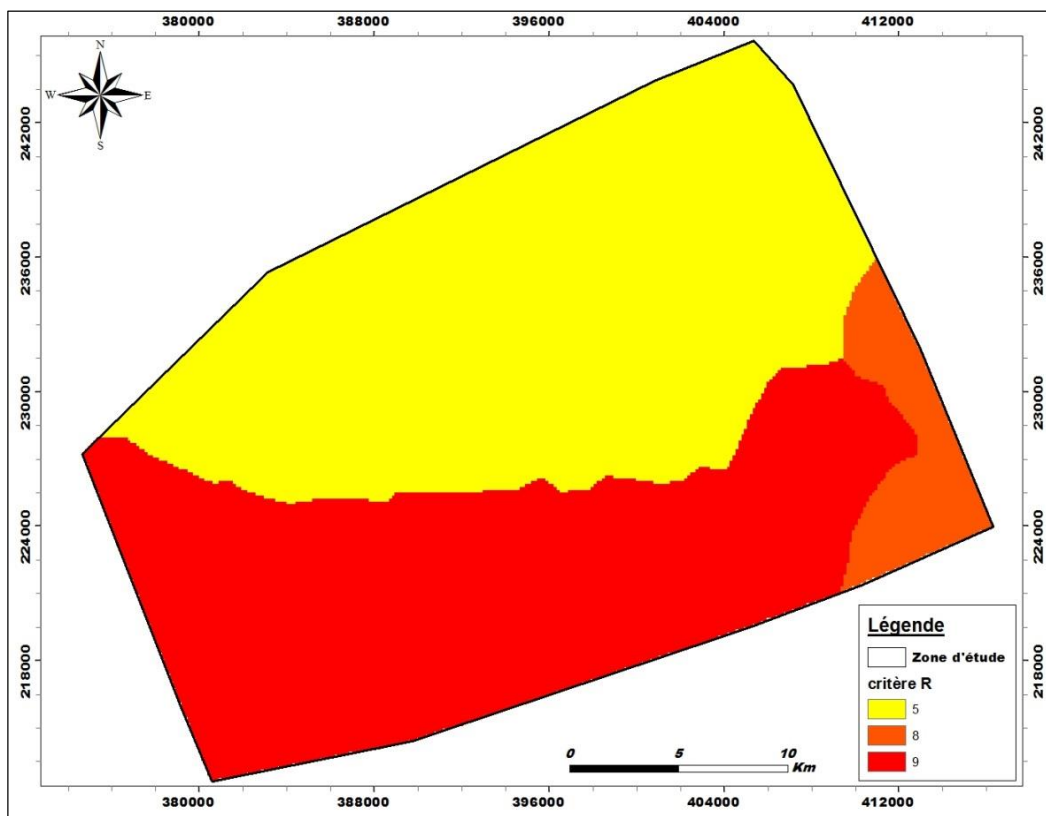


Figure 91 : Carte de vulnérabilité de la nappe relative à la Recharge efficace (R)

7.3. Carte thématique du critère A (nature des matériaux aquifères)

La circulation et la propagation d'un contaminant dans la zone saturée dépendent de la texture et de la distribution lithologique des couches de l'aquifère. Cela est toujours contrôlé par la granulométrie, la porosité, la perméabilité et la lithologie des formations géologiques. La conductivité hydraulique contrôle la migration des contaminants et leur dispersion du point d'injection, à la surface, jusqu'à la zone saturée et, par conséquent, leurs concentrations dans la nappe aquifère. La carte de conductivité hydraulique est obtenue par affectation d'un facteur de perméabilité pour chaque classe lithologique (Castany, 1982 et Banton, 1997).

Tableau 26 : Classes et notes retenues pour A

Matériaux	Note typique	Poids	Valeur
Argile	2	3	6
Marnes plastiques	3		9
Sables phosphatés, Marnes sableuses	4		12
Marno-calcaire	5		15
Calcaire marneux	6		18
Calcaire phosphaté	7		21
Calcaire massif	8		24
Conglomérat	9		27
Calcaire fracturé	10		30

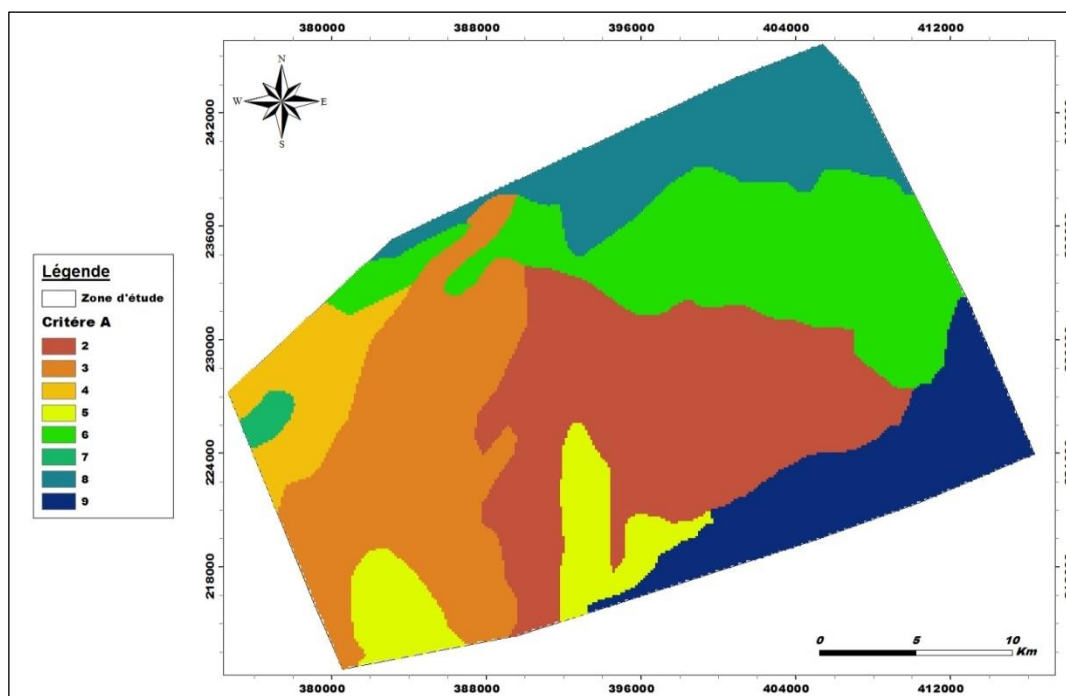


Figure 92: Carte de vulnérabilité de la nappe relative à lithologie de l'aquifère (A)

7.4. Carte thématique du critère S (type de sol)

Les caractéristiques du sol guident le mouvement descendant des contaminants. La présence de matériaux fins (argiles, silts et limons) et de la matière organique dans le sol diminue la perméabilité intrinsèque, et retarde la migration des contaminants, par les processus physico-chimiques (adsorption, échange ionique, oxydation, biodégradation) (Smida, et al 2009). Le sol joue un rôle dans la filtration et la rétention de certaines substances. Cette action est d'autant plus efficace que la granulométrie est plus faible.

Tableau 27 : Classes et notes retenues pour S (type de sol)

Type de sol	Note	Poids	Valeurs
Graviers, conglomérat, Alluvions	10	2	20
Croute calcaire, calcaire	9		18
Phosphates marneux	6		12
Limons	5		10
Argiles	2		4

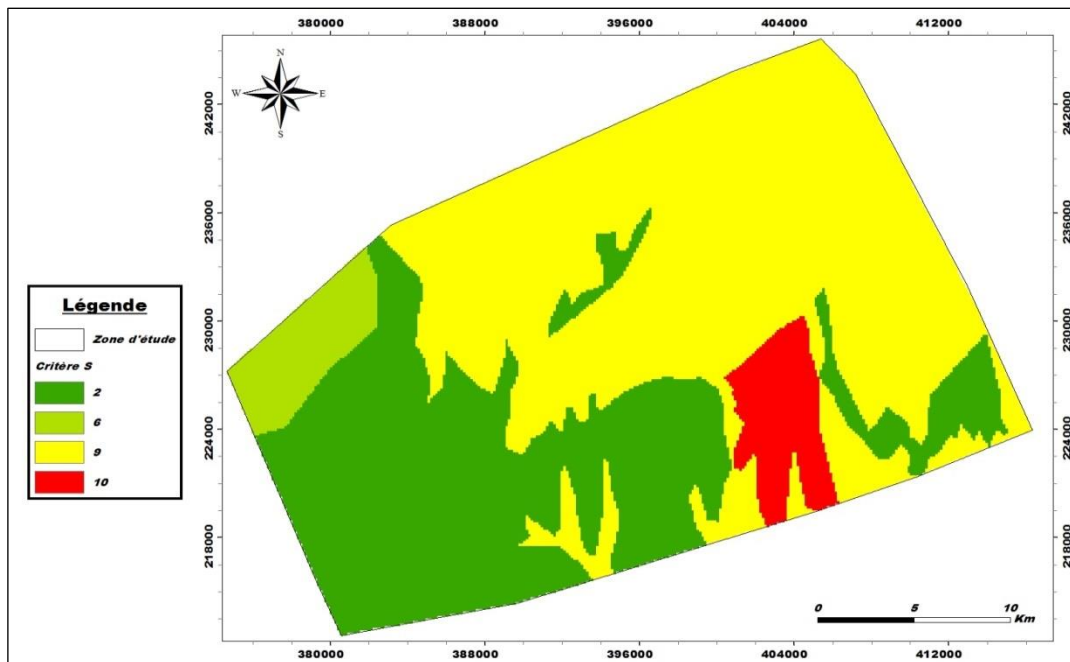


Figure 93 : Carte de vulnérabilité de la nappe relative au type du Sol (S)

7.5. Carte thématique du critère T (Topographie)

Le paramètre topographie est représenté par les valeurs de la pente en degrés. Il traduit la capacité des eaux superficielles à introduire des agents polluants vers la nappe en influençant les taux d'infiltration et de ruissellement. Le modèle numérique de terrain a été utilisé pour calculer la pente en tous points de la zone d'étude. La carte élaborée après classification de chaque pixel, en fonction des systèmes de cotation, montre que la quasi-totalité de la région est caractérisée par une pente très faible, inférieure à 2°.

Tableau 28 : Classes et notes retenues pour T (topographie)

Plage de la pente (%)	Note	Poids	Valeurs
0 à 2	10	1	10
2 à 6	9		9
6 à 12	5		5
12 à 18	3		3
> 18	1		1

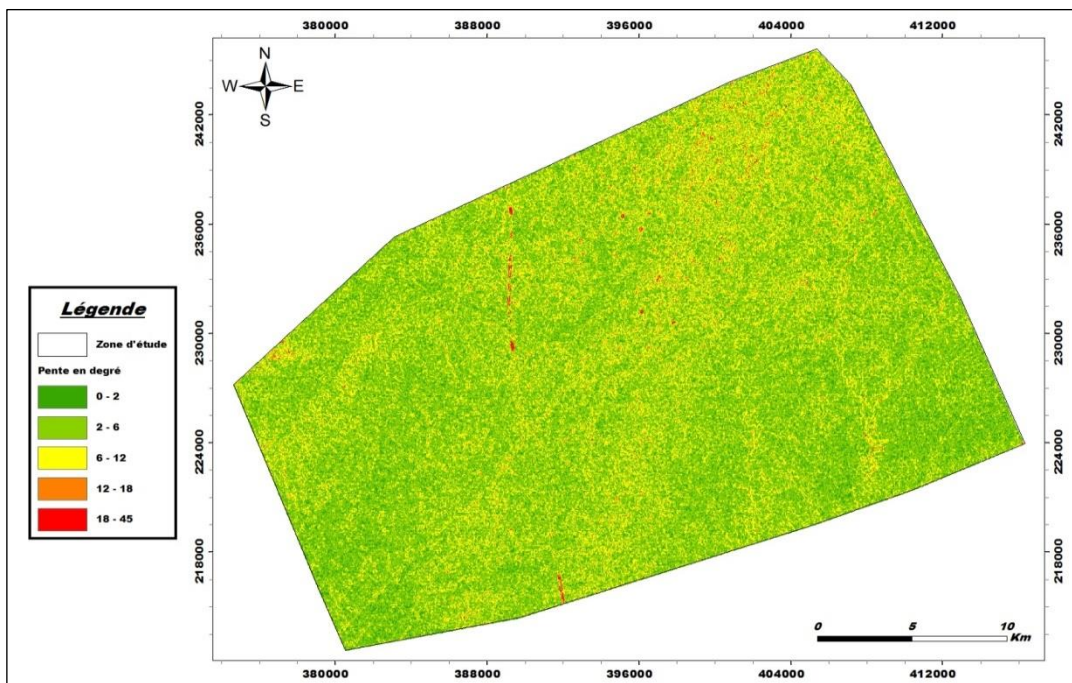


Figure 94: Carte de vulnérabilité de la nappe relative à la Pente (T)

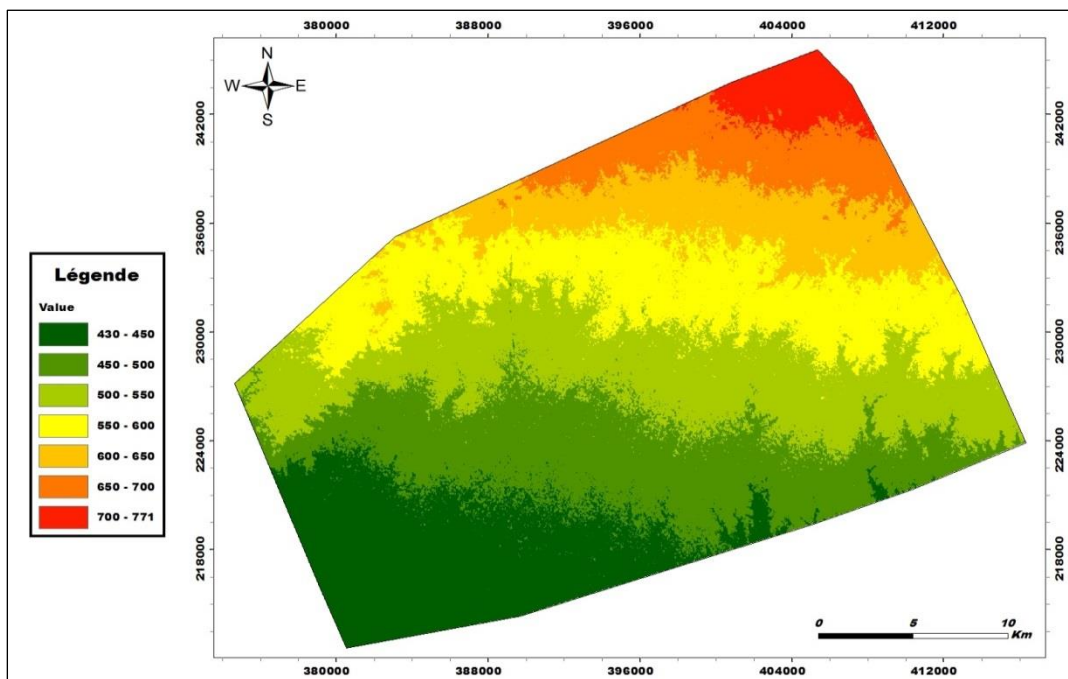


Figure 95: Carte d'altitude de région étudiée

7.6. Carte thématique du critère I (Zone non saturée)

La zone vadose ou zone non saturée (ZNS) du sol est la partie du sol et/ou du sous-sol situé à l'interface entre atmosphère-pédosphère et la nappe phréatique. L'influence de cette zone dans la pollution potentielle de l'aquifère dépende essentiellement de sa perméabilité et de sa capacité d'atténuation. La carte « I » est obtenue par l'interprétation et la corrélation entre les différents forages réalisés dans la zone d'étude. La carte matricielle montre que la lithologie de la zone vadose en sud représente des notes DRASTIC importantes. Ce qui veut dire que cette zone non saturée en eau est constituée de matériaux perméables, par conséquent, le risque de pollution est élevé.

Tableau 29 : Classes et notes retenues pour I (zone non saturée)

Nature lithologique	Note	Poids	Valeurs
Argile et limon	1	5	5
Marnes	2		10
Calcaire	3		15
Marno-calcaire	4		20
grès tendre et calcaire phosphaté tendre	5		25
Conglomérat	6		30
Sables phosphates	7		35
Graviers et alluvions	9		45

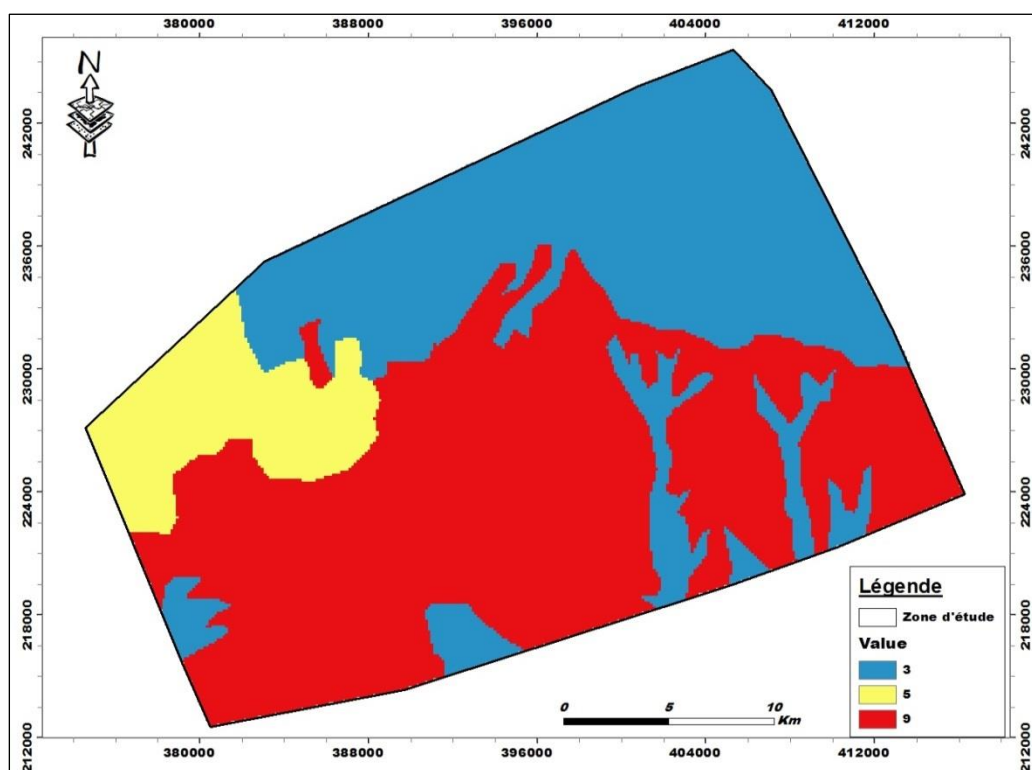


Figure 96: Carte de vulnérabilité de la nappe relative à la Zone non Saturé (I)

7.7. Carte thématique du critère C (Conductivité hydraulique)

La conductivité hydraulique exprime l'aptitude des formations géologiques à transmettre l'eau avec d'éventuels polluants sous l'effet d'un gradient hydraulique jusqu'à la zone saturée. (Azzi et al, 2014). Les coupes des puits de l'ABHOER donnent une idée sur la lithologie et par la suite sur conductivité hydraulique tout en affectant un facteur de perméabilité pour chaque classe lithologique ;

Tableau 30 : Classes et notes retenues pour C (la conductivité hydraulique)

Plage de la perméabilité (en m/s)	Note	Poids	Valeur
$<10^{-9}$	1	3	3
$10^{-9} - 10^{-7}$	2		6
$10^{-7} - 10^{-5}$	4		12
$10^{-5} - 10^{-3}$	6		18
$10^{-3} - 10^{-1}$	8		24
$10^{-1} - 10$	9		27

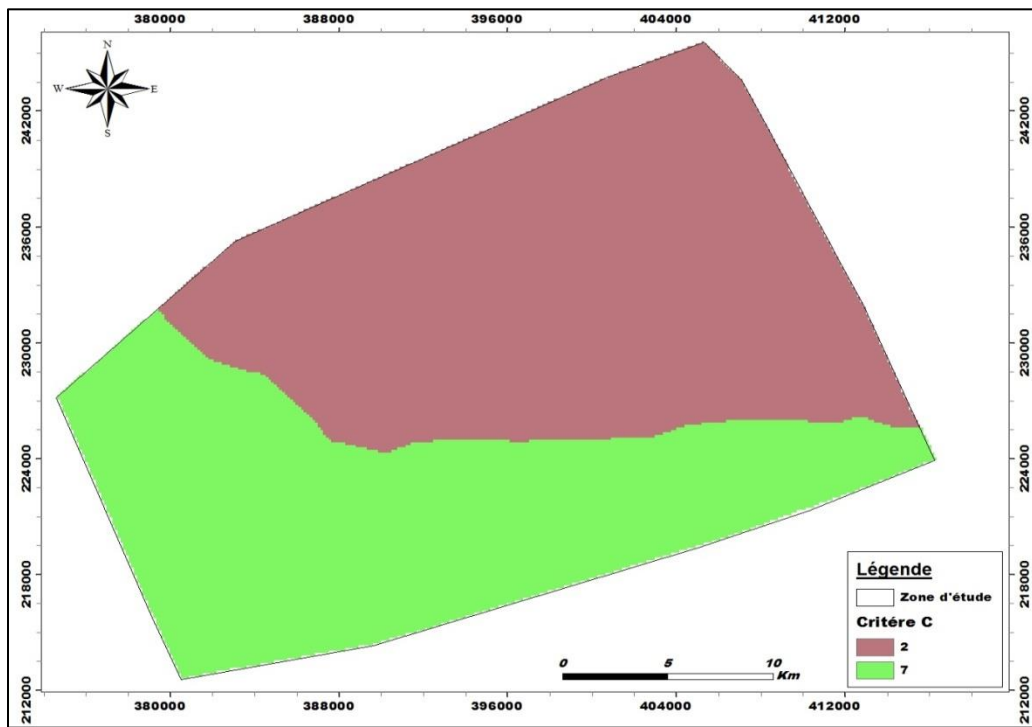


Figure 97: Carte de vulnérabilité de la nappe relative à la Perméabilité (C)

Les différentes cartes des paramètres sont obtenues par digitalisation et classification des données en utilisant le logiciel Arc Gis.

La superposition des sept cartes pondérées permet d’obtenir la carte de l’indice DRASTIC qui s’effectue sur la base d’une combinaison linéaire entre les différentes valeurs données pour chaque polygone dans la table attributive (fig. 98).

L’analyse de la carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe de la zone septentrionale de la plaine de Tadla montre une variation hétérogène de la vulnérabilité dans l’ensemble de la zone, avec des valeurs de l’indice DRASTIC (ID) variant de 62 à 169 réparti spatialement dans la zone d’étude selon quatre classes quand on a déterminé par la reclassification des résultats.

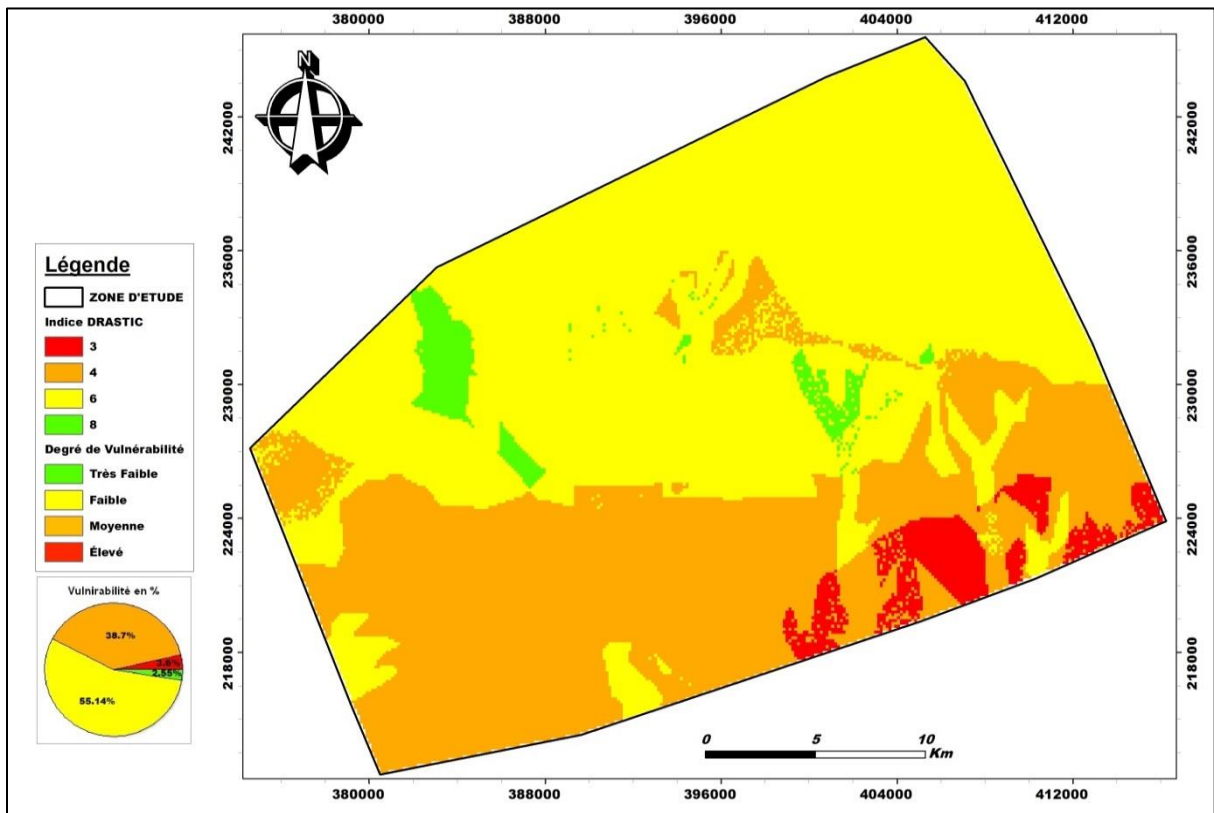


Figure 98: Carte de vulnérabilité intrinsèque à la pollution (Application de la méthode DRASTIC)

La répartition spatiale de ces quatre classes de vulnérabilité montre que :

- **Zone la plus vulnérable** : et qui occupent 3.6 % de la surface totale étudié sont localisés essentiellement dans la partie sud-est, Dans ces zones presque tous les paramètres interviennent dans l'augmentation du degré de vulnérabilité : la profondeur de la nappe qui varie entre 12 et 25 m, la recharge de la nappe qui dépasse 25 cm/ans et la nature du sol qui est caractérisé par la présence de texture alluvion et limon qui facilite l'infiltration.
- **Zone moyennement vulnérable** : représentée dans une large superficie de la plaine du Tadla soit 38.7% de la superficie totale, ils se rencontrent dans la totalité de la partie sud (zone irrigué et les zones proche de l'Oum Er-bia) et aussi dans la partie nord-ouest de la zone d'étude. Généralement la pente topographique est faible avec la présence dans certains endroits de larges cuvettes favorisant l'infiltration des eaux. La profondeur du niveau piézométrique est fonction directe du taux de recharge engendrée par l'infiltration des eaux de pluie.
- **Une zone faible à très Faible vulnérable** : occupent les plus grandes superficies, soit 57.69% de la superficie totale, ils se rencontrent dans la totalité de la zone Nord. Les différents paramètres agissant sur la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines présentent des valeurs intermédiaires. Le taux de recharge est relativement faible (zone non irriguée et pluviométrie inférieure généralement à 350 mm), et la faible perméabilité qui inférieure à 10⁻⁵, ces paramètres sont responsable de ce degré de vulnérabilité.

Conclusion

Dans cette étude, Le modèle DRASTIC couplé à un SIG a été utilisé pour évaluer la vulnérabilité de la nappe des Béni Amir à la pollution. Les cinq paramètres DRASTIC : la profondeur des eaux souterraines D, la recharge nette R, le sol S, la topographie T et l'impact de la zone non saturée I, ont été élaborés et classés pour calculer des indices de vulnérabilité. La répartition spatiale des degrés de vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique de la zone nord-est de la plaine de Tadla est généralement de très faible à plus vulnérable, les indices variant entre de 62 à 169, La répartition spatiale de ces quatre classes de vulnérabilité montre que :

- Zone la plus vulnérable : et qui occupent 3.6 % de la surface totale étudié sont localisés essentiellement dans la partie sud-est,
- Zone moyennement vulnérable : représentée dans une large superficie de la plaine du Tadla soit 38.7% de la superficie totale, ils se rencontrent dans la totalité de la partie sud (zone irrigué et les zones proche de l'Oum Er-bia) et aussi dans la partie nord-ouest de la zone d'étude.
- Une zone faible à très Faible vulnérable : occupent les plus grandes superficies, soit 57.69% de la superficie totale, ils se rencontrent dans la totalité de la zone Nord.

Cette approche spatialisée de la vulnérabilité permet aux organismes intéressés d'assurer une gestion durable de la ressource en eau souterraine. Elle constitue un support d'aide à la décision en matière de planification et d'aménagement du territoire en identifiant les zones les plus menacées par la pollution des aquifères.

Chapitre VI : Étude hydrochimique de la zone septentrionale de la plaine de Tadla

Introduction

Il est évident que le chimisme naturel des eaux dépend principalement de la nature des formations géologiques des milieux traversés et du temps de séjour des eaux ; en effet, l'interaction eau-roche est responsable de la modification des teneurs des éléments majeurs constitutifs (calcium, magnésium, sodium, potassium, chlorure, sulfate et bicarbonate, etc..). Les concentrations de ces éléments naturels sont conditionnées par divers facteurs, tels que les facteurs climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre aquifères et les eaux de surface. Dans la région de Tadla, le chimisme des eaux souterraines est souvent influencé par l'effet de la dissolution des formations géologiques, les rejets industriels et l'activité agricole. Le présent chapitre a été mené afin de connaître le régime, l'origine, le mécanisme du chimisme, l'évolution des éléments chimiques décrits et de caractériser la qualité des eaux souterraines de la partie Nord-est du bassin de Tadla.

1. Échantillonnage et matériel :

L'échantillonnage des eaux souterraines a été réalisé en sélectionnant un réseau représentatif de 20 puits de manière à obtenir le maillage le plus régulier possible (fig. 99).

À chaque point, nous avons prélevé un flacon en polyéthylène de 500 ml d'eau, préalablement rincés et hermétiquement fermés permettant le dosage des éléments majeurs. Les flacons sont mis dans des glacières, transportés ensuite au laboratoire et conservés dans un réfrigérateur.

Nous avons mesuré in situ, la piézométrie, le pH, et la température. Le pH est mesuré par un pH-mètre type HI 991003 HANNA instrument calibré par une solution tampon à pH 4 et 7.

Les analyses chimiques des éléments majeurs (chlorure, nitrate, sulfate, phosphate (en mg/l) ont été effectuées par chromatographie ionique (ICS 1100 de Dionex) au centre d'analyse chimique (CAC) au l'agence hydraulique d'Oum Er-bia a Béni Mellal.

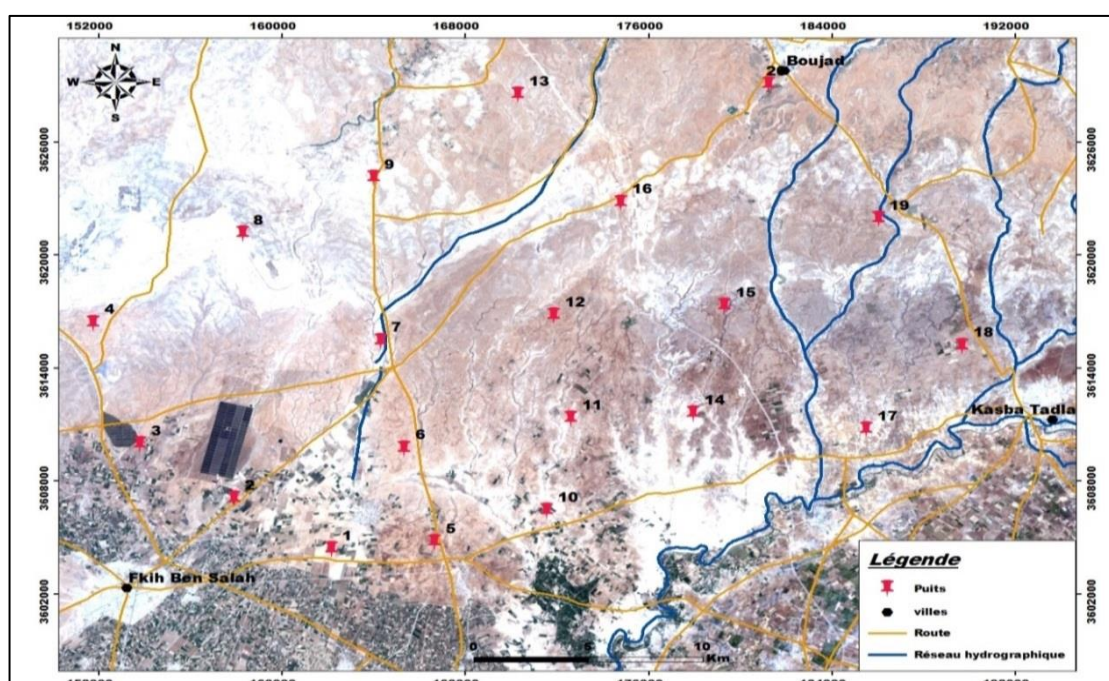


Figure 99: Localisation des points de prélèvements des eaux souterraines



Figure 100: les mesures in situ

2. Les paramètres physico-chimiques mesurés

2.1. La température

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

Dans les eaux souterraines, les variations thermiques sont très atténuées, le sol ne transmettant pas les variations saisonnières de température auxquelles il est soumis à la surface. D'après Morette (1964), à partir de 12 à 15 m de profondeur la température de celui-ci est indépendante de sa couche superficielle et à fortiori de la température extérieure. Ainsi à 7.50 m l'amplitude thermique annuelle n'excède pas 2°C.

D'autres auteurs (Dole, 1983 ; PPicard, 1962) estiment qu'à partir de -50 cm dans les substrats, les écarts journaliers ne se font plus ressentir, alors que les variations saisonnières peuvent encore s'observer.

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

2.2. Le potentiel d'hydrogène

Le pH (potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions H^+ de l'eau, il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14. 7 étant pH de neutralité. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico chimique et dépend de plusieurs facteurs tels que l'oxygène dissous, le gaz carbonique et le taux de la matière organique. Ainsi une chute de pH marque l'augmentation de la teneur en CO_2 , la diminution de la teneur en O_2 et l'accroissement de la teneur en matières organiques.

Le pH indique le caractère acide ou basique de l'eau. Dans les eaux souterraines, il est déterminé en partie par la nature géologique du bassin de drainage (Bermond, 1979). Pour la

qualité des eaux destinées à la consommation humaine L'O.M.S (Organisation mondiale de santé) admet que 6.5 est la limite minimale alors que la limite maximale est de 8.5. Le pH doit être impérativement mesuré sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre ou par colorimétrie.

Tableau 31 : classification des eaux d'après leur pH

pH < 5	Acidité forte => présence d'acides minéraux ou organiques dans les eaux naturelles
PH=7	pH neutre
7 < pH < 8	Neutralité approchée => majorité des eaux de surface
5.5 < pH < 8	Majorité des eaux souterraines
pH > 8	Alcalinité forte. évaporation intense

2.3. Composés azotés :

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

2.3.1 Nitrates (NO³⁻)

Les nitrates sont les formes d'azote les plus solubles dans l'eau. Par conséquent, leurs concentrations varient selon les événements hydrologiques atteignant ou dépassant parfois leurs critères respectifs de qualité pour l'eau brute d'alimentation humaine (Bchitou, 2001)

La présence de ces ions dans une eau est un indicateur de la pollution de cette eau. Ces ions proviennent soit naturellement du sol, soit de la pollution par l'industrie chimique, des décharges électriques ou des engrais azotés.

Les eaux naturelles contiennent normalement des nitrates à des doses variant selon les saisons. Les concentrations de ces ions d'origine naturelle dans les eaux de surface et souterraines sont généralement de quelques milligrammes par litre. Dans de nombreuses eaux souterraines et de surfaces, on observe aujourd'hui une augmentation de la concentration de ces ions. La valeur maximale admissible en cet ion d'après les normes marocaines relatives à la qualité des eaux d'alimentation humaine est de 50 mg/L(85)

2.3.2 Sulfates (SO₄⁻)

Les ions sulfates proviennent de la dissolution du gypse (CaSO₄. 2H₂O) et par l'oxydation des sulfures en sulfates dans les déchets miniers. Les principales sources industrielles sont les effluents des tanneries, des ateliers de décapage métallique, des usines de textile et des fabriques de pâtes et papiers. Les ions sulfates sont très solubles et leur concentration est très variable dans les eaux naturelles. La norme marocaine pour les sulfates est de 400 mg/L. La présence de ces ions en quantité supérieure à 300 mg/L peut entraîner dans certaines

conditions une attaque du béton et accélérer la corrosion du fer, ainsi des concentrations élevées en ces ions peuvent poser des problèmes en agriculture.

2.3.3 Phosphate PO_4^{3-}

Le phosphore est un élément assez rare mais indispensable à tout être vivant. Il joue un rôle d'engrais. Le phosphate est obtenu dans la nature à partir de la décomposition des cellules mortes qui sont minéralisées par les micro-organismes. Sa présence dans l'eau n'a pas de conséquence sanitaire. Par contre, elle favorise la croissance des algues dès que l'eau est exposée à la lumière par des phénomènes de l'eutrophisation. Bien que non toxiques, les phosphates présents dans l'eau peuvent occasionner des troubles digestifs à cause de leur effet tampon. (Samake, 2002).

3. Résultat et Interprétation

3.1 Température (T °C)

L'analyse de la carte de répartition spatiale de la température des eaux souterraines (Fig. 101) montre une augmentation de la température du Nord vers le sud de la zone étudiée, les valeurs élevées sont situées généralement dans la partie Sud-Ouest (P10) où la valeur de la température dépasse 28°C.

Cette variation des valeurs de la température, qui oscille entre 20 °C et 28°C, est due fort probablement à la diminution de la profondeur dans la partie Nord, par contre dans la zone Sud l'augmentation est due probablement à la l'alimentation de la nappe phréatique (Plio-Quaternaire) par les eaux fraîches d'oued de l'Oum Er-rabia.

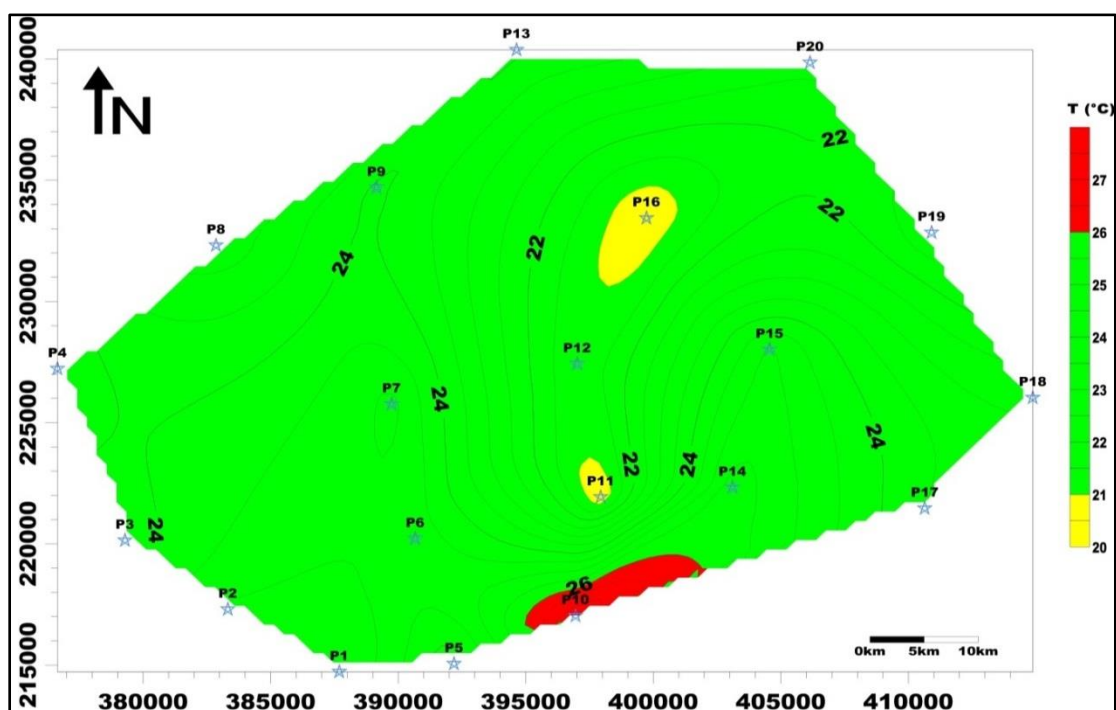


Figure 101: Distribution spatiale de la Température dans la zone d'étude

3.2 Potentiel hydrogène (pH)

L'analyse de la carte de répartition du pH montre des valeurs du pH mesurées des eaux souterraines variant entre 6.7 et 7.9 avec une moyenne de 7.3. Les valeurs mesurées sont globalement homogènes, Néanmoins, on remarque une légère augmentation de l'acidité des

eaux prélevées dans la partie Sud est de Fkih ben Salah. Cette augmentation de l'acidité des eaux peut être expliquée par la minéralisation de la matière organique fortement utilisée sous forme d'engrais organique dans les zones agricoles.

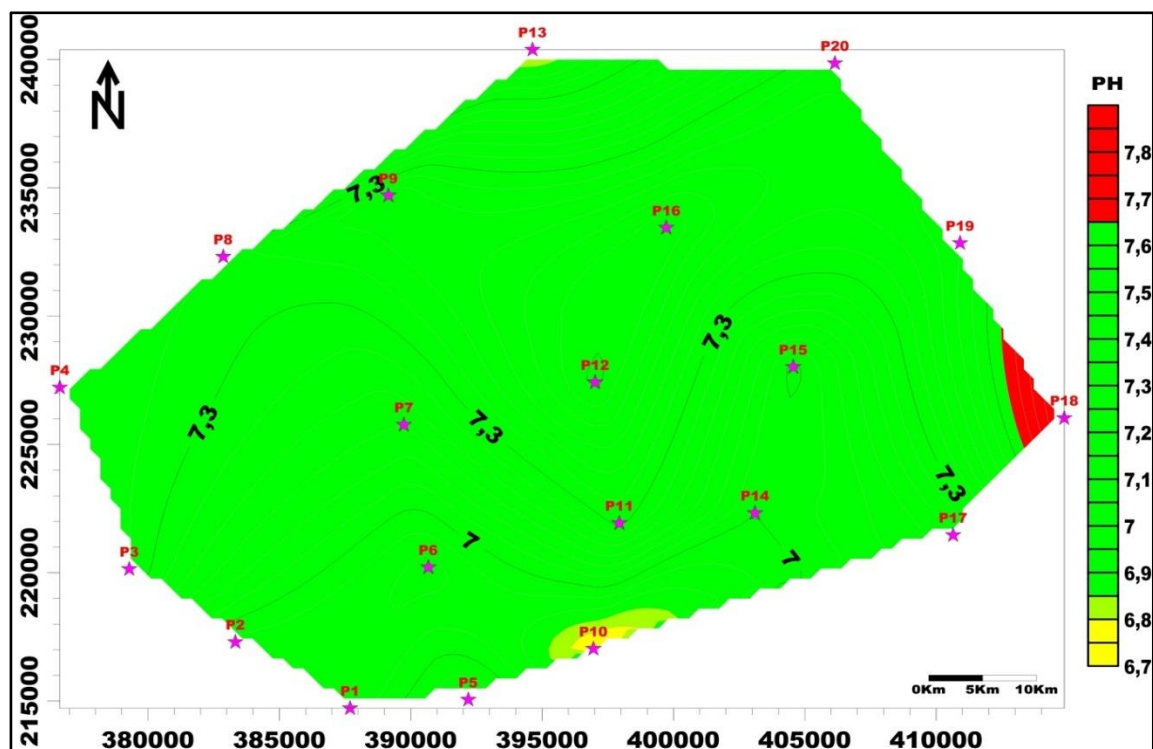


Figure 102: Distribution spatiale de PH dans la zone d'étude

3.3 Nitrate :

Les nitrates sont considérés comme indicateurs de la pollution d'origine anthropique dans les zones à forte activité agricole. Dans la plaine de Tadla, la mise en évidence de la contamination de la nappe par les nitrates remonte à une vingtaine d'années. Cependant, la réelle prise de conscience des pouvoirs publics est plus récente. En conséquence, les eaux souterraines n'ont pas été surveillées assez régulièrement ou assez en détail pour qu'on puisse dresser un tableau exhaustif de l'historique et dégager les tendances d'évolution interannuelle relative à leur contamination.

L'examen de la carte de distribution des nitrates établis sur la base des mesures réalisées en 20 Puits en Avril 2017 montre comme il est indiqué sur la figure 103 les teneurs en nitrates variaient entre 6mg/L et 46 mg/L. Elles n'ont pas dépassé les normes marocaines.

Les valeurs les plus élevées sont enregistrées en aval de la zone étudiée où les teneurs en nitrates sont de 24 à 46 mg/l. Cette dégradation semble être due essentiellement à l'activité humaine, la fertilisation azotée des zones agricoles voisines des points étudiés, les eaux usées, et les déchets des élevages. Dans le reste de la zone, les teneurs en nitrates de la nappe restent en deçà des 20 mg/l.

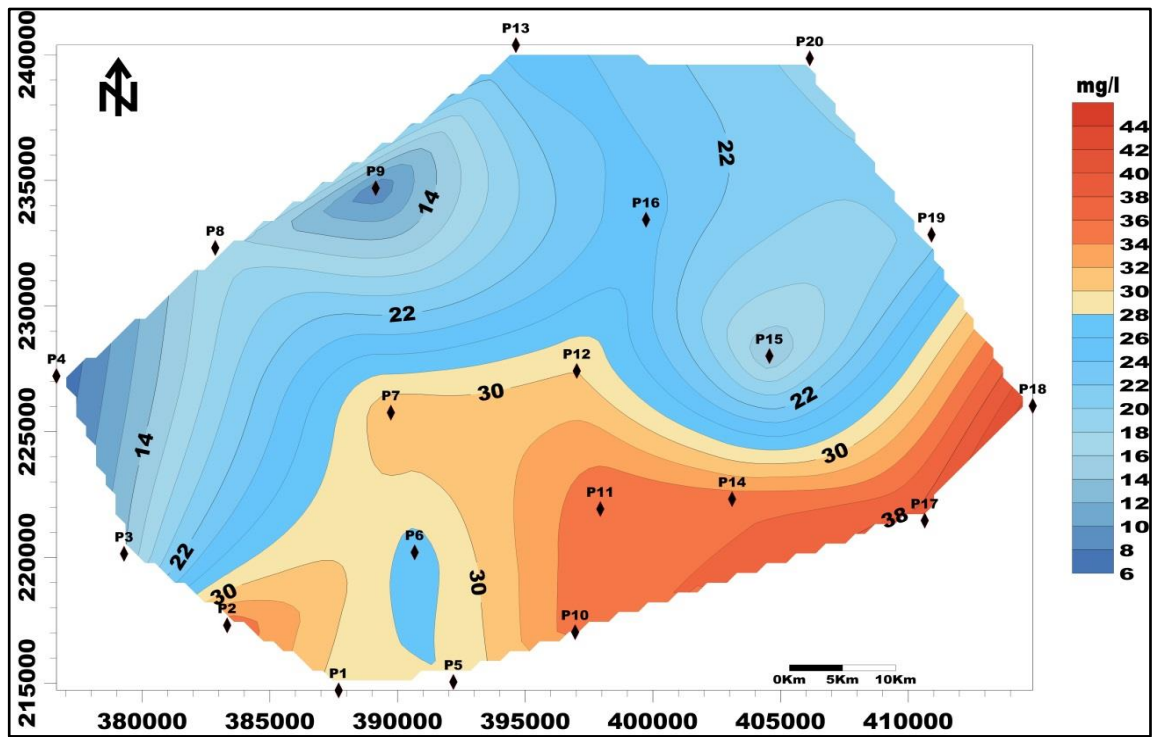


Figure 103 : Distribution spatiale de Nitrate dans la zone d'étude

3.4 Sulfate :

Les ions sulfates proviennent de la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et par l'oxydation des sulfures en sulfates dans les déchets miniers. L'examen de la carte de distribution des sulfates établie sur la base des mesures réalisées en 20 Puits en Avril 2017 montre comme il est indiqué sur la figure 104 des valeurs très variables, elles oscillaient entre 20mg/l à 440 mg/l.

Le P16 avait le niveau de sulfate le moins élevé alors que le P1 avait le niveau le plus élevé qui dépasse la valeur de la norme. La valeur moyenne du niveau de sulfate pour les échantillons analysés était de 200 mg/l. Presque tous les résultats confirment l'acceptabilité de ces eaux souterraines en termes de leur teneur en sulfates. Selon cette étude, 85% des puits de la région d'étude sont conformes aux normes Marocaine (400mg/l).

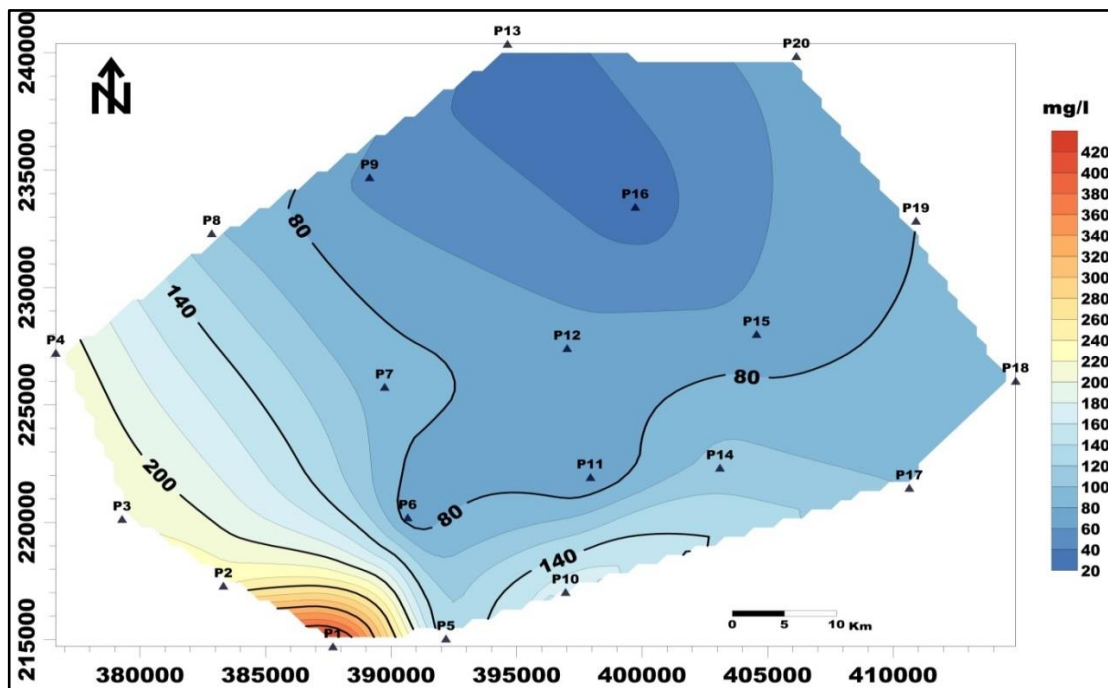


Figure 104: Distribution spatiale de sulfate dans la zone d'étude

Les orthophosphates constituent la forme prédominante du phosphore disponible dans l'eau. En combinaison avec l'azote, le phosphore est utilisé dans les engrais chimiques et naturels pour enrichir les sols agricoles.

L'examen de la carte de distribution du phosphate établi sur la base des mesures réalisées en 20 Puits en Avril 2017 montre comme il est indiqué sur la figure 105 des valeurs très variables, elles oscillaient entre une valeur minimale de 0 mg/l et une maximale de 3,6 mg/l (P17)

Les valeurs les plus élevées sont enregistrées en aval de la zone étudiée où les teneurs en phosphate sont de 1.2 à 3.8 mg/l. Cette dégradation semble être due essentiellement à l'activité humaine, la fertilisation azotée des zones agricoles avoisinantes aux points étudiés. Dans le reste de la zone, les teneurs en phosphate de la nappe restent en deçà des 1 mg/l.

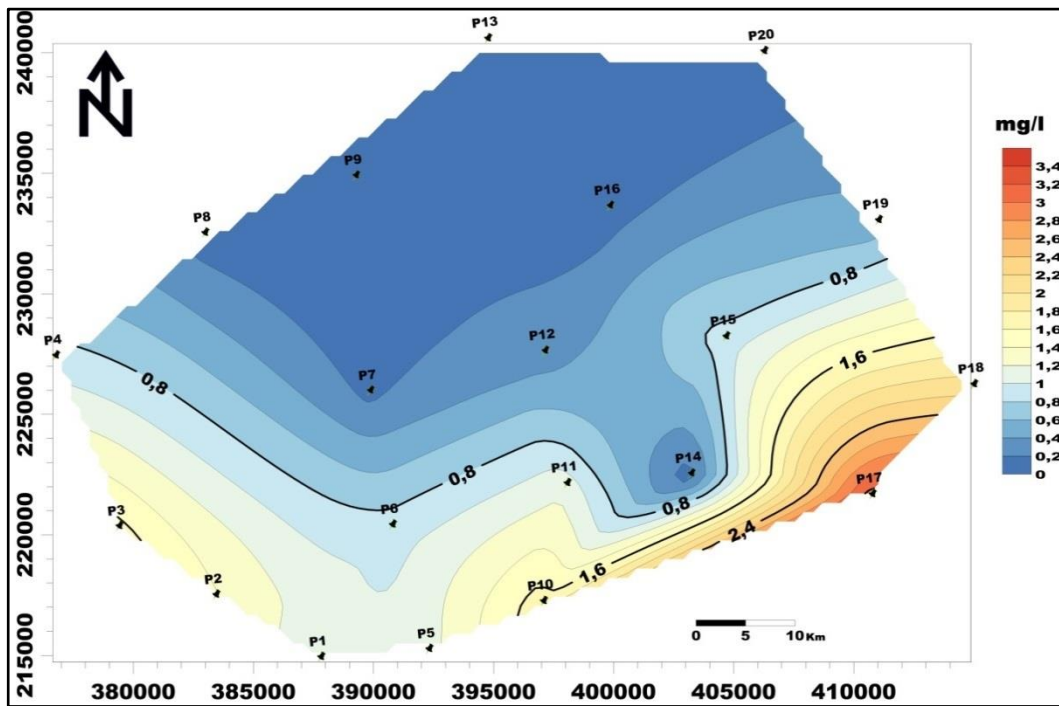


Figure 105: Distribution spatiale phosphate dans la zone d'étude

3.5 Chlorures (CL) :

Les chlorures sont des anions inorganiques importants contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Ils sont souvent utilisés comme un indice de pollution.

Les teneurs en chlorures des échantillons d'eau analysés (Fig.106) affichaient des valeurs oscillant entre 50 mg/L et 880 mg/L. Les points d'eau situés en amont de la zone d'étude sont conformes aux normes, étant donné que la concentration en chlorures est inférieure à celle recommandée par les normes marocaines dans le cas des eaux souterraines et qui sont de l'ordre de 750 mg/L. En aval de la zone, les points 1, 2, 10, 17 et 18 renfermaient des eaux avec une qualité moyenne ; les teneurs oscillaient entre 350mg/L et 850 mg/L.

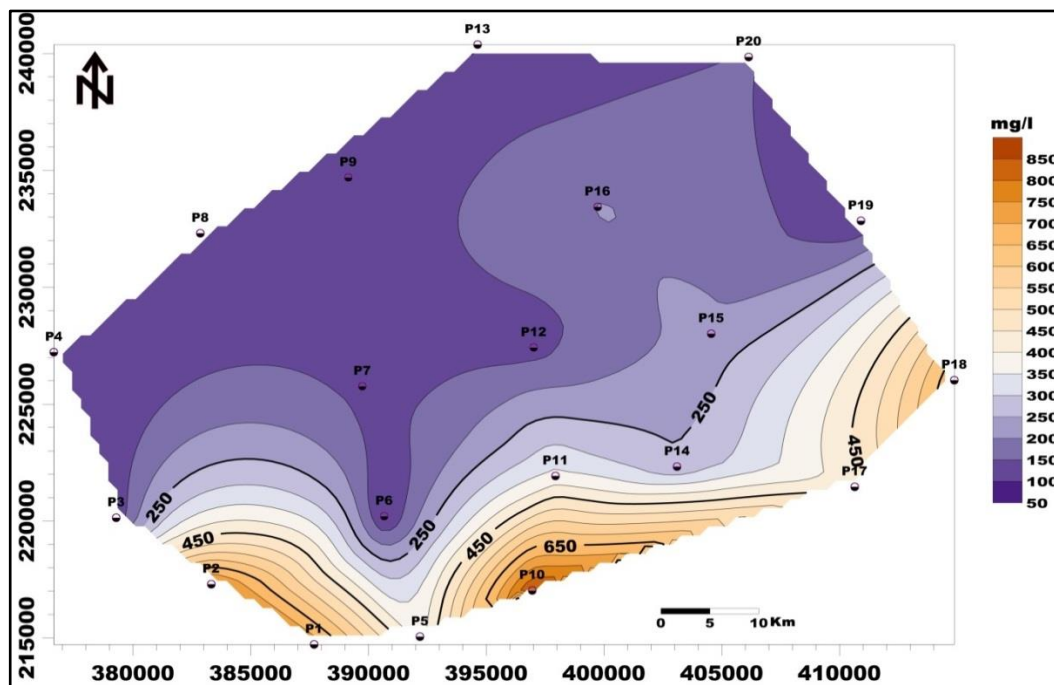


Figure 106: Distribution spatiale de chlore dans la zone d'étude

Conclusion

Les ressources en eau sont menacées de nos jours par la pollution qui cause la dégradation de la qualité de l'eau. Les polluants superficiels peuvent s'infiltrer à travers le sol vers les nappes. Dans ce chapitre on a évalué la qualité physico-chimique des eaux souterraines de 20 puits de la région Nord-Est de la plaine de Tadla tout en effectuant les analyses des paramètres physico-chimiques et chimiques dans laboratoire. Ces paramètres sont : (pH), (T), (Cl⁻), (SO₄²⁻), (PO₄²⁻), (NO³⁻).

D'après les analyses et les résultats qualitatifs obtenus, on remarque que les eaux souterraines dans les puits étudiés localisent dans la partie sud et Sud-Ouest de la région étudiée ont des teneurs en nitrate, en sulfates et en chlorures et en phosphate plus élevées et dans certains puits dépassant la norme marocaine des eaux potables et des eaux d'irrigation. La source de cette pollution à sembler être due essentiellement à l'activité humaine, la fertilisation azotée des zones agricoles, et les déchets des élevages.

Cette pollution aura plusieurs impacts négatifs néfastes sur la santé humaine, l'agriculture, etc. La fragilité de cet état, longtemps considérée comme problème secondaire devant d'autres secteurs, doit occuper une place primordiale parmi les activités de protection de l'environnement et la réservation des ressources en eau, et exiger une intervention des autorités concernées.

Dans ce sens, il convient de réduire l'extension et la gravité des impacts sur les eaux de surface et souterraines, par des méthodes de restauration efficaces et économiques.

DISCUSSION GENERALE

L'étude géologique, que nous avons exécutée à partir des données des forages pétroliers, forages n°IRE et puits, l'analyse de la carte géologique et le log stratigraphique synthétique dans notre zone d'étude, nous a permis de découvrir plusieurs niveaux stratigraphiques et de suivre leur évolution dans la profondeur et dans l'espace. Il s'agit d'une série sédimentaire d'âge crétacé supérieur marquée, en allant du bas vers le haut, par la présence des étages ci-dessous :

- Le Cénomaniens formé de calcaire marneux est de marnes.
- Le Turonien correspond au calcaire et parfois au calcaire dolomitisé.
- Le Sénonien formé d'une alternance d'une séquence marne à la base calcaire au milieu et marno-calcaire au sommet.
- l'Eocène constituant la série phosphatée correspond aux marnes bitumineuses phosphatées du maastrichtien et à une alternance de marne, de phosphate, plus ou moins marneux, et de sable phosphatés avec des intercalations calcaires.
- Le Mio-Plio-Quaternaire complexe hétérogène correspond à un mélange de marnes, de calcaire et de conglomérat.

Notre portrait géologique confirme et se complète avec celle d'Ettazarini, (2002) et de Tammal et al, (2014). En effet, ces auteurs ont signalé que la disposition géologique est encore plus compliqué ; le domaine est composé d'une série du crétacé supérieure déposée sur des terrains paléozoïques, avec parfois des intercalations de faciès d'âge triasique. La série crétacée est marquée par la présence des étages de l'Infra-cénomaniens, du Turonien ou Cénomano-turonien et du Sénonien. Une formation d'éocène riche en phosphate se repose sur les terrains identifiés du Crétacé en formant le plateau des phosphates.

De point de vue structural, notre étude montre que la série sédimentaire prend une forme sub-tabulaire moins profonde et moins épaisse vers le plateau des phosphates, par contre au sud. Cette série devient plus profonde et plus épaisse (Plaine de Tadla) pour dessiner un hémisynclinal asymétrique rempli d'un complexe hétérogène d'âge Mio-Plio-Quaternaire. Nos résultats sont en accord avec ceux rapportés par Najine et al (2006). En effet, ces auteurs ont trouvé que la plaine de Tadla consiste en une dépression remplie par un complexe hétérogène de dépôts Plio-Quaternaire.

L'analyse et l'interprétation des différents résultats des profils électrique, des cartes d'iso-résistivité, des cartes d'isopaques et aussi les coupes géoélectrique établis dans le cadre de l'étude géophysique, montre la superposition de plusieurs horizons de résistivités électriques différentes. Ces terrains dessinent une structure monoclinale asymétrique qui plonge du NE vers SW, présentant les niveaux suivants :

- i. un recouvrement hétérogène de résistivité variable allant de 10 à environ 250 $\Omega.m$;
- ii. un niveau résistance (120 à 280 $\Omega.m$) d'épaisseur variable, correspond la série phosphatée ;

- iii. Un niveau conducteur de grande épaisseur et de résistivité comprise entre 10 et 20 $\Omega.m$. Il s'agit des marnes grises et dolomies du Sénonien marin et argiles sableux à anhydrite du Sénonien évaporitique ;
- iv. Une formation très résistante profonde a été attribuée au Turonien qui constitue le réservoir le plus important dans la région. Cette formation correspond au calcaire dolomitique, sa résistivité dépasse 700 $\Omega.m$.

De point de vue géologique, Le complexe hétérogène, correspond au remplissage Mio-Plio-Quaternaire (Conglomérat polygénique, sable, alluvions, marne, marne sableuse, grès et calcaire blanc) leur épaisseur deviennent très importantes au Sud de la zone avec une épaisseur totale pouvant atteindre 100 m parfois plus (SE22) et deviennent minces vers le Nord jusqu'au SE 25 où l'épaisseur devient nulle. Les résistivités de cette unité varient de 10 à 30 $\Omega.m$ pour les niveaux conducteurs et de 70 à 280 $\Omega.m$, pour les niveaux résistants. Les résistivités très basses rencontrées dans certaines stations (moins de 15 Ohm.m) sont significatives à des passées argileuses imperméables ou d'une salinité élevée des eaux de la nappe. Les résistivités élevées sont, au contraire, caractéristiques de lentilles calcaires incorporées dans la masse alluvionnaire (Belli, 1948). Nos résultats sont en accord avec l'étude réalisée par Radouani (2013) sur la partie Nord-Ouest de la plaine de Tadla, cette étude montre que Le complexe hétérogène, correspond au remplissage Mio-Plio-quaternaire, avec une épaisseur variable qui augmente considérablement du nord vers le sud (15 m au nord à plus de 300 m au sud et au SW)

Le niveau résistant superficiel correspond aux calcaires de la série phosphatée (d'Eocène) L'analyse des résultats montre que cette série est présente sur une large superficie recouverte par le Plio-Quaternaire, ces formations deviennent minces vers le Nord jusqu'à le SE 26 où l'épaisseur devient nulle. Par contre, vers le SW de la région (la ville de Fkih ben Salah) l'épaisseur de la série phosphatée peut dépasser 120 m. Nos résultats sont dans le même sens avec l'étude de Radouani (2013) qui montre que cette série est présente partout dans la zone prospectée avec une épaisseur variable. Elle fait une vingtaine de mètres au nord (le plateau des phosphates). Puis elle s'épaissit considérablement vers le SW du bassin d'étude, pour atteindre une valeur de 109 m.

Les formations conductrices d'âge sénonien deviennent très importantes du Nord vers le Sud de la zone avec une épaisseur totale pouvant atteindre 80 m parfois plus (SE22) et deviennent très minces vers le Nord jusqu'à l'épaisseur devient nulle (Boujaad).

Les formations résistantes de Turonien qui constitue le réservoir le plus important du bassin du Tadla par sa capacité d'emménagement et la qualité de ses eaux (Boukdir, 1994). Tout en faisant référence aux coupes des puits et forages mécaniques fournissent par l'ABHOER, la nature du faciès de ce réservoir est de type carbonaté formé essentiellement de calcaires, de calcaires dolomitiques et de calcaires oolithiques. Ces faciès sont caractérisés par des valeurs relativement élevées de résistivité.

Les terrains résistants de Turonien s'enfoncent progressivement depuis les zones d'affleurement (Boujad) en direction du Sud, la coupe montre aussi que les résistivités électriques de l'aquifère du Turonien diminuent vers le Sud. Ceci a été expliqué par la variation latérale du faciès lithologique du Turonien qui devient de plus en plus marneux vers le (l'Oum er-bia). Les résistivités du Turonien de l'ordre de 3000 à 4000 $\Omega \cdot m$ (les SE 26-27) au Nord, passent à des valeurs faibles, de l'ordre de 400 $\Omega \cdot m$ au Sud (450 $\Omega \cdot m$ au SE 22).

Les terrains imperméables sont représentés par les niveaux très conducteurs détectés sur les profils des sondages électriques et les sections de la tomographie. Il s'agit des marnes grises du Sénonien marin, et argiles et argiles sableux à anhydrite du Sénonien évaporitique, et par certains niveaux argileux de la base du Miocène. Belhacene et al (1992).

Les coupes géoélectriques établies à partir des résultats des sondages et les forages mécaniques montrent que la zone prospectée présente, grosso-modo, une structure monoclinale à pendage irrégulier du NE vers le SW. Le pendage des niveaux géologiques est doux dans la partie nord. Mais il devient important laissant la place à un important dépôt du complexe hétérogène du Moi-Plio-Quaternaire.

Au sud des coupes géoélectrique établie, on remarque aussi la présence des discontinuités électriques correspondant à des failles normales. Ces failles sont à l'origine de l'affaissement des compartiments situés au Sud.

La tectonique compressive à l'origine de la structuration de l'Atlas influe dans le même sens la géométrie du bassin qui se replie pour former un sillon. Parallèlement, ce dernier est comblé au Néogène et au Quaternaire par les produits de démantèlement de la chaîne. Ils forment des cônes alluviaux puissants appuyés contre les reliefs.

L'examen de la carte gravimétrique du bassin de Tadla montre une diminution des valeurs de l'anomalie de Bouger du Nord vers le Sud. Compte tenu de l'état de connaissance actuelle de la structure de ce bassin, cette diminution peut être expliquée par un épaissement de la série sédimentaire en allant vers le Sud. On aperçoit que la diminution progressive des valeurs du Nord vers le Sud sur la carte d'anomalie de bouger est localement perturbée par des zones à forts gradients gravimétriques. Ces zones correspondent vraisemblablement à des failles ou à des flexures qui indiquent des affaissements brutaux de la série sédimentaire vers le Sud. Nos résultats sont en accord avec ceux rapportés par Najine et al (2006). En effet, ces auteurs ont trouvé que la plaine de Tadla est affectée par plusieurs anomalies correspondant des failles ou des flexures, ces structures sont responsables de la structure du bassin.

Face à des nombreuses menaces de pollution dans notre zone d'étude, due surtout aux apports massifs des engrais et potentiellement des pesticides, d'une irrigation non maîtrisée et d'une fertilisation minérale excessive pouvant avoir un impact négatif sur la qualité des ressources en eaux qui se traduit essentiellement par la pollution nitrique diffuse des eaux souterraines (Bellouti et al, 2002). Une étude de vulnérabilité s'avérerait nécessaire pour savoir dans quelle mesure les endroits à plus forte vulnérabilité constituent un danger pour la ressource

en eau souterraine. C'est dans cet objectif que différents degrés de vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine ont été définis et une méthode de cartographie spécialisée a été mise au point pour indiquer leur distribution géographique au sein de la zone étudiée.

Généralement, l'indices de vulnérabilité calculée à partir des Sept paramètres drastiques, dévoile trois classes de vulnérabilités :

- **Très faible à faible** : occupent les plus grandes superficies, soit 57.69% de la superficie totale, ils se rencontrent dans la totalité de la zone Nord.
- **Moyennement vulnérable** : représentée dans une large superficie de la plaine du Tadla soit 38.7% de la superficie totale, ils se rencontrent dans la totalité de la partie sud (zone irriguée et les zones proche de l'Oum Er-bia) et aussi dans la partie nord-ouest de la zone d'étude.
- **plus vulnérable** : occupent 3.6 % de la surface totale étudiée sont localisés essentiellement dans la partie sud-est, Dans ces zones presque tous les paramètres interviennent dans l'augmentation du degré de vulnérabilité : la profondeur de la nappe qui varie entre 12 et 25 m, la recharge de la nappe qui dépasse 25 cm/ans et la nature du sol qui est caractérisé par la présence de texture alluvion et limon qui facilite l'infiltration.

Dans le même sens, Knouz et al (2016) ont montré que la profondeur de l'eau a un impact significatif sur la vulnérabilité dans la nappe de Beni Amir. Les formations géologiques à forte conductivité hydraulique (paramètre C) permettant l'écoulement des eaux chargées de polluants sont situées au nord-est de la nappe de Béni Amir.

L'analyse des données hydrochimiques montre que les valeurs du pH mesurées des eaux souterraines varient entre 6.7 et 7.9 avec une moyenne de 7.3. L'abondance des ions majeurs dans les échantillons des eaux souterraines et des eaux superficielles est dans l'ordre suivant : $\text{NO}_3^- > \text{PO}_4^{3-} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$. Les valeurs les plus élevées des ions étudiés sont enregistrées en aval de la zone d'étude où certains puits dépassant la norme marocaine des eaux potables et des eaux d'irrigation. Cette augmentation semble être due essentiellement à l'activité humaine, la fertilisation azotée des zones agricoles avoisinantes aux points étudiés, les eaux usées, et les déchets des élevages. Nos résultats sont en accord avec ceux rapportés par Faouzi. M(2010) et Bellouti. A (2002) qui montrent que la source de la pollution qui attaque la nappe de Béni Amir sont liées aux mauvaises pratiques agricoles et aux épandages d'engrais conjugués à une mauvaise gestion de l'irrigation.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail consiste à déterminer la géométrie du système aquifère de la plaine du Tadla précisément la zone entreprises dans la partie septentrionale de la plaine du Tadla en bordure du plateau des phosphate, Diagnostique de l'état de la qualité des eaux souterraines. A cet égard plusieurs volets d'étude ont été abordés: Analyse des données géologiques, hydrogéologique, géophysiques par la combinaison de plusieurs outils, hydrochimique et l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines en tenant compte des différents paramètres intrinsèques agissant directement sur l'infiltration et la propagation des polluants..

La plaine du Tadla couvrant une superficie de 3600 km² environ, s'étend au Nord de la chaîne du Haut Atlas à 200 Km au Sud-Est de Casablanca. Elle est limitée vers le Nord par le Plateau des Phosphates, vers l'Est la plaine se rétrécit le long de l'Oum-er-Rbia en direction des reliefs accusés des pays Zaïan. À l'Ouest, aucune limite géographique ne sépare le Tadla de la Bahira qui lui fait suite, mais le cours inférieur d'Oued El Abid sera pris comme limite régionale de cet ensemble.

Le bassin de Tadla est caractérisé par un climat de type aride à semi-aride avec une température élevée en été et basse en hiver La longueur de la plaine ainsi définie atteint environ 125 km tandis que sa largeur maximum au centre est de 50 km environ.

Il est traversé par Oued Oum Er Rbia sur environ 160 km. Le cours d'Oued Oum ErRbia, d'orientation générale ENE-WSW jusqu'à l'amont de sa confluence avec l'Oued El Abid puis à l'aval de celle-ci de direction NW-SE, divise la plaine en deux parties. Le débit moyen annuel de l'Oum Er Rbia est de 38,6 m³/s avec un minimum de 10 m³/s et un maximum de 1700 m³/s.

La compilation des données de forages, des puits, les sections et les cartes géologiques, nous a permis de bien définir la nature géologique des formations et la géométrie des réservoirs. Cette compilation montre que le Tadla se présente comme une dépression hémi synclinal dissymétrique remplie d'un complexe hétérogène d'âge Mio-Plio-Quaternaire, cette dépression caractérisée par une faible pente au Nord (Plateau des phosphates) mais qui devient importante en s'approchant du piémont Atlasique au Sud,

La reconnaissance hydrogéologique montre que notre zone d'étude est marquée par l'existence de 4 unités de ressources potentielles qui sont :

Turonien : Le Turonien est constitué d'une importante dalle calcaire renfermant une puissante nappe exploitée pour les usages agricoles. Cette nappe est la plus importante de point de vue qualitatif et quantitatif. Leur profondeur dans notre zone d'étude varie de 15m dans la partie Nord (le plateau des phosphates) et dépasse 100m sur la plaine de Tadla. La qualité de l'eau de l'aquifère du Turonien est bonne.

Sénonien : Le Sénonien est constitué d'une série marno-calcaire, la formation s'épaissit depuis le Nord de la zone vers le Sud-est où l'épaisseur de la formation conductrice peut dépasser 150 m d'épaisseur.

Eocène : La profondeur moyenne de la nappe augmente généralement du Nord vers le Sud, avec des valeurs qui passent de 17m au nord, à environ 90m au Sud à Côté de Fkih Ben Salah. La qualité de l'eau de cet aquifère est variable.

Beni Amir : La profondeur de la nappe de Beni Amir varie de 15m à 40m, il circule dans un complexe Plio-Quaternaire composé de calcaires francs, de marno-calcaires et d'argiles. L'écoulement est orienté principalement Nord vers le sud. La minéralisation des eaux de cette nappe est relativement élevée, en raison de la qualité même des eaux d'irrigation provenant de l'Oum Er Rbia, qui sont saumâtres en étiage, et aussi la fertilisation azotée des zones agricoles.

La reconnaissance géophysique par les sondages électriques (SEV) et par la tomographie électrique (TRE) a permis de mettre en évidence la superposition de plusieurs terrains de résistivités électriques différentes. (i) un recouvrement hétérogène de résistivité variable allant de 10 à environ 250 $\Omega.m$; (ii) un niveau résistance (120 à 280 $\Omega.m$) d'épaisseur variable, correspond la série phosphatée ; (iii) Un niveau conducteur de grande épaisseur et de résistivité comprise entre 10 et 20 $\Omega.m$. Il s'agit des marnes grises et dolomies du Sénonien marin et argiles sableux à anhydrite du Sénonien évaporitique. (iiii) Une formation très résistante profonde a été attribuée au Turonien qui constitue le réservoir le plus important dans la région. Cette formation correspond le calcaire dolomitique, sa résistivité dépasse 700 $\Omega.m$

Le complexe hétérogène correspond au remplissage Mio-Plio- Quaternaire. Son épaisseur est variable et augmente considérablement du Nord vers le Sud. Les résistivités très basses rencontrées en certaines stations (moins de 30 $\Omega.m$) sont significatives de passées argileuses imperméables ou d'une salinité élevée des eaux de la nappe. Les résistivités élevées sont au contraire caractéristiques de lentilles calcaires incorporées dans la masse alluvionnaire.

Le niveau résistant correspond aux calcaires de la série phosphatée est présente partout dans la zone prospectée sauf la zone Nord-est(Boujaad). Son épaisseur est variable, elle fait une cinquantaine de mètres sur le plateau des phosphates puis elle s'épaissit considérablement vers le sud du bassin.

La technique d'analyse des contacts appliquée aux données gravimétrique a permis de mettre en évidence un important réseau de structures qui indique que la zone d'étude a été fortement influencée par la tectonique atlasique.

L'examen de la carte gravimétrique du bassin de Tadla montre une diminution des valeurs de l'anomalie de Bouger du Nord vers le Sud. Compte tenu de l'état de connaissance actuelle de la structure de ce bassin, cette diminution peut être expliquée par un épaissement de la série sédimentaire en se rapprochant de la bordure du Haut-Atlas. C'est d'une part, d'autre part La carte d'anomalies résiduelles montre plusieurs zones de gradients gravimétriques qui peuvent correspondre à des contacts ou des discontinuités (failles, flexures,).

La gestion et l'évaluation des ressources en eaux (de surface et souterraines) dans les zones arides et semi-arides deviennent de plus en plus demandées. Vue leur situation mondiale, il est actuellement très important d'étudier leur vulnérabilité à la pollution. L'étude de vulnérabilité par

la méthode DRASTIC Standard, a permis de cartographier les zones à risque de pollution qui peut être de différentes origines. Cette étude a permis de mettre en évidence trois classes de vulnérabilité (vulnérable forte, moyenne, et vulnérable faible à très faible). Elle a aussi permis de cartographier spatialement les principaux paramètres responsables sur le risque de pollution. Les cartes élaborées constituent une importante source d'informations indispensable, dans le sens qu'elles permettent d'avoir une idée assez précise sur les zones sensibles à la pollution dans cette région. Ceci va dans le sens d'une sensibilisation et d'une prise de conscience à propos des dangers qui menacent ces ressources hydriques.

La carte de la vulnérabilité à la pollution dressée pour la zone d'étude montre que la zone Sud-est présentent des vulnérabilités à la pollution élevées à très élevées sur une superficie de 3.6 % de la surface totale étudié.

La compilation des données hydrochimiques montre que les valeurs du pH mesurées des eaux souterraines varient entre 6.7 et 7.9 avec une moyenne de 7.3. L'abondance des ions majeurs dans les échantillons des eaux souterraines et des eaux superficielles est dans l'ordre suivant : $\text{NO}_3^- > \text{PO}_4^{3-} > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$. Les valeurs les plus élevées des ions étudiés sont enregistrées en aval de la zone d'étude où certains puits dépassant la norme marocaine des eaux potables et des eaux d'irrigation. Cette augmentation semble être due essentiellement à l'activité humaine, la fertilisation azotée des zones agricoles avoisinantes aux points étudiés, les eaux usées, et les déchets des élevages.

Recommandations

Suite à cette étude, plusieurs recommandations peuvent être suggérées pour la préservation et l'évaluation des eaux souterraines dans la zone Nord-est de la plaine de Tadla :

- Il serait indispensable de limiter l'utilisation intensive des engrais chimiques dans les sols à forte et très forte vulnérabilité, afin de limiter l'infiltration des éléments chimiques vers la nappe.
- La modélisation de l'écoulement des eaux souterraines et du transfert des polluants chimiques au niveau du bassin pour connaître leur dispersion sur l'ensemble du bassin de Tadla.
- L'interdiction des fosses septiques non contrôlées dans les zones à vulnérabilité moyenne à très élevée à la pollution et la mise en place d'un réseau d'assainissement dans les zones agglomérées avec une station de traitement des eaux usées.
- Le choix des zones de stockage des déchets solides et/ou liquide dans des endroits où la nappe souterraine est non vulnérable à la pollution.

Perspectives scientifiques

L'étude menée dans ce travail des ressources en eaux de la zone Nord-est de la plaine de Tadla a permis de cartographier la géométrie des différentes formations qui pourraient être des aquifères, et d'étudier la vulnérabilité à la pollution de la nappe. L'apport de ce travail porte sur les possibilités offertes par les techniques de géoscience pour donner quelques réponses sur la disponibilité probables des réservoirs, en qualité et en quantité, des eaux souterraines de cette région. Cependant il serait intéressant de la compléter par :

- La réinterprétation des anciennes données de la géophysique pétrolière (sismique, gravimétrie, diagraphie, etc.) dans le cadre des études hydrogéologiques dans l'ensemble de la zone de Tadla pour ressortir les différentes communications possibles entre les différents aquifères.
- La réalisation des trainés électriques pour bien localiser les discontinuités électriques pouvant être des failles ou des flexures, qui jouent le rôle de barrière ou bien de points de communication entre les différents aquifères.
- La réactualisation du réseau d'échantillonnage hydrochimique et hydrodynamique pour la mise à jour et le suivi de façon continue dans le temps et dans l'espace de l'évolution de la qualité des systèmes aquifères et des échanges eaux de surface – eaux souterraines dans l'ensemble de la région.
- Compléter notre étude hydrochimique par une étude isotopique.

Références bibliographiques

A

Abourida, A. (2007). Approche hydrogéologique de la nappe du Haouz (Maroc) par télédétection, isotopie, sig et modélisation. Thèse de doctorat, Université Cadi Ayyad Marrakech, Faculté des Sciences Semlalia.

ABHOER. (2008). Etude d'actualisation du plan directeur d'aménagement intègre des ressources en eau (pdair) de la zone d'action de l'agence du bassin hydraulique de l'oum er rbia, Mission I.3 – Actualisation de l'évaluation des ressources en eau et de leur qualité. pp 182.

ABHOER. (2012). Etude de la recharge artificielle des nappes profondes du Tadla ; Mission I, ANZAR.

Aghzar, N., Berdai, H., Bellouti, A. and Soudi, B. (2002). Pollution nitrique des eaux souterraines au Tadla (Maroc). Journal of Water Science, 15(2), 459-492.

Aller, L. (1987). DRASTIC : à standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings. Us Environmental Protection Agency, EPA/600/2-87.

Arioua, A. et al. (2007). Corrélation entre paramètres hydrogéochimique et géoléctrique pour évaluation de la qualité des eaux de la nappe phréatique de la plaine du Tadla – Maroc. Geomagheb, 4, 113-117

Archambault, C. (1971). Rapport de présentation de documents de synthèse relatifs à la nappe phréatique du Tadla, 20p.

Archambault, C., Combe, M., et Ruhard, J.P. (1975). Plateau des Phosphates, in « Ressources en Eau du Maroc », tome 2, Plaines et Bassins du Maroc Atlantique. Notes et mém. serv. Géol. Maroc, n° 231 /2, Rabat, pp.239-259.

Archibald, N. et Bochetti, F. (1999). Multiscale edge analysis of potential field data. Explor. Geophys. 30, 38-44.

Aude Nuscia, T. (2015). Atlas régional région du Tadla Azilal Maroc

Azzi, Y., Essahlaoui A., El hmaidi, A., Al ouali A., (2014). Evaluation de la vulnérabilité la pollution du cause moyen atlasique (région El Hajeb-Ifrane), par la méthode DRASTIC utilisant les SIG 1-Equipe de recherche « sciences de l'eau et ingénierie de l'environnement » ; labo. Géo-ingénierie et environnement, Département de Géologie, Faculté des Sciences, Meknès.

B

Bahir, M. et Mennani, A. (2002). Problématique de la gestion des eaux souterraines au Maroc, Estudios Geológicos, 58, 103-108.

Bachaoui, E. (2015). Mapping crop based on phenological characteristics using time-series NDVI of Operational Land Imager data in Tadla irrigated perimeter, Morocco. Proceedings of Spie, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVII, 96372G.

Badraoui, M. (2006). Connaissance et utilisation des ressources en sol au Maroc pp.92-11.

Badraoui, M., Agbani, M., Soudi B. (2000). Évolution de la qualité des sols sous mise en valeur intensive au Maroc. In Soudi & al. Eds. Intensification agricole et qualité des sols et des eaux, Actes du séminaire organisé à Rabat.

Barker, R. (1979). Signal contribution section and their use in resistivity studies. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 59(1), 123-129.

Beaudet, G., Maurer, G. et Ruellan, A. (1967). Le quaternaire marocain : observations et hypothèses nouvelles. Revue de Géographie Physique (2), Vol. IX, No. 4, pp. 269

Belghazal, H. (2012). Modélisation des aquifères thermaux avec des méthodes géophysiques intégrées. Thèse de Doctorat de recherche en ingénierie du territoire, Université Abdelmalek Essai. Faculté des sciences : Maroc.

Bellouti, A. (2002). Mise en place d'un système de suivi et de surveillance de la qualité des eaux souterraines et des sols dans le périmètre irrigué du Tadla, au Maroc, Atelier du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) sur une Maîtrise des Impacts Environnementaux de l'Irrigation. Cirad-IRD-Cemagref, Montpellier, France, pp. p. 11.

Benhadj, I. (2008). Observation spatiale de l'irrigation d'agrosystèmes semi-arides et Gestion durable de la ressource en eau en plaine de Marrakech.. Océan, Atmosphère. Université Paul Sabatier - Toulouse III. Français.

Bermond, R. & Perrodon, C. (1979). Paramètres de la qualité des eaux. Minist. De l'Envi., Paris, 259p.

Bchitou, R. (2001). Le suivi des métaux lourds dans les eaux et les sédiments du moyen Sebou : Elaboration d'un plan d'expérience afin d'éliminer le chrome. Thèse d'Etat. Faculté des Sciences Université Mohammed V Agdal Rabat : Maroc.

Billaux, P. et Bryssine, G. (1970). Les sols du Maroc : chapitre III. Cahier de l'ORSTOM, numéro de la collection de références, No. 13703, pp. 59-101.

Bitar, K & al. (2013). Evaluation qualitative et identification des sources de pollution du bassin versant de l'Oum Erbia. Maroc. Larhyss Journal, 14, 161-177.

Blakely, R.J. and Simpson, R.W. (1986). Approximating Edges of Source Bodies from Magnetic or Gravity Anomalies. Geophysics, 51, 1494-1498.

BOLELLI, E. (1952). Hydrogéologie du Maroc (Beni-Amir, Beni-Moussa). Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, 97, pp.205-215.

BOLELLI, E. (1959). Carte géologique du Maroc au 1/200000 feuilles Benahmed-El Brou-Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc. Rabat.

BONN, F. et ROCHON, G. (1992). Précis de Télédétection, Vol. 1, Principes et Méthodes. Les Presses de l'Université du Québec et AUPELF-UREF, Sainte-Foy, 485 p.

BONN, F. et ROCHON, G. (1992). Précis de Télédétection, Vol. 1, Principes et Méthodes. Les Presses de l'Université du Québec et AUPELF-UREF, Sainte-Foy, 485 p.

BOUJO, A. (1976). Contribution à l'étude géologique du gisement de phosphate, crétacé éocène des Ganntour (Maroc occidental). Notes et Mém.serv.géol.Maroc. N° 262,228p.

Boukdir, A. (1994). Contribution à l'étude géothermique du bassin du Tadla, plateau des phosphates et Tassaout aval : Application au réservoir calcaire du turonien (crétacé), Faculté des Sciences, As-Samlalia, Marrakech - DES ou DESA.

BOURCART, J. (1942). Carte géologique d'exploration du territoire autonome du Tadla au 200.000. Notes et Mém.serv.géol.Maroc., N° 58 et 58bis.

BRGM. (1962). Méthodes d'études et de recherches des nappes aquifères. Editions du BRGM Publida-Paris-France-158p.

BRGM. (1993). Étude des systèmes aquifères de la plaine du Tadla ; Rapport ,127 p.

BRGM. (1993). Étude du système multicouche de la plaine de Tadla. Description des quifères et analyse du système multicouche, Maroc, Rapport R35610 4S/Eau-92, 129 p.

Bryssine, G. (1953). Étude des sols du périmètre irrigable des Beni Amir - Beni Moussa.

Bouchaoui, L. (1997). Contribution des isotopes à l'étude de la recharge des aquifères de la région de Béni Mellal (Tadla, Maroc). Hydrochemistry (Proceedings of the Rabat Symposium, April 1997) IAHS Publ, 244.

Bouchaoui, L & al. (2009). Origin and residence time of groundwater in the Tadla basin (Morocco) using multiple isotopic and geochemical tools. Journal of Hydrology, 379(3-4), 323–338.

Bouderbala, A. (2015). Contribution des méthodes hydrochimiques et géophysiques a l'acquisition de la minéralisation dans les zones côtières cas de la nappe alluviale de l'oued nador - tipaza (algerie). Thèse de doctorat, Université Hassiba benbouali de chlef faculté de génie civil et d'architecture, département d'hydraulique.

Boukdir, A. (1990). Etude hydrogéologique en vue d'une modélisation du système aquifère du Tadla-Plateau des phosphates. CEA, Fac. Scien. Semlalia Marrakech : Maroc.

Bouikbane, H., Boualoul, M. et Benamara, A. (2016). Prospection Par Methode De Sondages Electrique Au Niveau Du Piedment Du Causse Moyen Atlasique D'el Hajeb-Ifrane (Maroc), IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics, 4(4), 42-52.

Buard, E. (2013). Dynamiques des interactions espèces – espace Mise en relation des pratiques de déplacement des populations d’herbivores et de l’évolution de l’occupation du sol dans le parc de Hwange (Zimbabwe). Thèse de doctorat, Université Paris 1 – Panthéon – Sorbonne UMR 8504 – Géographie-Cités.

C

Chapellier, D. (2005). Application des méthodes électriques lacustres et terrestres à l’étude d’un aquifère côtier. Institut de Géophysique, Univ de Lausanne, Suisse.

Chaieb, A., Khattach, D., Kaufmann, O. et Chaieb, M. (2016). Electrical imaging study of contaminated sites : the case of a landfill site in Berkane (Morocco). *Journal of Materials and Environmental Science*, 7(12). 4448-4455.

Chkir, N., Trabelsi, R., Bahir, M. et Monteiro, J. P. (2008). Vulnérabilité des ressources en eaux des aquifères côtiers en zones semi-arides – Etude comparative entre les bassins d’Essaouira (Maroc) et de la Jeffara (Tunisie). *Comunicações Geológicas*, 95, 107-121.

Cordell, L. (1982). Mapping basement magnetic zones from aeromagnetic data in San Juan basin, New Mexico, in : *The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps*, SEG Publication, pp. 181–197.

Choubert, G., et Faure Muret, A. (1960-1962). Evolution du domaine atlasique marocain depuis les temps paléozoïques, in « livre à la mémoire du Professeur Paul Fallot » M.h.Serv.Soc.géol.fr.t.l, pp : 447-527.

D

Dahlin T., Zhou B. (2004). À numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 52, 379-398.

Diallo, B. (1996). Analyse et contrôle de la pollution des eaux du fleuve Niger par les rejets liquides urbains et industriels du district de Bamako. Mémoire DEA de Biologie. Ensup Bamako.

Diot, H. (1989). MISE en place des granitoides hercyniens de la meseta Marocaine Etude structurale des massifs de Sebt de BriKiine (Rehamna), de Zaër et d'Oulmès (Massif Central, et d'Aoulf Bou-Mia (Haute Moulouya). implications géodynamiques. Thèse de doctorat. L'UNIVERSITE PAUL SABATIER ;

Doerfliger et Zwahlen, (1997). EPIK: à new method for outlining of protection areas in karstic environment International symposium and field seminar on “karst waters and environmental impacts”, edited by: Günay, G. and Jonshon, AI, Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam.

Dole, L. (1983). Elastic Properties of Hafnium and Zirconium Oxides Stabilized with Praseodymium or Terbium Oxide, *Journal of the American Ceramic Society*.

E

El hammoumi, N., Sinan, M., Lkhlif, B. et Mahjoub, L. (2012). Évaluation de la qualité des eaux souterraines pour leur utilisation dans l'eau potable et l'agriculture : plaine de Tadla. Maroc. Afrique Science, 8(1), 54-66.

El Harti, & al. (2016). Spatiotemporal monitoring of soil salinization in irrigated Tadla Plain (Morocco) using satellite spectral indices. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 50, 64–73.

ESSAHLAOUI A., (2000). Contribution à la reconnaissance des formations aquifères dans le bassin de Meknès-Fès (Maroc). Prospection géo-électrique, étude hydrogéologique et inventaire des ressources en eau. Thèse de Doctorat, E.M.I, Rabat.

Ettazarini, S. (2006). Groundwater Pollution Risk Mapping for the Eocene Aquifer of the Oum Er-Rabia Basin, Morocco. Environmental Geology, 51, 341-347

F

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 de doctorat, Université Chouaïb Doukkali, Faculté des Sciences El Jadida.

Faouzi, M. et Larabi, A. (2001). Problématique de la remontée de la salinité et de la pollution par les nitrates des eaux de la nappe phréatique des Beni-Amir (Tadla. Maroc) Ingénieries, 27, 23-36.

Fabre, J. (1971). Structure de l'Algérie saharienne. Eléments pour une carte tectonique. Bull. Serv. Géol., Algérie, V. 41, p, 161-185 Nouvelle série.

Foster, SSD., Hirata R., (1988). Groundwater pollution. Risque assessment. A methodology using available data WHO-PAHO-CEPIS Lima, Pérou, pp1-87.

G

Gerard, A. (1972). Interprétation quantitative en gravimétrie ou magnétisme à partir des cartes transformées de gradient vertical. Géophys. Prosp. 20, 459-481.

Girard. (1999). Traitement des données de télédétection. DUNOD, Paris, p. 529.

H

Hammani, A., Kuper, M., Debbarh, A., Bouarfa, S., Badraoui, M., Belloouti, A. (2004). Evolución de l'exploitation des eaux souterraines dans le périmètre irrigué du Tadla. Hommes La Terre L'eau, 130, 42-43.

Hathouti, M. (1990). Étude gravimétrique et magnétique des amas sulfures viens de la région de Marrakech (Maroc). Document et travaux du Centre Géologique et Géophysique de Montpellier numéro 27. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier: France.

Herbei, N.V. et Sala, F. (2015). Use landsat image to evaluate vegetation stage in sunflower crops. Agrolife scientific journal, 4(1), 79-86.

Hessas, N.(2005). Evaluation cartographique et évolution diachronique par télédétection du risque incendie de forêt. Simulation de la propagation du feu dans le bassin versant du Paillon, Nice, Alpes Maritimes. Géographie. Université Joseph-Fourier - Grenoble I. Français.

Hsissou, Y., Chauve, P. et Mania, J. (1996). L'aquifère des calcaires du Turonien (Bassin du Tadla. Maroc). Alimentations locales et lointaines à partir de l'Atlas. Journal of Hydrology, 183(3-4), 433–44.

Hsissou, Y., Chauve, P., Mania, J., Mangin, A., Bakalowicz, M. et Gaiz, A. (1996). Characterization of the groundwaters of the Turonian catchment of Tadla (Morocco) by the concentration ratios of Sr^{2+} / Ca^{2+} . Journal of Hydrology, 183(3-4). 445-451.

Hsissou, Y. (1991). L'aquifère des calcaires du Turonien (Bassin du Tadla, Maroc). Alimentations locales et lointaines à partir de l'Atlas. Thèse de Doctorat, Terre, Océan, Espace, Univ de Besançon. 180p.

Hssaisoune, M & al. (2012). Analyse géophysique et structurale de l'aquifère de la plaine du Souss Massa : synthèse et conséquences hydrogéologiques. Revue internationale de géologie, de géographie et d'écologie tropicales, 36, 63– 82.

Hubert-Moy, L., Cotonnec, A., Le Du, L., Chardin, A., and Perez, P. (2001). A comparison of classification procedures of remotely sensed data applied on different landscape units, Remote Sensing of Environment, ed. Elsevier, vol.75, n°2, p.174-187.

Hubert-Moy L., Quêté Y., Billot M., and Corgne S. (2001). Trajectories of Land-cover-change in intensive agricultural regions : a short-time predictive approach with the Dempster-Shafer theory, First International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing images, September 13-14, 2001, Trento, Italy,

I

Intissar, R. (2009). Apport des méthodes électriques à la détermination de la structure interne d'une halde à stériles. Thèse de doctorat, université de Montréal, école polytechnique de Montréal

J

Jilali, A. (2014). Contribution à la compréhension du fonctionnement hydrodynamique de la nappe souterraine de l'oasis de Figuig (Haut Atlas Oriental). Thèse de doctorat, Université Mohammed Premier, Oujda. Maroc.

K

Kachi, S. (2007). Vulnérabilité de la nappe alluviale de TEBESSA-MORSOTT face aux polluants ; Univ, BADJI MOKHTAR ANNABA. N° 142.PP174.

Kaid rassou, K. (2009). Étude des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans le bassin côtier d'oualidia. Thèse de doctorat au Laboratoire Geophysique, département de géologie, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech : Maroc.

Keller, G. V., Frischknecht, F. C. (1966). Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon press.17).

Kuper, M. (2004). Autonomie et dépendance des irrigants en grande hydraulique : observations de l'action organisée au Maroc et en Algérie. Natures Sciences Sociétés, 2009/3 (Vol. 17).

Knödel, K., Lange, G., Voigt, HJ. (2007). Environmental geology: handbook of field methods and case studies, Bundesanstalt für geowissenschaften, Springer, Hannover, 310 p

L

Lbouh, H. (2016). Apport de la télédétection dans l'évaluation de la variation des surfaces d'eau, du sol et du couvert végétal dans la Plaine du Tadla entre 1984 et 2015.

Lecerf, R. (2008). Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution. Thèse de doctorat, laboratoire Costel, Université de Rennes 2.

Loke, M.H., Barker, R.D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method, Geophysical Prospecting 44, 131-152.

Loke, M.H., Dalhin, T. (2002). À comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton method in resistivity imaging inversion. Journal of Applied Geophysics , 49, 149-162.

Loukili, M. Bock, L. Engels, P et Mathieu, L. (2000). Approche géomorpho-pédologique et système d'information géographique (sig) pour la gestion des terres au Maroc, Étude et gestion des sols, 7 (1), 37- 52.

Lu. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance, International Journal of Remote Sensing Volume 28, Issue 5.

M

Mansouri, A & al. (2016). Application du SIG et des méthodes géoélectriques pour la caractérisation géophysiques et modélisation tridimensionnelle des aquifères Sud-Ouest du bassin du Rharb (Maroc NW). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 14(1), 73-83.

Massoni C., Missante G., 1966. Description des régions transversales chapitre II : la plaine du Tadla Les cahiers de la recherche agronomique N° 24, congrès de pédologie méditerranéenne 1966.

Masse, (2013). Développement et automatisation de méthodes de classification à partir de séries temporelles d'images de télédétection - Application aux changements d'occupation des sols et à l'estimation du bilan carbone.

Missante, G. (1963). Les sols du Tadla et leur répartition schématique au 1/500000

Ministère de l'Intérieur (2015). MONOGRAPHIE GENERALE, La région de Béni Mellal-Khénifra.,).

Michard, A. (1976). Éléments de géologie marocaine. Notes et mémoires, ser.géol. Maroc. Rabat, n°252, pp.408.

Monographie générale (2015). La région de béni Mellal-khénifra, Ministère de l'Intérieur, p 56.

N

Najine, A & al. (2006). Contribution de la gravimétrie à l'étude de la structure du bassin de Tadla (Maroc) : Implications hydrogéologiques. *Géoscience*, 338(10). 676–682. Récupéré de :

O

Office fédéral de la santé publique (OFSP) (2010). Procédés reconnus destinés au traitement de l'eau potable.

Oulaaross, Z. (2009). Étude 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 de doctorat, L'université Chouaïb Doukkali UFR environnement, aménagement et gestion intégrée des espaces littoraux.

P

Par Jean-Paul, L. (2011). Sols, milieux naturels et conservation archéologique Académie des Sciences et Lettres de Montpellier Séance du 30 Mai 2011, conférence 4150, bull. 42, pp. 249-265.

Parker, (1972). The Rapid Calculation of Potential Anomalies, Geoplzys. J. R . astr. SOC.(1972) 31, 447455.

Pique, A. et Michard, A. (1989). Moroccan hercynides, a synopsis. The paleozoic sedimentary and tectonic evolution at the northern margin of West Africa. Am. J. Sci.298, p. 286-330.

R

Radouani, F., Najine, A., Aifa, T. et Ouzerbane, Z. (2013). Reconnaissance du système aquifère du Nord-Ouest de la plaine du Tadla (Maroc oriental) par imagerie électrique. Journal of Hydrocarbons Mines and Environmental Research, 4(1), 33-41.

Rassou, K. (2009). Etude des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans le bassin côtier d'oualidia. Thèse de doctorat, Université Cadi Ayyad Marrakech, Faculté des Sciences Semlalia.

Rochdane, S. & al. (2015). Géométrie de l'aquifère du Haouz oriental et Tassaout amont, Maroc occidental : approche géophysique et hydrogéologique. Hydrological Sciences Journal, 60(1), 133-144.

Robert, M. (1996). Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Masson, 241p.

Reynolds J. (1997). An introduction to applied and environmental geophysics. Ed. Wiley, John & Sons, Inc. 749 p.

S

Saadi, E. (1982). Schéma structural du Maroc. Notes et Mém.serv.géol.Maroc, n° 278 Bis.

Tammal, M. Kiki, M., EL Gasmî, E., Mridekh, A. et Mansouri, B. (2014). Modélisation multicouche du système aquifère du bassin de Tadla et le plateau des phosphates. International Journal of Innovation and Scientific Research, 6(2), 172-180.

Schnebelen, N. & al. (2002). Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5. Opération sectorielle. Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise, nouvelles connaissances hydrogéologiques, Cartographie de la vulnérabilité aux pollutions. Phase 2. Rapport BRGM/RP-51178- FR, 75p.

Samake. (2002). Analyse physico-chimique et bactériologique au L.N.S. Des eaux de consommation de la ville de Bamako.

T

Tammal, M. et al. (2014). Modélisation multicouche du système aquifère du bassin de Tadla et le plateau des phosphates, International Journal of Innovation and Scientific Research ISSN 2351-8014 Vol. 6 No. pp. 172-180.

Thirion, (2003). Modélisation de l'interaction cohérente des ondes électromagnétiques avec des couverts forestiers. Thèse Doctorat en Science, Spécialité Électronique Micro-ondes, Université PAULSABATIER, Toulouse III, France. 183 p.

Telford, W. M. Sheriff, R.E. (1990). Applied Geophysics.

V

Von, V. (2009). Recherches sédimentologies et structurales à l'articulation entre Haut et Moyen Atlas et la Haute Moulouya, Maroc. Thèse de doctorat. Université Berlin Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Naturwissenschaften

Vrba, J. & zaporozec, A. (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability. Associ. Int. Hydrogéol., vol. 16, 131p.

Z

Zahi, F. (2014). Contribution à l'étude hydrochimique du sous bassin versant du lac fetzara (nord-est algérien) approche géochimique et fonctionnement des sols et des eaux. Thèse de doctorat, Université badji Mokhtar Annaba, Faculté des Sciences de la Terre.

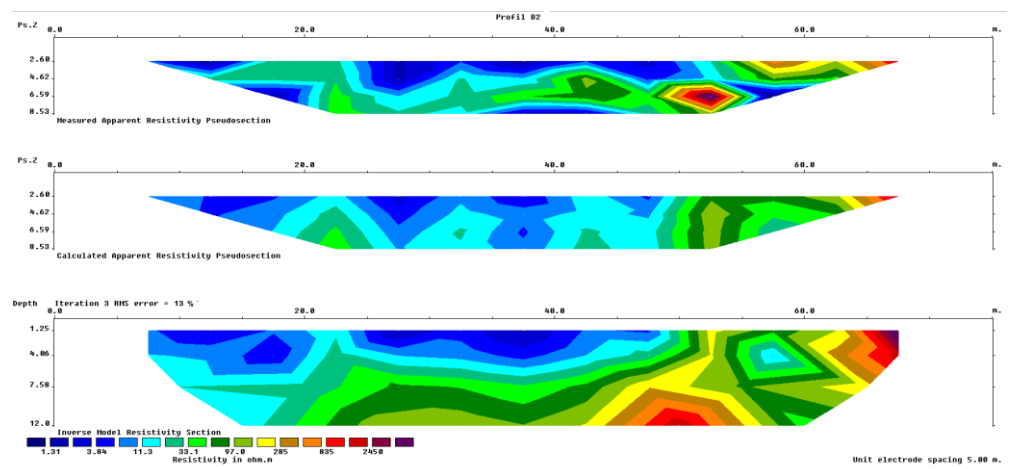
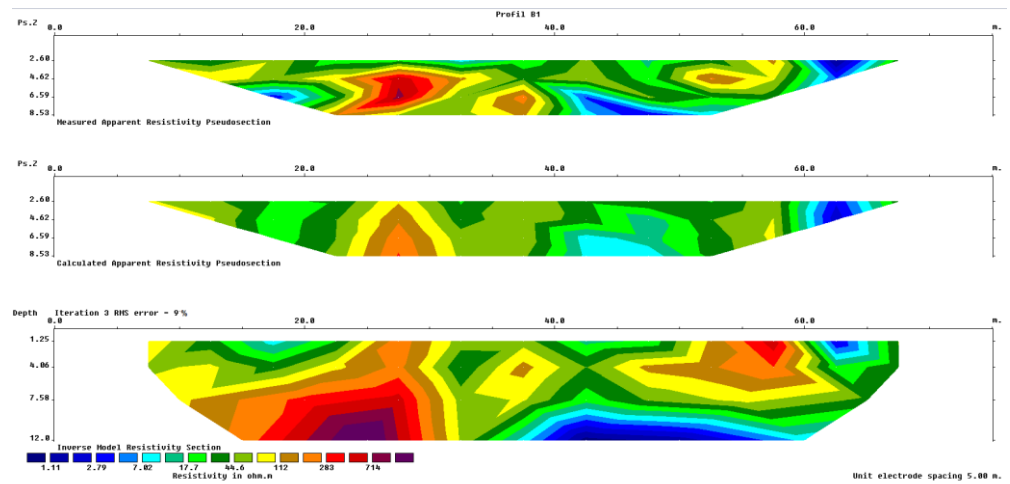
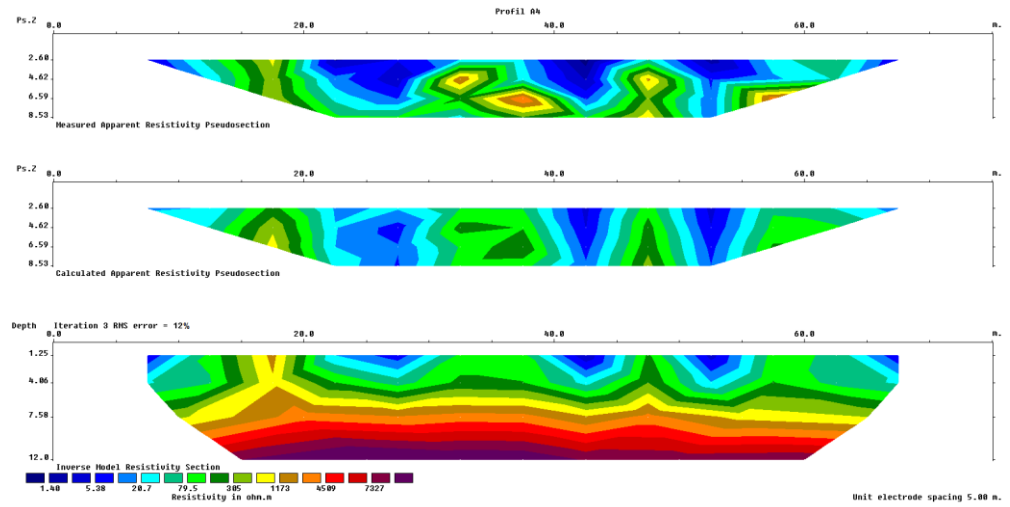
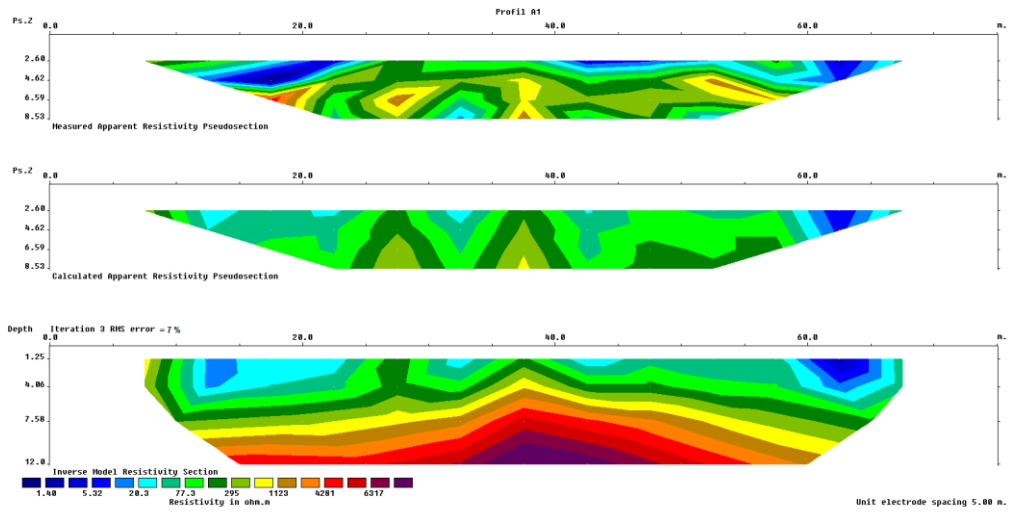
Zarhloule, Y & al. (2001). La prospection géothermique de surface au Maroc : hydrodynamisme, anomalies thermiques et indices de surface. Journal of African Earth Sciences, 32(4), 651-667.

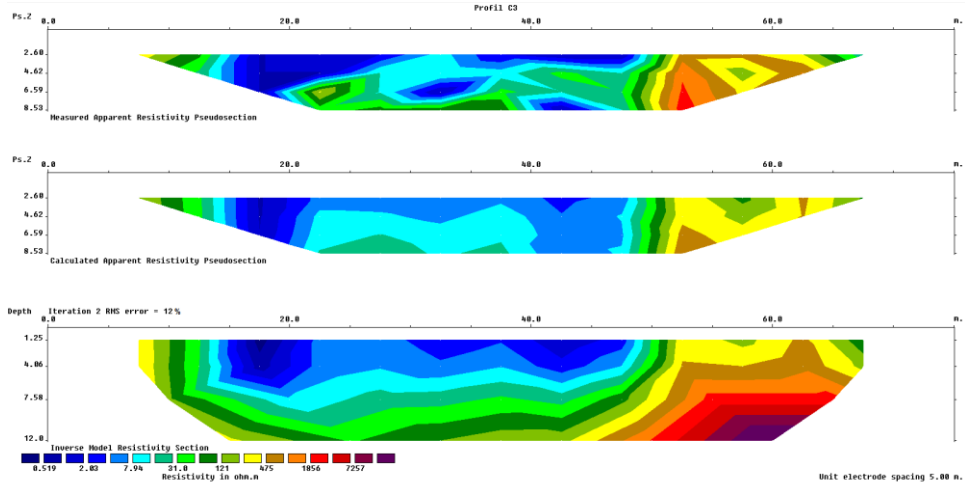
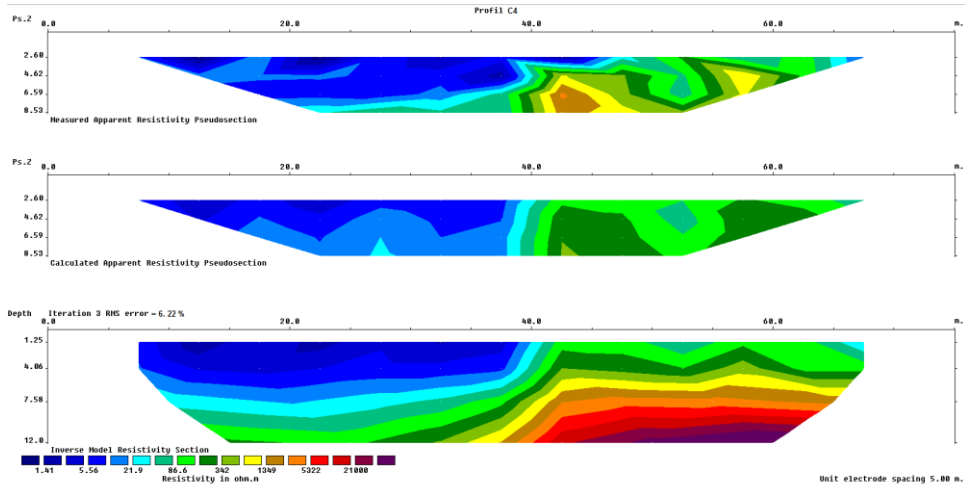
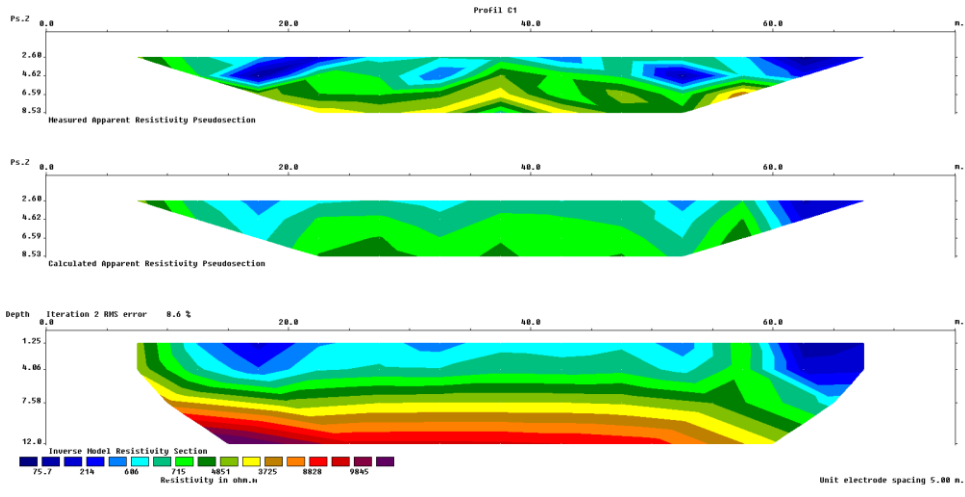
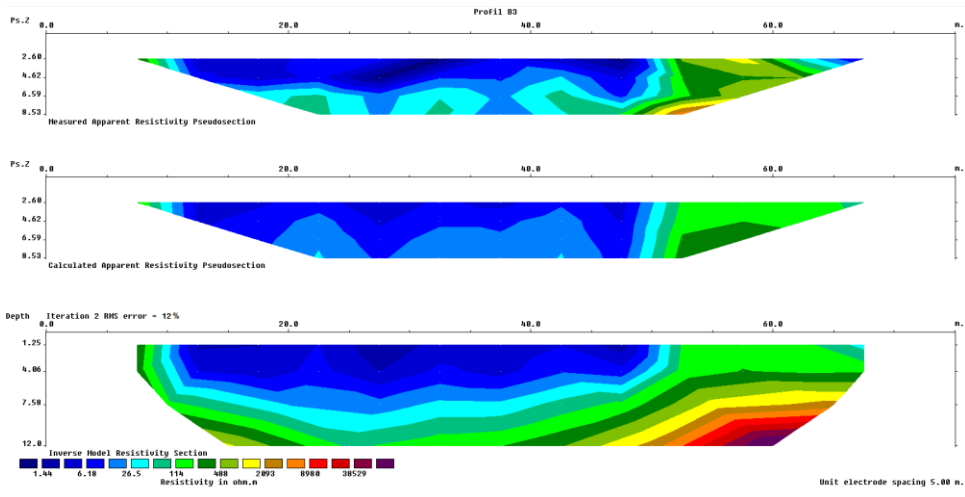
Zerki, N. (2013). Apport de la chimiométrie pour l'analyse et l'interprétation de quelques paramètres physicochimiques influençant la répartition des métaux lourds, des éléments nutritifs et des anions dans les eaux de l'oued de bouregreg, Thèse de doctorat, Université Mohammed V-Agdal, Faculté des sciences rabat. Maroc.

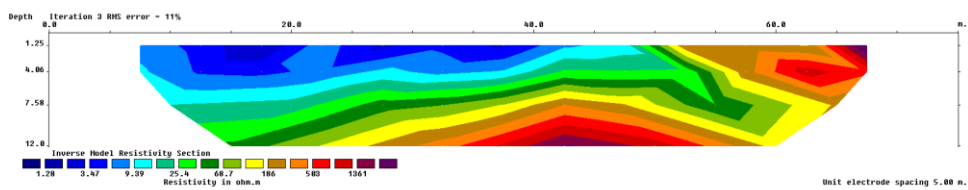
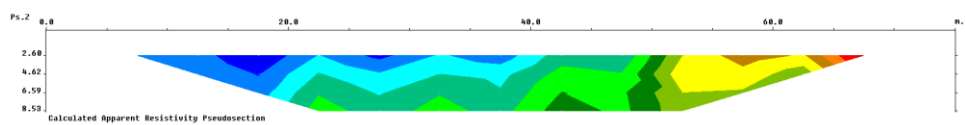
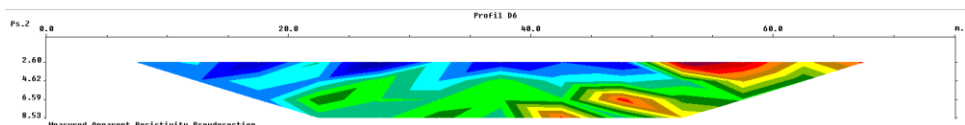
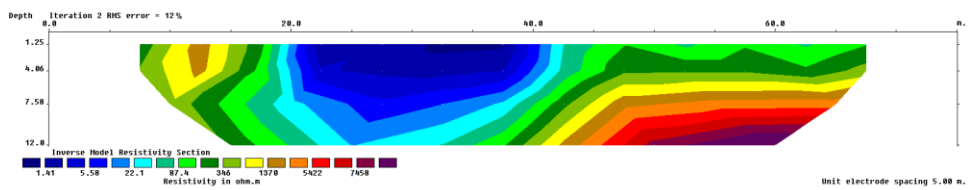
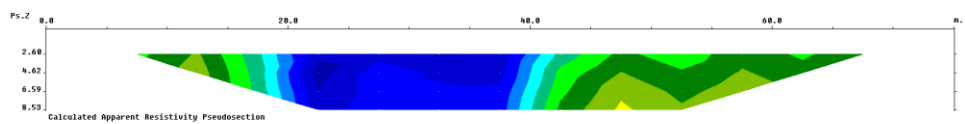
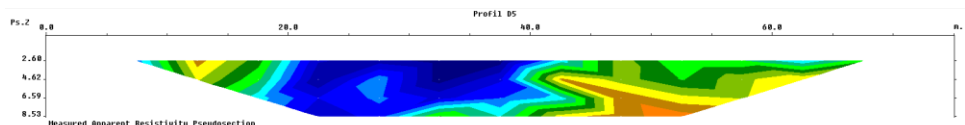
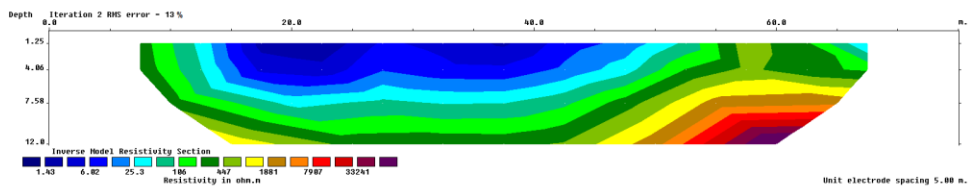
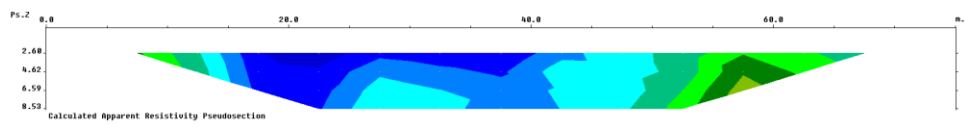
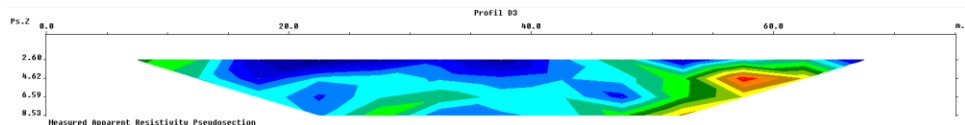
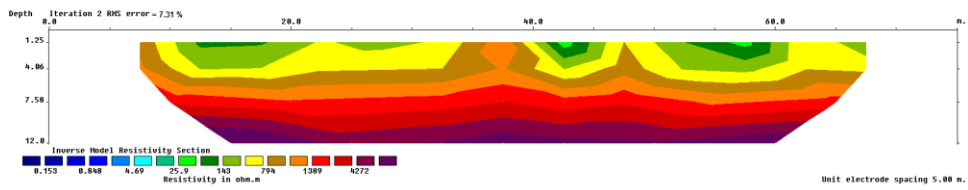
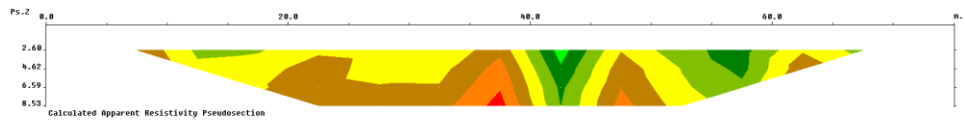
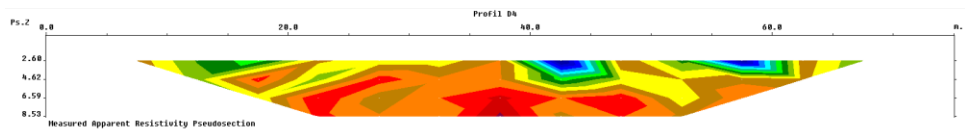
Zheng, B., Myint, S. W., Thenkabail, P. S., & Aggarwal, R. M. (2015). A support vector machine to identify irrigated crop types using time-series Landsat NDVI data". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 34, 103–112.

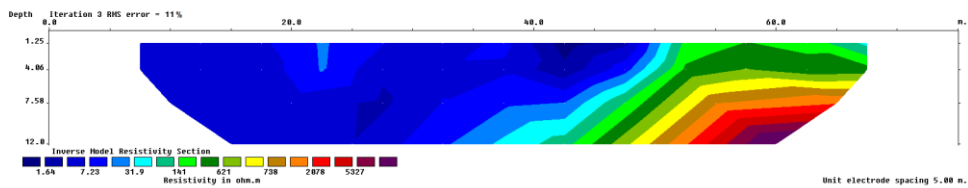
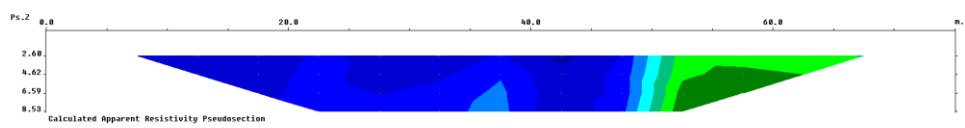
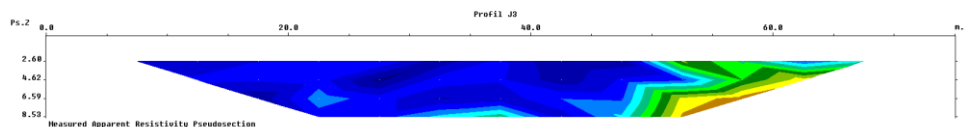
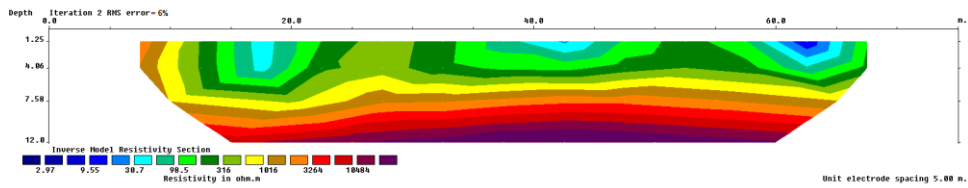
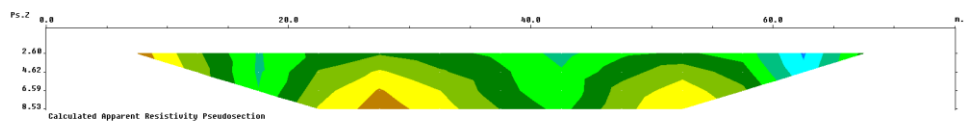
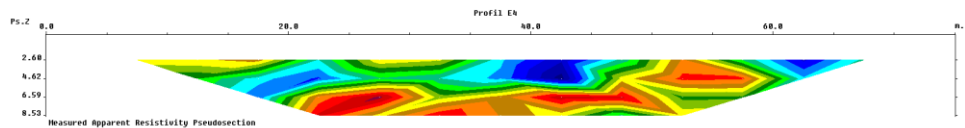
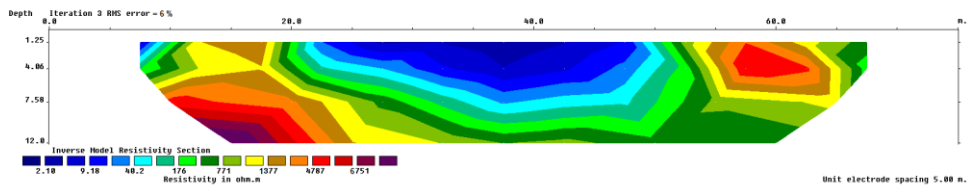
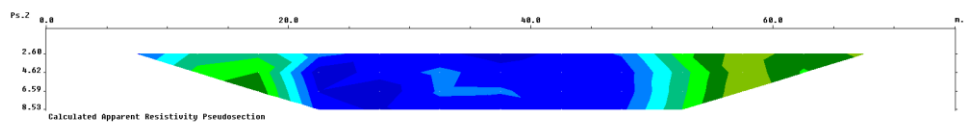
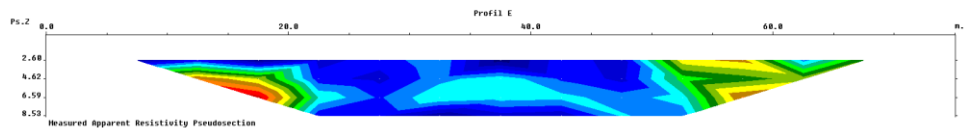
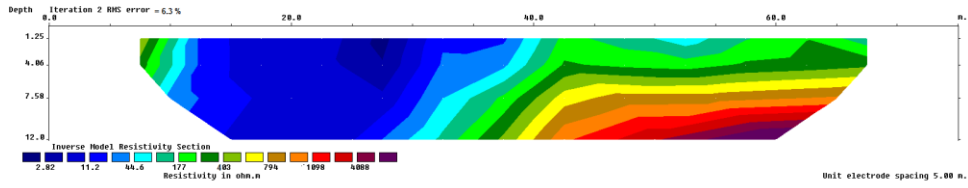
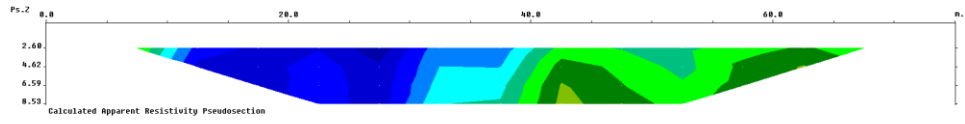
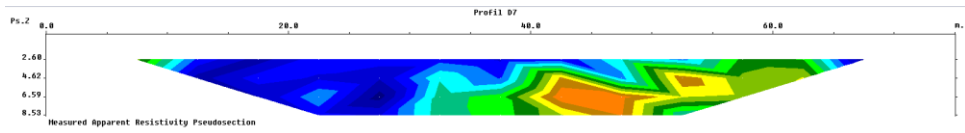
Annexes

Profils de la tomographie électriques :



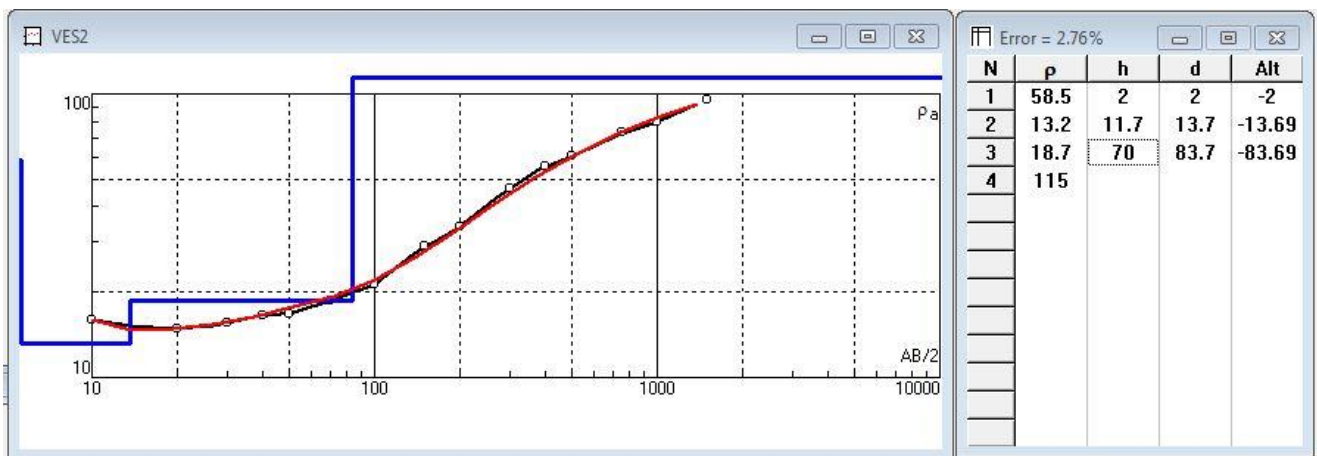
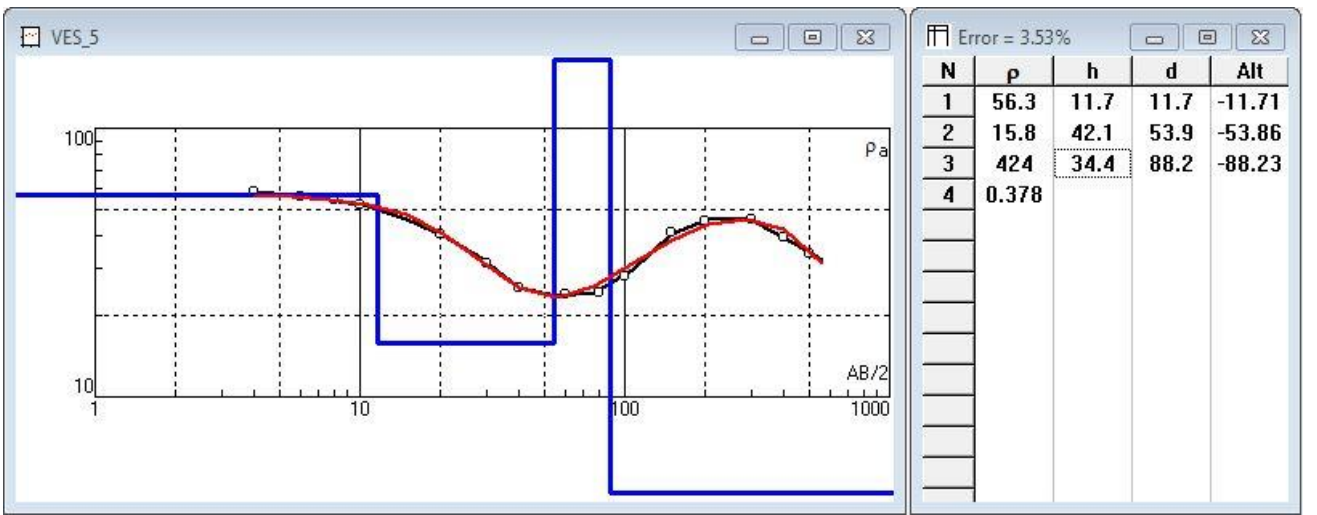
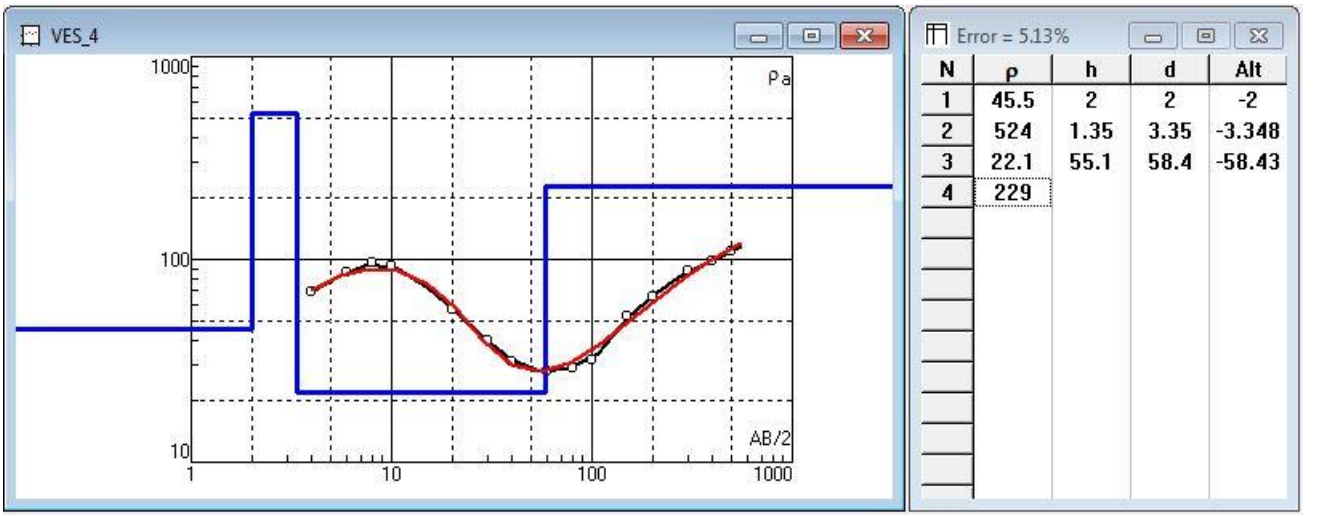
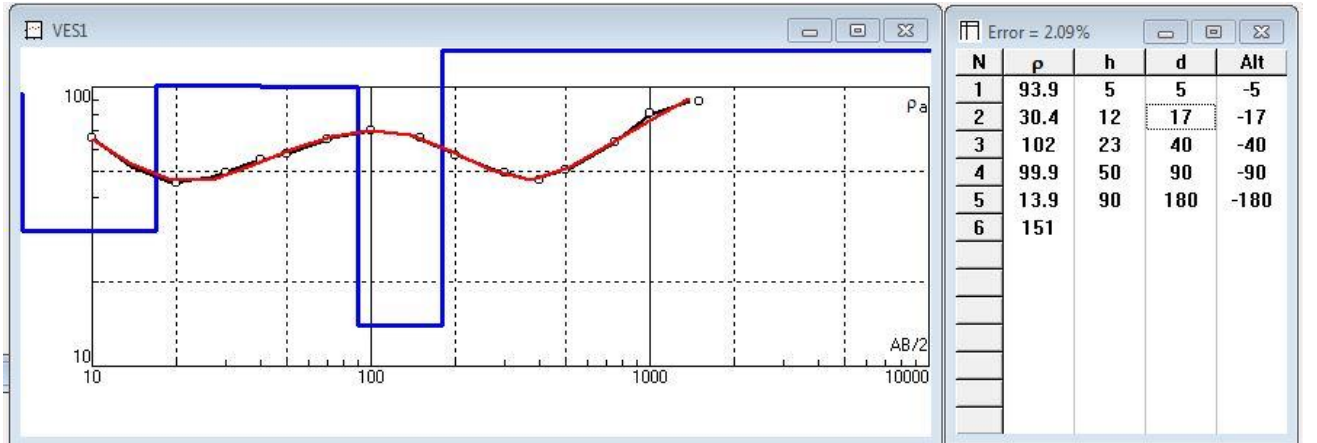


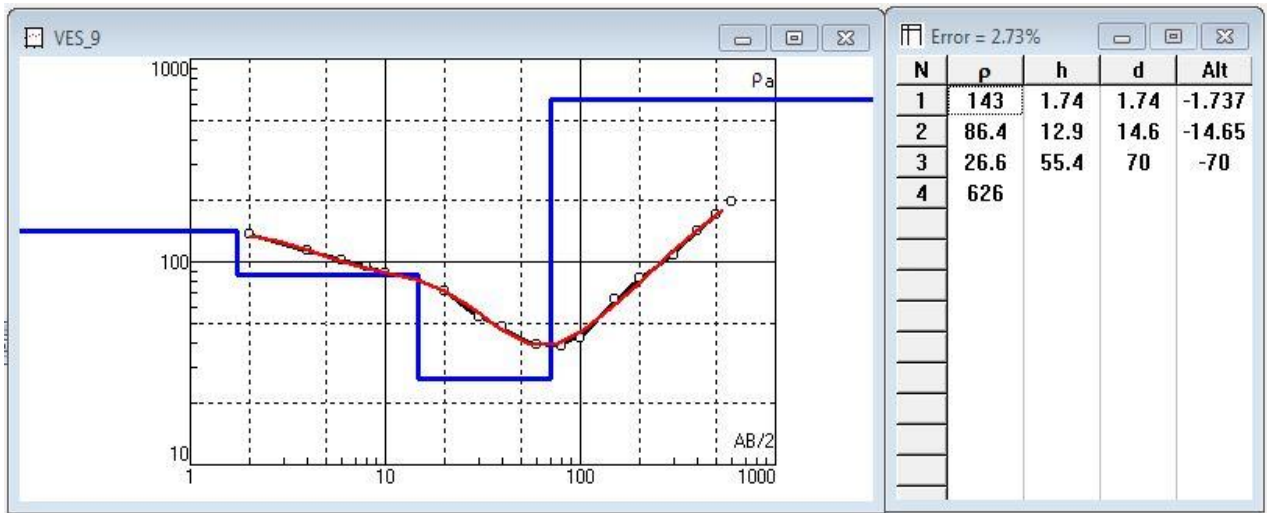
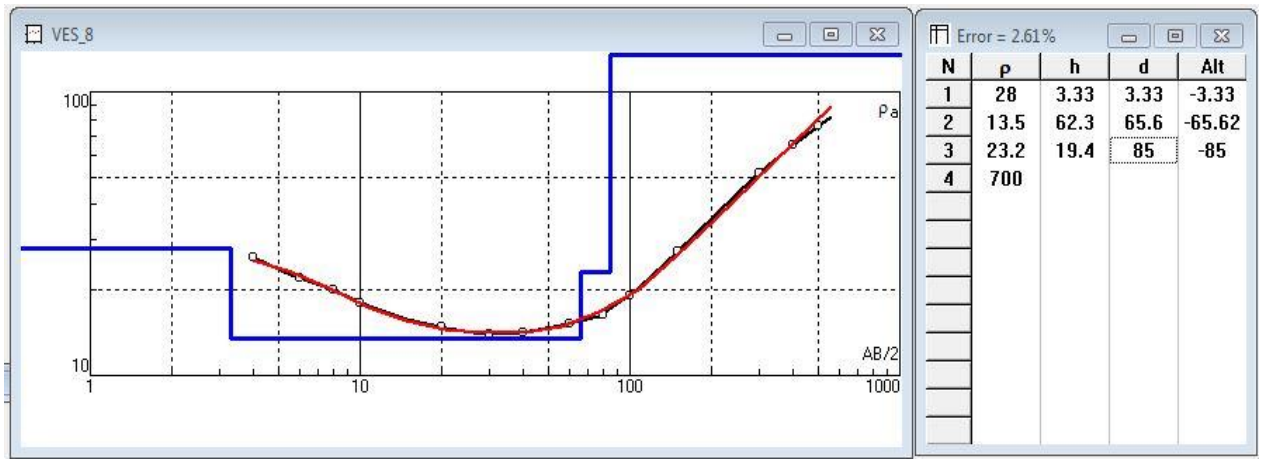
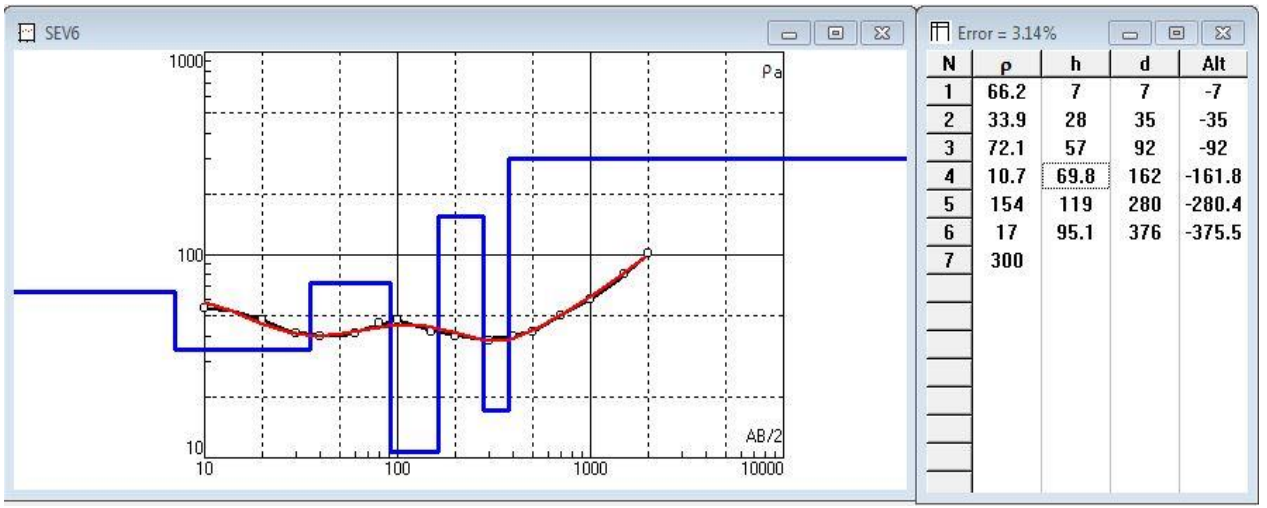
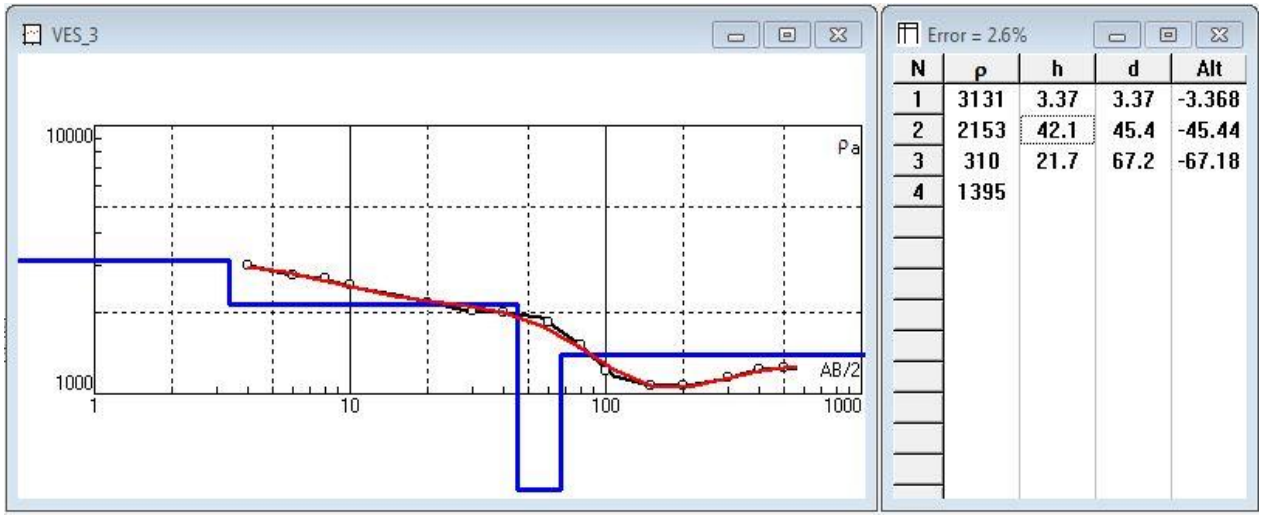


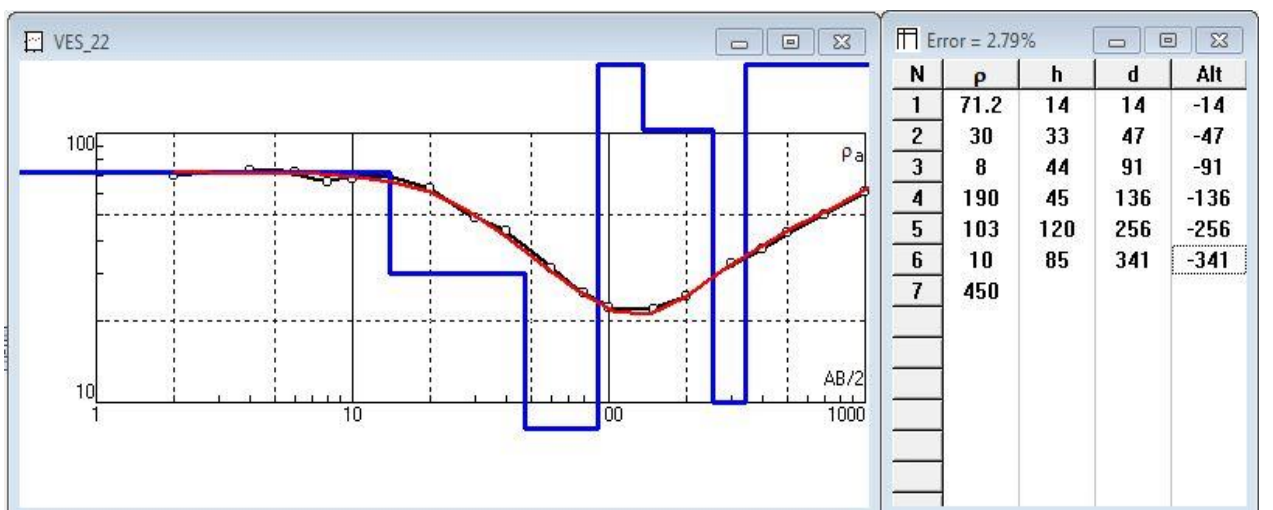
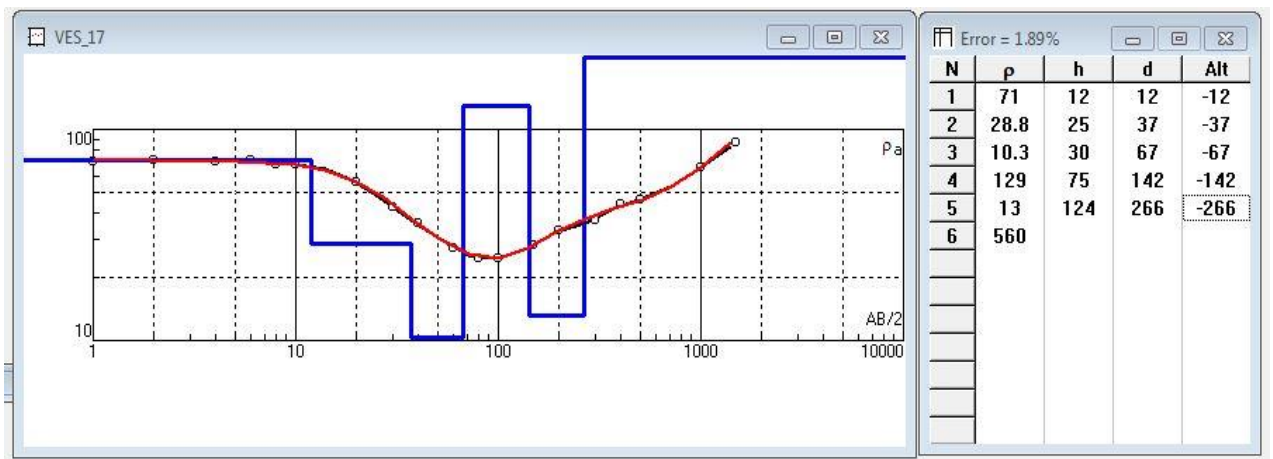
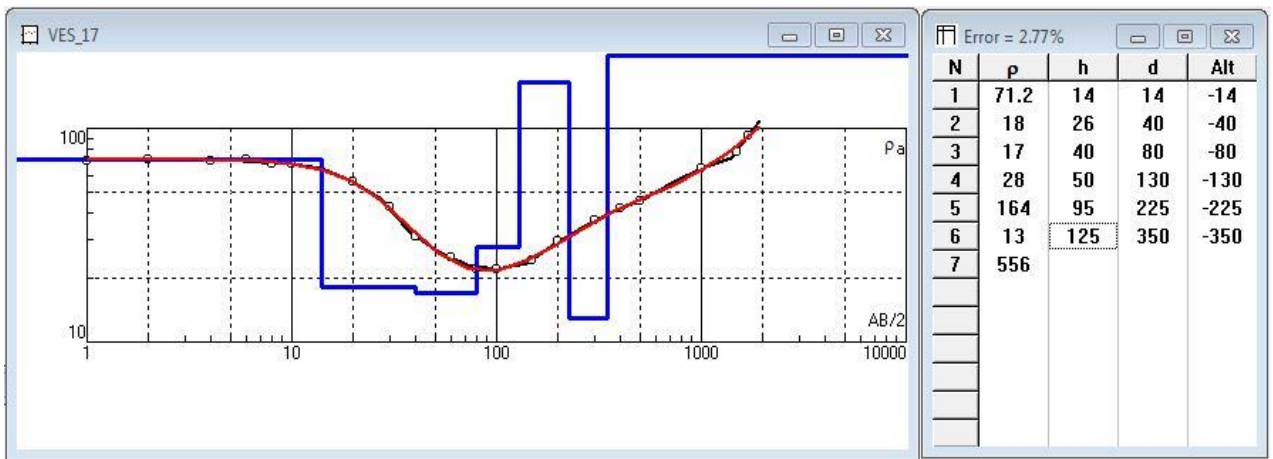
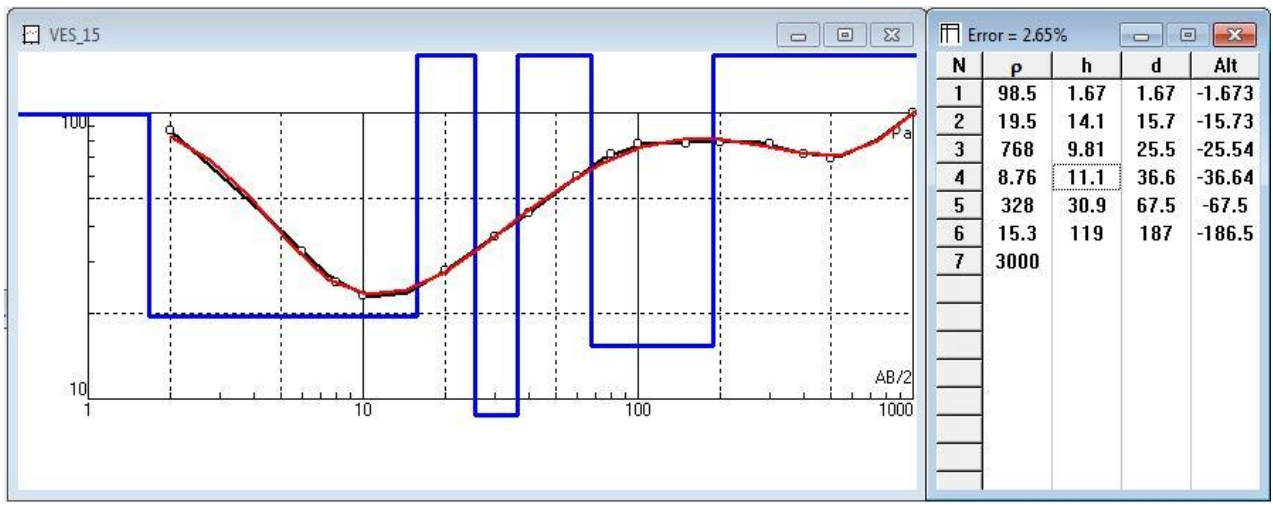


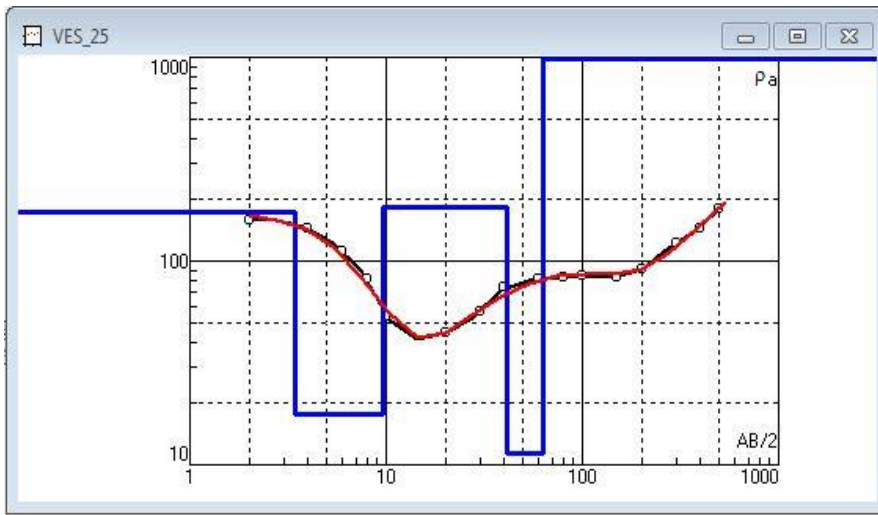
Annexe 2

Profils des sondages électriques :



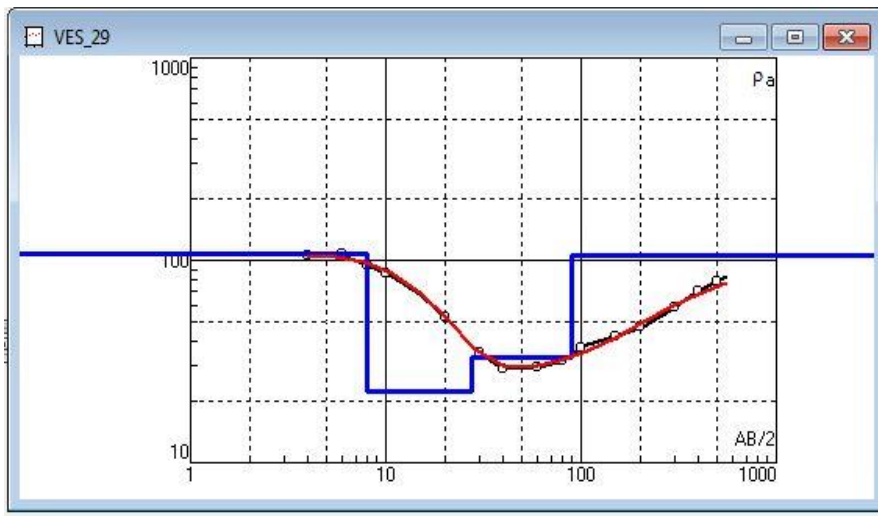






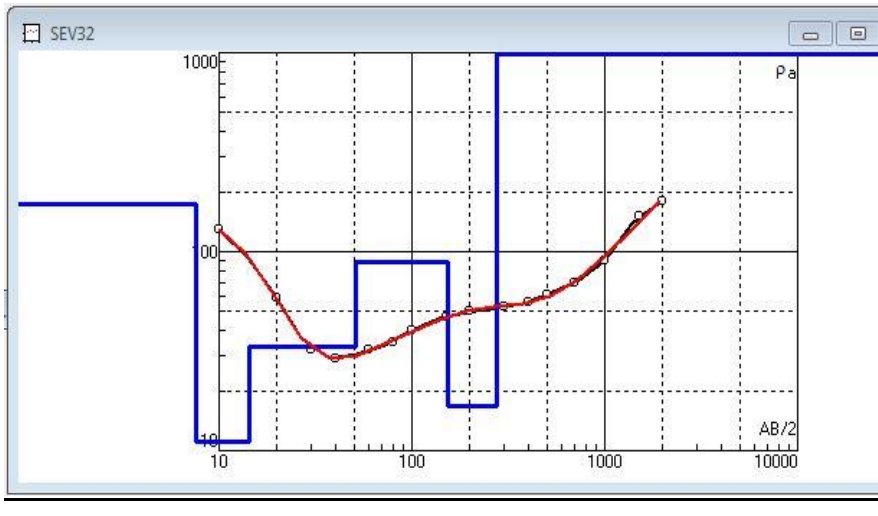
Error = 3.98%

N	p	h	d	Alt
1	172	3.46	3.46	-3.457
2	17.6	6.1	9.55	-9.553
3	184	31.9	41.4	-41.43
4	11.4	21.9	63.3	-63.33
5	1557			



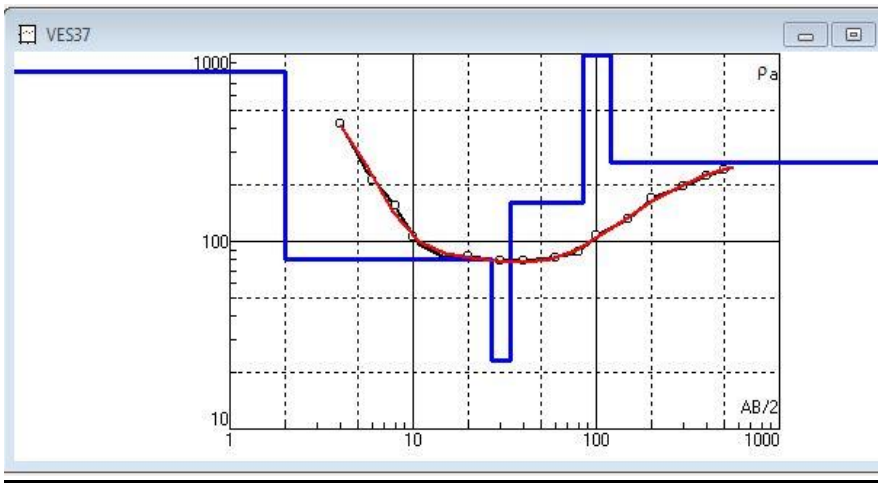
Error = 3.64%

N	p	h	d	Alt
1	108	8	8	-8
2	22.4	19.5	27.5	-27.54
3	33.1	62	89.5	-89.54
4	106			



Error = 2.4%

N	p	h	d	Alt
1	173	7.54	7.54	-7.54
2	11	6.71	14.3	-14.25
3	33.4	37.3	51.5	-51.55
4	89.2	101	153	-152.6
5	16.8	125	278	-277.5
6	4091			

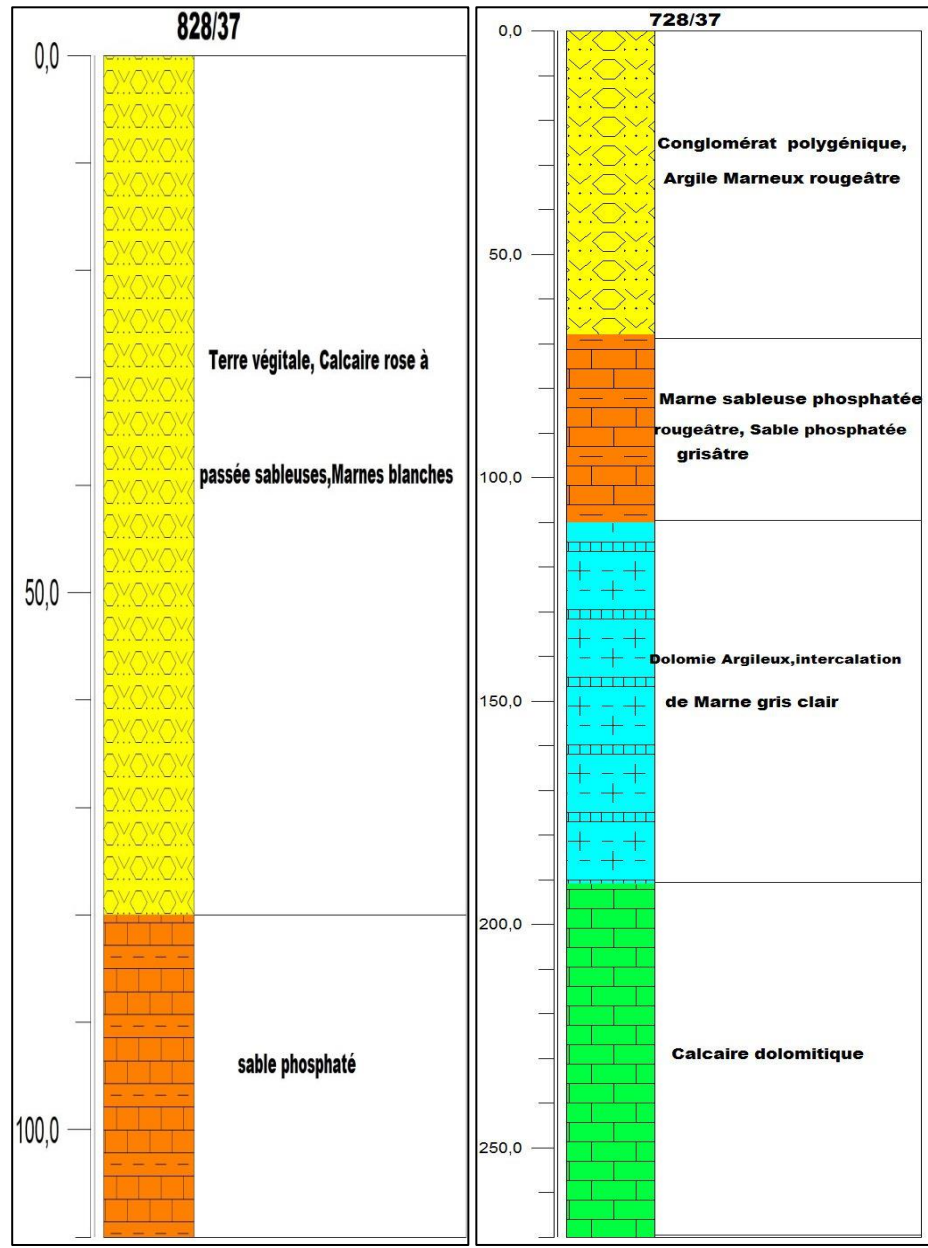


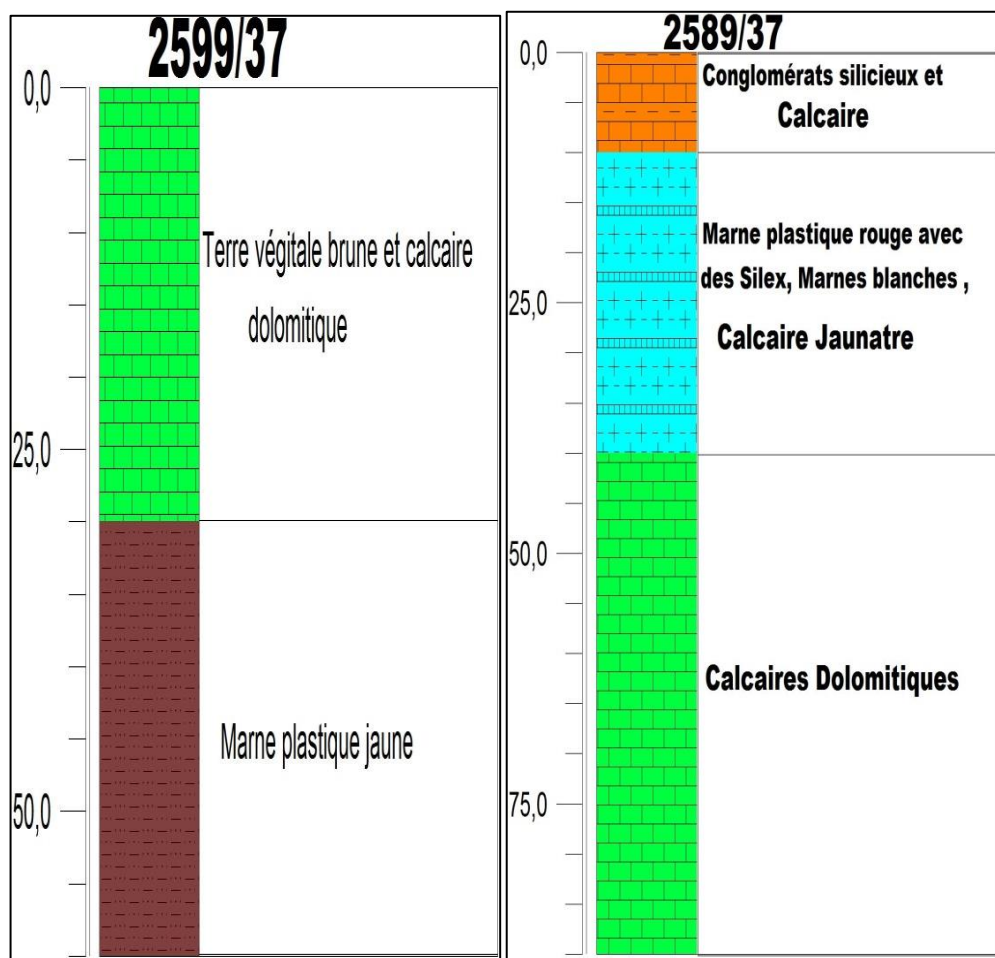
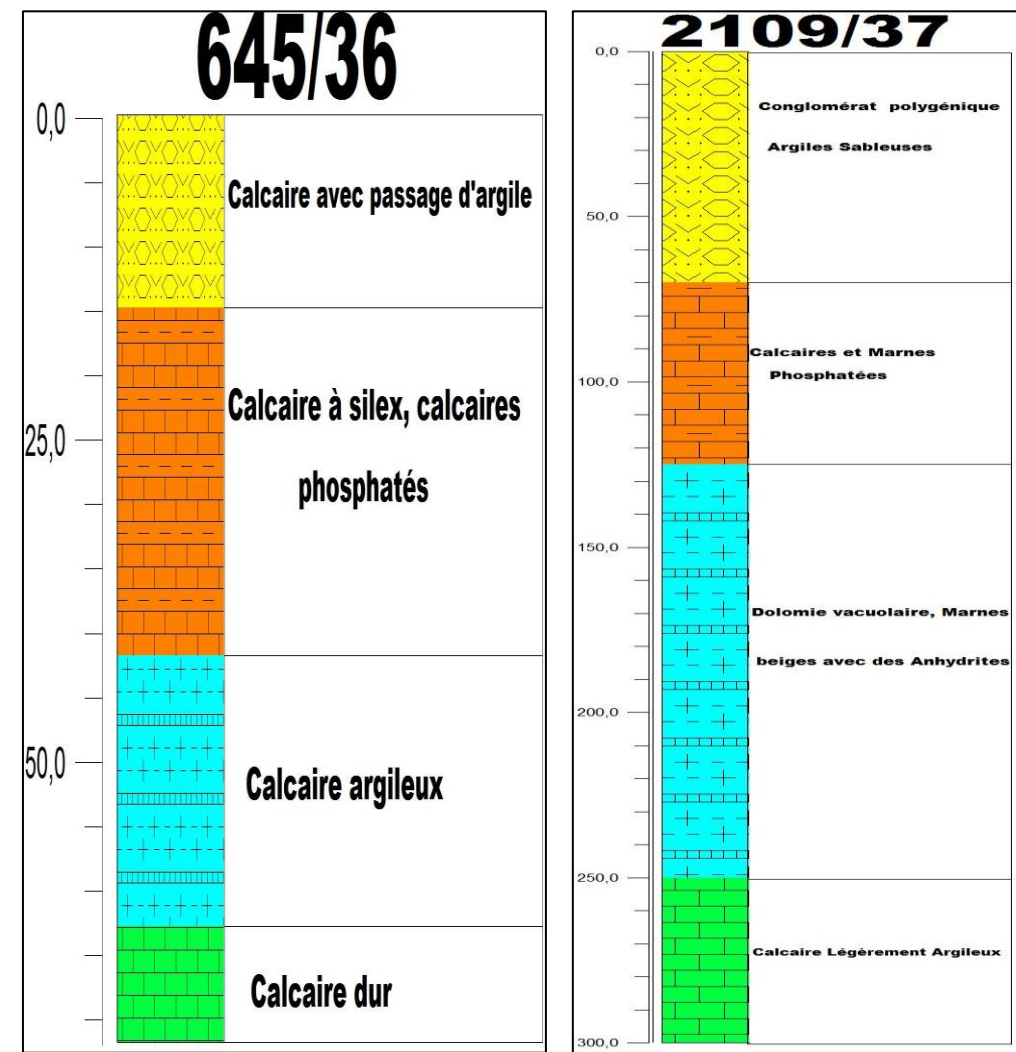
Error = 3.88%

N	p	h	d	Alt
1	807	2	2	-2
2	81	25	27	-27
3	23	7	34	-34
4	162	51	85	-85
5	1047	36	121	-121
6	263			

Annexe 3

Profils des puits





Annexe 4

Les donnes climatiques des stations pluviométriques :

Pluies mensuelles														
		X :	409165	Y :	193045	Z :	537							
Nom :	BENI MELLAL											Unité :	Mm	
Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Total	
1982/83	*	*	*	*	13,2	4,0	92,9	53,5	17,5	0,0	0,0	7,8	188,9	
1983/84	26,3	5,4	116,5	22,6	13,2	4,6	92,9	53,5	58,0	0,0	0,0	0,0	393,0	
1984/85	1,2	4,6	99,8	1,3	183,6	29,0	15,2	79,1	31,6	0,0	0,0	0,0	445,4	
1985/86	2,2	0,8	56,0	49,8	66,5	84,8	38,7	53,7	34,4	59,9	0,0	0,0	446,8	
1986/87	1,9	71,2	72,8	6,0	80,1	107,5	9,1	2,0	0,0	3,7	0,6	0,0	354,9	
1987/88	11,4	21,6	97,5	76,7	110,9	75,7	53,1	10,5	11,2	0,0	0,0	3,4	472,0	
1988/89	10,8	29,7	112,5	0,4	42,7	78,5	70,6	124,9	6,8	0,0	5,2	12,5	494,6	
1989/90	9,1	52,4	74,1	60,9	55,9	0,0	45,5	90,6	35,8	0,0	4,6	0,0	428,9	
1990/91	7,0	7,5	28,7	75,5	1,8	87,6	210,4	46,7	1,8	0,0	0,4	1,7	469,1	
1991/92	30,6	47,4	15,6	17,4	0,0	35,6	78,6	53,9	39,7	77,6	0,0	11,1	407,5	
1992/93	0,0	27,9	30,6	24,4	35,1	23,6	79,2	26,9	28,1	0,0	0,0	0,0	275,8	
1993/94	1,5	23,1	161,6	28,8	48,2	112,8	18,2	1,0	3,0	0,0	0,2	8,7	407,1	
1994/95	6,0	24,9	24,6	1,1	0,0	54,8	33,0	68,2	0,7	1,1	5,2	10,1	229,7	
1995/96	15,9	16,0	45,7	102,7	178,9	116,2	143,7	29,3	66,1	38,2	0,0	0,0	752,7	
1996/97	22,2	12,0	7,5	132,9	84,7	29,5	19,5	167,6	42,8	1,4	0,2	16,2	536,5	
1997/98	61,0	40,1	53,2	150,0	11,8	59,0	22,2	6,5	26,3	4,8	0,0	1,6	436,5	
1998/99	8,9	6,0	0,0	64,2	103,9	45,6	36,2	3,8	13,6	0,0	0,0	1,7	283,9	
1999/00	3,3	40,7	53,8	60,4	26,2	0,0	0,0	114,0	80,6	1,1	0,0	1,1	381,2	
2000/01	5,0	82,8	31,0	95,6	68,1	4,9	28,0	10,5	3,3	0,0	0,0	0,0	329,2	
2001/02	0,0	0,0	9,4	83,7	0,0	19,5	136,9	125,9	15,8	1,6	0,0	0,0	392,8	
2002/03	5,4	15,7	192,0	29,3	38,0	41,4	72,8	58,9	13,3	1,9	0,2	2,0	470,9	
2003/04	0,0	75,9	114,2	110,0	3,5	67,3	59,6	43,5	93,7	6,7	0,0	2,0	576,4	
2004/05	0,2	37,9	38,0	59,4	4,7	61,5	38,6	1,0	0,0	2,6	4,0	0,0	247,9	
2005/06	0,0	73,7	50,2	37,6	128,6	81,2	38,7	14,6	48,6	12,2	3,6	2,0	491,0	
2006/07	23,6	25,5	38,3	17,7	14,5	40,6	5,8	115,0	28,5	0,0	0,0	1,5	311,0	
2007/08	0,6	22,9	90,6	43,7	50,2	26,9	17,1	13,9	37,6	0,0	0,0	0,0	303,5	
2008/09	66,7	103,6	139,6	96,3	117,9	94,3	70,9	0,6	6,1	36,9	0,0	0,6	733,5	
2009/10	27,3	6,8	21,9	100,1	143,7	146,7	75,6	35,5	20,8	8,0	0,3	9,6	557,6	
2010/11	0,3	79,8	78,5	56,0	40,9	34,0	81,1	54,5	136,0	7,6	0,0	3,0	571,7	
2011/12	0,0	54,0	153,1	6,2	50,5	15,8	23,4	105,3	105,3	5,4	0,0	2,7	521,7	
2012/13	32,0	119,3	179,7	20,1	43,8	22,0	145,2	57,0	15,2	3,4	2,0	0,0	639,7	
2013/14	73,8	0,0	46,9	23,7	83,3	35,6	55,0	45,8	0,0	2,8	0,4	1,3	368,6	
2014/15	4,7	6,5	175,4	46,2	44,8	25,2	96,9	5,8	50,5	4,5	22,5	33,7	516,7	

2015/16	2,8	22,5	6,9	0,0	28,0	60,6	58,2	24,2	47,9	1,0	2,1	6,2	260,4
---------	-----	------	-----	-----	------	------	------	------	------	-----	-----	-----	-------

ANNEE		SEP	OC T	NO V	DE C	JA N	FE V	MAR S	AV R	MA I	JUI N	JUI L	AOU T	MAX
1985	1986	41,2	36,0	32,4	26,8	21,8	27,2	27,2	29,4	40,2	41,8	44,0	43,8	44,0
1986	1987	39,2	30,2	25,0	22,4	26,0	25,4	26,6	38,8	33,2	36,6	42,0	43,4	43,4
1987	1988	36,6	30,2	21,4	23,2	19,8	23,4	27,8	28,4	30,2	33,8	44,2	46,8	46,8
1988	1989	41,6	37,4	28,4	19,8	18,4	24,6	27,6	24,8	32,6	39,4	45,0	46,4	46,4
1989	1990	41,6	37,2	25,2	P	P	25,8	31,4	31,0	39,2	43,2	45,6	46,2	46,2
1990	1991	44,0	34,2	P	P	P	P	30,2	34,2	44,0	37,8	48,0	47,2	48,0
1991	1992	42,0	34,6	28,2	26,2	28,2	28,6	27,6	38,4	41,4	38,8	44,6	47,2	47,2
1992	1993	46,2	36,2	28,8	27,2	32,0	32,6	41,6	39,4	36,2	42,6	46,8	46,4	46,8
1993	1994	33,6	34,0	21,6	26,4	28,4	35,2	36,2	39,6	43,6	46,2	44,6	41,2	46,2
1994	1995	44,0	37,8	33,6	28,6	16,4	31,2	30,6	35,6	42,8	44,6	47,6	47,6	47,6
1995	1996	43,2	42,8	35,0	27,0	28,0	26,8	33,0	34,0	40,0	42,0	47,2	47,0	47,2
1996	1997	44,2	34,0	35,4	30,0	29,4	32,0	35,0	39,6	42,6	33,6	40,0	46,0	46,0
1997	1998	40,8	30,6	30,0	22,8	24,4	26,4	31,0	32,6	36,4	43,0	44,6	43,8	44,6
1998	1999	41,2	33,0	31,0	22,8	25,6	22,0	30,4	30,4	40,2	44,4	45,6	43,8	45,6
1999	2000	36,0	36,0	30,6	24,6	23,4	28,2	32,6	30,4	37,4	42,4	44,6	44,4	44,6
2000	2001	41,4	33,2	25,8	23,6	23,0	26,8	35,0	33,2	41,2	41,6	45,8	45,4	45,8
2001	2002	37,6	37,8	30,4	25,0	27,8	26,8	32,2	32,8	39,6	42,4	44,4	39,6	44,4
2002	2003	36,4	35,0	30,0	27,0	24,8	24,6	31,0	35,4	42,6	39,0	46,6	46,0	46,6
2003	2004	42,6	34,0	28,2	23,2	22,8	25,6	29,4	32,0	34,0	45,0	44,0	42,8	45,0
2004	2005	38,4	36,2	27,8	21,2	22,8	22,0	35,6	34,2	37,6	41,6	45,4	44,6	45,4
2005	2006	44,0	37,6	29,4	23,0	19,8	22,0	35,0	36,2	40,8	40,6	44,8	43,8	44,8
2006	2007	43,0	38,4	33,0	22,0	24,8	29,4	29,8	29,0	37,0	39,2	44,8	43,6	44,8
2007	2008	36,4	34,2	32,2	23,8	23,8	26,8	31,6	36,4	35,0	44,0	44,8	43,0	44,8
2008	2009	38,2	31,0	24,6	20,2	20,0	24,8	31,0	37,2	35,8	42,0	45,4	45,2	45,4
2009	2010	36,8	36,8	34,6	24,0	25,6	27,0	29,8	34,6	37,6	40,2	44,0	45,2	45,2
2010	2011	40,0	35,8	28,8	28,4	23,4	27,0	27,6	34,8	34,6	43,8	43,4	45,6	45,6

2011	2012	43,4	37,8	31,2	24,0	24,8	25,0	32,0	29,8	41,2	45,2	47,2	46,4	47,2
2012	2013	41,4	36,6	31,6	26,8	28,6	27,6	29,2	38,2	37,8	45,6	46,8	44,8	46,8
2013	2014	37,0	35,0	31,6	21,2	24,6	25,0	31,8	35,6	43,2	40,2	43,0	43,6	43,6
2014	2015	37,4	37,2	34,6	24,0	25,6	27,0	29,8	34,6	37,6	40,2	44,0	45,2	45,2
2015	2016	36,0	37,8	31,2	25,8	25,2	27,6	29,2	28,4	38,2	42,2	45,6	44,2	45,6

ANNEE		SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	TOTAL
1985	1986	373,5	252,7	90,0	41,5	57,9	66,0	94,8	88,3	287,9	280,2	358,4	282,9	2274,1
1986	1987	322,7	178,2	162,5	155,3	171,4	142,6	138,0	257,6	295,0	356,0	357,2	292,9	2274,1
1987	1988	241,1	149,8	132,5	72,7	56,0	106,5	207,3	58,9	279,3	259,2	334,3	414,5	2829,4
1988	1989	244,1	247,4	121,2	84,0	109,0	93,0	183,0	192,9	284,1	305,8	360,6	358,9	2312,1
1989	1990	273,8	191,4	139,5	166,8	151,0	215,4	214,2	208,6	266,6	376,3	437,0	372,2	2584,0
1990	1991	262,8	229,5	145,9	107,8	113,8	160,1	177,3	186,6	372,2	342,4	378,4	397,2	3012,8
1991	1992	258,8	241,6	178,3	136,1	163,7	165,2	142,7	203,0	359,9	339,4	665,0	398,8	2874,0
1992	1993	264,1	232,5	191,5	111,5	103,7	99,9	169,4	240,2	289,8	255,2	406,3	31,7	3252,5
1993	1994	176,7	147,1	58,9	90,1	131,7	190,7	230,4	222,6	240,3	309,9	409,2	337,4	2395,8
1994	1995	235,4	234,1	170,9	142,0	154,6	191,3	169,9	138,3	279,5	291,7	319,7	387,8	2545,0
1995	1996	262,4	211,7	145,9	107,8	113,8	160,1	152,7	159,5	177,3	250,7	372,9	377,8	2715,2
1996	1997	242,0	174,9	156,0	106,0	146,7	174,6	213,7	161,7	149,4	170,8	234,9	266,2	2492,6
1997	1998	171,6	145,7	99,1	95,6	87,8	94,4	185,1	135,1	174,2	253,1	315,4	220,0	2196,9
1998	1999	174,3	210,8	163,1	96,6	85,7	103,0	97,2	159,9	228,3	210,9	297,8	249,1	1977,1
1999	2000	145,7	102,7	108,8	71,1	90,7	136,7	223,9	132,7	141,1	282,2	321,5	374,3	2076,7
2000	2001	197,0	11,3	67,1	92,3	79,2	111,2	151,0	165,4	148,6	305,2	350,5	314,6	2131,4
2001	2002	199,4	229,8	128,5	79,6	104,3	98,0	130,0	110,8	172,1	229,5	298,0	314,5	1993,4
2002	2003	242,6	226,4	121,3	85,8	97,1	85,3	130,0	139,0	202,0	268,9	322,0	298,6	2094,5
2003	2004	228,7	142,5	114,9	69,7	70,4	118,8	128,3	134,3	110,1	223,7	308,9	276,4	2219,0
2004	2005	181,8	146,9	95,9	71,7	88,5	84,7	141,3	186,8	266,0	289,0	271,4	451,8	1926,7
2005	2006	42,0	215,0	144,8	102,3	56,2	63,9	192,0	234,2	285,0	288,0	348,0	318,7	2275,8
2006	2007	315,0	183,7	161,8	139,6	136,8	192,0	94,1	195,2	281,5	331,1	321,7	284,7	2290,1
2007	2008	252,4	205,6	134,1	101,6	101,6	117,6	151,6	210,3	230,8	254,6	305,3	376,1	2637,2

2008	2009	203,7	116,5	69,3	48,1	36,4	78,9	118,2	128,2	181,4	209,5	298,7	274,7	2441,6
2009	2010	157,0	180,8	118,1	78,3	80,5	59,6	104,5	128,2	181,3	246,3	289,0	278,8	1902,4
2010	2011	243,9	79,8	78,5	89,2	86,0	78,5	123,4	148,6	161,2	276,9	259,9	297,1	1923,0
2011	2012	228,5	185,5	88,6	88,2	82,1	92,7	162,4	93,7	243,5	356,6	396,0	364,2	2382,0
2012	2013	288,0	150,4	55,5	86,8	92,0	94,0	82,7	137,2	195,1	309,7	413,5	329,6	2234,5
2013	2014	164,3	133,0	101,1	91,7	85,1	82,5	149,2	187,6	314,0	245,9	271,7	311,4	2137,5
2014	2015	213,0	167,9	134,1	101,6	117,6	151,6	210,3	230,8	254,6	305,3	376,1	385,8	2648,7
2015	2016	197,3	168,5	126,3	139,2	106,2	123,7	131,2	144,2	176,4	276,1	366,9	334,3	2290,3

		Station : BENI MELLAL								Coordonnée Lambert		X : 409,165 Y : 193.045 Z : 537		
		Paramètre : Évaporation Bac Colorado (en mm)												
ANNEE		SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	TOT
1985	1986	163,6	128,9	68,3	32,9	36,4	22,5	52,6	49,4	91,4	181,0	199,2	211,1	1237,2
1986	1987	134,9	66,5	57,1	40,2	27,7	27,8	48,2	53,7	84,5	184,6	212,6	212,7	1150,5
1987	1988	191,0	49,9	30,7	29,4	25,2	20,7	33,5	51,9	108,7	112,6	194,1	237,2	1084,9
1988	1989	189,8	76,8	50,3	31,6	31,4	25,6	46,3	24,4	67,8	142,4	195,1	220,2	1101,6
1989	1990	169,5	80,5	74,9	30,6	31,2	29,4	34,9	29,3	41,1	123,0	221,4	234,9	1100,7
1990	1991	182,3	86,1	37,8	46,4	52,7	47,4	57,5	68,0	150,3	191,8	206,3	206,3	1332,9
1991	1992	148,1	80,9	46,8	31,9	30,1	30,9	34,5	89,2	127,4	133,9	200,0	234,7	1188,4
1992	1993	167,7	73,2	41,8	33,9	30,8	29,5	74,6	84,3	103,6	117,7	222,9	239,7	1219,7
1993	1994	190,1	94,8	37,8	46,4	52,7	47,4	73,7	103,2	107,2	224,5	314,5	260,3	1552,6
1994	1995	203,8	65,9	56,4	45,0	57,8	70,6	76,0	68,8	178,0	205,3	221,6	238,3	1487,6
1995	1996	179,6	133,7	72,9	327,0	29,9	26,0	28,0	47,8	57,9	118,2	261,7	126,2	1408,9
1996	1997	173,3	101,8	67,8	30,5	35,6	43,6	74,6	57,5	88,2	159,0	211,0	195,0	1237,9
1997	1998	128,1	86,4	48,7	27,7	29,4	54,5	109,7	108,9	165,6	221,6	252,0	220	1452,6
1998	1999	158,1	143,3	97,0	42,7	43,9	53,3	79,5	126,6	188,8	216,8	273,9	249,7	1673,5
1999	2000	166,4	80,3	64,8	27,7	32,8	69,7	128,4	109,2	138,7	227,7	238,8	254,1	1538,5
2000	2001	170,4	83,8	59,9	29,4	29,2	57,6	72,5	118,1	119,5	334,0	232,3	241,4	1548,0
2001	2002	171,6	162,4	93,6	61,0	69,6	53,1	71,4	75,0	157,0	222,3	256,3	231,2	1624,3
2002	2003	204,1	142,1	65,1	37,7	34,7	45,0	73,5	75,1	109,1	175,5	224,6	219,3	1405,9
2003	2004	165,1	73,4	56,9	51,7	34,0	57,1	70,3	99,0	85,6	171,1	318,1	228,7	1411,1
2004	2005	179,1	102,8	36,1	31,9	32,4	31,7	76,6	117,3	192,7	211,8	269,0	275,3	1556,7

2005	2006	183,7	142,1	70,9	46,4	30,7	29,7	52,4	105,2	171,7	153,8	276,4	266,1	1528,9
2006	2007	183,5	82,8	77,4	41,6	44,2	104,6	94,1	168,0	175,0	196,7	263,2	201,0	1631,8
2007	2008	185,9	135,1	81,0	37,7	37,7	39,7	55,0	94,7	237,8	259,5	266,5	243,7	1674,3
2008	2009	152,7	67,8	33,3	34,5	23,8	41,0	64,7	104,7	156,0	176,4	262,2	241,8	1358,9
2009	2010	114,8	150,6	108,7	41,8	30,9	29,0	61,8	102,9	146,4	160,1	236,0	205,0	1388,0
2010	2011	191,8	87,4	70,5	49,9	40,5	41,8	39,3	81,4	121,6	202,3	230,9	242,3	1399,7
2011	2012	189,7	152,3	48,2	36,6	89,5	34,7	70,4	73,9	152,9	207,4	227,4	224,9	1507,9
2012	2013	200,0	79,6	33,7	48,8	38,3	51,2	44,8	109,9	133,7	183,3	271,3	229,8	1424,4
2013	2014	170,9	110,0	64,9	50,6	29,7	46,0	72,5	146,0	216,4	198,3	268,7	246,5	1620,5
2014	2015	190,9	168,2	108,7	41,8	30,9	29,0	61,8	102,9	146,4	160,1	236,0	248,7	1525,4
2015	2016	149,1	118,0	107,5	73,9	58,8	51,7	48,8	68,5	83,6	170,5	212,8	182,1	1325,3

ANNEE		Station : BENI MELLAL								Coordonnée Lambert		X : 409,165 Y : 193,045 Z : 537		
		Paramètre : Vitesse du Vent (m/s)												
		SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	TOT
1985	1986	0,75	0,58	0,44	0,46	0,55	0,75	0,7	0,79	0,76	0,82	0,78	0,80	7,48
1986	1987	0,62	0,46	0,44	0,37	0,5	0,67	0,55	0,70	0,67	1,00	0,86	0,72	6,44
1987	1988	0,69	0,48	0,35	0,36	0,47	0,47		0,28	0,25	1,00	1,78	0,61	6,27
1988	1989	0,67	0,46	0,34	0,25	0,30	0,42	0,46	0,58	0,61	0,63	0,71	0,65	6,08
1989	1990	0,68	0,48	0,33	0,26	0,17	0,16	0,28	0,39	0,43	0,33	0,76	0,48	4,75
1990	1991	0,53	1,29	0,24	0,22	0,31	0,28	0,36	0,42	0,33	0,45	0,56	0,48	4,42
1991	1992	0,39	0,39	0,40	0,23	0,16	0,18	0,19	0,22	0,39	0,48	0,86	0,30	4,19
1992	1993	0,46	0,35	0,16	0,17	0,13	0,24	0,26	0,45	0,40	0,37	0,79	0,71	4,49
1993	1994	0,44	0,29	0,23	0,12	0,20	0,28	0,37	0,35	0,33	0,59	0,54	0,59	4,33
1994	1995	0,34	0,28	0,16	0,15	0,19	0,27	0,33	0,35	0,42	0,52	0,44	0,55	4,00
1995	1996	0,24	0,25	0,24	0,22	0,31	0,28	0,16	0,16	0,23	0,23	0,20	0,17	2,69
1996	1997	0,22	0,15	0,12	0,16	0,20	0,26	0,28	1,19	0,24	0,45	0,33	0,33	3,93
1997	1998	0,16	0,07	0,10	0,10	0,08	0,13	0,13	0,25	0,27	0,35	0,31	0,35	2,30
1998	1999	0,26	0,13	0,07	0,12	0,13	0,15	0,26	0,26	0,32	0,36	0,39	0,36	2,81
1999	2000	0,28	0,21	0,13	0,05	0,31	0,12	0,21	0,35	0,30	0,34	0,38	0,39	3,07
2000	2001	0,28	0,11	0,08	0,17	0,15	0,20	0,21	0,29	0,31	0,34	0,38	0,39	2,91
2001	2002	0,24	0,11	0,12	0,08	0,07	0,13	0,16	0,18	0,22	0,32	0,27	0,26	2,16
2002	2003	0,22	0,15	0,12	0,05	0,05	0,02	0,12	0,16	0,21	0,27	0,21	0,23	1,81
2003	2004	0,19	0,11	0,06	0,04	0,01	0,04	0,04	0,05	0,08	0,10	0,14	0,16	1,02
2004	2005	0,11	0,10	0,01	0,02	0,02	0,08	0,04	0,08	0,15	0,20	0,19	0,22	1,22
2005	2006	0,13	0,07	0,06	0,01	0,05	0,10	0,09	0,16	0,18	0,38	0,52	0,30	2,05

2006	2007	0,33	0,20	0,16	0,23	0,13	0,18	0,30	0,26	0,46	0,49	0,57	0,59	3,90
2007	2008	0,43	0,40	0,13	0,19	0,26	0,30	0,35	0,41	0,52	0,18	0,75	0,62	4,54
2008	2009	0,55	0,42	0,41	0,36	0,35	0,44	0,47	0,47	0,58	0,57	0,58	0,60	5,80
2009	2010	0,50	0,29	0,29	0,36	0,35	0,45	0,46	0,52	0,57	0,62	0,60	0,56	5,57
2010	2011	0,46	0,34	0,34	0,31	0,31	0,36	0,41	0,46	0,45	0,49	0,63	0,65	5,21
2011	2012	0,44	1,34	0,29	0,23	0,33	0,35	0,45	0,52	0,51	0,64	0,57	0,57	6,24
2012	2013	0,45	0,36	0,34	0,25	0,29	0,35	0,40	0,43	0,50	0,51	0,50	0,57	4,95
2013	2014	0,40	0,35	0,27	0,30	0,32	0,35	0,35	1,71	0,59	0,65	0,58	0,62	6,49
2014	2015	0,53	0,35	0,37	0,31	0,35	0,44	0,47	0,47	0,58	0,57	0,58	0,60	5,62
2015	2016	0,43	0,37	0,27	0,26	0,26	0,42	0,45	0,45	0,46	0,57	0,66	0,80	5,40

Les donnees climatique de la station d'Ahmed El hansali

														X :	452,750	
Station : AHMED EL HANSALI														Coordonnée Lambert	Y :	231,750
Paramètre : Vitesse du Vent (m/s)														Z :	690	
ANNEE	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	TOTAL			
1985	1986	1,75	1,54	1,27	1,03	1,21	1,61	1,27	1,55	1,52	1,72	1,87	1,75	18,09		
1986	1987	1,60	1,16	0,95	0,89	1,42	1,32	1,07	1,45	1,56	1,83	1,78	1,80	16,83		
1987	1988	1,59	1,26	1,13	0,77	0,99	0,98	0,95	1,46	1,53	1,92	1,63	1,54	15,75		
1988	1989	1,58	1,38	1,38	0,73	0,73	1,41	1,18	1,57	1,66	1,59	2,11	2,10	17,42		
1989	1990	1,64	1,36	0,14	0,83	0,72	0,75	1,16	1,46	1,35	1,62	1,85	1,73	14,61		
1990	1991	1,79	1,33	1,02	0,86	0,84	1,34	1,37	1,20	1,64	1,50	1,91	1,86	16,66		
1991	1992	1,52	1,02	0,85	0,72	0,82	0,83	1,57	1,71	1,78	1,51	1,62	2,22	16,17		
1992	1993	1,77	1,59	0,81	0,81	0,76	1,41	1,43	1,79	1,71	1,79	1,82	1,86	17,55		
1993	1994	1,51	1,27	0,89	0,63	0,85	1,34	1,36	1,32	1,45	1,71	1,94	1,95	16,22		
1994	1995	1,53	1,23	0,83	0,85	0,84	1,16	1,49	1,63	1,61	1,92	2,13	1,90	17,12		
1995	1996	1,62	0,92	1,11	0,81	1,66	1,03	1,17	1,55	1,61	1,90	1,64	1,47	16,49		
1996	1997	1,51	1,07	0,98	1,49	1,22	0,77	1,33	1,47	1,27	1,48	1,58	1,82	15,99		
1997	1998	1,48	1,01	0,63	1,09	0,85	0,91	1,27	1,70	1,73	1,66	1,90	2,11	16,34		
1998	1999	1,50	1,11	0,93	0,71	1,08										
1999	2000															
2000	2001															
2001	2002															
2002	2003	1,30	1,35	1,60	0,93	1,40	1,24	1,11	1,12	1,35	1,67	1,55	1,40	16,02		
2003	2004	1,44	1,38	1,61	1,57	0,95	1,49	1,52	1,47	1,45	1,40	1,55	1,63	17,46		
2004	2005	1,42	1,51	1,09	1,51	1,22	1,59	1,27	1,52	1,71	1,81	1,69	1,68	18,02		
2005	2006	1,40	1,19	1,55	1,32	1,73	1,91	1,84	1,47	1,69	1,56	1,77	1,70	19,13		
2006	2007	1,46	1,58	1,35	1,72	1,48	1,72	2,00	1,74	1,89	1,76	1,72	1,81	20,23		
2007	2008	1,59	1,48	1,18	1,23	1,57	1,20	1,64	2,10	2,00	1,26	1,99	1,68	18,92		

2008	2009	1,65	1,22	1,72	1,59	1,52	2,10	1,67	1,68	1,54	1,48	1,30	1,72	19,19
2009	2010	1,24	1,14	1,31	1,81	1,86	2,03	1,76	1,36	1,63	1,57	1,60	1,60	18,91
2010	2011	1,40	1,67	1,57	1,58	1,55	1,68	1,42	1,63	1,47	1,49	1,58	1,68	18,72
2011	2012	1,42	1,35	1,65	1,28	1,54	1,50	1,67	1,88	1,62	1,61	1,63	1,68	18,83
2012	2013	1,64	1,75	1,57	1,28	1,50	1,72	1,89	1,56	1,58	1,40	1,33	1,54	18,76
2013	2014	1,29	1,21	1,29	1,21	1,43	1,34	1,41	1,54	1,68	1,83	1,46	1,49	17,18
2014	2015	1,47	1,25	1,55	1,40	1,40	1,58	1,35	1,26	1,47	1,65	1,54	1,92	17,84
2015	2016	1,37	1,36	1,15	1,10	1,29	1,77	1,57	1,38	1,70	1,61	1,65	1,80	17,75

Pluies mensuelles													
		X :	452550	Y :	231600	Z :	595						
Nom :	AHMED EL HANSALI											Unité :	mm
Année	Septem	Octobre	Novembre	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Total
1968/69	*	*	*	*	*	*	*	*	52,5	38,0	1,2	2,0	93,7
1969/70	60,0	56,2	147,2	77,6	323,8	0,5	80,2	23,4	17,4	6,1	0,0	0,0	792,4
1970/71	1,2	16,0	14,2	105,2	164,4	35,4	175,4	233,7	95,3	46,7	2,3	0,0	889,8
1971/72	10,6	10,9	137,6	73,1	78,4	87,3	112,7	37,9	76,5	9,7	0,0	1,0	635,7
1972/73	20,2	118,9	46,1	61,5	78,1	51,2	55,4	76,9	12,8	30,4	0,0	1,0	552,5
1973/74	0,0	13,5	38,2	221,8	15,5	64,8	95,0	187,2	0,0	14,5	1,4	5,2	657,1
1974/75	35,5	9,8	1,2	0,6	53,2	59,4	97,1	66,9	19,3	42,2	1,8	4,5	391,5
1975/76	14,3	0,0	40,0	59,0	47,0	53,6	69,1	177,9	52,7	24,2	0,9	1,0	539,7
1976/77	7,5	224,5	0,1	135,0	159,6	81,7	13,4	6,4	17,4	11,6	0,0	0,0	657,2
1977/78	1,2	112,5	122,0	90,8	64,4	122,6	20,2	130,8	36,8	16,8	0,3	5,1	723,5
1978/79	37,0	18,6		116,7	100,6	256,7	51,0	26,6	1,5	1,6	1,6	0,0	611,9
1979/80	62,2	97,7	9,1	16,5	90,2	49,2	131,7	55,5	32,9	1,4	0,0	2,7	549,1
1980/81	10,0	25,0	120,5	9,6	38,7	29,6	55,4	24,9	8,7	0,3	0,0	0,4	323,1
1981/82	0,0	1,3	0,0	43,6	49,3	70,0	59,4	123,8	137,9	1,9	10,1	1,7	499,0
1982/83	13,3	27,8	38,2	57,7	0,0	101,9	38,1	14,7	11,2	0,3	0,0	0,3	303,5
1983/84	6,2	8,3	96,6	43,2	14,6	12,0	80,4	56,9	91,0	0,0	0,3	0,0	409,5
1984/85	1,0	1,2	110,2	2,1	196,4	25,6	20,6	47,8	43,9	0,0	2,9	0,0	451,7
1985/86	0,1	5,9	65,4	64,5	91,2	134,6	51,0	71,4	9,3	57,9	1,9	3,2	556,4
1986/87	0,0	46,1	53,0	8,0	136,5	107,2	30,4	2,9	2,7	50,9	0,0	0,0	437,7
1987/88	66,8	11,5	81,9	85,6	110,9	109,4	34,4	4,7	23,3	4,1	0,0	20,6	553,2
1988/89	1,5	15,7	67,7	0,0	42,4	61,8	83,1	154,7	9,1	0,9	7,0	19,4	463,3
1989/90	8,0	38,4	122,7	77,0	68,7	0,4	40,5	53,8	19,0	0,3	3,3	9,7	441,8
1990/91	59,2	8,4	42,2	120,9	2,5	124,7	179,2	40,4	7,6	1,5	3,6	17,9	608,1
1991/92	27,3	53,8	14,9	8,2	0,0	41,6	68,3	105,0	41,3	67,8	0,2	18,4	446,8
1992/93	0,0	33,4	17,6	14,5	27,7	33,0	82,5	36,3	10,9	0,0	1,4	2,5	259,8
1993/94	0,3	17,9	151,3	49,8	69,5	144,4	17,8	0,6	2,7	0,0	4,5	0,1	458,9
1994/95	11,4	10,1	34,0	0,2	0,0	48,6	29,2	79,0	35,2	7,4	1,0	4,8	260,9
1995/96	18,1	12,1	58,1	118,2	283,3	86,6	157,2	32,1	65,4	61,0	0,0	0,0	892,1
1996/97	4,4	16,5	12,2	251,6	0,0	12,0	29,4	131,6	20,0	2,3	0,0	0,0	480,0
1997/98	0,0	18,4	124,8	132,0	46,6	56,7	40,0	5,9	27,7	17,0	0,0	2,3	471,4
1998/99	6,6	13,5	0,0	112,7	116,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	17,0	266,7

1999/00	2,0	37,3	87,0	68,8	23,0	0,0	0,0	148,3	37,3				403,7
2000/01	3,4												3,4
2001/02												5,5	5,5
2002/03	3,0	29,0	277,4	52,9	72,7	63,8	56,5	59,6	18,4	5,8	2,0	15,2	656,3
2003/04	2,8	112,2	143,8	209,0	2,3	97,8	51,3	27,5	140,6	13,5	0,0	0,0	800,8
2004/05	3,6	83,7	59,2	61,9	4,7	79,7	29,5	0,3	0,0	1,6	0,0	3,5	327,7
2005/06	0,7	45,1	76,6	35,7	159,1	108,8	46,1	45,9	52,8	26,1	0,0	0,0	596,9
2006/07	3,1	19,8	32,4	20,9	27,8	45,9	29,7	140,0	22,9	0,0	13,0	0,0	355,5
2007/08	0,0	66,1	88,0	35,1	81,7	48,4	17,9	24,4	26,0	4,0	0,0	0,0	391,6
2008/09	33,5	102,6	174,0	165,9	148,7	171,0	173,8	3,4	21,6	20,5	3,4	33,5	1051,9
2009/10	76,1	6,0	26,8	197,0	215,5	290,5	108,0	136,0	20,2	7,2	1,0	8,5	1092,8
2010/11	4,6	89,1	147,0	90,8	44,1	57,3	103,1	75,9	124,8	25,2	0,0	12,0	773,9
2011/12	0,0	63,8	265,8	11,0	64,1	16,1	12,0	162,9	0,0	0,0	0,0	0,2	595,9
2012/13	28,2	188,5	264,6	11,9	90,3	48,2	165,6	66,5	24,5	0,2	5,5	2,0	896,0
2013/14	91,2	1,0	98,5	27,7	170,1	81,7	46,2	51,5	0,0	0,0	0,0	0,2	568,1
2014/15	5,3	0,9	242,4	103,4	68,9	50,2	126,4	1,3	69,1	18,6	16,4	9,9	712,8
2015/16	7,6	40,6	8,2	0,0	30,6	76,1	133,0	33,2	48,2	0,0	4,9	9,2	391,6

													x :	452,750
Station : AHMED EL HANSALI							Coordonnée Lambert						y :	231,750
Paramètre : T° moyenne mensuelle													z :	690
ANNEE		SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	MAX
1985	1986	26,8	23,2	16,2	12,1	11,0	11,5	13,6	14,0	23,6	23,0	30,3	29,4	30,3
1986	1987	27,3	20,1	15,3	12,6	12,1	12,5	16,3	20,3	21,6	25,7	27,3	27,9	27,9
1987	1988	27,9	20,0	15,7	13,0	10,2	12,3	15,5	17,5	19,3	21,9	30,8	31,4	31,4
1988	1989	28,1	20,3	16,7	12,3	10,6	12,5	15,7	14,5	21,5	25,4	29,7	30,3	30,3
1989	1990		22,9	16,6	14,5	9,9	16,0	17,4	15,3	21,9	25,1	30,7	30,9	30,9
1990	1991	26,7	20,6	16,5	11,9	10,9	9,8	12,5	15,7	19,9	25,7	30,4	30,9	30,9
1991	1992	25,3	17,8	15,6	13,8	11,5	14,6	13,6	17,4	21,6	20,7	28,9	29,6	29,6
1992	1993	26,6	18,2	16,3	12,8	11,2	12,3	15,3	16,9	19,2	25,0	31,2	29,3	31,2
1993	1994	23,0	18,9	14,1	12,5	10,7	11,8	15,0	17,1	20,9	24,9	26,8	28,8	28,8
1994	1995	22,1	18,5	16,5	13,2	11,6	14,6	16,2	17,5	19,8	22,3	25,9	30,2	19,0
1995	1996	23,0	20,3	16,9	13,2	12,1	11,1	13,9	16,8	20,2	24,3	27,4	31,3	19,2
1996	1997	21,8	19,8	16,8	12,7	14,8	16,3	17,9	18,2	21,5	26,0	27,1	28,8	28,8
1997	1998	22,0	22,8	17,3	13,2	12,5	11,2	14,3	16,7	20,3	25,8	26,9	30,2	30,2
1998	1999	24,1	22,7	17,3	13,0	11,3								24,1
1999	2000													
2000	2001													

2001	2002											25,5	23,7	23,7
2002	2003	21,2	13,8	12,3	11,5	9,7	9,3	13,9	14,9	16,8	27,8	33,1	32,5	18,1
2003	2004	22,6	20,1	17,5	13,1	10,2	9,5	17,6	16,2	17,2	29,6	32,7	26,7	19,4
2004	2005	24,7	21,6	14,3	11,7	11,6	9,9	14,8	22,6	24,8	31,9	33,2	34,7	23,7
2005	2006	27,0	23,7	18,2	11,6	9,1	10,0	15,2	21,2	22,0	24,1	32,6	34,8	20,8
2006	2007	20,2	21,8	18,7	13,0	14,7	17,2	16,4	17,6	21,5	25,5	33,1	30,8	20,9
2007	2008	25,4	20,8	17,4	14,1	P	P	P	P	P	P	P	28,2	21,2
2008	2009	25,7	17,2	11,9	9,9	8,3	11,4	12,8	14,6	19,9	23,1	33,1	31,4	18,3
2009	2010	24,9	25,6	15,7	11,8	10,2	13,7	16,3	19,8	20,8	23,5	30,8	32,7	20,5
2010	2011	26,8	20,3	15,2	14,9	12,3	11,4	14,5	19,6	22,2	28,2	28,3	30,1	20,3
2011	2012	25,6	22,5	16,6	12,8	11,5	11,3	18,4	14,1	22,7	27,2	29,3	30,3	20,2
2012	2013	25,5	19,6	13,3	11,3	10,6	11,1	12,6	18,1	20,2	28,1	30,9	32,0	19,4
2013	2014	25,1	22,7	16,5	11,9	11,2	10,7	13,1	18,6	25,6	27,3	30,0	32,2	20,4
2014	2015	25,5	24,1	16,1	12,4	11,4	10,6	15,2	19,5	25,3	26,4	31,7	29,9	20,7
2015	2016	25,4	21,9	17,9	17,4	15,3	14,4	15,0	18,5	23,2	29,9	33,1	32,7	22,1

													X	452,750
Station : AHMED AL HANSALI								Coordonnée Lambert					Y	231,750
Paramètre : Évaporation Piche (en ml)													Z	690
ANNEE		SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	TOT
1985	1986	323,1	291,2	141,8	102,4	80,0	78,5	102,4	108,5	265,4	219,0	378,0	390,1	2480,4
1986	1987	317,8	190,4	128,0	114,5	107,1	73,1	136,4	229,2	252,2	289,5	335,5	299,6	2473,3
1987	1988	350,8	166,4	112,0	67,1	59,9	79,4	160,8	151,3	199,3	237,6	389,1	410,6	2384,3
1988	1989	321,7	194,8	120,3	122,5	92,1	79,0	149,4	102,3	263,0	277,9	204,9	382,4	2310,3
1989	1990	318,6	187,4	112,6	100,3	93,9	172,8	211,2	169,3	267,4	299,8	431,8	543,7	2908,8
1990	1991	306,3	200,5	164,3	51,5	120,5	69,9	95,7	136,7	305,9	315,6	515,0	529,7	2811,6
1991	1992	285,7	161,8	178,7	133,7	170,0	176,3	193,1	220,8	318,5	226,6	483,2	550,2	3098,6
1992	1993	406,6	207,2	190,7	136,4	139,9	174,6	179,6	276,8	241,8	382,7	554,4	492,5	3383,2
1993	1994	297,8	208,9	60,3	109,8	96,5	103,0	171,6	238,1	287,5	469,9	635,6	544,9	3223,9
1994	1995	342,4	236,5	195,9	181,5	180,7	189,7	229,8	216,7	388,6	350,2	491,7	499,2	3502,9
1995	1996	342,7	237,4	231,2	82,9	81,7	67,3	96,8	205,4	272,3	400,4	502,0	403,8	2923,9
1996	1997	315,6	313,3	219,6	90,7	101,2	147,3	264,9	195,2	300,6	378,7	409,0	495,2	3231,3
1997	1998	311,8	241,6	91,8	113,3	107,2	154,8	244,5	166,9	227,1	355,6	400,7	496,0	2911,3

1998	1999	328,2	324,0	281,7	140,7	101,8									1176,4
1999	2000														
2000	2001														
2001	2002														
		Construction du Barage													
2001	2002											334,3	295,8	630,1	
2002	2003	253,7	209,4	121,6	66,4	66,7	60,6	114,1	100,2	221,7	274,1	362,8	348,4	2199,7	
2003	2004	295,2	128,8	86,5	55,8	84,1	97,8	97,3	104,4	109,5	285,2	356,8	397,5	2098,9	
2004	2005	266,3	232,6	188,7	46,5	70,8	62,2	117,5	189,7	240,4	309,8	454,5	380,7	2559,7	
2005	2006	291,8	182,1	93,3	85,6	64,9	58,5	118,7	161,2	181,5	217,0	334,7	393,3	2182,6	
2006	2007	330,3	258,8	124,5	91,1	116,3	110,6	187,4	161,2	213,9	252,5	390,6	543,4	2780,6	
2007	2008	321,1	198,5	136,3	116,9	95,7	107,4	141,1	187,4	157,1	256,3	337,1	462,7	2517,6	
2008	2009	242,2	115,2	80,9	66,0	50,3	77,9	97,7	140,5	348,2	361,6	516,5	409,6	2506,6	
2009	2010	208,1	291,4	219,6	123,4	104,7	79,9	151,7	177,7	253,1	283,0	451,4	541,0	2885,0	
2010	2011	247,5	168,9	140,0	141,2	136,2	113,5	124,3	222,0	207,3	369,4	429,5	420,1	2719,9	
2011	2012	298,2	261,0	95,1	121,1	138,9	139,3	255,7	128,4	349,7	394,2	520,5	572,4	3274,5	
2012	2013	357,0	239,3	96,3	138,0	121,0	123,6	165,6	187,5	277,0	396,2	492,7	475,0	3069,2	
2013	2014	239,4	237,0	151,0	138,0	129,1	115,2	182,1	237,5	371,4	385,4	423,1	428,1	3037,3	
2014	2015	267,9	316,7	127,5	123,2	123,2	112,1	156,7	181,6	327,7	364,4	486,5	400,7	2988,2	
2015	2016	289,3	217,9	177,7	209,2	174,5	164,6	199,2	194,0	308,7	460,6	511,5	498,9	3406,1	

													x :	452,750
Station : AHMED EL HANSALI							Coordonnée Lambert						y :	231,750
Paramètre : Évaporation Bac Colorado (en mm)													z :	690
ANNEE		SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	TOT
1985	1986	277,0	190,7	88,4	62,7	43,7	58,2	85,3	131,2	209,8	221,2	336,5	303,7	2008,4
1986	1987	246,5	152,1	92,6	67,7	45,9	39,8	108,4	156,6	221,7	290,8	316,4	310,7	2049,2
1987	1988	251,1	140,2	74,2	50,6	39,1	53,2	49,4	142,0	206,3	259,7	363,0	375,5	2004,3
1988	1989	293,7	180,9	103,2	92,0	72,1	68,1	113,4	85,6	196,8	265,7	347,3	339,5	2158,3
1989	1990	282,5	179,7	87,1	43,6	47,8	90,2	134,4	134,2	207,9	278,9	358,8	374,8	2219,9
1990	1991	239,5	178,0	115,4	42,2	65,0	56,3	51,6	80,5	198,1	270,4	346,4	334,2	1977,6
1991	1992	190,8	122,4	99,1	58,4	78,2	87,5	111,3	123,2	196,7	167,8	333,8	343,9	1913,1
1992	1993	291,9	149,1	95,1	66,1	60,3	82,8	82,6	156,6	183,3	315,6	376,4	342,6	2202,4
1993	1994	243,0	142,4	44,9	45,7	55,5	47,6	75,0	154,4	199,3	304,1	363,0	341,9	2016,8

1994	1995	274,3	162,0	97,8	83,9	72,3	91,1	119,5	156,2	250,8	297,4	387,0	349,8	2342,1
1995	1996	233,1	132,6	114,9	41,1	37,3	43,4	53,5	110,6	138,2	202,1	353,0	347,5	1807,3
1996	1997	266,4	198,9	113,8	44,5	40,2	78,1	167,3	138,6	148,2	233,4	365,0	352,2	2146,6
1997	1998	242,8	131,6	92,7	58,2	39,4	49,2	60,7	78,9	157,9	228,1	377,5	370,8	1887,8
1998	1999	114,5	101,6	83,2	52,4	44,8								396,5
1999	2000													
2000	2001													
2001	2002											333,1	124,2	457,3
2002	2003	257,6	209,6	127,2	705,0	68,4	60,1	106,6	91,4	209,0	282,0	388,9	341,9	2847,6
2003	2004	369,1	138,8	58,5	66,3	100,1	107,0	108,3	111,6	125,7	35,6	328,5	356,3	1905,7
2004	2005	278,8	236,0	120,9	53,6	70,8	62,2	117,5	189,7	240,4	309,8	454,5	380,7	2514,9
2005	2006	327,4	204,4	114,6	110,1	75,1	68,0	121,3	164,6	196,5	220,7	343,4	393,3	2339,4
2006	2007	330,6	259,1	127,7	100,7	122,0	115,0	190,1	165,3	219,1	256,4	400,2	422,8	2709,0
2007	2008	325,8	201,2	138,7	122,6	100,7	110,4	145,0	189,1	177,5	258,7	342,6	465,9	2578,2
2008	2009	240,9	119,9	84,7	70,6	54,6	81,0	106,3	154,2	270,7	441,8	483,6	398,9	2507,2
2009	2010	195,1	241,3	171,1	105,4	90,4	70,7	122,8	149,1	180,0	225,4	330,0	425,0	2306
2010	2011	208,9	147,6	130,2	108,2	104,3	94,8	96,7	136,4	147,7	240,2	390,9	352,8	2158,7
2011	2012	232,6	191,2	70,3	84,9	89,6	85,1	159,8	91,5	246,8	299,3	432,7	482,5	2466,3
2012	2013	282,6	171,5	56,6	93,7	85,9	97,0	70,8	115,9	180,8	309,8	399,6	416,9	2281,1
2013	2014	189,0	175,2	109,6	80,1	68,2	57,3	107,9	141,0	252,5	288,4	326,5	369,9	2165,6
2014	2015	210,9	146,4	75,4	52,3	52,3	62,1	103,3	122,3	192,1	245,5	374,2	316,5	1953,3
2015	2016	217,1	133,7	95,3	94,7	85,8	86,5	125,0	155,8	212,9	373,7	434,5	409,3	2424,3

Les donnes climatique de la station de Mechra Eddahk

			X	394980	Y	204800	Z	406			Unité: mm			
Nom : Mechra Eddahk														
Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Total	
1968/69		0,0	73,4	27,8	13,4	68,3	37,3	63,9	12,4	11,9	1,3	11,6	321,3	
1969/70	9,2	9,9	98,5	15,8	74,1	0,0	60,5	13,1	36,2	2,1	0,0	0,0	319,4	
1970/71	0,0	19,5	6,1	63,2	57,4	23,2	121,7	74,9	57,1	3,2	2,9	0,0	429,2	
1971/72	25,4	5,9	59,5	20,0	28,4	47,6	58,2	24,0	30,1	0,0	0,0	0,0	299,1	
1972/73	14,2	27,3	14,4	37,7	24,0	8,0	14,2	34,4	3,8	0,0	0,0	0,0	178,0	
1973/74	0,0	12,9	43,8	63,8	10,7	53,3	131,8	62,0	0,0	4,6	0,3	0,0	383,2	
1974/75	0,0	1,9	0,8	0,0	26,6	26,6	34,5	54,7	86,5	6,4	0,0	0,0	238,0	
1975/76	2,5	0,0	26,8	30,4	11,0	18,6	42,2	102,1	56,5	26,3	0,0	0,0	316,4	
1976/77	3,6	48,6	0,3	43,9	80,2	19,3	14,5	4,2	5,8	1,2	0,0	0,0	221,6	
1977/78	0,3	75,5	71,4	43,4	32,0	49,2	5,9	50,6	47,0	6,0	0,0	13,3	394,6	
1978/79	0,0	16,4	22,4	62,8	57,7	70,2	27,6	10,6	1,1	0,0	0,0	0,0	268,8	
1979/80	34,6	54,5	0,0	4,3	28,8	58,3	63,5	6,9	6,2	2,3	0,0	3,9	263,3	
1980/81	4,1	9,3	59,1	4,5	6,2	19,4	21,1	9,4	6,6	0,7	3,1	0,0	143,5	
1981/82	0,0	11,5	0,8	31,8	51,9	43,6	44,3	107,7	62,7	0,0	1,7	0,0	356,0	
1982/83	0,0	3,3	19,4	20,3	0,0	50,7	8,6	2,3	8,8	0,0	0,0	0,0	113,4	
1983/84	20,3	1,8	87,1	6,0	4,3	5,3	58,4	25,8	46,6	0,0	0,0	0,0	255,6	
1984/85	0,0	0,0	54,5	0,0	124,4	23,5	3,8	33,5	27,5	0,0	0,0	0,0	267,2	
1985/86	30,0	4,9	22,4	30,7	38,3	70,5	37,4	42,1	5,2	23,0	2,1	0,0	306,6	
1986/87	0,0	16,0	48,4	4,5	55,4	77,2	9,0	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	211,8	
1987/88	11,2	7,6	50,4	76,4	85,4	75,9	51,7	1,0	20,9	0,0	0,0	0,0	380,5	
1988/89	0,0	8,8	64,7	0,5	36,4	53,4	52,5	66,9	0,0	1,2	13,3	17,9	315,6	
1989/90	0,0	22,5	43,7	35,3	33,8	0,0	47,2	31,8	32,1	0,0	14,5	0,0	260,9	
1990/91	7,6	1,6	19,9	69,4	0,0	107,1	116,4	14,8	4,3	0,0	3,7	1,5	346,3	
1991/92	24,0	27,0	0,0	8,8	0,0	31,7	27,0	53,6	13,4	35,4	0,0	0,0	220,9	
1992/93	0,0	16,5	15,5	14,2	26,3	12,2	41,1	10,2	12,2	0,0	0,0	0,0	148,2	
1993/94	0,0	6,7	127,0	33,9	43,2	44,3	34,2	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	290,5	
1994/95	0,0	8,6	13,5	0,0	0,0	51,2	33,7	42,4	0,0	0,0	0,5	0,0	149,9	
1995/96	7,7	6,7	25,2	62,1	142,4	66,0	81,6	14,6	32,5	51,0	3,5	0,0	493,3	
1996/97	25,1	8,7	10,1	93,3	66,5	1,0	27,9	103,5	11,8	0,0	0,0	0,0	347,9	
1997/98		3,7	27,1	84,7	29,7	32,4	12,6	0,3	8,4	4,8	0,0	0,0	203,7	
1998/99	0,6	0,0	0,0	34,2	64,1	21,9	31,9	0,7	5,6	0,0	0,0	7,0	166,0	
1999/00	0,6	23,9	25,3	32,8	17,1	0,0	0,0	33,1	13,5	3,6	0,0	6,9	156,8	
2000/01	8,5	33,9	14,9	58,3	51,1	2,9	11,2	0,1	0,5	0,0	0,0	0,0	181,4	
2001/02	0,0	0,0	7,4	35,1	0,0	10,6	52,6	70,2	5,2	0,0	0,0	0,0	181,1	
2002/03	0,6	6,2	145,3	33,9	23,1	33,0	16,1	23,9	1,2	0,5	0,0	0,0	283,8	
2003/04	0,0	30,9	77,4	68,2	0,7	35,5	33,4	13,0	78,5	5,0	0,0	0,0	342,6	
2004/05	0,8	35,6	24,9	35,4	1,2	26,1	17,4	0,0	0,0	3,2	0,2	0,0	144,8	
2005/06	0,0	21,7	41,1	25,2	98,0	36,9	6,2	10,7	27,3	19,5	0,0	0,0	286,6	
2006/07	0,0	17,0	18,5	10,1	7,6	19,9	4,2	56,8	13,2	0,0	0,0	0,8	148,1	
2007/08	0,2	23,4	71,0	23,7	24,8	20,8	5,6	4,9	9,1	0,0	0,0	0,0	183,5	
2008/09	13,2	57,4	59,8	40,4	66,6	90,9	86,4	0,0	3,5	5,9	0,0	0,0	424,1	
2009/10	18,8	1,3	4,2	66,4	62,5	75,8	56,5	10,8	2,8	0,0	5,6	1,5	306,2	
2010/11	0,0	30,1	56,9	24,6	10,4	19,0	52,4	25,9	42,5	4,8	0,0	0,0	266,6	
2011/12	0,0	58,2	88,4	0,3	24,0	4,3	13,9	50,8	0,0	0,0	0,0	3,0	242,9	
2012/13	29,8	71,9	87,9	8,1	12,6	7,3	59,0	44,6	8,7	0,0	29,6	0,0	359,5	
2013/14	31,4	0,0	20,3	11,4	62,3	12,0	31,8	28,0	0,0	0,0	0,0	13,8	211,0	
2014/15	2,4	0,0	174,2	29,9	32,6	16,0	81,4	2,0	18,5	3,4	18,2	6,1	384,7	
2015/16	0,0	20,4	9,4	0,0	12,6	37,8	30,0	7,4	22,1	0,6	0,0	0,0	140,3	

Annexe 5

Photos extrait au cours du travail sur le terrain

