



**UNIVERSITE SULTAN MOULAY SLIMANE**

**Faculté des Sciences et Techniques**

**Béni Mellal**

**Centre d'études doctorales : Sciences et Techniques**  
**Section : Ressources Naturelles, Environnement et Santé (RNES)**



**THESE**

Présentée par

**Vivien Romaric EKOUELE MBAKI**

En vue de l'obtention du diplôme de

**DOCTORAT ES SCIENCES ET TECHNIQUES**

**Spécialité : Géologie Appliquée**

**Option : Hydrogéologie**

**Synthèse hydrogéologique et proposition de scénarii de recharge artificielle du Sahel Doukkala (Bassin de l'Oum ErRbia, Maroc)**

**Soutenu le 11 /05/18 à 10 heure devant la commission d'examen composée de :**

<b>PRESIDENT :</b>	<b>Pr. Ahmed BARAKAT</b>	<b>Université Sultan Moulay Slimane</b>	<b>FST – Béni Mellal</b>
<b>RAPPORTEURS :</b>	<b>Pr. Abdessamad NAJINE</b>	<b>Université Sultan Moulay Slimane</b>	<b>FST – Béni Mellal</b>
	<b>Pr. Ahmed AKHSSAS</b>	<b>Université Mohammed V</b>	<b>EMI – Rabat</b>
	<b>Pr. Ahmed FEKRI</b>	<b>Université Hassan II</b>	<b>FSBM – Casablanca</b>
<b>EXAMINATEUR :</b>	<b>Pr. Mohamed HILALI</b>	<b>Université Moulay Ismail</b>	<b>FST – Errachidia</b>
<b>DIRECTEUR DE THESE :</b>	<b>Pr. Ahmed BOUKDIR</b>	<b>Université Sultan Moulay Slimane</b>	<b>FST – Béni Mellal</b>

## Remerciements

Ce travail est le fruit d'une contribution collégiale de plusieurs personnes envers qui j'aimerais exprimer reconnaissance et gratitude. Il m'est appelé de reconnaître que la rédaction de cette partie n'est pas aisée, car elle implique des oublis lors des citations et ce malgré l'attention particulière que l'on accorde à tous. J'aimerais ici m'excuser auprès de tous ceux qui pourraient se heurter à cet effet, et même sur l'ordre de passage des uns et des autres.

Dans un premier temps, j'exprime ma gratitude auprès de mon directeur de thèse ; Professeur **Ahmed Boukdir** pour avoir cru en moi en me donnant la possibilité d'intégrer les structures nécessaires pour la tenue de la thèse. Avec lui, le centre d'études doctorales ; le laboratoire de Génie Industriel, l'agence du bassin hydraulique de l'Oum Er R'Bia, le laboratoire de l'office national de l'Eau Potable et d'Electricité – Branche Eau de Béni Mellal. En plus de la confiance et des différentes opportunités d'insertions ; il a mis à notre portée ; un dispositif scientifique permettant des échanges et conseils sur différents projets. Ce qui nous confère, une caractéristique de pluridisciplinaire ; bien entendu utile pour la hauteur de vue de nos projets. Je remercie les professeurs, ingénieurs et techniciens qui au nom du professeur même ; nous ont guidés et rendus pratique, les contraintes administratives et de logistiques. Professeurs **Mustapha Mabrouki** en sa qualité de chef du laboratoire et **Mohamed Hilali** ; monsieur **Abdeslam El Issami**, l'équipe de **MEDITEC IN**.

Je remercie l'Université Sultan Moulay Slimane et le centre d'études doctorales pour l'accueil, son doyen ; Professeur **Ahmed Zeghal**. Travailler sous le label de cette université m'a donné l'accès aux soins et au titre de séjours multiples fois renouvelés. Mon statut d'étudiant m'a valu la confiance de nombreux logeurs et la participation aux nombreux congrès nationaux et internationaux. La disponibilité de certains professeurs dans les nombreux échanges ; Professeur **Zhor Ait Yacine**, professeur de Biologie cellulaire, Professeur **Boulli**, Professeur **Merbouha** respectivement Ecologie/biodiversité et Probabilité et statistique, Professeur **Abdelilah Chtaini** chargé de l'équipe Electrochimie Moléculaire et Matériaux Inorganiques, pour m'avoir permis l'analyse de bons nombres de mes échantillons au sein même de son laboratoire, Professeur **Abdelkarim Arioua**, chargé de l'hydrologie/Cartographie, et **Abderrahmane El Ghmari** pour les nombreux conseils et encouragements.

Aux membres du jury du comité d'évaluation de la Direction de l'Ecole Doctorale pour avoir accepté d'accorder leurs temps si précieux dans l'exercice de la lecture et évaluation de mon dossier scientifique ; au Directeur du Centre d'Etudes Doctoral qui a fait suivre mon dossier auprès des membres jury.

J'exprime ma gratitude aux membres du jury pour avoir relu, corrigé et apporté leurs nombreuses suggestions ; pour m'avoir accordé leur temps en répondant présent à la soutenance. Il s'agit de :

- Professeur **Ahmed Barakat**, enseignant chercheur à la faculté des sciences et techniques de Béni Mellal (Université Sultan Moulay Slimane) ; en sa qualité de président du jury ;
- Professeur **Abdessamad Najine**, enseignant chercheur à la faculté des sciences et techniques de Béni Mellal (Université Sultan Moulay Slimane) ; en sa qualité de rapporteur numéro 1 ;
- Professeur **Ahmed Akhsas**, enseignant chercheur à l'école Mohammadia de l'ingénieur (Université Mohamed V) ; en sa qualité de rapporteur numéro 2 ;
- Professeur **Ahmed Fékri**, enseignant chercheur à la faculté des sciences Ben M'Sik (Université Hassan II) ; en sa qualité de rapporteur numéro 3 ;
- Professeur **Mohamed Hilali**, enseignant chercheur à la faculté des sciences et techniques d'Errachidia (Université Moulay Ismail) ; en sa qualité d'examineur ;
- Monsieur **Brahim Aghazzaf**, directeur de l'agence hydraulique de l'Oum Er Rbia ; en sa qualité d'invité ;
- Professeur **Ahmed Boukdir**, enseignant chercheur à la faculté des sciences et techniques de Béni Mellal (Université Sultan Moulay Slimane) ; en sa qualité de directeur de thèse.

Merci encore d'avoir évalué l'ensemble de mes travaux scientifiques et d'avoir contribué à l'amélioration du document final à travers vos nombreuses remarques et suggestions pertinentes.

La pratique est dure, et la réalisation d'une thèse de Doctorat (PhD) nécessite beaucoup de ressources que nous arrivons à puiser ici et là mais, sans laquelle, nous abandonnerions tous. Une pensée à ceux-là même, qui n'ont pas cessé de m'encourager, et de me rappeler ce qui est important dans la vie. Ces professeurs qui malgré la distance se sont substitués aux membres de ma famille par des échanges par

mail, téléphones, voire réseaux sociaux ; me rappelant la rigueur, la pugnacité, et l'esprit de curiosité. Professeurs **Mostafa Stitou, Soumia Fahd**, Docteurs **Boris Olegoba Ibara, Diaka Sidibé Konaté, Michel Abaga Abessolo, Assoman Kouakou, Thérèse Rosie Lauriane Ngonu, Valery Hambaté, Moussa Traoré**. J'ai encore en tête les fois où vous étiez à l'écoute face à mes nombreuses requêtes.

A mes amis, et collègues de laboratoire du Génie Industriel ; je vous dis merci pour tout. Les échanges importants, les fous rires, les critiques portées à l'endroit de certains de nos aînés et surtout la disponibilité de chacun. Avec vous, je pouvais dormir tranquille car je savais que vous trouveriez quoiqu'il en soit des solutions pratiques pour moi ; sachant mon statut d'étranger au Maroc. Les traductions, les données, les traitements des outils système d'information géographique, l'orientation et la consolation. A **Abdelhamid Zitouni**, merci infiniment de ta disponibilité qui m'a profondément marqué. **Samivel Pana**, merci pour les encouragements et pour les solutions techniques que tu m'apportais même tard la nuit. **Nadia Houari** aux frères **Ismail et Mustapha Ghafrani** merci pour les nombreux conseils et astuces que vous avez sus me transmettre. A **Nadia Lmoudn**, merci pour l'accueil au sein de tes bureaux, et de ton soutien immense vis-à-vis de moi.

**El Moutassime Sabri, Patrick Kayupé, Wissal Baite, Zhou Echakraoui, Larbi Barhazi, Amina El Joudiani, Hassan Ikmerdi, Alili Lahcen, Elhassan Ben-Saïd, Lahcen Belowad** merci à tous et bon courage à certains pour l'ensemble de vos travaux.

Enfin à ma famille nombreuse, pour le soutien illimité car il est difficile de séjourner au Maroc sans travail, dans la peau d'un étudiant-chercheur, participer à des congrès à ses frais, sans compter les soucis de logistique, passer des coups de fils réguliers sans pour autant rentrer au pays pendant autant d'années. Chacun de vous à tour de rôle m'a apporté son soutien moral et financier à chaque fois qu'il était nécessaire. Je pense notamment à : monsieur **Henri Menga**, Docteur **Sylvain Lékaka**, messieurs **Raoul Ominga**, et **Camille Bongou**, madame **Simone Ngolo**, le Commandant **Edouard Edoungatso**, et monsieur **Paul Ombeté** d'avoir permis ma venue et mon intégration au Maroc. L'ensemble des diplomates congolais au Maroc ; précisément madame **Jeanne Longaguet** secrétaire générale et responsable des affaires estudiantines.

Merci à mon frère aîné ; Docteur **Hughes Brioux Ekouele Mbaki** pour l'exemplarité, Docteur **Ghislain Mpandzou**, monsieur **Doucouré Makan**, Professeur **Hervé Iloki**, monsieur **Ghislain Iloki**, Docteur **Lambi Munka Nkalla**, monsieur **Loréno Palé**, mesdemoiselles **Lylia Mathurine Hompérat** et **Sandra Adoua**, monsieur **Norbert Ondongo et famille**, mademoiselle **Noellia Ekouele Mbaki**, mamans **Jacquie et Annicette Menga**, grand-mères **Bernadette Iloki** et **Henriette Maboueret**, messieurs **Elvis Menga, Pavely Menga Okandza, et Revy Iloki**.

Grand merci à mademoiselle **Dorina Sylvarolle Boussa** pour le soutien au quotidien ; merci d'être toi, dans la générosité qui te caractérise et l'amour que tu portes à mon égard.

J'en oublie naturellement et heureusement pour les certains lecteurs. Cela signifie d'autres part qu'on n'est jamais seuls sur terre et que l'on a beaucoup de gens pour qui l'on compte.

Enfin, j'aimerais exprimer mes sincères remerciements à tous ceux, de près ou de loin, ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réussite de ce travail.

## Avant-propos

Cette thèse est le fruit de la collaboration entre l'université Sultan Moulay Slimane à travers sa formation doctorale ; Ressources Naturelles, Environnement et Santé (RNES), le laboratoire de Génie Industriel et l'agence de bassin hydraulique Oum Er Rbia.

Les travaux ont été menés en alternance entre le laboratoire Génie Industriel, l'Agence Oum Er Rbia et différentes autres structures d'accueils telles MEDITEC IN, la Radeet/ONEE, ORMVAD et de nombreuses sorties de terrain dans la région du Sahel-Doukkala.

Ce travail nous a permis de participer à des nombreux travaux et de participer à des congrès aussi bien nationaux qu'internationaux au moyen des communications orales et écrites présentées ci-dessous :

**V.R. Ekouele Mbaki**, A. Boukdir, P. Menga Okandza, A. Elissami, A. Zitouni, E. Sabri. *Estimation of recharge potential of aquifers in the Sahel Doukkala region (Morocco)*. Jowset, 2017 (02), N°01, 173-182.

Abdelhamid Zitouni, Ahmed Boukdir, **Vivien Romaric Ekouele Mbaki**, Wissal Baite, Zhou Echakraoui, El Mouatassime Sabri, Hamou El Fjiji, Abdessalam El Issami. *Contribution of the method of electric resistivities in the gratitude (recongnition) of the aquifer turonien in the plain of tadla and the tray of phosphates (Morocco)*. JOWSET, 2017 (03), N°01, 88-94

El Mouatassime Sabri, Ahmed Boukdir, Rachid El Maslouhi, Mustapha Mabrouki, Abdellah El Mahboul, **Vivien Romaric Ekouele Mbaki**, Abdelhamid Zitouni, Wissal Baite, Zhou Echakraoui. *Modelling reservoir sedimentation at bin el ouidane dam, morocco*. agrofor international journal, vol. 2, issue n°1, 2017

**V. R. Ekouele Mbaki**, A. Boukdir, P. Menga Okandza, A. Mahboul, M. Hilali, and A. Zitouni. *Geomorphological analysis and estimating the water potential in the region of sahel doukkala (morocco)*. International Journal of Innovation and Applied Studies ISSN 2028-9324 Vol. 19 No. 1 Jan. 2017, pp. 242-251

**V. R. Ekouele Mbaki**, A. Boukdir, P. Menga Okandza, A. El Mahboul, M. Hilali, A. Zitouni. *Quantitative analysis of water potential in the region of sahel doukkala*. JOWSET, 2016 (01), 26. **Article**

El Mouatassime. Sabri, Ahmed Boukdir, Abdallah. El Mahboul, Rachid. El Meslouhi, Mustapha Mabrouki, **Vivien Romaric Ekouele Mbaki**, Abdelhamid Zitouni, Wissal Baite, Zhou Echakraoui (2016): *Predicting soil erosion and sediment yield in oued el abid watershed, Morocco*, 2nd Annual International Conference on Geography (2016), Athens Institute for education and research Greece, Juin 2016

Z. Echakraoui, A. Boukdir, A. Zitouni, W.Baite, S. El Mouatassime, **V.R. Ekouele Mbaki**, H.Ikhmerdi, E.Ben-Said, L.Alili, A. El Mahboul, R. El Meslouhi (2016) : *Les changements climatiques et les mesures d'adaptation au Maroc*), Colloque international « Migrations Climatiques : tendances et enjeux » à Rabat le 20 Mai 2016, Résumé.

Z. Echakraoui, A. Boukdir, A. Zitouni, W.Baite, S. El Mouatassime, **V.R. Ekouele Mbaki**, H.Ikhmerdi, E.Ben-Said, L.Alili (2016) : *Strategie d'adaptation de la gestion des ressources en eau dans le bassin*

*hydraulique de l'oum er rbia au changement climatique*, CI3E à Al Hoceima le 21-22 Avril 2016, pp.90, Résumé.

Z. Echakraoui A. Boukdir, A. Chaouni, W. Baite, A. Zitouni, S. El Mouatassime, **V.R. Ekouele Mbaki**, H.Ikhermerdi, E.Ben-Said, L.Alili (2016) : *Maitrise et optimisation de la station de traitement des eaux usees de khouribga*, CI3E à Al Hoceima le 21-22 Avril 2016, pp.91, Résumé

Abdelhamid Zitouni, A. Boukdir, Z. Echakraoui, W. Baite, **V.R. Ekouele Mbaki**, et S. El Mouatassime (2015) : *Apport de la methode des resistivites electriques au degagement des ressources en eaux souterraines dans la plaine du tadla et plateau des phosphates (Maroc)*, EDE5, Settat le 24-25-26 Novembre 2015, pp.27, Résumé.

**Ekouele Mbaki Vivien Romaric**, Boukdir Ahmed, Hilali Mohamed, El Issami A., Mabrouki Mustapha, Zitouni Abdelhamid, Sabri El Mouatassime, Baite Wissal, Echakraoui Zhour (2015), *Caracterisation hydrogeomorphologique de la region du sahel-doukkala : apport a la recharge artificielle des nappes de la region*, 5è édition du congrès international : Eaux, Déchets & Environnement, Novembre 2015, Settat p21

Abdelhamid Zitouni, A. Boukdir, W. Baite, S. El Mouatassime, Z. Echakraoui et **V.R. Ekouele Mbaki**. (2015) : *Evolution des teneurs en nitrates de la nappe phreatique de la plaine du tadla. etat des lieux, foyers de pollution et risque sur la sante de la population*, EDE5 a Settat le 24-25-26 Novembre 2015, Résumé

E. Sabri, A. Boukdir, A. El Mahboul, M. Bairise, R.M. El Meslouhi, A. Ettaqy, A.Zitouni, W.Baite, Z.Echakraoui, A.Baddi, A.El Kasri, **V.R. Ekouele Mbaki** (2015) : *Erosion hydrique dans le bassin versant d'oued el abid region beni mellal-khenifra, au Maroc*. Application Des Technologies Géospatiales En Géosciences (2015), FP Taza, Octobre 2015, pp. 216-217, Résumé.

Wissal Baite, A. Boukdir, Z. Echakraoui, A. Zitouni, E. Sabri et **V.R. Ekouele Mbaki**. (2015). *L'application du sig a l'elaboration d'un programme de recharge artificielle de la nappe de chtouka*. Congrès International sur l'application des technologies Géospatiales en Géosciences. Taza, Octobre 2015, pp 130. Résumé

Z. Echakraoui, A. Boukdir, A. Zitouni, W. Baite, S. El Mouatassime, **V.R. Ekouele Mbaki**, I.Boutirame. *Les changements climatiques et les mesures d'adaptation : gestion integree des ressources eaux (GIRE)*. Application Des Technologies Géospatiales En Géosciences (2015), FP Taza, Octobre 2015, pp. 91, Résumé.

Abdelhamid Zitouni, A. Boukdir, W. Baite, Z. Echakraoui, S. El Mouatassime, **V.R. Ekouele Mbaki** (2015) : *Choix de site pour la mise en place d'un centre de transfert des dechets pour le groupement des communes : Kasba Tadla, el Ksiba, Zawiat Chikh*, Application Des Technologies Géospatiales En Géosciences (2015), FP Taza, Octobre 2015, pp. 76-77, **Résumé**.

**Ekouele Mbaki Vivien Romaric**, Boukdir Ahmed, El Mahboul A., El Issami A., Zitouni Abdelhamid, Baite Wissal, Sabri El Mouatassime, ECHAKRAOUI Zhour (2015), *Geomorphologie dynamique du sahel – doukkala. Apport à la gestion des eaux de la region*, 1er Congrès international Polydisciplinaire, Juin 2015, Béni Mellal p51

**Ekouele Mbaki Vivien Romaric**, Zitouni Abdelhamid, Menga Okandza Pavely, Boukdir Ahmed (2015), *Determination des flux de direction et d'accumulation de la region du Sahel – Doukkala*, Workshop National SRIE Mai 2015, Errachidia p21

## Résumé

La Recharge Artificielle de Nappe (RAN) est une technique émergente de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), de plus en plus utilisée pour résoudre des problèmes d'approvisionnement et de gestion surtout en zones semi-arides et arides. Elle vise à augmenter les volumes d'eau souterraine disponibles en favorisant, par des moyens artificiels, son infiltration jusqu'à l'aquifère. La région du Sahel Doukkala appartient à la grande unité géologique connue sous le nom de « Méséta marocaine ». Elle s'étend sur une profondeur de 70 à 80 Km depuis Azemmour jusqu'à Safi, soit sur une longueur de 150 Km de littoral.

Plutôt pauvre dans le Sahel où les sols, limités aux dépressions interdunaires, sont squelettiques, peu profonds et inaptes à produire de bonnes récoltes mais à potentialités agricoles remarquables dans la vaste étendue limoneuse de la plaine des Doukkala ; la région du Sahel Doukkala présente plusieurs nappes soumises à l'aridité d'une part mais aussi et surtout aux pressions anthropiques de l'autre. On compte parmi les conséquences directes vis-à-vis d'elles ; la baisse considérable du niveau piézométriques à travers les différents points d'eaux (un taux d'accroissement de 1,6% environs, sur plus de 20 ans de mesures ponctuelles), une dégradation qualitative aussi bien dans la partie en amont que le long du littoral (justifié par l'invasion marine).

A cet effet, la direction de l'agence du bassin hydraulique de l'Oum Er Rbia lance plusieurs programmes dont la mise en place de la recharge artificielle en vue de palier aux problématiques liées aux ressources en eau de la région.

La présente recherche a consisté à analyser les conditions de recharge naturelle et artificielle, pour ensuite développer une méthodologie d'analyse de la faisabilité de Recharge Artificielle. Trois grandes parties se dégagent. Notamment dans la quantification des ressources en eau locale et mobilisable, l'analyse des données piézométriques historiques et la déduction des zones non saturées ; ensuite l'étude qualitative des eaux souterraines avant d'établir la proposition des scénarii de la recharge artificielle.

A l'aide du Model Numérique de Terrain (MNT), des outils du Système d'Information Géographique (SIG), des logiciels de calculs associés, et des données existantes ; on remarque le faible réseau hydrographique couplé de bassins endoréiques et d'un relief dunaire qui constitue un barrage à l'écoulement de surface en direction de l'océan. Les sorties de terrains en haute eaux et basses eaux ont révélé d'un point de vue quantitatif les amplitudes de fluctuations de 6 mètres au niveau du Sahel central, contre environs 1 mètre dans le reste de la région. Et d'un point de vue qualitatif, l'échantillonnage exhaustif puis, réduit nous montre la dégradation en certains points en amont, au niveau des surfaces irriguées et une variation de dégradation sur le littoral. On déduira selon chacun des paramètres (le sens des courants souterrains, la puissance des zones non saturées et ses variations, les paramètres hydrodynamiques des aquifères et la proximité des zones à invasion marine), les zones propices à l'exécution de la recharge artificielle du Sahel Doukkala. Cette étude constitue un outil d'aide à la décision quant à la gestion intégrée des ressources en eau et tous les résultats obtenus peuvent ainsi servir de support pour les études ultérieures dans la région.

**Mots clés :** Maroc, Sahel Doukkala, Bassin de l'Oum Er Rbia, Gestion des eaux, Recharge artificielle des nappes, Analyse spatiale, Indice d'humidité topographique, Géostatistique, Analyse piézométrique, Etude qualitative.

## **Abstract**

Managed Aquifer Recharge (MAR) is an emerging technique of integrated water resources management (IWRM), increasingly used to solve supply and management problems especially in semi-arid and arid zones. It aims to increase available groundwater volumes by artificially promoting its infiltration to the aquifer. The Sahel Doukkala region belongs to the large geological unit known as the "Moroccan Meseta". It extends to a depth of 70 to 80 km; from Azemmour to Safi, over a length of 150 km of coastline.

Rather poor in the Sahel where the soils, limited to interdunal depressions, are skeletal, shallow and unable to produce good crops but with remarkable agricultural potential in the vast silty extent of the Doukkala plain; the Sahel Doukkala region presents several layers subject to aridity on the one hand but also and above all to human pressures on the other. One of the direct consequences to them; the considerable drop in the piezometric level across the various water points (a growth rate of around 1.6%, over more than 20 years of one-off measurements), a qualitative deterioration both in the upstream and the long coastline (justified by the marine invasion).

For this purpose, the management of the Oum Er Rbia watershed agency is launching several programs including the implementation of artificial recharge in order to address the issues related to water resources in the region.

The present research consisted in analyzing the conditions of natural and artificial recharge, then to develop a methodology of Analysis of the feasibility of Artificial recharge. Three major parts emerge; in particular in the quantification of local and mobilizable water resources, the analysis of historical piezometric data and the deduction of unsaturated zones; then the qualitative study of the groundwater before establishing the proposition of the scenarios of the artificial recharge.

Using the Digital Elevation Model (DEM), Geographical Information System (GIS) tools, associated calculation software, and existing data; we note the weak coupled hydrographic network of endorheic basins and a dune relief that constitutes a dam to the surface flow towards the ocean. Outflows from high water and low water revealed the amplitude of fluctuations of 6 meters in the central Sahel from a quantitative point of view, compared to about 1 meter in the rest of the region. And from a qualitative point of view, the reduced sampling shows us the degradation at certain points upstream, at the level of irrigated surfaces and a variation of degradation on the littoral. Depending on each of the parameters (the direction of the underground currents, the power of the unsaturated zones and its variations, the hydrodynamic parameters of the aquifers and the proximity of the zones with marine invasion), we will deduct the zones favorable to the execution of the artificial recharge of the Sahel Doukkala. This study is a decision-making tool for integrated water resources management and all results can be used as a support for further studies in the region.

**Keywords:** Morocco; Sahel Doukkala; Oum Er R'Bia basin; Water management; Artificial recharge or aquifers; Spatial analysis; Topographic wetness index; geostatistics; Piezometric analysis; Qualitative study.

## Liste des abréviations

**GIEC** : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

**RAN** : Recharge Artificielle des Nappes

**MAR** : Managed Aquifer Recharge

**CERED** : Centre d'Etude et de Recherche Démographique

**GWP**: Global Water Partnership

**DRPE** : Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau

**MNT** : Model Numérique de Terrain

**SIG** : Système d'Information Géographique

**CF** : Coliformes fécaux

**CE** : Conductivité électrique

**AEPI** : Adduction en eau potable et d'irrigation

**FAO**: Food and Agriculture Organization of the United Nations

**R et R'**: Coefficient de remplissage immédiat et retardé

**S et S'**: Coefficient d'emmagasiner immédiat et retardé

**IDW** : Inverse Distance Weighting

**TDS** : Total des solides dissous et représente la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Chapitre 1. Introduction et définition de la problématique</b>	<b>19</b>
1.1	Introduction générale	19
1.2	Définition de la problématique	21
1.3	Objectifs de la thèse	22
1.4	Démarche adoptée	23
1.5	Généralités et définitions du cadre d'étude	25
1.5.1	Intérêt de la recharge artificielle des nappes d'eaux souterraines	28
1.5.2	Intérêts économiques de la recharge artificielle des nappes d'eaux souterraines	29
1.5.3	Intérêts techniques et sociaux	30
1.5.4	Les différents dispositifs de la recharge artificielle des nappes	32
<b>2</b>	<b>Chapitre 2. Présentation du cadre d'étude, analyse géomorphologique et estimation du potentiel en eau de la région.</b>	<b>36</b>
2.1	Présentation du cadre d'étude	36
2.1.1	Caractéristiques physiques et climatiques de la région	37
2.1.2	Régime climatique	42
2.1.3	Le réseau hydrographique	46
2.2	Aménagement hydro-agricole	48
2.3	Analyse géomorphologique et estimation du potentiel en eau de la région	49
2.3.1	Méthode analytique	50
2.3.2	Résultats et discussion	51
2.3.3	Estimation du potentiel hydrique exploitable	58
2.4	Conclusion partielle	60
<b>3</b>	<b>Chapitre 3. Etude hydrogéologique et analyse du comportement piézométrique de la nappe.</b>	<b>61</b>
3.1	Contexte géologique	61
3.1.1	La stratigraphie	62
3.1.2	Structure	66
3.2	Caractérisation hydrogéologique	66
3.2.1	Caractéristiques hydrogéologiques des différents niveaux stratigraphiques	67
3.2.2	Caractéristiques hydrogéologiques des nappes de Doukkala	70
3.2.3	Caractérisation des nappes du Sahel	75
3.3	Etude du comportement piézométrique des nappes de la région du Sahel Doukkala	77
3.3.1	Matériels et méthodes	78
3.3.2	Résultats et discussion	79

3.4	Conclusion partielle .....	97
4	Chapitre 4. Etude qualitative des eaux souterraines de la région .....	100
4.1	Matériel et méthode .....	101
4.1.1	Elaboration et mise en place du réseau de prélèvements à des fins hydrochimiques 102	
4.1.2	Appareillage .....	103
4.2	Bilan des mesures réalisées.....	104
4.2.1	Conductivité électrique .....	104
4.2.2	pH des eaux.....	107
4.3	Évaluation de l'état qualitatif des masses d'eau souterraine de la région.....	109
4.3.1	Les ions sodium.....	111
4.3.2	Les ions Chlorures.....	113
4.3.3	Les ions Calcium.....	115
4.3.4	Les bicarbonates .....	116
4.3.5	Les ions Magnésium.....	118
4.3.6	Les ions Sulfates.....	119
4.3.7	Les ions Potassium.....	121
4.3.8	Les Nitrates .....	122
4.4	Analyse et interprétation des données.....	124
4.4.1	Indice de saturation.....	129
4.4.2	Mise en évidence des échanges de base.....	133
4.5	Analyse en Composantes Principales (ACP).....	134
4.6	Bilan qualitatif.....	137
4.7	Conclusion partielle .....	140
5	Chapitre 5. Choix de sites et scénario de recharges .....	144
5.1	Récapitulatif des historiques de données.....	144
5.1.1	Présentation de la situation des ressources en eau souterraines du Sahel .....	144
5.1.2	Ressources en eau potentielles pour la recharge artificielle du Sahel .....	147
5.2	Scénarios et variantes proposées pour la recharge artificielle .....	148
5.3	Analyses multicritères des scénarios de ressources.....	150
5.4	Classement des variantes de ressources.....	151
5.5	Etude des sites potentiels de la recharge .....	152
5.5.1	Géologie de surface et de subsurface .....	152
5.5.2	Paramètres hydrodynamiques (transmissivités et perméabilités).....	153
5.5.3	Emmagasinement .....	154
5.5.4	Epaisseur de la zone non saturée.....	155
5.5.5	Zones de forte baisse du niveau piézométrique.....	156

5.5.6	Proximité du Biseau Salé .....	158
5.5.7	Proximité aux zones de forte dégradation de la qualité des eaux.....	159
5.5.8	Proximité des forages d'eau qui seront utilisés pour injection .....	160
5.6	Proximité de la ressource en eau mobilisable .....	160
5.7	Classement des variantes .....	160
5.8	Conclusion partielle .....	169
6	Conclusion générale.....	170
6.1.1	Evaluation quantitative des potentialités en eau de surface de la région .....	171
6.1.2	Analyse des données piézométriques de la région selon les années hydrologiques.....	172
6.1.3	Etude physico chimique des nappes de la région, et déterminations des zones de pollution .....	172
6.1.4	Modélisation des scénarii de recharge artificielle.....	173
6.2	Perspectives et recommandations.....	174

## Liste de figures

Figure 1. Représentation graphique du taux de croissance de la population annuelle du Maroc d'après le haut-commissariat au plan ( <a href="http://www.hcp.ma">www.hcp.ma</a> ; consulté en juin 2018).....	25
Figure 2. Différentes nappes d'eaux souterraines (tirée de l'agence de l'eau Rhône méditerranée Corses, 2012).....	28
Figure 3. Schémas de l'illustration du rôle de la recharge artificielle dans l'augmentation de la capacité d'extraction d'un aquifère.....	31
Figure 4. Présentation de la zone d'étude .....	37
Figure 5. Aperçu en 3D de la région du Sahel Doukkala.....	38
Figure 6. Aperçu morphologique de la région du Sahel Doukkala à partir des profils topographiques ; orientations SE – NO.....	40
Figure 7. Photo illustrative de la morphologie de la région de Oualidia, prise le 10 décembre 2015.....	42
Figure 8. Représentation graphique et comparative entre la pluviométrie moyenne mensuelle interannuelle de la région du Sahel - Doukkala et de l'ensemble du bassin versant de l'Oued Oum Er Rbia sur 39 ans.....	45
Figure 9. Carte représentative du réseau hydrographique et du découpage en sous bassins versants de la région du Sahel Doukkala .....	47
Figure 10. Carte des aménagements hydro-agricoles du bassin Sahel-Doukkala .....	49
Figure 11. Représentation cartographique des pentes de la région du Sahel Doukkala .....	52
Figure 12. Carte représentative des orientations des pentes de la région du Sahel Doukkala .....	53
Figure 13. Carte représentative d'accumulation de flux dans la région du Sahel Doukkala.....	54
Figure 14. Carte représentative du réseau hydrologique de la région du Sahel Doukkala.....	55
Figure 15. Représentation spatiale de la variabilité de l'indice de l'humidité par la méthode de Beven – Kirkby (1979).....	57
Figure 16. Vue panoramique de daya de Fahs et de l'oued Fel Fel (Photo prise le 9 décembre 2015) .....	58
Figure 17. Evaluation des surfaces à hauts indices.....	59
Figure 18. Aperçu géologique de la région du Sahel – Doukkala d'après la carte géologique du Maroc au 1/1000.000, dressée par M. G. Choubert .....	66
Figure 19. Carte d'extension des principaux niveaux aquifères du bassin Sahel-Doukkala .....	69
Figure 20. Carte représentative de la piézométrie moyenne 1989-1990 .....	73
Figure 21. Aperçu des principaux niveaux aquifères du bassin Sahel-Doukkala.....	77
Figure 22. Carte représentative des mesures piézométriques sur fond model numérique de terrain (MNT) en décembre 2015.....	80
Figure 23. Carte de répartition des zones non saturées de la région du Sahel Doukkala (d'après la prospection de Décembre 2015).....	82
Figure 24. Cartes représentatives des zones non saturées sur 3 années spécifiques (1991 – 1992 ; 1995 – 1996 ; 2010 – 2011) de la région du Sahel Doukkala .....	86
Figure 25. Répartition spatiale des zones non saturées en fonction de la profondeur dans le Sahel Doukkala .....	87
Figure 26. Représentation cartographique des fluctuations piézométriques globales (HE-BE) dans la région pendant 3 années distinctes (1991-1992, 1995-1996, 2010-2011) dans le Sahel Doukkala... ..	89
Figure 27. Carte représentative de la situation des points d'eaux évalués.....	91
Figure 28. Carte illustrative des historiques piézométriques des points de mesures (1,2,3,4,5 et 6) dans le Sahel Doukkala.....	94
Figure 29. Extrait de la coupe géologique à travers le Sahel (tiré de Ressources en eau Tome 2)....	95

Figure 30. Extrait de la coupe géologique à travers les Doukkala (tiré de Ressources en eau du Maroc, tome 2).....	96
Figure 31. Graphes représentatifs du volume des zones non saturées et du taux d'accroissement	98
Figure 32. Cartes représentative des points prospectés (116).....	102
Figure 33. Photo illustrative de l'appareillage utilisé.....	103
Figure 34. Aperçu de la décomposition du sel (NaCl).....	104
Figure 35. Carte représentative de la conductivité électrique dans la région du Sahel Doukkala (Selon les mesures de terrain réalisées en Décembre 2015).....	106
Figure 36. Carte représentative du pH dans la région du Sahel Doukkala (Selon les mesures de terrain réalisées en Décembre 2015).....	108
Figure 37. Corrélation entre le pH et la conductivité électrique (Décembre 2015).....	109
Figure 38. Présentation des points d'analyses physico chimiques choisis après réduction de l'échantillonnage global.....	111
Figure 39. Variation spatiale des teneurs en ions sodium des eaux souterraines du Sahel Doukkala central (Juin 2014).....	113
Figure 40. Variation spatiale des teneurs en ions chlorure des eaux souterraines du Sahel Doukkala central (Juin 2014).....	114
Figure 41. Variation spatiale des teneurs en ions calcium des eaux souterraines du Sahel Doukkala central (Juin 2014).....	116
Figure 42. Variation spatiale des teneurs en bicarbonates [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] des eaux souterraines du Sahel Doukkala central (Juin 2014).....	118
Figure 43. Variation spatiale des teneurs en ions magnésium [Mg <sup>2+</sup> ] des eaux souterraines du Sahel Doukkala central (Juin 2014).....	119
Figure 44. Variation spatiale des teneurs en Sulfates [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] des eaux souterraines du Sahel Doukkala central (Juin 2014).....	120
Figure 45. Variation spatiale des teneurs en Potassium [K <sup>+</sup> ] des eaux souterraines du Sahel Doukkala central (Juin 2014).....	122
Figure 46. Variation spatiale des teneurs en Nitrates [NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] des eaux souterraines du Sahel Doukkala central (Juin 2014).....	124
Figure 47. Diagramme triangulaire de Piper pour les eaux souterraines de la région du Sahel Doukkala (Juin 2014).....	126
Figure 48. Projection sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff des résultats des analyses des puits /forages du Sahel Doukkala (Juin 2014).....	127
Figure 49. Cartographie représentative des indices de saturations des aquifères de la région dans le Sahel Central de 2011 à 2014.....	132
Figure 50. Projection des variables dans le plan factoriel F1-F2 des eaux souterraines du Sahel Central.....	136
Figure 51. Projection des stations de mesure des eaux souterraines sur le plan factoriel F1-F2....	137
Figure 52. Présentation des secteurs en exploitation dans le Sahel (étude DRHT et rapport PDAIRE 1994).....	146
Figure 53. Carte représentative du cadre d'étude réduit de la région du Sahel Doukkala.....	149
Figure 54. Carte représentative de la conductivité électrique des eaux et zones menacées par l'intrusion marine (ABHOER, 2005).....	150
Figure 55. Cartographie de l'évolution des iso variations des niveaux piézométriques entre 1963 et 2003 (ABHOER, 2005).....	151
Figure 56. Carte représentative de la répartition spatiale des zones de transmissivités dans le Sahel central.....	154

Figure 57. Carte globale d'évolution spatiale de la puissance de la zone non saturée d'après les données enregistrées par l'ABHOER.....	156
Figure 58. Cartographie représentative des zones en fonction de l'historique de fluctuations de niveau des nappes de 1963 à 2003 ; d'après les données de l'ABHOER, 2005.....	158
Figure 59. Présentation des trois sites potentiels principaux pour la recharge de la nappe.....	161
Figure 60. Scénario 1 : Transfert d'eau de Daya Ouest Tnine Gharbia vers le site potentiel d'injection situé dans la zone du forage N°IRE 496/34 et aperçu topographique.....	163
Figure 61. Scénario 4 : Transfert d'eau à partir du réseau d'irrigation Bas Service vers la zone du forage 496/34 et aperçu topographique.....	164
Figure 62. Scénario 2 : Transfert d'eau de Daya au Nord Est Tnine Gharbia vers le site d'injection au Sud de Tleta Oulad Ghanem (forage 318/26) et aperçu topographique.....	165
Figure 63. Scénario 6 : Transfert d'eau à partir du réseau de drainage vers la zone Sud de Tleta Oulad Ghanem (forage 318/26), aperçu topographique.....	166
Figure 64. Scénario 3 : Transfert d'eau de Daya Fahs vers la zone du sud est de Sidi Moussa (forage 402/06), et aperçu topographique.....	167
Figure 65. Scénario 5 : Transfert d'eau à partir du casier Sidi Smail vers la zone d'Oulad Aissa (forage 402/26) et aperçu topographique.....	168
Figure 66. Carte représentative de l'altimétrie de la région du Sahel Doukkala.....	195
Figure 67. Indice topographique d'humidité d'après Beven & Kirkby (1979).....	196
Figure 68. Aperçu général des points humides.....	196
Figure 69. Canal sans berges à proximité de Sidi Bennour.....	197
Figure 70. Daya située à proximité de Zemamra.....	197
Figure 71. Photo d'une daya située à proximité de Tnine El Gharbia.....	198
Figure 72. Aperçu de la daya à proximité de la localité de Zémamra.....	198
Figure 73. Coupe hydrogéologique synthétique du Sahel Doukkala.....	199
Figure 74. Situation des coupes hydrogéologiques (moitié sud de la zone du projet).....	199
Figure 75. Coupe hydrogéologique A-A' Oualidia-Tnine Gharbia-Doukkala.....	200
Figure 76. Coupe hydrogéologique B-B' Littoral-Ain El Ghor-Doukkala.....	200
Figure 77. Coupe hydrogéologique C-C' Littoral-Tleta Bouaris-Moul Bergui-Doukkala.....	200
Figure 78. Coupe hydrogéologique D-D'Océan- Dar Si Aissa.....	201
Figure 79. Coupe hydrogéologique E-E' Ain Thami-Sud Dar Si Aissa.....	201
Figure 80. Coupe hydrogéologique F-F' Safi- Moul Bergui-Doukkala.....	201
Figure 81. Légende des coupes hydrogéologiques.....	202
Figure 82. Esquisse de la piézométrie de Janvier 1992.....	203
Figure 83. Esquisse de la piézométrie Aout 1992.....	203
Figure 84. Esquisse de la piézométrie Janvier 1996.....	204
Figure 85. Esquisse de la piézométrie Aout 1996.....	204
Figure 86. Esquisse de piézométrie Janvier 2011.....	205
Figure 87. Esquisse de piézométrie en Aout 2011.....	205
Figure 88. Aperçu de l'historique piézométrique du point 27/2037.....	206
Figure 89. Aperçu de l'historique piézométrique du point 26/235.....	206
Figure 90. Aperçu de l'historique piézométrique du point 26/316.....	207
Figure 91. Aperçu de l'historique piézométrique du point 26/317.....	207
Figure 92. Aperçu de l'historique piézométrique du point 26/448.....	208
Figure 93. Aperçu de l'historique piézométrique du point 34/505.....	208
Figure 94. Aperçu de l'historique piézométrique du point 34/1194.....	209
Figure 95. Aperçu de l'historique piézométrique du point 34/1398.....	209
Figure 96. Aperçu de l'historique piézométrique du point 34/496.....	210

<b>Figure 97. Aperçu de l'historique piézométrique du point 34/497</b> .....	210
<b>Figure 98. Cartographie représentative de la répartition spatiale des ions nitrates (2011)</b> .....	211
<b>Figure 99. Cartographie représentative de la répartition spatiale des ions nitrates (2012)</b> .....	211
<b>Figure 100. Cartographie représentative de la répartition spatiale des ions nitrates (2013)</b> .....	212
<b>Figure 101. Cartographie représentative de la répartition spatiale des ions nitrates (Hautes eaux 2014)</b> .....	212
<b>Figure 102. Cartographie représentative de la répartition spatiale des ions chlorure (2011)</b> .....	213
<b>Figure 103. Cartographie représentative de la répartition spatiale des ions chlorure (2012)</b> .....	213
<b>Figure 104. Cartographie représentative de la répartition spatiale des ions chlorure (2013)</b> .....	214
<b>Figure 105. Cartographie représentative de la répartition spatiale des ions chlorure (Hautes eaux 2014)</b> .....	214

## Liste des tableaux

Tableau 1. Estimation moyenne annuelle du potentiel hydrique de la région .....	59
Tableau 2. Equivalence et variations latérales des faciès du Crétacé inférieur (tiré des ressources en eau du Maroc Tome 2, par Ferre & Ruhard) .....	64
Tableau 3. Perméabilité type des sols du Sahel - Doukkala .....	69
Tableau 4. Répartition des profondeurs des nappes .....	73
Tableau 5. Tableau récapitulatif des gradients hydrauliques dans la région .....	81
Tableau 6. Historique des précipitations dans le Sahel - Doukkala de 1990 à 2002 .....	84
Tableau 7. Conversion des unités de conductivités .....	105
Tableau 8. Exemples de valeurs de conductivité .....	105
Tableau 9. Récapitulatif de la conductivité électrique (décembre 2015) .....	106
Tableau 10. Classification des eaux, selon le pH .....	107
Tableau 11. Récapitulatif du pH (Décembre 2015) .....	108
Tableau 12. Présentation de l'historique de teneurs en ion sodium [Na <sup>+</sup> ] en mg/L .....	112
Tableau 13. Présentation de l'historique de teneurs en ion chlorures [Cl <sup>-</sup> ] en mg/L .....	114
Tableau 14. Présentation de l'historique de teneurs en ion Calcium [Ca <sup>2+</sup> ] en mg/L .....	115
Tableau 15. Présentation de l'historique de teneurs en Bicarbonates [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] en mg/L .....	117
Tableau 16. Présentation de l'historique de teneurs en ions magnésium en mg/L .....	119
Tableau 17. Présentation de l'historique de teneurs en ions sulfates en mg/L .....	120
Tableau 18. Présentation de l'historique de teneurs en ions potassium en mg/L .....	121
Tableau 19. Présentation de l'historique de teneurs en nitrates en mg/L .....	123
Tableau 20. Présentation du bilan des éléments physico-chimiques des eaux souterraines de la région du Sahel Doukkala .....	125
Tableau 21. Indices de saturation des eaux souterraines de la région du Sahel Doukkala .....	130
Tableau 22. Récapitulatif de l'indice d'échanges de bases de 2011 à 2015 .....	134
Tableau 23. Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques .....	135
Tableau 24. Grille simplifiée pour l'évaluation de la qualité globale des eaux souterraines selon .....	138
Tableau 25. Qualité globale des eaux souterraines du Sahel Central (2011 - 2014) .....	140
Tableau 26. Données physico-chimiques entre les points d'eaux situés en amont et ceux situés en aval du bassin versant de l'oued Oum Er R'Bia .....	141
Tableau 27. Bilan qualitatif des eaux souterraines du Sahel Central (1997 - 2002) .....	142
Tableau 39. Situation des ressources en eau et de la salinité dans le Sahel côtier .....	147
Tableau 40. Matrice des variantes de ressources .....	152
Tableau 41. Présentation des tranches de transmissivités et leurs coefficients de pondération ...	154
Tableau 42. Coefficients d'emménagement estimés pour différentes zones du Sahel-Doukkala et leurs coefficients de pondération .....	155
Tableau 43. Epaisseur des zones non saturées .....	155
Tableau 44. Zones de forte baisse et remontée du niveau .....	157
Tableau 45. Bilan des scénarios de recharge retenus pour la nappe .....	162
Tableau 46. Répartition spatiale à partir des données altimétriques .....	195

# 1 Chapitre 1. Introduction et définition de la problématique

## 1.1 Introduction générale

La gestion des ressources en eau est un des problèmes majeurs du XXI<sup>e</sup> siècle. L'eau est nécessaire à la vie, mais elle est aussi utilisée pour la fabrication de nombreux produits alimentaires et industriels.

Actuellement, l'homme a puisé et continue de puiser sans retenue dans les ressources en eau disponibles en surface et même dans les nappes souterraines. Cependant, alors que dans de nombreux pays il y a une pénurie épisodique ou chronique d'eau, on estime que la demande en eau double tous les vingt ans. Dès lors, la quantité d'eau disponible sera donc insuffisante.

Ce manque est d'autant plus alarmant car il concerne tout aussi les eaux douces déjà minoritaires. L'eau constitue une denrée de plus en plus rare dans de nombreuses régions du monde notamment en Afrique subsaharienne (Paquerot, 2005 ; Amisigo, 2006 ; Baron, 2009), justifiant les poussées de désertifications critiques.

Au Maroc, plus précisément dans la région du Sahel – Doukkala ; il y règne un climat de type semi-aride où la pluviométrie moyenne annuelle n'excède pas les 700 mm et une évaporation moyenne annuelle d'environ 1600 mm. Avec de plus fortes pressions sur les ressources en eau douce générées par la poussée démographique, la nécessaire croissance de la production agro-alimentaire, le développement industriel ainsi que l'amélioration des conditions de vie ; les nappes déjà fortement sollicitées le sont davantage.

On enregistre ainsi, des baisses considérables du niveau piézométrique, des pollutions marquées en certains endroits plutôt que d'autres en raison d'aménagements agricoles et humains, sans oublier l'intrusion marine au niveau du littoral.

A cet effet, les réserves souterraines se trouvent confrontées à des taux de salinités élevés. L'historique de mesures diligentées par l'agence du bassin de l'Oum Er Rbia nous permet de déterminer les zones polluées et de déterminer les différents gradients. Il s'agit entre autres des zones situées le long du littoral mais aussi, certains points situés à proximité du périmètre d'irrigation.

Toutefois, la situation de la région est particulière, car rappelons-le ; le Sahel – Doukkala est situé en aval du bassin versant et est caractérisé par une faible densité hydrographique. En plus d'une particularité géomorphologique, la présence de nombreux cordons dunaires confère à la région du Sahel ; un relief de type appalachien ; et constitue une sorte de barrage aux flux d'eaux superficiels, laissant ainsi un seul exutoire au Nord du bassin (région d'Azemmour).

Il apparaît donc que cette région compte plusieurs sous bassins endoréiques laissant apparaître un grand nombre de dépressions qui, lors des crues successives et conséquentes, donnent lieu à des lagunes et des lacs localement nommés dayas.

Cependant, les activités humaines couplées aux dégradations naturelles donnent lieu à de fortes concentrations en amont comme en aval qu'il convient d'endiguer. Mettre en œuvre un modèle de gestion durable nécessiterait au préalable de faire l'inventaire pluridisciplinaire ; allant aussi bien du volet juridique au volet socioéconomique, mettre à jours les forces en présence de la région tout en tenant compte de toutes celles qui composent l'ensemble du bassin.

Avec un cadre juridique bien défini, notamment avec la loi 10-95 et la récente 36-15 relatives à l'eau et ses décrets auxquelles se joignent de nombreuses autres lois ; 12-03 relative aux études d'impact sur l'environnement, les infrastructures de base en l'occurrence les barrages, les forages et piézomètres et des canaux d'irrigation. Force est de constater malgré tout, la situation critique des nappes présentes dans la région.

L'évapotranspiration annuelle est supérieure à la pluviométrie (1600 mm environs) ; la présence de nombreux points d'eaux où les pompages sont d'usages pour suppléer l'irrigation, ce qui contribue à l'augmentation du temps de percolation et influence grandement la conductivité hydraulique. La variabilité des conditions d'humidité du sol, l'encroûtement des sols, la végétation et la rugosité, la dynamique de l'intensité de pluie, peuvent tous produire différents régimes hydrologiques à différentes échelles spatiales (Esteves & Lapetite, 2003).

A cet effet, nous nous proposons dans ce document de réaliser la synthèse hydrogéologique et de proposer les scénarii de recharge artificielle des nappes du bassin du Sahel – Doukkala afin ; d'appuyer les infrastructures déjà présentes et nécessaires dans la gestion des ressources en eau.

Au sens plus large, on peut définir la recharge artificielle comme le procédé qui consiste à introduire l'eau dans une formation perméable. Cette définition sous-entend que la pénétration de l'eau dans le sous-sol est réalisée par l'intermédiaire d'un dispositif aménagé à cet effet. Ce qui nous permet d'éliminer deux cas de figures :

- Toute recharge d'une nappe provoquée par un aménagement dont ce n'est pas but tel que les pertes de retenues, canaux, réseaux d'irrigation, etc (J. Bize, L. Bourguet et J. Lemoine ; 1972). Même lorsque les aquifères qui en bénéficient sont activement exploités en ce sens où la part des pertes est fort importante dans la régénération de celui-ci ; les conduisant par ailleurs à une exploitation soutenue ;
- Toute recharge de la nappe à partir d'aquifères contigus ou de cours d'eau en liaison hydraulique avec elle, sous l'effet de la dépression provoquée par une exploitation intensive (réalimentation induite), même lorsque cette action est l'objectif recherché par l'exploitant.

On peut aussi rajouter, qu'il convient de préciser à chacun des cas, la destination des eaux introduites qui représentent une ressource supplémentaire apportée à la formation aquifère.

## 1.2 Définition de la problématique

Plusieurs études ont montré que la recharge artificielle des nappes fait partie de la politique de gestion (Kovacs, 1981 ; Baumann 1952, 1957, 1961 ; Revenga et al., 1999) et ses objectifs peuvent être classés dans plusieurs catégories parmi lesquelles nous pouvons citer :

- Modification de la qualité de l'eau ;
- Augmentation des ressources en eaux souterraines et optimisation de l'exploitation ;
- Création de barrières souterraines pour mettre fin à l'intrusion ou à la pénétration de l'eau salée et d'autres eaux indésirables dans les aquifères, et aussi la récupération des aquifères contaminés.

Partant du postulat de départ basé sur de nombreuses études précédentes réalisées au sein même du royaume d'un point de vue général et au niveau du littoral Atlantique ; le Sahel en particulier, il y a vraisemblablement des cas d'invasions marines localisées (Younsi et al, 1997 ; FAO, 1997 ; Hilali M. 2002). La problématique consistait alors, de palier à cette dégradation par les eaux d'origines marines par la mise en place d'un système de recharge artificiel des aquifères.

A ce titre, les sources d'eaux convenables pour la recharge comprennent l'eau potable traitée, les eaux souterraines traitées ou non-traitées, les eaux pluviales, les eaux usées de haute qualité de récupération, les eaux de ruissellement en milieu urbain et l'eau de mer dessalée.

Depuis, avec la rudesse du climat, et les pronostics futurs plus alarmants les uns des autres, il est clair que cette opération peut clairement choquer l'opinion qui subit fortement le manque patent d'eau.

Sachant que la gestion de la recharge peut également entraîner des effets néfastes découlant de l'augmentation du niveau des nappes affectant le drainage des terres et la gestion des voies navigables des plaines.

Les aspects négatifs du stockage d'eau dans l'aquifère peuvent être une perte d'eau due à la migration de celle-ci à travers l'aquifère ou encore une dégradation de la qualité de l'eau nécessitant des traitements supplémentaires. L'interaction entre l'eau injectée, les eaux souterraines et les sédiments natifs peut entraîner une détérioration de la qualité de l'eau injectée.

Le tout exige une mise en œuvre des moyens logistiques efficaces afin de garantir l'efficacité du projet. Ainsi, nous nous proposons dans ce document d'utiliser le système d'information géographique et les outils statistiques de calcul associés pour aider à la décision et définir le cadre principal de la recharge artificielle des nappes de la région du Sahel – Doukkala.

### 1.3 Objectifs de la thèse

Le présent travail a pour objectif d'analyser différentes données climatologiques, hydrologique et hydrogéologique afin de réaliser la synthèse hydrogéologique et de proposer les scénarii de recharge artificielle des nappes du Sahel Doukkala. Au-delà donc du strict cadre de la recherche, nous avons également des préoccupations de développement car la région est soumise à une forte dégradation de la

qualité de l'eau et ce, de toutes parts. L'évaluation de la dégradation des ressources en eau sur les principaux états du bassin versant permettent l'identification des zones favorables.

Les objectifs spécifiques de ce travail sont :

- L'actualisation et synthèse des données relatives au fonctionnement de la nappe du Sahel Doukkala ;
- Les propositions de scénarii de recharge artificielle de la région.

#### 1.4 Démarche adoptée

L'actualisation et synthèse des données relatives au fonctionnement de la nappe consiste à présenter l'état de lieu de la nappe en tenant compte des données historiques mais aussi des mesures récentes. Nous nous proposons ici une approche qui permet l'étude et la quantification de toutes les ressources superficielles pour estimer la capacité de mobilisation des eaux de recharge ; cela permet de prendre en compte la dimension spatiale des scénarios de recharge. Cependant, l'une des difficultés de l'étude vient de ce que les observations en conditions naturelles sont longues et aléatoires et que la méthode expérimentale est délicate à mettre en œuvre. Des sorties répétées de terrains nous ont permis de valider les données, de compléter une analyse qualitative. Nous avons pu réduire l'échelle du travail en procédant à chaque fois par éliminations, de manière à gagner en temps mais aussi en argent.

Cette étude est conduite au moyen d'une analyse statistique de données acquises sur plusieurs années ; allant de 1933 à 2015 mais, certaines données n'ont pas été incluses dans différentes analyses en raison des erreurs et de non disponibilité.

Avec bien sur de nombreux collaborateurs, et plusieurs chercheurs notamment les laboratoires de génie industriel, les groupes gestion et valorisations des ressources hydriques et électrochimie moléculaire et matériaux inorganiques, l'agence de bassin hydraulique de l'Oum Er Rbia ; l'office régional de mise en valeur agricole des Doukkala (ORMVAD), l'office national de l'eau potable et d'électricité (ONEE - Branche eau), Meditec IN et Aquasoft, etc. Tous ont apportés leurs avis bien que parfois divergents et nous ont permis de prendre de la hauteur dans certains cas.

Dans cette thèse, nous avons un aperçu de résultats ponctuels situés dans l'espace. Afin de ne pas biaiser les études ultérieures, notamment au niveau des frontières de la région ; nous ne nous sommes pas permis d'extrapoler les valeurs notamment aux zones non évaluées. Car, il est bien évident que l'ensemble des problématiques de la région ne peuvent pas faire l'objet d'une seule thèse compte tenu de sa haute importance mais aussi de sa complexité. Cependant, les résultats produits pourront servir de base à un programme plus large et plus ambitieux.

Il s'articule autour de six (06) chapitres :

Le chapitre 1 est une étude bibliographique et une description générale de la région. Il fait état des divisions administratives, et donc la définition du cadre d'étude.

Le chapitre 2 présente la zone expérimentale et concerne l'estimation du potentiel en eau et la caractérisation géomorphologique. Un accent particulier est mis sur l'influence de la géomorphologie dans la situation hydrique. Déterminer les zones humides est important notamment dans la mise en place du processus de recharge ; ce chapitre contribue à la réduction du cadre d'étude.

En ce qui concerne le chapitre 3, il décrit quantitativement les ressources en eau souterraines. Avec l'historique des mesures piézométriques et climatologiques, nous avons déterminé les fluctuations des toits des nappes, le sens de l'écoulement souterrain, et déduit les zones de recharges. Avec les données géophysiques, on comprend mieux le sens des zones non saturées du Sahel mais aussi des Doukkala.

Le chapitre 4 constitue une étude qualitative. En obéissant à une logique quasi identique, nous avons décrit les évolutions des eaux souterraines ; localiser les points critiques afin de compléter les précédentes analyses. Car, l'eau injectée dans la nappe doit obéir à certains critères avant la recharge, pour garantir la lutte contre la pollution anthropique mais surtout l'invasion marine.

Le chapitre 5 s'appuie sur les précédents chapitres pour établir le scénario de recharge. Nous avons désormais une zone plus réduite, et nous pouvons déterminer la zone de recharge propice. En effet, dans chacun des scénarios, deux propositions s'offrent à nous et, c'est bien sur la résultante des études quantitatives et qualitatives qui permettront d'y arriver.

Enfin, le chapitre 6, qui est un bilan global de l'étude présentant des conclusions, mais aussi certaines perspectives de l'étude. On dégagera enfin les principaux acquis de la thèse sur la mise en œuvre de la recharge artificielle dans le Sahel Doukkala.

## 1.5 Généralités et définitions du cadre d'étude

L'accroissement de la demande en eau dû à la poussée démographique (figure 1) et au développement du secteur agricole et industriel s'accompagne d'une pression sur les eaux de la nappe, ce qui risque à terme, de causer un déficit du bilan de la nappe et une dégradation de la qualité de l'eau par l'invasion des eaux marines et par la pollution d'origine agricole (les fertilisants et les nitrates phytosanitaires).

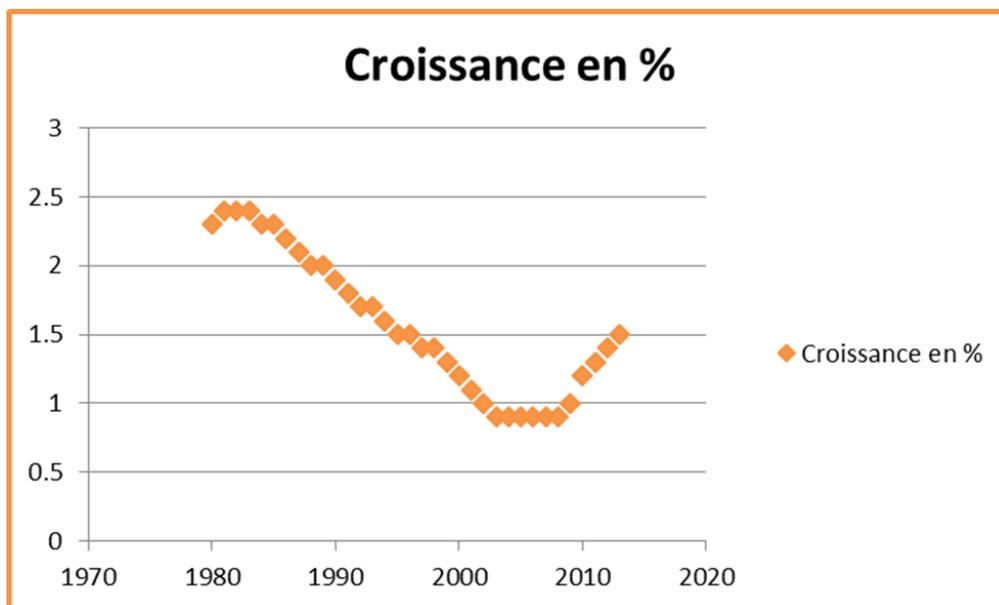


Figure 1. Représentation graphique du taux de croissance de la population annuelle du Maroc d'après le haut-commissariat au plan ([www.hcp.ma](http://www.hcp.ma); consulté en juin 2018)

D'un point de vue naturel, dans plusieurs régions côtières, le changement climatique entraîne une augmentation de l'amplitude des inondations, une accélération de l'érosion, une perte de terres humides et l'intrusion d'eau salée dans des aquifères d'eau douce (GIEC, 2007). Avec la faible pluviométrie combinée aux valeurs croissantes d'évapotranspiration potentielle, la fonte des glaciers et de la hausse du niveau de la mer, on assiste de plus en plus aux intrusions marines au niveau des nappes côtières ce qui est le cas dans pour notre région côtière (Oulaaross, 2009).

La Recharge Artificielle des Nappes (RAN), en anglais « Managed Aquifer Recharge » (MAR) est une opération qui consiste à faciliter la recharge d'une nappe en augmentant d'une façon intentionnelle et à l'aide de méthodes artificielles le volume d'eau entrant dans un aquifère pour rejoindre sa zone saturée.

Une nappe d'eau souterraine est une eau contenue dans les interstices ou les fissures d'une roche du sous-sol qu'on nomme aquifère. Seule l'eau libre, c'est-à-dire capable de circuler dans la roche fait partie de la nappe. Ce type de réservoir peut être exploité et peut approvisionner les réseaux de distribution d'eau potable, comme c'est le cas dans la majorité des pays du monde.

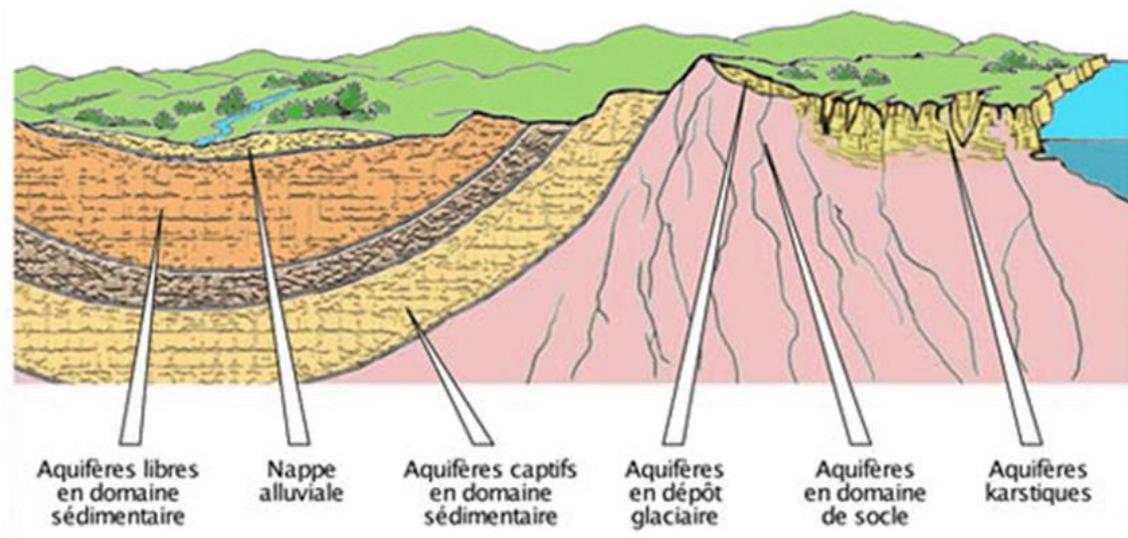
Ainsi, il existe un rapport entre la nappe et l'aquifère. Ce rapport est respectivement le même qu'entre le contenu et son contenant. Les nappes peuvent être contenues dans des aquifères de type poreux (sables, craie, graviers, grès, scories volcaniques, etc.), dans les types fissurés : l'eau est contenue et circule dans les failles, fissures ou diaclases de la roche (calcaires, granites, coulées volcaniques, etc.) ou alors, en milieu karstique, la roche peut présenter des conduits et grottes dans lesquels l'eau peut circuler beaucoup plus vite que dans les autres types d'aquifères.

Certaines formations géologiques sont suffisamment poreuses ou fissurées pour contenir de l'eau. On parle de formations aquifères (étymologiquement « roche qui contient de l'eau »).

Selon la nature géologique des terrains, on peut distinguer différents types d'aquifères :

- ✚ Les aquifères en domaine sédimentaire : Ces systèmes sont caractéristiques des bassins sédimentaires, il s'agit de roches sédimentaires poreuses ou fracturées (sables, grès, calcaires, craie) jadis déposées en vastes couches. Ces aquifères peuvent être libres ou captifs selon qu'ils sont ou non recouverts par une couche imperméable. Dans un aquifère libre, la surface supérieure de l'eau fluctue sans contrainte et la pluie efficace peut les alimenter par toute la surface. Dans un aquifère captif, une couche géologique imperméable confine l'eau. L'eau est alors sous pression et peut jaillir dans des forages dits artésiens lorsque la configuration s'y prête. L'alimentation ne peut se faire que par des zones d'affleurement limitées ou par des communications souterraines. Les nappes captives sont souvent profondes.

- ✚ Les nappes alluviales : Contenue dans les grands épandages de sables, graviers et galets des fleuves et des rivières, la nappe alluviale est le lieu privilégié des échanges avec les cours d'eau et les zones humides. Ce type de nappe peut être réalimenté par les crues et restituer à l'inverse de l'eau dans le cours d'eau en période de sécheresse. A titre d'exemples, ces nappes fournissent 60% des eaux souterraines captées en France, en particulier grâce à leur facilité d'accès et leur bonne productivité
  
- ✚ Les aquifères en domaine de socle : Ils correspondent aux roches cristallines ou cristallophylliennes (granites, gneiss et autres roches métamorphiques...), l'eau est contenue et circule dans les franges d'altération et les fissures et fractures de la roche. Il s'agit donc généralement de petits systèmes discontinus.
  
- ✚ Les aquifères karstiques : Les aquifères karstiques se rencontrent dans les formations calcaires. Les eaux en dissolvant le calcaire à la faveur des fissures préexistantes constituent des vides dans lesquels peuvent s'écouler les eaux. Ces vides peuvent atteindre de grandes dimensions (gouffres, cavernes). Dans ces conduits, les eaux peuvent cheminer rapidement et constituer des cours d'eau souterrains. Aux points de sortie, les sources présentent des débits souvent variables dans le temps (leur valeur varie parfois de 1 à 100 au cours de l'année).
  
- ✚ Les aquifères des dépôts glaciaires : Ces dépôts, à la structure sédimentologique complexe composés de matériaux de granulométrie très variée, sont à l'origine de petits aquifères très compartimentés localisés dans les anciens ombilics glaciaires et cirques morainiques. Ils sont par conséquent, en général peu développés en superficie mais peuvent, par contre, être épais, tout particulièrement derrière les verrous glaciaires ou dans d'anciens sillons sous ou périglaciaires.



**Figure 2. Différentes nappes d'eaux souterraines (tirée de l'agence de l'eau Rhône méditerranée Corse, 2012)**

Lorsque les quantités d'eau pompées sont excessives, le niveau des nappes phréatiques baisse et les puits s'assèchent. Le temps de restitution naturelle du niveau de la nappe est souvent très long. Les méthodes de réalimentation permettent de maintenir les nappes phréatiques à un niveau suffisant afin qu'elles puissent continuer à être exploitables dans des contextes d'utilisation intensive. Le principe consiste à créer des bassins de ré infiltration ou des tranchées sur un sol ayant une perméabilité suffisante. La méthode peut être mise en œuvre à partir d'une retenue d'eau créée par un barrage ou par pompage dans un cours d'eau et transfert dans des bassins de ré infiltration. Ce processus est aussi utilisé pour purifier l'eau de façon naturelle ce qui permet son utilisation pour l'alimentation en eau potable.

### 1.5.1 Intérêt de la recharge artificielle des nappes d'eaux souterraines

C'est une application émergente de développement durable qui a montré jusqu'à présent des résultats encourageants sur les plans social, économique et politique. Elle est considérée comme une solution à plusieurs problèmes d'alimentation et de gestion des ressources en eau surtout dans les zones arides et semi arides. De plus, elle a été identifiée comme un facteur clé dans la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) surtout dans les zones arides.

D'ailleurs, dans le cadre de recherche d'alternatives pour optimiser l'exploitation des ressources en eau disponibles, la RAN a été considérée comme une technique qui rend possible l'utilisation et l'exploitation des ressources en eau qui sont actuellement non exploitées comme les eaux pluviales, les eaux des crues de rivières et de sources et les eaux usées traitées. Elle fonctionne par principe de stockage temporaire de quantités d'eau non utilisées tout en modifiant et améliorant leur qualité chimique au cours du temps.

Très vite, la RAN s'est avérée être un outil fiable économiquement, s'inscrivant dans la gestion active des ressources en eau (Detay, 1997 ; Collin, 2004) et devenant ainsi l'une des solutions techniques essentielles dans toutes les zones arides et semi-arides en plus des régions à forte demande en eau. Actuellement, la RAN est utilisée d'avantage pour des stockages de long terme et de court terme où on aperçoit plusieurs avantages par rapport au stockage en surface et en réutilisation des eaux usées traitées (Bouwer, 2002).

Les sites de RAN peuvent être groupés selon leurs conceptions, selon l'origine de l'eau utilisée pour la recharge (y inclut l'eau provenant des stations de dessalement ou des stations d'épuration) ou bien selon l'utilisation de l'eau récupérée de la nappe. Actuellement, un grand nombre de pays possède des sites de RAN, surtout dans les aquifères alluviaux et poreux, tenant à servir différents objectifs (Gale and Dillon, 2005).

### 1.5.2 Intérêts économiques de la recharge artificielle des nappes d'eaux souterraines

Dans la plupart des cas, la RAN peut être un outil économiquement fiable pour appliquer une GIRE, surtout dans les zones où la pression sur les ressources en eau est très grande (Collin, 2004 ; Detay, 1997). Par ailleurs, entre tous les facteurs clés, Pyne (1995) considère que l'intérêt économique de la RAN est le facteur principal qui a propulsé l'expansion rapide de cette technologie. En d'autres termes, les facteurs suivants doivent être considérés lors de l'implantation d'un projet de RAN :

- L'existence d'un besoin socio-économique ;
- L'existence d'un aquifère capable de remplir les fonctions de stockage ou de filtration de l'eau de recharge ;

- La disponibilité d'une ressource d'eau adéquate et de capacité suffisante pour alimenter le projet de RAN sur toute sa durée de vie estimée de 20 ans ;
- Les faisabilités techniques et économiques du projet de RAN ainsi qu'une volonté politique pour soutenir et pousser l'économie de la région (Collin, 2004).

Se basant sur le contexte régional, des analyses de faisabilité économiques portant sur l'investissement et sur les profits estimés peuvent être adoptés pour démontrer que la RAN peut être une alternative efficace ou une solution complémentaire aux projets de barrages, de réservoirs, des techniques de dessalement ou même des transferts de l'eau entre régions ou pays. Ces analyses prennent en considération tous les facteurs évoqués. De plus, elles doivent consulter d'autres points comme les avis des décideurs, la législation, le développement durable de l'opération de recharge, la gestion du projet, les impacts environnementaux, etc.

D'autres avantages économiques se résument ainsi :

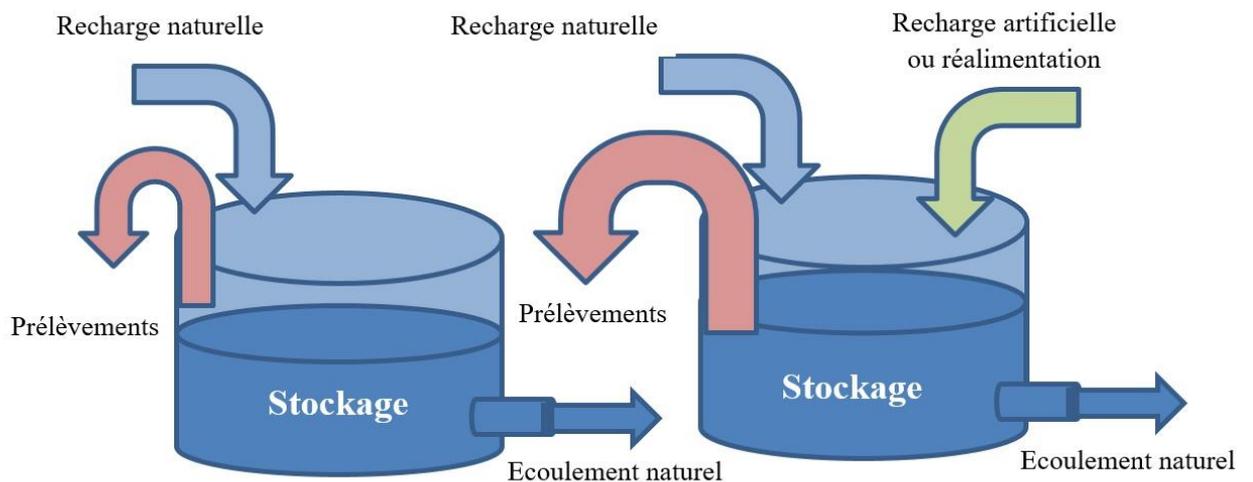
- Technique rapide à implanter et plus souple à utiliser comparée aux aménagements de surface qui nécessitent des intervalles de temps et des suivis plus longs (acquisition de terrain, construction, etc),
- Approvisionnement en eau à caractère stratégique ou d'urgence (Water banking) suite à une force majeure comme les séismes, les crues et inondations, les accidents de contamination, les dégâts dus aux actions de sabotage, de guerre, de terrorisme, surtout dans les pays arides.

### 1.5.3 Intérêts techniques et sociaux

La RAN est une technologie qui, progressivement, permet de stocker des volumes considérables d'eau pour une utilisation ultérieure plus ciblée. L'eau de recharge constitue un excès de caractère saisonnier ou intermittent. Son stockage dans l'aquifère lui génère de meilleures qualités chimiques la plupart du temps. D'autres objectifs de la RAN peuvent être signalés :

- L'autoépuration de l'eau en la faisant passer au sein de l'aquifère. Les techniques les plus utilisées sont les bassins d'infiltration et les dérivation des rivières ;

- L'augmentation de la capacité d'extraction d'un aquifère ;
- Réduire les impacts sociaux et écologiques en minimisant l'action anthropique et en intégrant la RAN dans les « technologies vertes » (Dillon, 2009) ;
- La formation d'une barrière hydraulique qui empêche généralement une eau polluée (Jekel et al., 2005), en particulier une intrusion saline dans les zones côtières (par exemple lors de l'exploitation d'un aquifère côtier) ;
- Réduire l'impact des inondations et des crues tout en stockant des volumes d'eau durant les crues ;
- Rétablir les niveaux initiaux des nappes partiellement en déclin continu à cause de la surexploitation. Ceci aide à lutter contre les phénomènes de subsidence (Mexico, Shanghai...) ou pour remédier contre des pollutions accidentelles en diluant l'eau native. Enfin, cette restitution des niveaux initiaux de l'aquifère permet sa surexploitation temporaire en augmentant sa capacité d'extraction.



**Figure 3. Schémas de l'illustration du rôle de la recharge artificielle dans l'augmentation de la capacité d'extraction d'un aquifère.**

#### 1.5.4 Les différents dispositifs de la recharge artificielle des nappes

Le système de mise en œuvre de la recharge se présente sous plusieurs formes. Afin de le définir, on doit étudier les paramètres propres au site tels que la topographie, la géologie, l'hydrogéologie, les caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques des eaux de recharge et leurs volumes disponibles en plus de données techniques, économiques sociales et politiques.

Les différents dispositifs de la RAN peuvent être divisés en deux grandes parties : systèmes de recharge par injection et systèmes de recharge à partir de la surface. Dans tous les cas, on considère l'acronyme RAN comme technique représentative de toute activité de recharge qui utilise un des dispositifs cités après.

Dans la majorité des cas ce sont des forages d'injection et des bassins d'infiltration qui sont utilisés pour la recharge des nappes.

##### **i. Recharge par puits d'injection**

Ces dispositifs sont souvent utilisés pour recharger des aquifères profonds ou dans le cas d'insuffisance d'espaces en surface. La récupération des volumes injectés se fait à partir du même puits ou à partir d'un autre puits éloigné pour permettre l'autoépuration. Des considérations de densités et des paramètres hydrauliques doivent être prises en compte lors d'une étude d'un dispositif de recharge par puits (Missimer et al., 2002).

##### **ii. Recharge depuis la surface**

Globalement, les avantages et les inconvénients des bassins sont à l'inverse de ceux des forages d'injection. En effet, la superficie du dispositif est beaucoup plus importante, et donc le coût d'acquisition plus élevé. Cependant le coût d'entretien des bassins est peu onéreux. D'ailleurs, les prétraitements les plus rencontrés pour de tels dispositifs ou même pour les dérivations de rivières sont normalement le grattage superficiel du fond du bassin. Ceci minimise les traitements ultérieurs à effectuer si on désire avoir de l'eau potable. A Berlin, la désinfection pour l'eau potable peut être évitée grâce à une élimination quasi-totale des pathogènes par un séjour de l'eau dans le sous-sol d'une durée supérieure à 6 mois (Schmidt, 2003). Les matières organiques et les métaux lourds peuvent être adsorbés

dans la matrice de l'aquifère. Bien que cela n'élimine pas ces substances complètement, les déversements accidentels d'hydrocarbures sont retardés et leurs concentrations sont réduites. Le carbone organique dissous et les substances organiques en traces sont dégradés biologiquement dans le sous-sol dans une certaine limite. Des investigations récentes ont montré que le potentiel redox de l'aquifère est décisif pour la capacité d'élimination (Stuyfzand, 1998 ; Massmann, 2007).

L'épuration par le sol ou géo purification, est efficace, ce qui entraîne une économie de traitement de l'eau à injecter. La principale limite technique est que le niveau de l'aquifère étudié doit être en relation directe avec la surface : l'alimentation des aquifères captifs ou profonds par cette méthode est donc exclue.

On distingue les types suivants de dispositifs de recharge depuis la surface :

- ✚ Dérivations de rivière et inondations contrôlées pour augmenter la recharge (River Bank filtration) : extraction de l'eau souterraine depuis un puits ou un caisson près d'une rivière pour augmenter l'infiltration depuis la surface de manière à avoir une eau de meilleure qualité (Tufenkji et al., 2002). Cette technique a une longue histoire de génération d'eau potable en Europe (Kuehn et al., 2000) ;
- ✚ Infiltration dans les cordons dunaires utilisant le sable comme facteur épurateur (Dune filtration): infiltration de l'eau depuis des bassins construits dans les dunes et extraction à partir de puits ou de bassins distants et à des niveaux plus bas permettant une amélioration de la qualité de l'eau et assurent un équilibre entre l'offre et la demande. Cette technique est largement utilisée aux Pays-Bas (NWP, 2007) et en Allemagne ;
- ✚ Bassins d'infiltration (Infiltration ponds) : ce sont des bassins construits généralement au bord des rivières dont l'eau est déviée vers ces bassins dans lesquels elle s'infiltré dans des milieux non argileux pour rejoindre la nappe libre sous-jacente. C'est la technique de recharge artificielle la plus simple et la plus appliquée dans le monde (Asano, 2007) ;

- ✚ Infiltration favorisée par aménagements de surface (Percolation tanks) : technique fréquemment utilisée en Inde, pour mettre en œuvre dans les vallées des aménagements de rétention des eaux de pluie s'infiltrant après dans les nappes libres alimentant les villages ;
- ✚ Collecte des eaux de pluie (Rainwater harvesting) : collecte des eaux de ruissellement sur les toits d'une pluie et acheminement dans une tranchée remplie de gravillons et de sable alimentant l'eau souterraine qui sera pompée ultérieurement ;
- ✚ Epuration souterraine (Soil aquifer treatment - SAT) : les eaux usées traitées sont infiltrées dans le sol à partir de bassins d'infiltration pour faciliter l'élimination des nutriments et des pathogènes par épuration souterraine ou géo purification. Cette eau est par la suite pompée et utilisée après un certain temps de résidence ;
- ✚ Barrages sédimentaires (Sand dams), construits dans des vallées et des terrains de faible perméabilité : leur rôle est de retenir les sédiments au cours de chaque crue pour former ainsi une sorte de barrage qui retient un petit aquifère poreux capté par puits durant les saisons sèches ;
- ✚ Barrages souterrains (Underground dams) : lorsque la géologie le permet, un barrage souterrain est conçu pour améliorer la rétention des eaux de recharge ;
- ✚ Déclencheurs de recharge (Recharge releases) : dans les barrages conçus pour lutter contre les inondations, des vannes de réduction de pression peuvent être utilisées de manière à alimenter lentement la nappe sous-jacente par infiltration.

## **Partie I. Etude quantitative des potentiels exploitables :**

### **Ressources en eau & réservoirs**

## 2 Chapitre 2. Présentation du cadre d'étude, analyse

### géomorphologique et estimation du potentiel en eau de la région.

#### 2.1 Présentation du cadre d'étude

La région du Sahel – Doukkala est comprise, entre la latitude, 32° 15' et 33° 15', et s'étend sur une superficie de 7 700 km<sup>2</sup> soit environ 16% de la superficie du bassin versant de l'oued Oum Er R'Bia. Avec une population estimée à 2 033 000 habitants en 2008, contre 2 020 000 habitants l'année d'avant (2007) ; soit un taux d'accroissement de 0,64% selon les projections du C.E.R.E.D. L'accroissement de la population urbaine quant à elle s'est effectuée à un rythme rapide, comparativement à celle qui est rurale, présentant des taux respectifs de 1,2% et 0,31%. La région est à prédominance rurale, car la population urbaine présentait alors, 37,1% de l'ensemble de la population.

Le Sahel – Doukkal est limité au Nord et à l'Est par l'oued Oum Er R'Bia, à l'Ouest et au Nord-Ouest par l'océan Atlantique, au Sud par la base des collines des Mouissate, et au Sud-Est par le massif des Rehamna. Il est centré à proximité de Sidi – Bennour, situé à 125 km à vol d'oiseau au Sud-Ouest de Casablanca.

Les régimes hydrologiques et le fonctionnement des hydrosystèmes dépendent principalement de la saison des pluies dont la pluviosité est régie par un climat de type semi-aride.

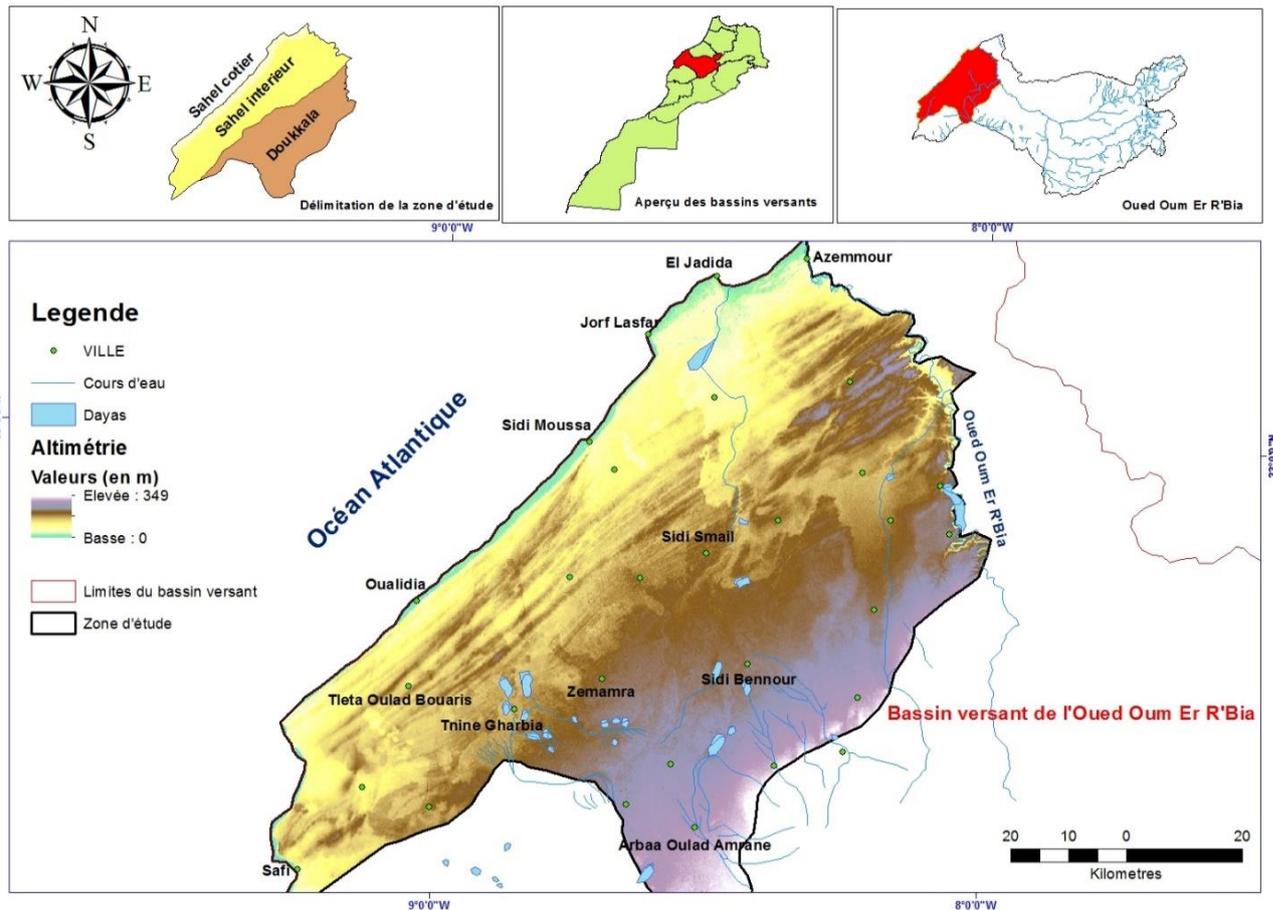


Figure 4. Présentation de la zone d'étude

## 2.1.1 Caractéristiques physiques et climatiques de la région

### 2.1.1.1 Relief

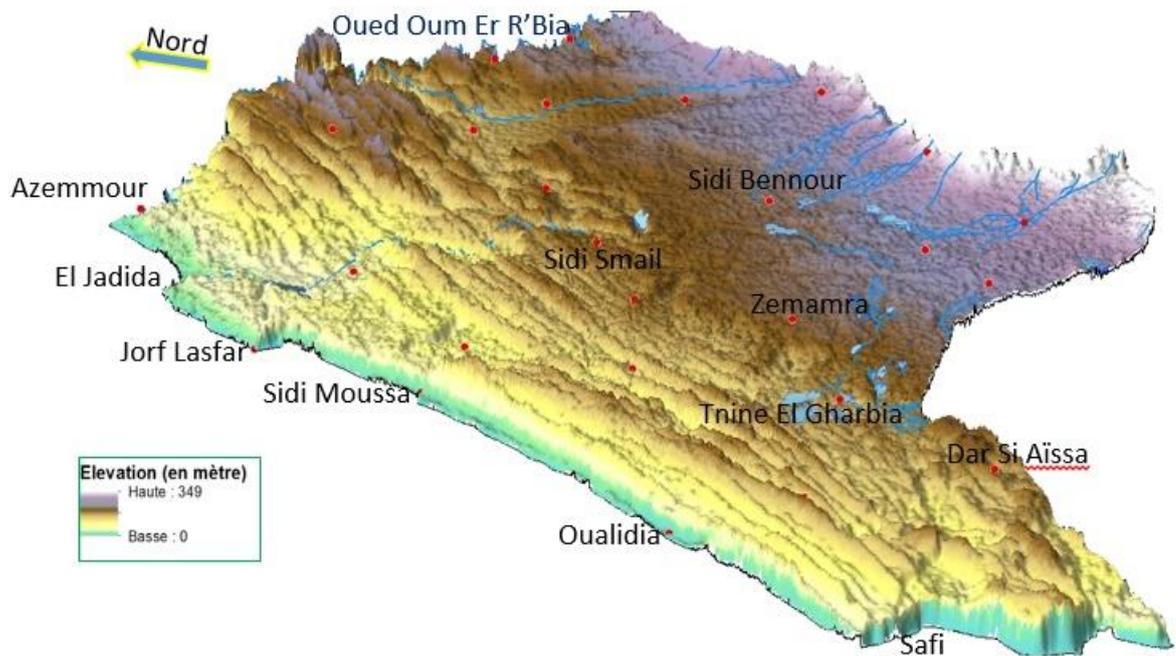
D'un point de vue géomorphologique, trois (3) éléments morphologiques sont à distinguer dans la région. Il s'agit notamment :

- des plateaux ;
- des vallées actuelles ou anciennes et ;
- et des reliefs dunaires.

En effet, les plateaux représentent les restes de la surface des comblements par les limons inférieurs argileux , sous une mince épaisseur (1 à 2 m) de limons récents, avec toujours ou presque , les argiles

rouges fortement encroûtées au sommet. C'est une topographie peu régulière dans laquelle, les dépressions se remplissent d'eau en année pluvieuse.

Sur un déplacement de l'intérieur (Est) vers l'extérieur (Océan Atlantique), en s'approchant du Sahel, et de l'Oued Oum Er R'Bia (au Nord), on aperçoit alors les premières crêtes dunaires qui émergent de la couverture limoneuse. Avec pour orientation, Sud-est, nord-ouest, imposant leurs tracés aux vallées.



*Figure 5. Aperçu en 3D de la région du Sahel Doukkala*

Plus au Sud ; la déflation éolienne s'exerçant par ailleurs sur les limons supérieurs, conduit à l'édification d'ensembles à topographie fortement tourmentée (Zemamra – Youssoufia).

En ce qui concerne les vallées, selon qu'elles soient anciennes ou récentes, elles décrivent le réseau hydrographique (Figure 5) par lequel, s'écoulent des eaux dits « oueds » de façon pérenne (Oued Oum Er R'Bia) et temporaire.

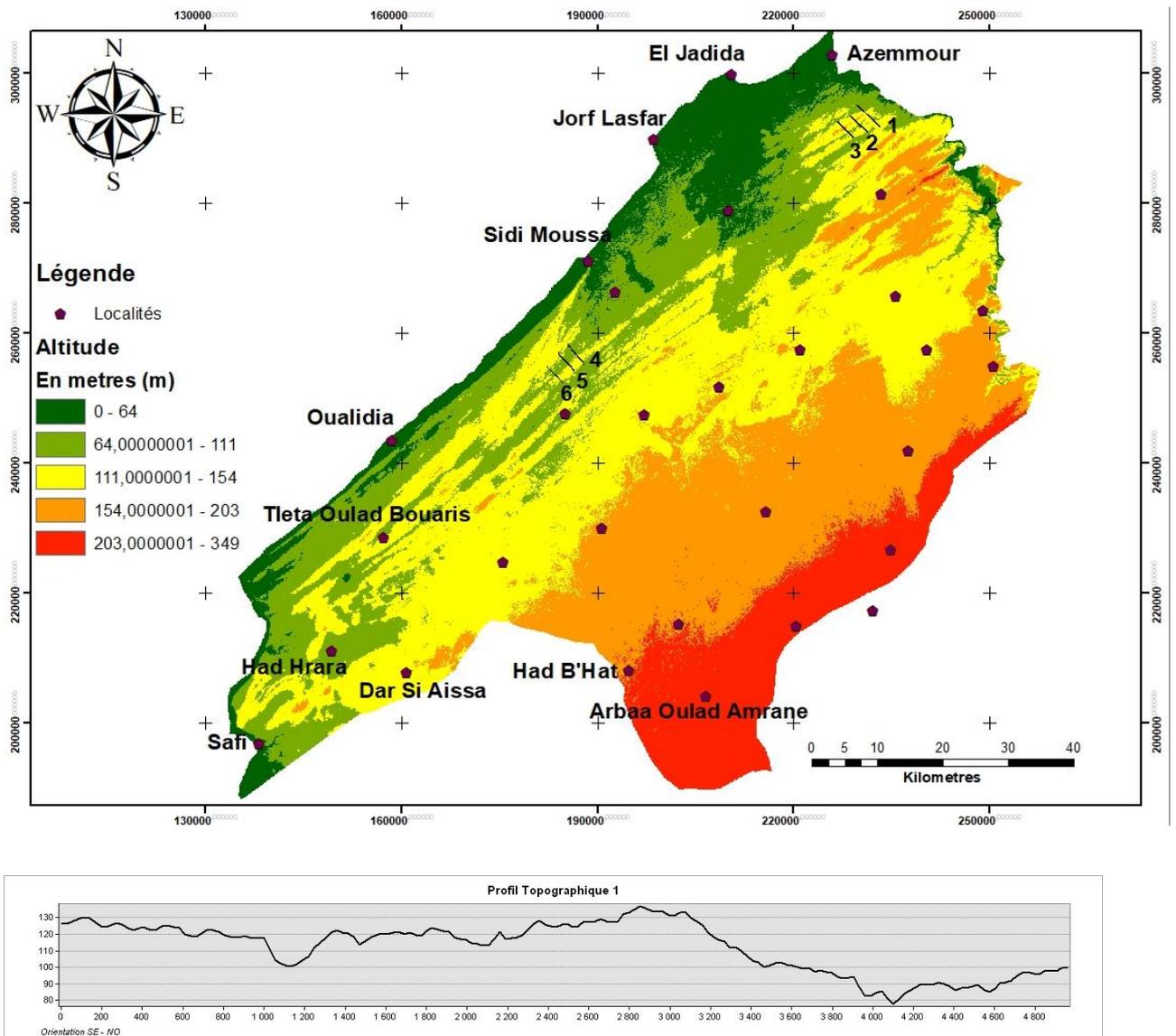
Le dessin des vallées est toutefois complexe, car à côté des thalwegs vifs à pente suffisante , on trouve de nombreux thalwegs morts constituant des suites de dépressions plus ou moins fermées.

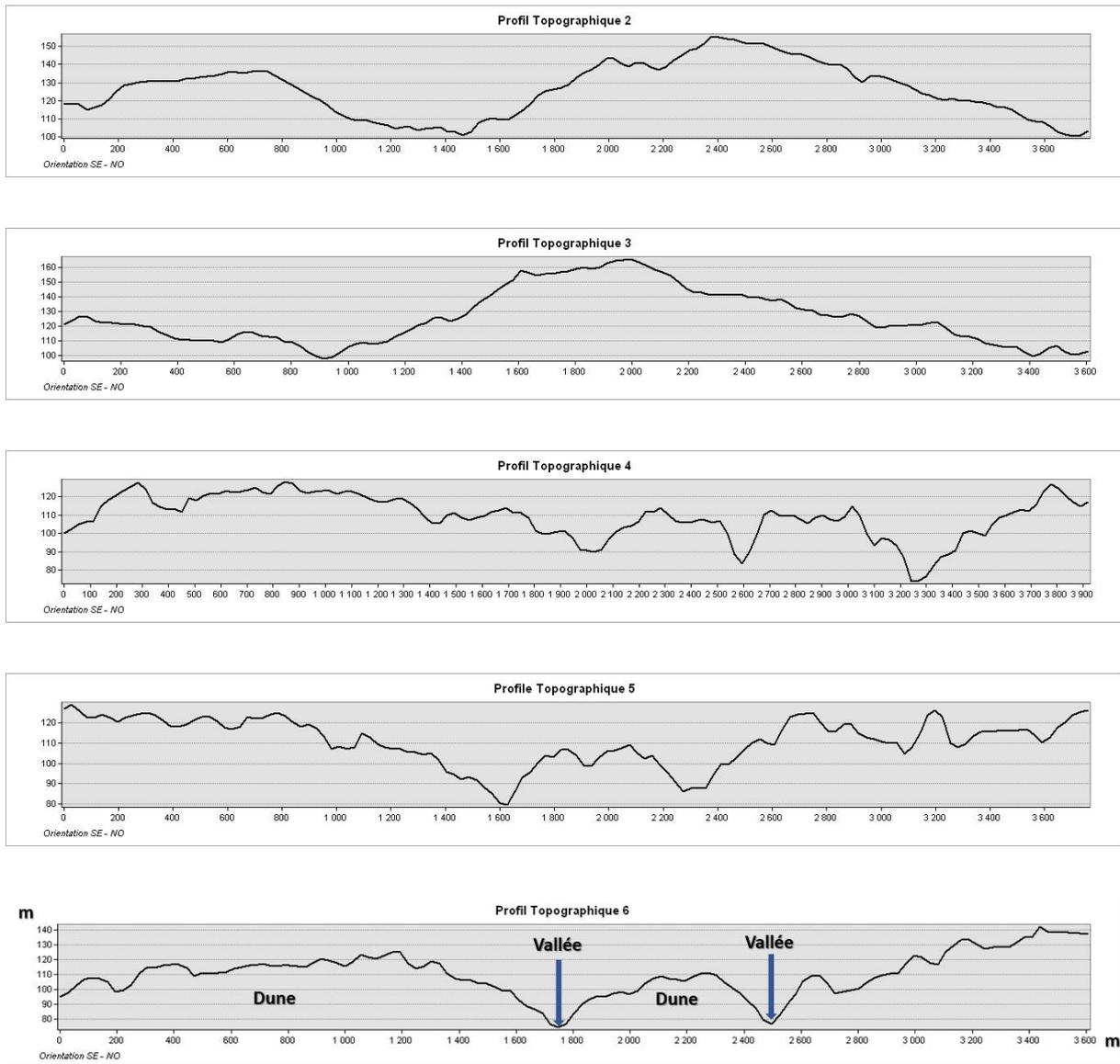
Un seul oued possède cependant un exutoire, tandis que les autres se perdent dans la plaine, constituant des bassins endoréiques.

Le Sahel, loin d'être uniforme, comporte des plates formes d'El Jadida large de 50 Km où l'on trouve des rides dunaires entièrement dégagées des limons.

D'une certaine manière, cette morphologie dunaire est régulière, en ce sens où les crêtes sont disposées succinctement sur de grandes distances avec la même orientation (Sud-Sud-Ouest, Nord-Nord-Est). Le tout, séparé par des dépressions inter dunaires, remplies de limons très sableux.

Cet alignement se poursuit plus au Sud, sur la portion centrale, parallèle à la côte sur une largeur d'environ 20 Km.





**Figure 6. Aperçu morphologique de la région du Sahel Doukkala à partir des profils topographiques ; orientations SE – NO**

### 2.1.1.2 Les karsts

La structure géomorphologique résultant de l'érosion hydrochimique et hydraulique de toutes les roches solubles, principalement de roches carbonatées dont essentiellement calcaire (Salomon, 2012 ; Gilli, 2006), est fortement présente dans la zone.

Les karsts présentent pour la plupart un relief tourmenté, un réseau hydrographique essentiellement souterrain (rivières souterraines) et un sous-sol creusé de nombreuses cavités : reliefs uniformes, pertes et résurgences de cours d'eaux, grottes et gouffres. Et, à noter que selon les régions du monde, les karsts portent des noms spécifiques.

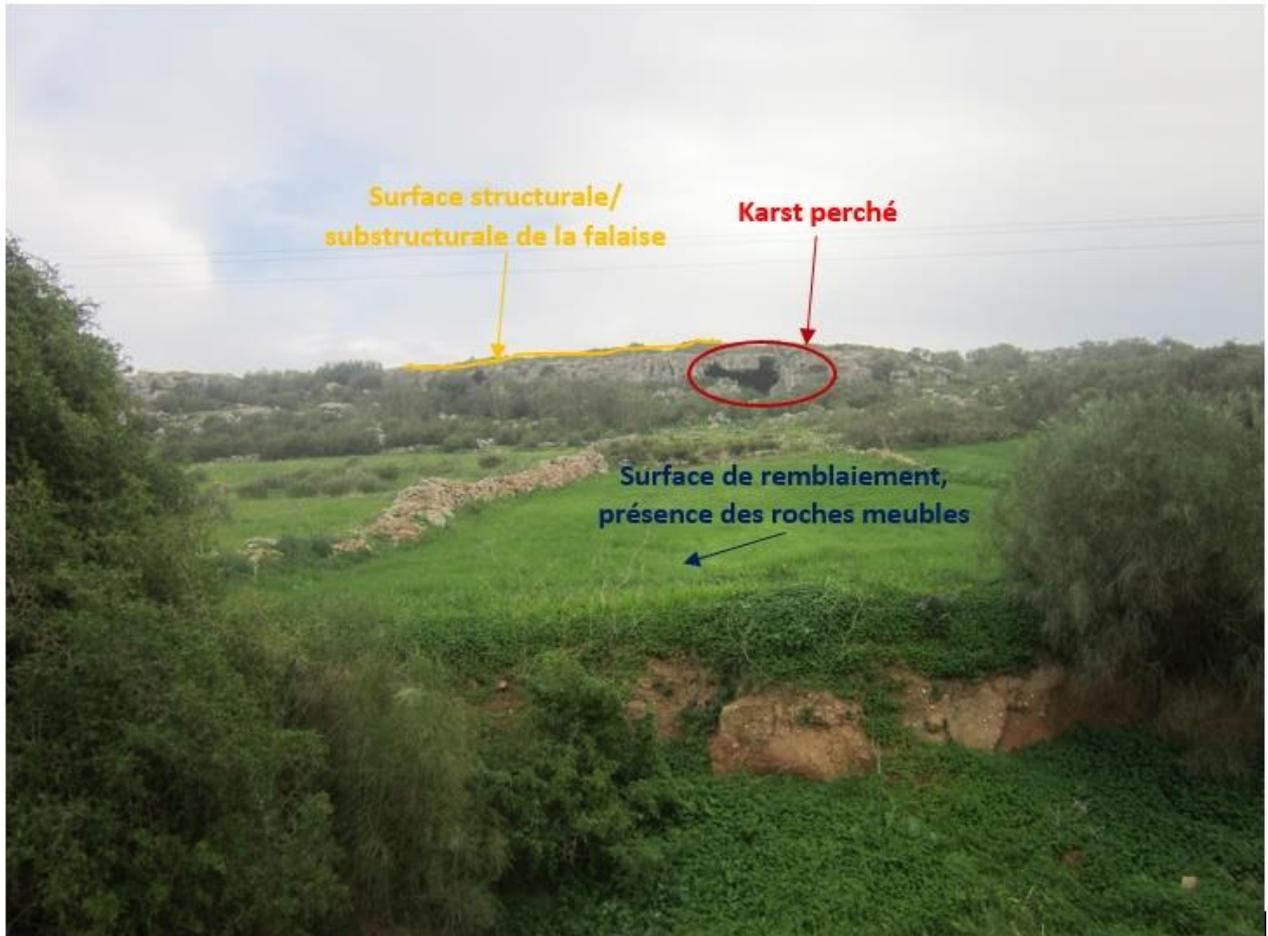
Nous n'allons pas ici, faire une étude approfondie des différents karsts présents dans le Sahel – Doukkala, mais simplement les présenter pour tenter de comprendre le système hydrographique.

En effet, les phénomènes karstiques jouent un très grand rôle dans l'hydrologie ainsi que l'hydrogéologie de la région. Ils apparaissent dans la morphologie sur les bordures sahéliennes des Doukkala, à l'intérieur des plaines où le manteau limoneux forme un matelas épais au-dessus des formations calcaires et gypseuses.

Les études réalisées par Dresch (1952), Gigout (1952, 1956, 1965) nous ont permis de noter que certains plateaux ne présentent pas de formes karstiques, ce malgré la grande superficie où affleurent les calcaires. C'est le cas des plateaux créacés de la bordure des Rehamna. Ils renchérisent en précisant les niveaux susceptibles de subir une karstification intense ; Il s'agit :

- du Jurassique supérieur, calcaire et gypseux très épais ;
- des calcaires hauteriviens de Dridates, plus ou moins dolomitiques ;
- des marnes à gypse du Crétacé inférieur ou moyen ;
- des calcaires du cénomaniens ;
- et des calcaires détritiques Plio-quadernaires.

Toutes ces classifications viennent à montrer qu'ils présentent des importances distinctes en raison des aptitudes variées à la karstification. Le plus important étant le Jurassique supérieur qui joue le rôle principal dans toute la partie sud-ouest de la région. Quant à la région Nord, les phénomènes spectaculaires proviennent surtout des marnes et des gypses du Crétacé inférieur ou moyen pendant que la structure lithologique du Plio-quadernaire, tend à limiter le développement des ouvertures de grandes tailles.



*Figure 7. Photo illustrative de la morphologie de la région de Oualidia, prise le 10 décembre 2015*

Au centre du bassin (zone du Sahel), les Lapiaz abondent sur les crêtes dunaires dénudées par les érosions. On trouve dans le fond des dépressions, une partie de limons qui s'y rassemblent.

Les grottes, les gouffres et les dolines sont aussi fortement représentés. Caractérisés par des ouvertures sèches et anciennes, ils se trouvent parfois en essaim, ayant toutefois une relation étroite avec la tectonique.

## 2.1.2 Régime climatique

### 2.1.2.1 Les précipitations

La région du Sahel-Doukkala se situe à la latitude moyenne du Maroc (32-33° N), à proximité immédiate de l'Océan. Son relief est à peu près négligeable en ce qui concerne l'influence possible sur la climatologie. On note cependant, selon les travaux antécédents, réalisés par (Oulaaros, 2009) ; que les

températures sont modérées dans les zones proches de l'Océan, tandis qu'elles sont plus contrastées à l'intérieur.

Les pluies tombent régulièrement en automne et en hiver, faisant suite à une longue saison sèche du printemps en été. Toutefois, les sécheresses catastrophiques sont rares, mais le total pluviométrique ne correspond pas partout aux besoins minima des cultures (300 mm/an). Il existe néanmoins des précipitations occultes (brumes, brouillards) qui sont d'un secours sensible à la végétation jusqu'à une grande distance de la côte en atténuant les effets de l'aridité.

D'après la classification des climats du Maroc de Debrach (1953), uniquement basée sur les températures, le Sahel aurait un climat littoral modéré, tandis que la plaine des Doukkala se placerait dans le climat semi-continental chaud, caractéristique du Maroc au Nord de l'Atlas.

La saison sèche s'étend de juin à septembre, tandis que la saison humide couvre en moyenne la période d'octobre à mars. Les pluies génératrices des grosses crues proviennent de la succession à intervalles réduits de plusieurs perturbations d'Ouest.

Les pluies sont essentielles pour la compréhension de nombreux phénomènes de la région, en ce sens où la pluie représente le signal d'entrée des systèmes hydrologiques (Oulaaros, 2009) ; les observations pluviométriques se montrent toutefois assez peu nombreuses. Cependant, la pluviométrie de la région a fait l'objet des études statistiques montrant qu'un ajustement des pluviométries annuelles à la loi de Gauss était très satisfaisant pour les stations choisies en raison de leur longue série d'observations : soient 30 années agricoles (1933-1963).

On peut ajouter à ces études, les travaux réalisés par Oulaaros (2009) présentant les précipitations moyennes mensuelles calculées à partir des données mensuelles moyennes (de 1965 à 2006) sur 4 stations, montrant des automnes et hivers pluvieux particulièrement de Novembre à Mars (30 et 100 mm en moyenne) et des étés secs.

- Khmis Zemamra de 1971 à 2006 ( $X = 187,400$  et  $Y = 230,000$ ) ;
- El-Jadida de 1977 à 1995 ( $X = 210,570$  et  $Y = 300,000$ ) ;
- Ouled Ghanem de 1994 à 2006 ( $X = 170,000$  et  $Y = 258,500$ ) ;

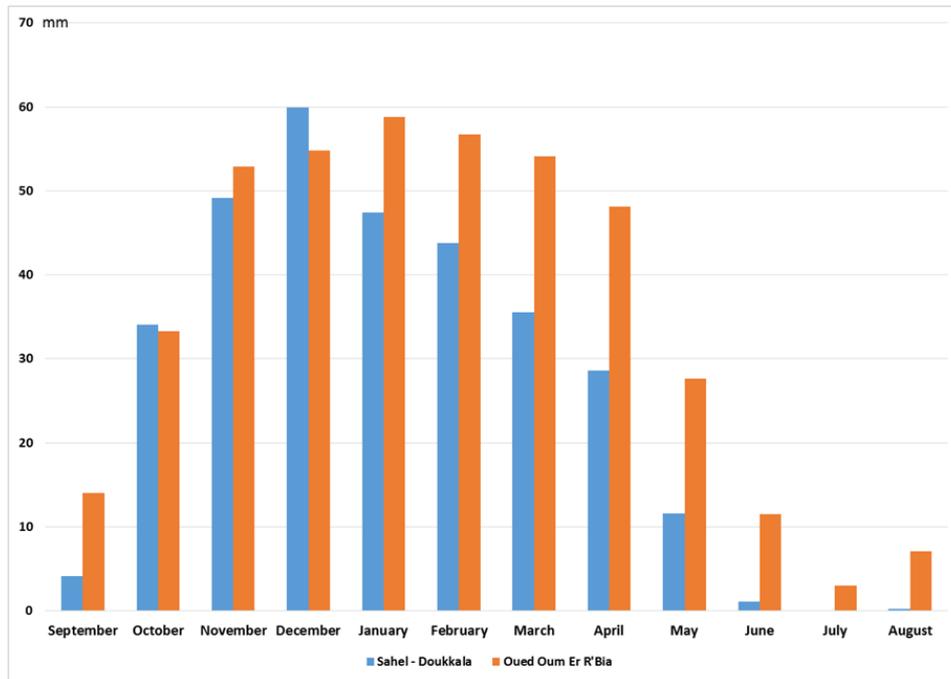
- Khmis Metouh de 1965 à 2003.

La comparaison avec l'ensemble du bassin versant nous a permis d'établir l'histogramme (Figure 8). On y voit qu'elle obéit à la même loi, sauf que le Sahel - Doukkala présente des valeurs inférieures de 50% en moyenne.

Ces valeurs sont conformes à la démarche proposée par Douguedroit, et de Saintignon (1970, 1974, 1981). L'effet d'ascendance de l'air entraîné par les mouvements dynamiques de l'atmosphère à l'approche des reliefs provoque une détente qui s'accompagne d'un refroidissement de l'ordre de 1°C tous les 100 mètres dans un air non saturé. L'humidité relative s'accroît en même temps jusqu'à atteindre le point de saturation nécessaire pour provoquer une condensation et l'apparition de nuage. La charge d'eau de ce dernier croît jusqu'au seuil variable, d'apparition de la pluie.

Il est donc prévisible que pour les précipitations, les reliefs entraînent des variations spatiales telles que la prise en compte du facteur altitudinal ne puisse pas aussi être privilégié que dans le cas des températures.

Ainsi, le Sahel Doukkala de par sa position (aval) au niveau du bassin versant, connaît des valeurs de pluviométries inférieures à cette dernière.



**Figure 8. Représentation graphique et comparative entre la pluviométrie moyenne mensuelle interannuelle de la région du Sahel - Doukkala et de l'ensemble du bassin versant de l'Oued Oum Er R'bia sur 39 ans**

### 2.1.2.2 Températures

La température de l'air est celle dont les observations sont les plus nombreuses. Trois postes ont été retenus (El Jadida, Safi et Sidi-Bennour) sur une période de 20 à 30 ans. Les moyennes annuelles obtenues se tiennent entre 17 et 19°C (ORMVAD, 2011), avec une augmentation du Nord au Sud et de l'Ouest en Est.

D'autre part, on observe une amplitude annuelle allant de 9 à 14°C au niveau des stations suivantes :

- El Jadida : 9.6 °C ;
- Safi : 10 °C ;
- Sidi Bennour : 14.1 °C.

Ces valeurs montrent que les températures à proximités du littoral sont modérées et se contrastent à mesure que l'on s'éloigne.

Les valeurs des amplitudes mettent en relief des différences notables d'amplitude moyenne journalière entre les stations. Au cours de l'année, cette variation d'amplitude est faible pour les postes voisins de l'Océan, avec un minimum en été.

Par ailleurs, les relevés de température maximum absolue sont :

- El-Jadida : 40°C ;
- Safi : 50°C ;
- Sidi-Bennour : 51°C.

Il s'agit ici, des valeurs qui sont comparables à celles des stations présahariennes du Maroc lorsque souffle le « Chergui » ; vent du secteur Est, originaire des dépressions sahariennes et sont toutefois moins fréquents que dans le sud (10 à 15 jours par an).

S'agissant des températures minimales, on observe quelques gelées exceptionnelles à l'intérieur, mais jamais en bordure océanique.

Si les températures sont comparables à celles des zones arides du Maroc, le facteur humidité de l'air rend toute comparaison impossible. En effet, on trouve des paliers maximums voisins entre 22 heures et 8 heures du matin en été contre un intervalle de 18 à 10 heures l'hiver avec des décroissances rapides de part et d'autre à partir de 12 heures et, ce jusqu'à 16 heures.

Les vents sont surtout du secteur NO à SO, de mai à septembre, ce sont des vents de N et NE et surtout des brises marines d'O. L'existence de vents plus violents en été, contribue à augmenter le contraste entre l'évaporation en saison chaude et en saison froide.

### 2.1.3 Le réseau hydrographique

Le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant est sous la dépendance du climat, de la lithologie, du relief et de l'occupation du sol. L'organisation du réseau hydrographique et la pente des talwegs, fruits de l'évolution géomorphologique, sont liés au relief, mais aussi par certains aspects directement liés à la lithologie. Leur prise en compte est indispensable à une bonne compréhension du déclenchement et de la propagation des écoulements de crue.

La topographie accidentée du Sahel –Doukkala ne favorise pas la formation des grands bassins. Les oueds issus des Rehamna, en amont ne présentent pas de débits d'étiages avec des écoulements qui ne s'effectuent que sous forme de crues brèves et violentes. Ils se distinguent toutefois entre eux par la

taille de leurs sous bassins, la pente moyenne et la nature des terrains drainés. On observe toutefois dans les travaux réalisés par Choubert (1953), Ferre (1966), Mougin (1955), la mise en évidence des seuils pluviométriques à partir desquels on observe un écoulement.

- Oued M'Tal ( $S= 37 \text{ Km}^2$ ), 4 à 5 mm d'eau en 12 heures ;
- Oued Kaf ( $S=148 \text{ Km}^2$ ), 7 à 10 mm en 12 heures ;
- Oued Faregh ( $S= 637 \text{ Km}^2$ ), 12 à 15 mm en 12 heures.

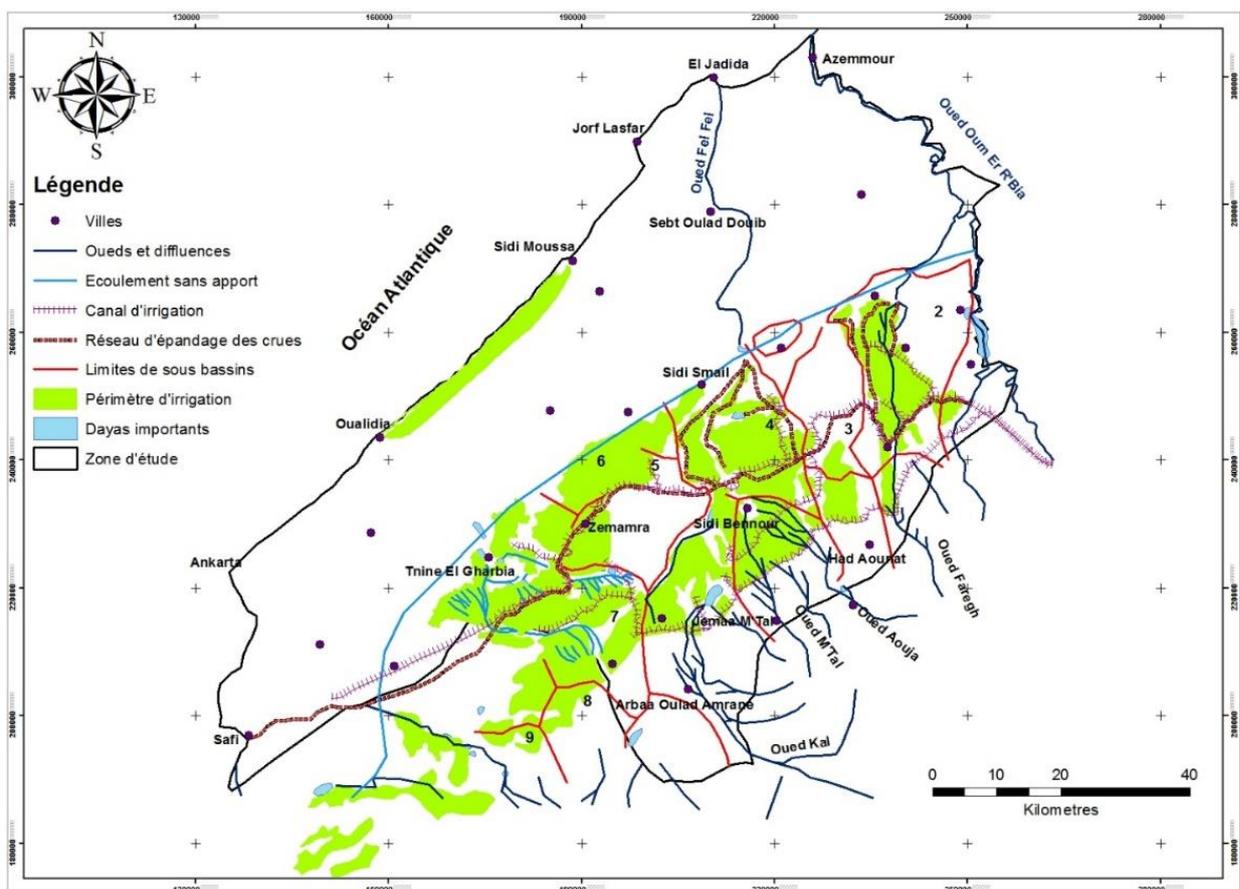


Figure 9. Carte représentative du réseau hydrographique et du découpage en sous bassins versants de la région du Sahel Doukkala

## 2.2 Aménagement hydro-agricole

L'oued Oum Er Rbia dérivées d'abord par le barrage d'Imfout, puis à partir de 1980 par celui d'Al Massira sert à des fins d'irrigation depuis les années 1950 au niveau de plateau des Doukkala.

Les aménagements se sont réalisés en deux étapes (figure 10)

- Périmètre Bas-service (61 000 ha au total sur la partie Nord et Ouest des Doukkala) alimenté par un canal de 111 km, prolongé jusqu'à Safi pour l'AEPI de cette ville.
- Périmètre Haut-service développé à partir de 1993 sur la partie amont des Doukkala et la plaine des Abda, superficie irriguée prévue 64 000 ha horizon 2006 (550 Mm<sup>3</sup> bruts 14 soit 8 600 m<sup>3</sup>/ha).

La mise en service progressive du périmètre Haut-Service à partir de 1993 n'a engendré qu'une augmentation légère des dotations globales jusqu'en 1999/2000 où un maximum de 616 Mm<sup>3</sup>/an a été enregistré. Les 3 années suivantes ont ensuite montré une chute spectaculaire des apports (moins de 200 Mm<sup>3</sup> en 2001/2002) due au fort déficit de remplissage des barrages pour ces années de sécheresse.

Par ailleurs, la superficie totale irriguée dans le Sahel côtier serait de 3800 ha, à partir d'environ 850 puits (étude ABHOER). L'étude évoque ensuite un chiffre de 150 Mm<sup>3</sup>/an (source ORMVAD 2004) pour les prélèvements d'irrigation par pompes privés dans une « zone des périmètres », non définie.

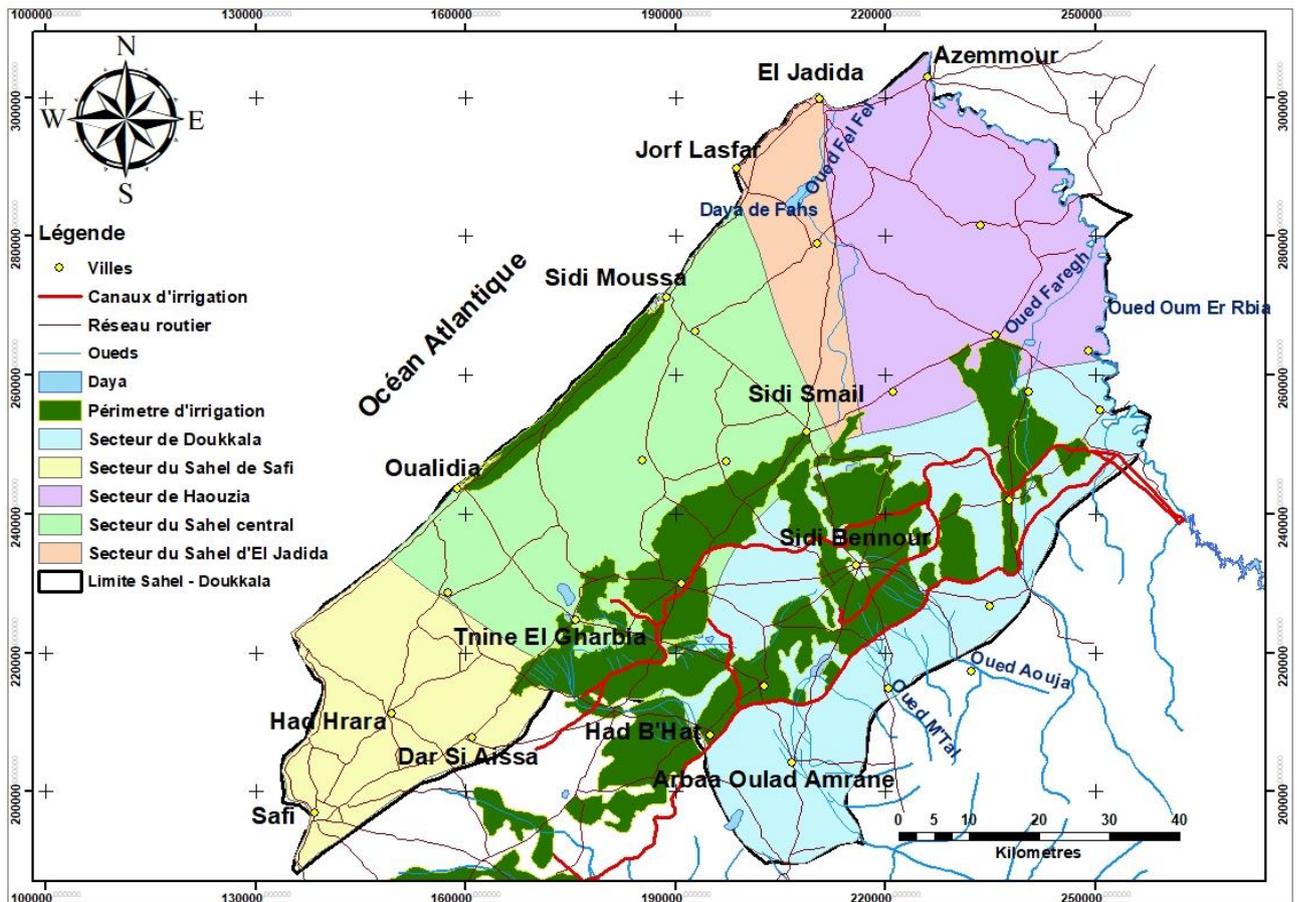


Figure 10. Carte des aménagements hydro-agricoles du bassin Sahel-Doukkala

### 2.3 Analyse géomorphologique et estimation du potentiel en eau de la région

Dans un premier temps, le contexte hydrologique du Maroc est principalement influencé par l'irrégularité annuelle et une variabilité considérable de la pluviométrie ainsi que sa disparité spatiale.

On note que les précipitations se concentrent principalement en automne et en hiver, réparties sur 4 mois (de Novembre à Février) avec les jours de pluie allant de 20 à 70 du Sud au Nord. En effet, le nord plus humide enregistre 2000 mm contre 100 mm dans le Sud, c'est une répartition inégale principalement associée à la position géographique (GWP, 2015).

La gestion des ressources en eaux consiste à planifier, développer, distribuer et gérer l'utilisation optimale des points de vue qualitatif et quantitatif. Ainsi, compte tenu du faible coefficient de drainage

de la région, nous avons procédé par une analyse hydrogéomorphologique pour une bonne compréhension du système hydrologique.

Le Sahel – Doukkala a une diversité géomorphologique (figure 6). Nous nous sommes servis du modèle numérique de terrain, à l'image de nombreux travaux au Maroc, comme partout ailleurs (Costa Cabral et al. 1994 ; Ariza – Vilaverde et al. 2015 ; El Bardai et al. 2015 et Jarihania Abdollah et al. 2015), en vue de nous permettre entre autres :

- l'extraction des paramètres du terrain ;
- la réalisation des différents profils topographiques ;
- la modélisation et les prévisions de l'écoulement de l'eau.

### 2.3.1 Méthode analytique

Partons du principe que la géomorphologie affecte le système hydrologique (Castany, 1982 ; Costa Cabral et al. 1994) en interagissant avec chacune des caractéristiques physiques. En effet, la résultante entre les gradients d'altitude, et le relief de type appalachien laisse entrevoir les cordons dunaires, ce qui nous permet de supposer les présences éventuelles des surfaces d'eaux.

Cela ne suffit pas toutefois, en raison de la superficie, on est susceptible de perdre en précision mais aussi en qualité ; en confondant des rivières, aux autres structures telles les sols hydromorphes riches en argile, les sols simplement humides ou alors les dépressions karstiques.

Tous ces différents écosystèmes jouent un rôle important dans les équilibres et de façons durables. Car, lors des changements, ces milieux qui se caractérisent par leur complexité, et de fortes variabilités incertaines, favorisent toutefois une certaine régulation, l'équilibre et la sécurité environnementale et permettent, le développement durable des zones de la région (Baiziri, 2003 ; Zhigao, 2015). En effet, les eaux météorologiques s'accumulent d'une certaine manière en ces points, permettant de réguler la température, par rapport à la faible infiltration et à l'évaporation certaines. On trouve à certains endroits des oiseaux migrants, les types de végétaux spécifiques etc. Et d'autres parts, ces milieux servent d'abreuvoir pour le bétail, et d'approvisionnement en eau à des fins d'irrigation.

A l'aide du logiciel ArcGis 10.2.2, nous avons déterminé l'indice topographique de Beven Kirkby (1979, 1991). Il s'agit d'une relation mathématique qui permet de déterminer les zones susceptibles d'accumuler de l'eau, en raison de la confluence entre la pente du terrain, les réseaux de thalwegs existants.

$$ln = \left[ \frac{(a + 1) \cdot p}{tanb} \right] \quad (1)$$

Avec :

**b** : la pente locale (en radian),

**a** : surface spécifique

**p** : pixel (dépendant du MNT)

### 2.3.2 Résultats et discussion

La modélisation a été effectuée en plusieurs étapes :

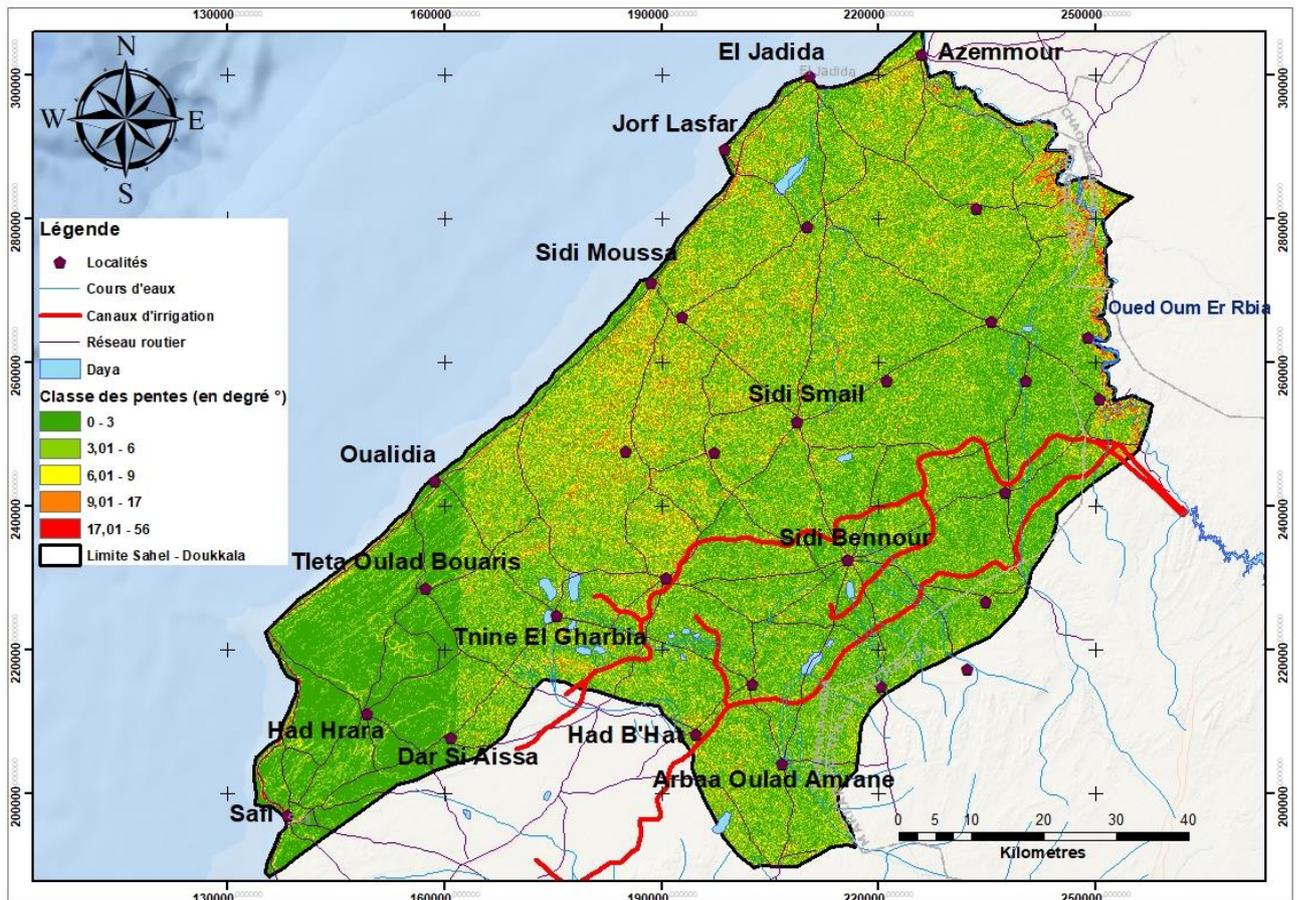
- La détermination des pentes et orientations de pentes ;
- La détermination de flux de direction et d'accumulation.

#### 2.3.2.1 Pentes et orientations de pentes

La pente est l'un des principaux facteurs dans la sélection des zones de sol d'épandage. La vitesse de l'eau est directement liée à l'angle d'inclinaison et en profondeur.

L'inclinaison du terrain vis-à-vis de l'horizontale, contribue à décrire les sites naturels de la région. C'est en effet un paramètre essentiel de l'écoulement de l'eau, des cours d'eau et, plus généralement, de l'écoulement gravitaire. Théâtre d'éboulements, d'avalanches de glissements de terrain, elle peut constituer le support d'activités humaines.

Elles varient les unes par rapport aux autres, en fonction de l'inclinaison, l'orientation, les lignes de plus grandes pentes et des formes selon qu'elles soient ou non exposées au soleil.



**Figure 11. Représentation cartographique des pentes de la région du Sahel Doukkala**

On aperçoit sur la figure 10, une variation de pente allant de 0 à 56 °, avec une moyenne de 4°. Les pentes les plus élevées se situent principalement au Nord, suivant la vallée de l’oued Oum Er R’Bia, à certains points du littoral par rapport aux falaises calcaires, mais aussi entre Oualidia et Sidi Moussa situé sur la côte (Sahel) et un peu plus au centre, caractérisé par un relief dunaire.

Toutefois, vers le Sud, et à l’Est, les valeurs des pentes sont inférieures à la moyenne (4°). En effet, la partie Est de la région se caractérise par des plateaux.

Sachant que le débit d'eau est fortement affecté par la gravité, les pentes et les orientations ; la figure 7 vient compléter les observations de la région. Les orientations de pentes sont différenciées par des couleurs et on peut remarquer que les Doukkala sont effectivement plats, tandis que le Sahel se caractérise par un relief de type appalachien.

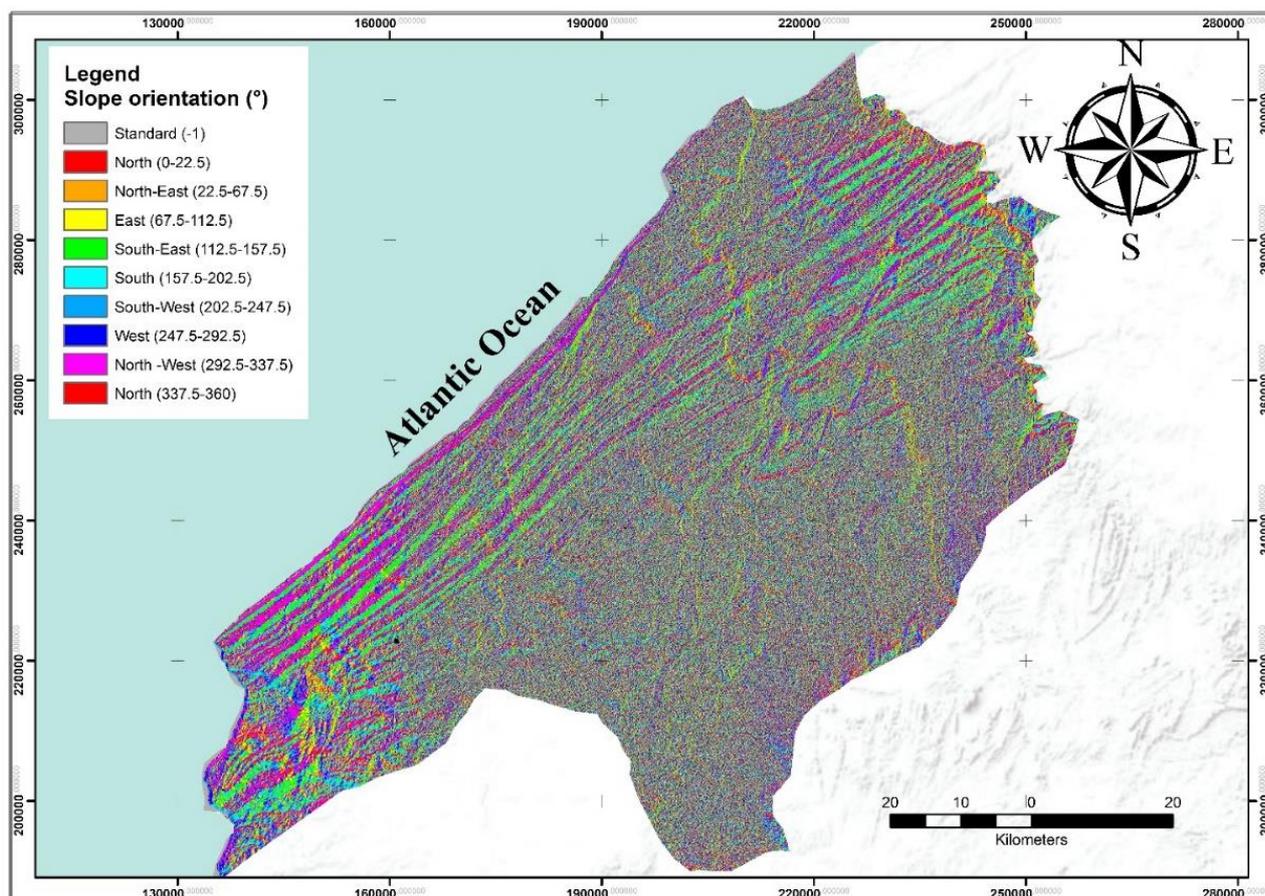


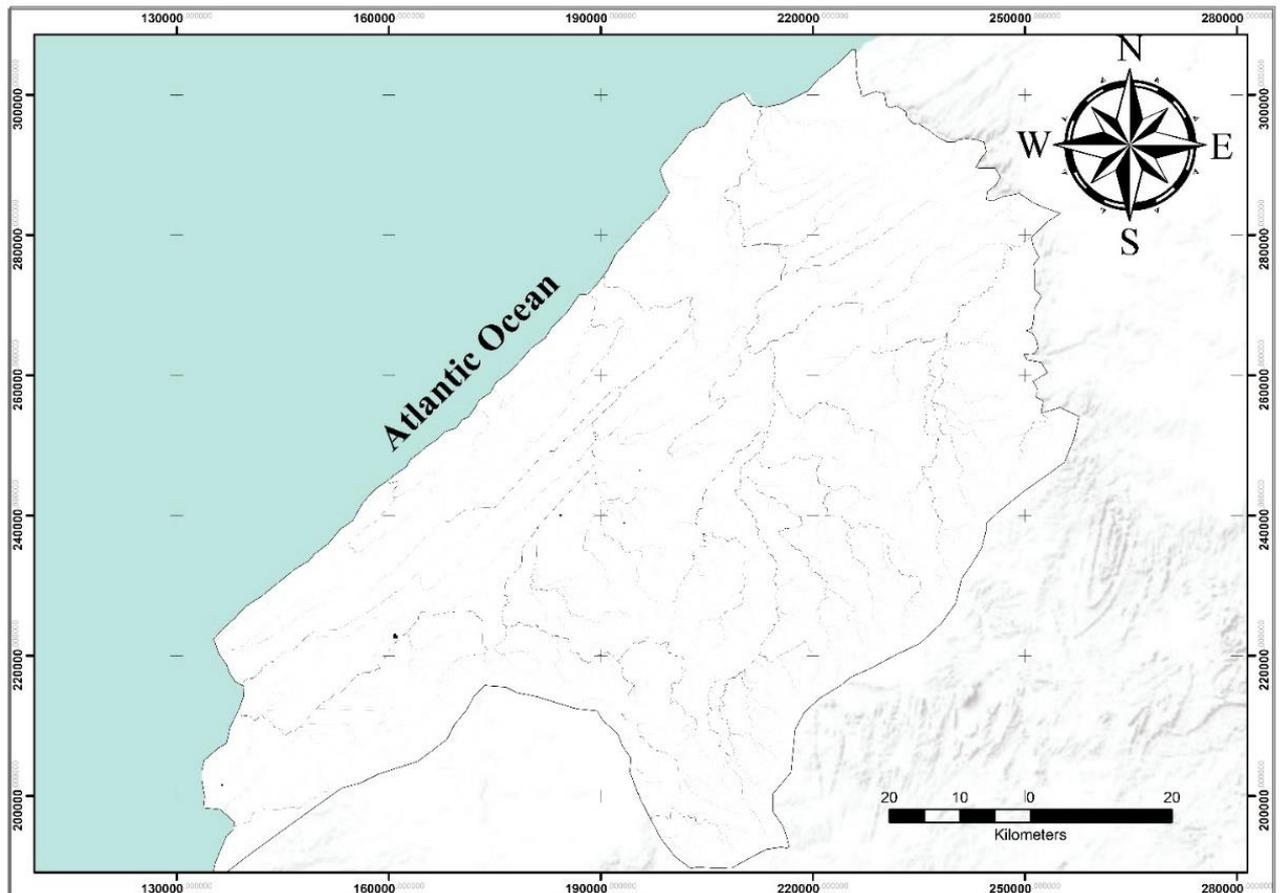
Figure 12. Carte représentative des orientations des pentes de la région du Sahel Doukkala

### 2.3.2.2 Flux de direction et flux d'accumulation

La surface spécifique « a » selon l'équation (1) ; correspond à la surface sur laquelle l'eau s'écoule. Il se caractérise de plusieurs éléments : d'un flux simple ou multiple, selon les approches de Jensen et Domingue (1988) et bien d'autres (Greenlee, 1987).

Le sens de circulation étant l'aspect clé, sur lequel l'on déduit les différentes dérivations à chaque surface raster ; tandis que l'accumulation de flux permet le calcul sous forme de moyenne cumulée de l'ensemble des pixels en fonction de la pente et du code direction.

Le résultat obtenu nous montre un réseau de thalwegs significatifs pour une accumulation d'eau (Figure 12). En le comparant au réseau hydrographique réel, on trouve quelques similitudes mais aussi, des différences apparentes. On retrouve le réseau hydrographique avec ses oueds temporaires et permanents en plus des sillons interdunaires (Sahel) et d'autres thalwegs quelque peu inactifs.



**Figure 13. Carte représentative d'accumulation de flux dans la région du Sahel Doukkala**

Comparé à la carte hydrologique de la région, on remarque dans un premier temps la différence entre le Sahel des Doukkala dans ce sens où, l'on dénombre plusieurs oueds (Temporaire/permanent) dans les Doukkala. Cela peut s'expliquer d'un point de vue géomorphologique, car en effet, se situant en amont, les eaux du Sahel y prennent leurs sources.

La limite de transgression correspond à une limite de concentration de flux. On peut dénombrer plusieurs cours d'eaux dans la partie des Doukkala (en amont) tandis qu'au-delà de la limite, les réseaux ne semblent présenter aucune continuité (figure 13), ou presque. Cette différence trouve son explication dans la perméabilité du sol, le réseau karstique fort présent ou encore l'évapotranspiration qui ne permettent pas aux eaux de surface de s'écouler jusqu'au littoral.

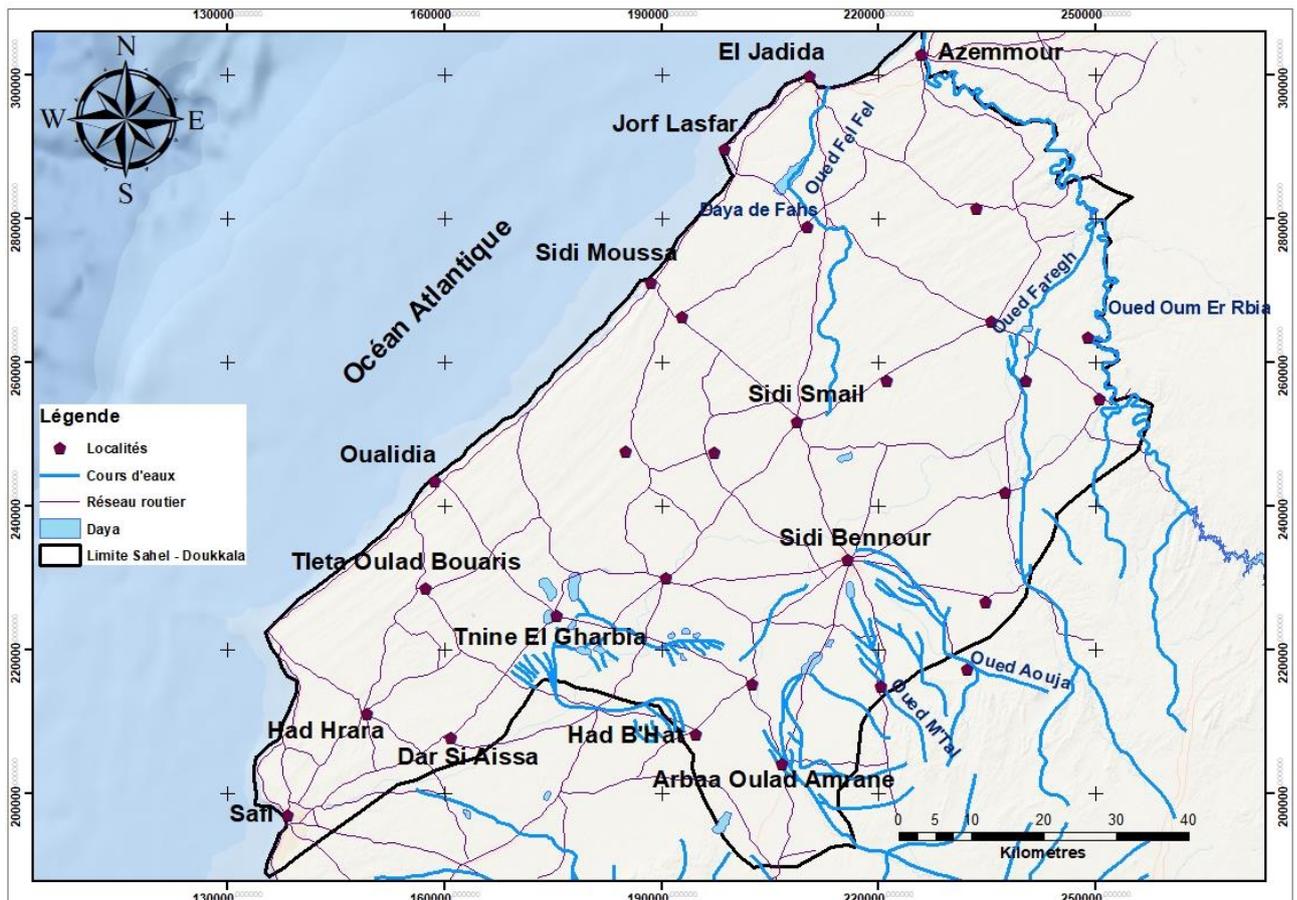


Figure 14. Carte représentative du réseau hydrologique de la région du Sahel Doukkala

A partir de la relation (1), le calcul effectué par l'Arc Gis 10.2.2 nous a permis d'obtenir la cartographie ci-dessous :

La valeur de l'indice varie de 0 à 25,13 ; avec une moyenne de 7,23 reflétant un coefficient de drainage bas. On note ici que la zone possède des caractéristiques d'humidité à mesure que l'indice est haut.

La première observation est cohérente avec les conclusions antérieures, notifiant l'absence de cours d'eaux majeurs et permanents. A la place, il y a des points à hauts indices répartis de manière forte inégale avec une densité tout aussi faible.

En effet, les Doukkala qui se caractérisent par une surface plane, et des cultures irriguées tout au long, présentent quelques points à fort indice tandis que le Sahel, en compte plusieurs. On émet alors de nombreuses hypothèses suivantes :

- Le sol est fortement perméable, déjà vu la présence des surfaces irriguées (figure 5) ;

- L'existence d'un réseau karstique, dans lequel s'infiltrent et s'écoulent notamment les eaux de surface en provenance des sommets (Oueds M'Tal et Aouja entre autres) ;
- Une évaporation supérieure par rapport aux apports en eau météorique.

Au niveau du Sahel, les points humides sont plus représentatifs, ils décrivent quelque peu l'aspect des surfaces interdunaires entre les localités de Sidi Moussa, Sidi Ismail, Oulidia, et Tnine El Gharbia, voire au-delà.

Cette présence massive en aval, laisse penser que les cotes dunaires constituent une barrière pour l'écoulement des eaux de surface, ce qui a tendance à s'accumuler, s'infiltrer ou s'évaporer. En rappellera ici que seul l'oued Oum Er R'Bia, qui constitue la limite nord de la région, trouve un exutoire à Azemmour pour l'océan Atlantique.

Ainsi, les visites de terrain nous ont permis d'effectuer les tests de validation des résultats expérimentaux obtenus au préalable. Nous avons pu constater, la présence de nombreuses étendues d'eaux dit Dayas, plus dans le Sahel que les Doukkala. Toutefois, il ne s'agissait pas que d'eau, certains points correspondaient à des périmètres d'irrigation, pendant que d'autres donnaient l'impression des cavités calcaires, des sols hydromorphes, des végétations typiques des sols humides, etc.

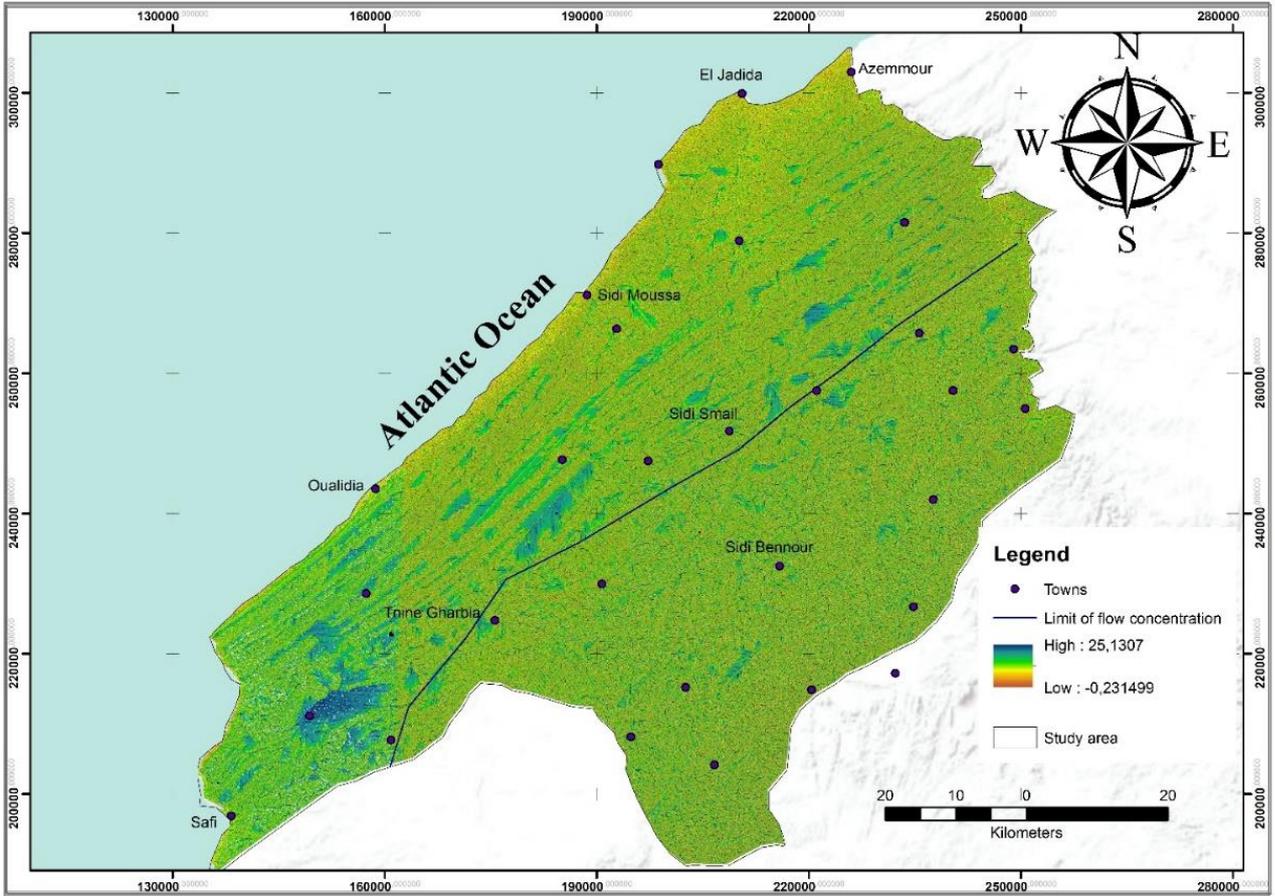


Figure 15. Représentation spatiale de la variabilité de l'indice de l'humidité par la méthode de Beven – Kirkby (1979)



*Figure 16. Vue panoramique de daya de Fahs et de l'oued Fel Fel (Photo prise le 9 décembre 2015)*

### 2.3.3 Estimation du potentiel hydrique exploitable

Notre estimation s'appuie sur des investigations de terrain entre 2014 et 2015, suivant les différentes périodes de hautes et basses eaux. Avec toujours l'objectif de déterminer les zones humides et de les correspondre aux coefficients seuils obtenus lors de l'étude expérimentale en laboratoire.

L'appréciation de l'importance de chacune des zones obtenues dépendra des quantités d'eaux in situ. Ainsi, nous considérerons comme zone humide, tout point ayant une valeur d'indice supérieur ou égale à 10.

On obtient 54 zones aux surfaces variées ayant en moyenne 10,49 Km<sup>2</sup> de superficie dont, 2 zones au-delà des 50 Km<sup>2</sup> (figure 16).

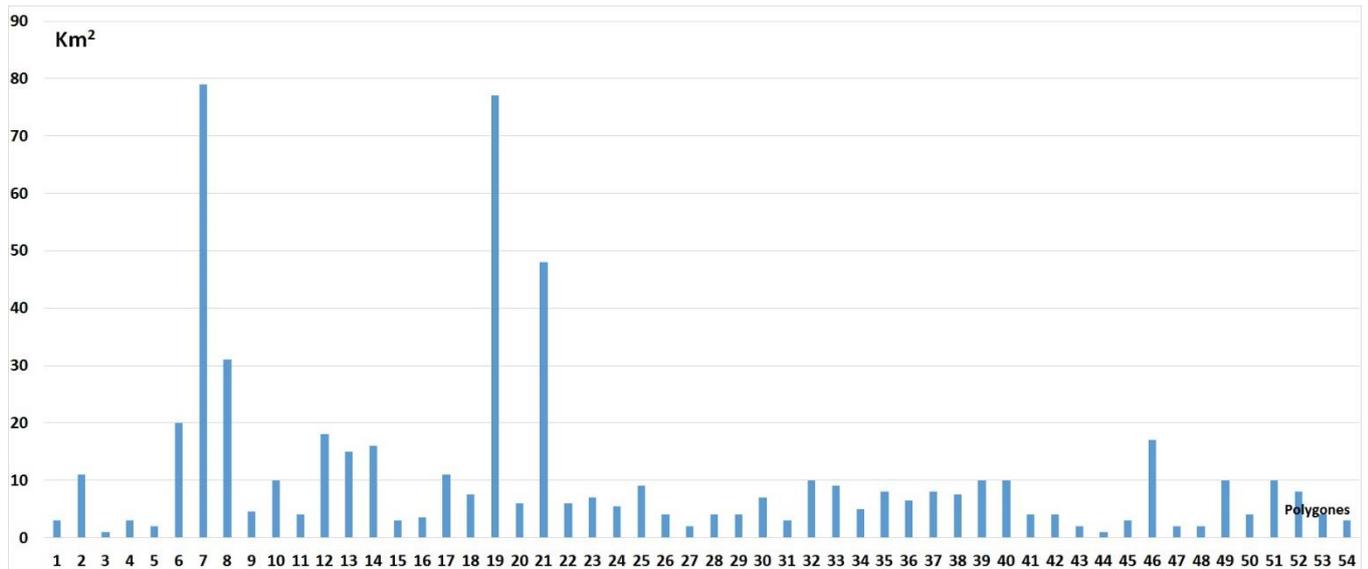


Figure 17. Evaluation des surfaces à hauts indices

L'estimation des surfaces cumulées atteint 567 Km<sup>2</sup>, ce qui représente 7.36% de la région et qui, toutefois tient son importance à la vue de la pluviométrie moyenne annuelle enregistrée dans la région (soit 350 mm).

Ces zones ne correspondent pas aux zones irriguées situées plus en amont et, lorsque l'on considère une pluie parfaite (selon la répartition des gouttes de pluie) sur l'ensemble de la région, on peut dresser le tableau 1 suivant.

Tableau 1. Estimation moyenne annuelle du potentiel hydrique de la région

	Surface (Km <sup>2</sup> )	Pourcentage	Volume (m <sup>3</sup> )	Debit (m <sup>3</sup> /s)
Total surface	567	1	198282770	6,283
>10 Km <sup>2</sup>	386,14	0,68	135148057	4,283
< 10 Km <sup>2</sup>	180,38	0,32	63134713,25	2

En raison des caractéristiques physiques de ces zones, les estimations nous ont permis de déterminer des quantités exploitables. Le bilan est toutefois non négligeable au vu des ressources présentes de la région. En effet, par rapport à la capacité totale des grands barrages en fonctionnement de 2011, soient 17,2 milliards m<sup>3</sup>, estimée par le gouvernement marocain (DRPE), la région du Sahel Doukkala emmagasine en moyenne 198 Mm<sup>3</sup> d'eau de surface soit, environ 1,1% des eaux des retenues.

## 2.4 Conclusion partielle

En somme, le Sahel – Doukkala est une région semi-aride avec une topographie variée, légèrement prédominante par des altitudes de l'ordre de 203 à 349 m. Il joue un rôle clé dans le système hydrologique et par conséquent porte une influence considérable sur les nappes de la région. Les effets de climat, et les dunes successives contribuent à une faible capacité de drainage enregistrée dans la région, ce malgré la présence de l'Oued Oum Er R'Bia.

L'indice géomorphologique nous a permis de noter la différence apparente entre Doukkala situé en amont, riche en cours d'eaux temporaires et diffus, du Sahel situé en aval et caractérisé par un relief de type appalachien agissant tel un barrage naturel aux flux amont avec plusieurs dépressions comblées par des eaux.

Ces dépressions, souvent endoréiques nous laissent supposer que les eaux subissent deux effets ; l'infiltration, l'évaporation et que certains endroits présentent des sols essentiellement hydromorphes, riches en argile, preuve d'humidité.

En ce qui concerne le potentiel mobilisable, le Sahel semble plus adéquat, ce en dépit de la rareté des cours d'eaux. Toutefois, il existe plusieurs interrogations quant à la relation réelle entre ces eaux superficielles et les nappes présentes de la région, car pour une gestion durable des ressources en eaux de la région, il convient de mesurer régulièrement les paramètres in situ dans le but d'établir un bilan hydrologique complet.

On parlera notamment des données climatiques, avec les principales composantes à savoir : les écoulements, la recharge de la nappe ou pertes par infiltration ainsi que l'évapotranspiration réelle.

### 3 Chapitre 3. Etude hydrogéologique et analyse du comportement piézométrique de la nappe.

Les eaux souterraines de la région du Sahel – Doukkala, ont été classées nappes intensément exploitées selon de nombreuses études réalisées sous la direction de l'agence du bassin hydraulique de l'Oum Er Rbia.

En effet, les oueds issus des Rehamna , à l'amont du bassin, ont des caractères particuliers. Ils n'ont pas de débit d'étiage et l'écoulement ne s'effectue que sous forme de crues brèves et violentes, se distinguant entre eux par la taille de leurs sous bassins, la pente moyenne et la nature des terrains drainés. Ce qui toutefois, influence fortement les écoulements souterrains.

Suite à de préconisations nombreuses et variées, la gestion intégrée des eaux du bassin de l'Oued Oum Er R'Bia constituée d'élus, d'usagers, et de représentants des administrations, s'est mis en place dans le but d'établir un schéma de gestion des eaux concertées sur l'ensemble du bassin.

Le présent chapitre correspond à l'étude proprement dite des aquifères de la région. Il vise la mise à jour des données piézométriques en s'appuyant entre autres sur des mesures récentes (Décembre 2015).

#### 3.1 Contexte géologique

Les eaux souterraines sont un agent géologique général, en ce sens où elles jouent un rôle actif dans les processus géodynamiques, grâce à la large répartition spatiale de leur écoulement ainsi qu'à leur forte capacité à interagir avec l'environnement (Toth, 1999). En effet, dans la géodynamique externe, l'eau souterraine joue ses deux rôles fondamentaux de vecteur et de solvant. Dans son rôle de solvant, l'eau souterraine a joué au cours des temps géologiques un rôle dans la mise en solution des minéraux, selon leur solubilité ou leur rapidité d'altération.

En revanche dans son rôle de vecteur, l'eau déplace les substances en solution, en émulsion ou en suspension. Du fait de la taille variable des vides dans le milieu souterrain, les eaux pourront entraîner seulement certains petits ions (cas des barrières de perméabilités argileuses dans certains gisements de pétrole), ou bien l'ensemble des substances en solution (cas général des aquifères). On peut aussi

rajouter les solutés plus des particules en suspension (argiles, particules organiques dont parasités, bactéries, virus ...) avec dans ce cas des aquifères possédant des drains (chenaux graveleux en nappe alluviale, fractures dans les roches consolidées, drains karstiques).

L'aquifère (du latin aqua fero : porter l'eau) est la structure géologique perméable contenant de l'eau, comme des alluvions de rivière, des granites fissurés, un plateau calcaire, etc. De l'infiltration, l'eau contenue dans l'aquifère circule dans le sous-sol en nourrissant une voire plusieurs sources ou, se déversant dans un milieu récepteur telle la mer, le lac, les cours d'eau, d'autres aquifères.

On la caractérise par sa géométrie, sa superficie et sa profondeur ; mais aussi par les caractéristiques intrinsèques de la roche dont il est formé : lithologie, porosité, perméabilité, fracturation, homogénéité, etc.

En définitif, l'aquifère permet un stockage plus ou moins important et plus ou moins long de l'eau infiltrée avec un transit à durée variable.

D'un point de vue géologique, la région de Doukkala appartient à la grande unité géologique connue sous le nom de « Meseta marocaine ». C'est un nom qui tire ses origines de l'espagnol ; désignant en géographie et géomorphologie notamment une structure géologique formée par un plateau entouré de massifs montagneux de moyenne altitude.

Elle se définit par un régime tabulaire des dépôts secondaires et tertiaires reposant sur un terrain primaire fortement plissé par l'orogénèse hercynienne.

Elle constitue la plus ancienne et la plus complexe formation géologique du Moyen Atlas marocain et représente des creux tectoniques favorables aux milieux subhumides et à la formation des lacs comme le lac Tiguelmamine (région de Khénifra), des cours d'eau, des biotopes.

### 3.1.1 La stratigraphie

Pour résumer la stratigraphie du Sahel – Doukkala, nous avons présenté une cartographie simplifiée (figure 17). Le socle primaire constitué de schistes et de quartzites affleure au NE et à l'E des Doukkala,

notamment dans la vallée de l'Oum-er-Rbia ; partout ailleurs, il est masqué par les dépôts postérieurs, à l'exception du pointement cambrien d'El-Jadida.

La position du socle sous la plaine reste assez peu connue ; cependant on a rencontré à travers certains sondages des schistes à 90 mètres de profondeur (à proximité de Boulaouane ; IRE 1/27), contre 1500 et 4000 mètres de profondeur selon les études géophysiques.

On trouve le Permo - Trias dans la vallée de l'Oued Oum Er R'Bia, sous forme de dépôts d'argiles et pélites rouges avec des coulées basaltiques. Au M'Tal, situé dans le sud – est ; ces formations se trouvent associées à des conglomérats rouges carbonifères tel indiqué par Ferré & Ruhard en 1975.

Le Jurassique quant à lui, affleure au Sud des Doukkala et constitue les collines des Mouissate. Il se prolonge de sorte qu'on le retrouve sous le Pliocène en affleurements dispersés dans la région de Tleta-Sidi-Embarek et Jemaa-Sahim , formant aussi la base des falaises qui s'étendent au N de Safi.

Les dépôts du Jurassique supérieur sont constitués par des calcaires et marno-calcaires jaunâtres, à lits argileux, contenant de nombreux bancs de gypse avec une puissance totale de ses dépôts atteignant plusieurs centaines de mètres.

S'agissant du Crétacé, il est extrêmement important en ce sens où il constitue le substratum presque continu des terrains plioquaternaires aquifères des Doukkala, tandis que certains niveaux calcaires renferment les nappes du Sahel.

Plus étendue vers le Nord et à l'Est, la transgression néocomienne fait suite sans discontinuité à la transgression jurassique. Par ailleurs, on n'observe pas de discontinuité à Safi avec le Jurassique et une série néocomienne transgressive sur le Primaire ou le Permo-Trias , en bordure des Rehamna.

La constitution lithologique et la puissance des différentes formations du Crétacé inférieur, formations parmi lesquelles le calcaire de Dridrate doit être signalé par l'importance de son rôle en hydrogéologie se résume par le tableau qui suit :

**Tableau 2. Equivalence et variations latérales des faciès du Crétacé inférieur (tiré des ressources en eau du Maroc Tome 2, par Ferre & Ruhard)**

Etage stratigraphique	Safi	Sidi Bennour	Bordure des Rehamna
Hauterivien : troisième étage stratigraphique du Crétacé inférieur (entre -132,9 et -129,4 Ma environs)	Argiles rouges et grès : 60 m Calcaire de Dridates : 30 m Argiles de Safi : 60 m	Argiles sableuses bariolées : 64 m	Sables, grès et argiles rouges : 60 m
Valanginien : deuxième étage stratigraphique du Crétacé inférieur (entre -139,8 et -132,9 Ma)	Calcaire : 5 m	Calcaire : 31 m Argiles rouges Conglomérats	Calcaires « moyens » : 10 m Argiles rouges : 40 m
Jurassique : Il s'agit d'une période stratigraphique ; la base du crétacé.	Calcaire à 200 m Marno – calcaires Argiles à gypses	Transgression et discordance	

Lorsque la mer se retire, à la fin du Néocomien, il emporte semble-t-il le reste du crétacé inférieur. Ainsi, le crétacé est absent dans la région d'El Jadida.

D'autres transgressions marines se produiront notamment au Cénomaniens (premier étage stratigraphique du Crétacé supérieur) d'où l'on observe des affleurements au Nord-Est du Sahel.

L'existence de marno-calcaires à Sidi Bennour où le gypse est très abondant révèle une puissance totale d'environ 100 à 200 mètres et témoigne d'une légère subsidence.

Les terrains éocènes (deuxième de l'ère Cénozoïque), célèbres par leurs gisements de phosphates, affleurent seulement en bordure des Rehamna à l'Est. Tandis que l'existence du Miocène (quatrième de l'ère Cénozoïque) est probable au Sud-Est d'El- Jadida et près de Sidi Smail avec 20 m environ de marnes sableuses ou d'argiles rouges.

En ce qui concerne le Plio – quaternaire, un dépôt de calcaire détritique de couleur jaune, formé de débris de coquilles triturées et de grains de sable ; caractéristique d'une transgression marine importante qui laisse derrière elle (lors de la régression) des dunes côtières constituées par des matériaux de même

nature. D'où la difficulté pour distinguer les deux types de dépôts lithologiques semblables, justifiant ce groupement entre le Pliocène et le Quaternaire.

On trouve cet étage dans les Doukkala, bien que masquée par la couverture limoneuse quaternaire avec toutefois, des affleurements dans la vallée de l'Oued Oum Er R'Bia, près de Safi mais aussi dans le Sahel Abda, au niveau des crêtes dunaires situées au Nord de la ligne Tnine-Rharbia—Khemis-M'Touh—Boulaouane. Les faciès lithologiques rencontrés dans ce niveau sont :

- des conglomérats grossiers en masses, caractéristiques de l'ancien estuaire de l'Oued Oum Er R'Bia ;
- les calcaires détritiques, lumachelliques jaunes et très poreux constitué de débris de coquilles liés par un ciment de calcite et d'hydroxyde de fer. La porosité (20 à 30%) est fonction de l'importance du ciment et résulte de l'arrangement des coquilles ;
- des sables jaunes grossiers ;
- des calcaires recristallisés, très durs correspondant à la circulation d'eaux souterraines récentes voire fossiles ;
- des calcaires à grains fin, chargé d'éléments argileux ;
- des marnes sableuses.

Le Quaternaire continental des Doukkala permet de distinguer :

- des limons anciens (ou inférieurs) , épais et essentiellement argileux formant 4/5 du remplissage de la plaine ;
- des limons récents (ou supérieurs) peu encroûtés mais plus épais dans les axes d'oueds importants, apparaissant beaucoup plus sableux et graveleux que les précédents avec les actions de phénomènes pédogénétiques et d'agents morphologiques récents (lessivage, tirsification, déflation éolienne).

L'étude stratigraphique a révélé d'importantes lacunes dues au retrait de la mer. A chacune d'elles correspond une érosion ou une abrasion des terrains précédemment déposés lors d'une transgression de la mer.

### 3.1.2 Structure

C'est essentiellement la tectonique tertiaire, conséquence à la fois des mouvements orogéniques rifains et atlasiques, qui a donné sa structure à la région (Choubert, 1955 ; Choubert et al, 1956). Deux directions principales aux plis se distinguent :

- une direction N-S, souvent superposée à des éléments tectoniques hercyniens ;
- une direction SW-NE à E-W, qui est celle de l'orogène atlasique.

Toute cette tectonique douce compte des plis à grand rayon de courbure et des flexures à pendage faible.

Les failles sont rares, présentes dans des secteurs très limités.

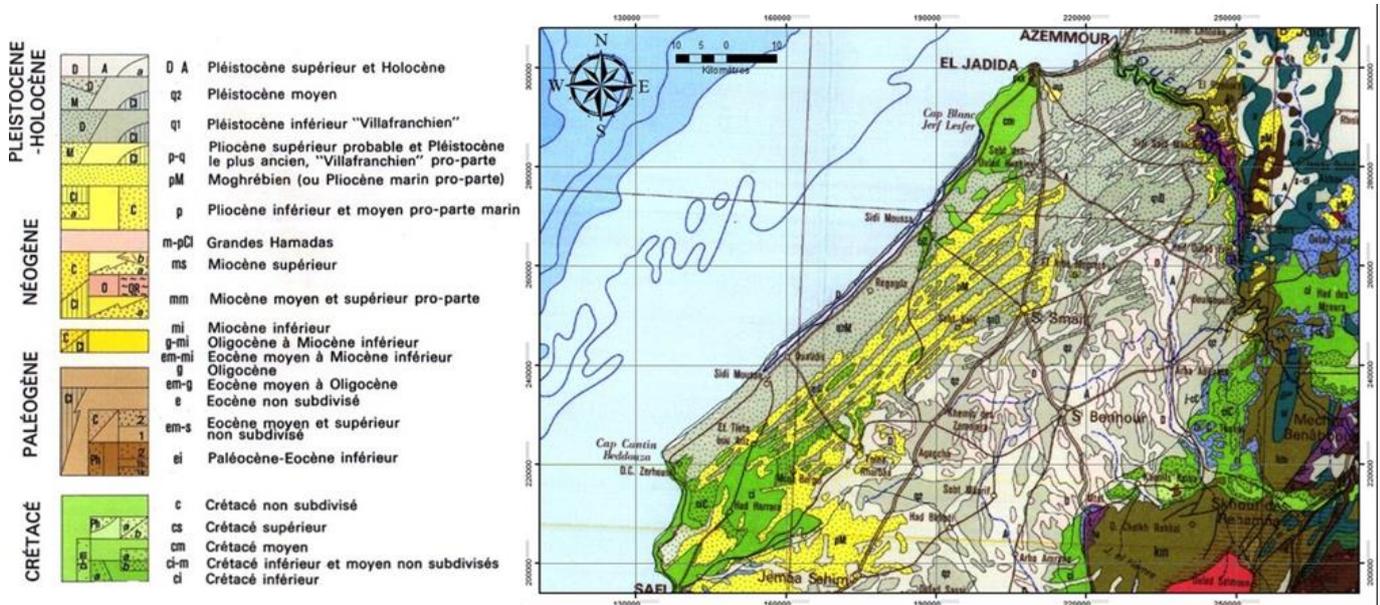


Figure 18. Aperçu géologique de la région du Sahel – Doukkala d'après la carte géologique du Maroc au 1/1000.000, dressée par M. G. Choubert

### 3.2 Caractérisation hydrogéologique

Afin de caractériser l'aquifère, point par point, nous avons représenté la région en fonction des systèmes stratigraphiques selon les superpositions superficielles et par rapport à l'écoulement majeur (Sud Est, Nord-Ouest).

### 3.2.1 Caractéristiques hydrogéologiques des différents niveaux stratigraphiques

#### 3.2.1.1 *Permo-Trias*

Le Primaire, essentiellement schisteux, est imperméable, sauf dans sa partie superficielle altérée, où il peut exister de petites nappes d'extension très limitée. Bien que peu étendu, on y rencontre une nappe ascendante (à proximité de M'Tal) très fissurés à 228 m de profondeur.

Il faut signaler en outre le cas des dolomies d'El- Jadida qui, très karstifiées, sont susceptibles de présenter localement des circulations importantes.

#### 3.2.1.2 *Jurassique supérieur*

Ce niveau, formé de puissantes assises de calcaires alternant avec des lits marneux, présente une perméabilité de fissures : les circulations se font souvent par de véritables galeries qui résultent de la dissolution du calcaire et du gypse.

Comme en zone karstique, les forages stériles voisinent souvent avec les ouvrages productifs.

#### 3.2.1.3 *Crétacé inférieur*

On trouve des bancs imperméables d'argiles, mais aussi des calcaires qui constituent des niveaux karstiques à fissurations très importantes, constituant à ce propos des pertes de circulation. Les horizons argilo-sableux supérieurs se comportent différemment selon la nature du niveau considéré (plus sableux ou plus argileux).

La perméabilité est certainement faible, mais suffit sans doute à expliquer l'alimentation du calcaire de Dridrate et l'absence de nappe dans le Plio-Quaternaire d'une grande part du Sahel, lorsque les deux formations sont au contact l'une de l'autre.

La lithologie est hétérogène et présente d'importantes variations latérales dans la région de Doukkala. Les couches rouges inférieures voient alterner des conglomérats et grès avec des niveaux argileux ; des forages profonds ont rencontré localement des nappes.

Le calcaire moyen présente une perméabilité de fissures quand il n'est pas marneux, tandis que les couches rouges supérieures sont surtout argileuses avec quelques rares bancs gréseux perméables.

#### 3.2.1.4 Crétacé moyen

En ce qui concerne le crétacé moyen, les calcaires et marnes présentent des fissurations irrégulières avec des faibles perméabilités selon quelques essaies à proximité d'El Jadida ( $5.10^{-5}$  à  $5.10^{-6}$  m/s).

#### 3.2.1.5 Plioquaternaire marin et dunaire

Les deux ensembles se confondent en un seul ensemble perméable, mais c'est presque toujours le faciès marin sous-jacent, plus cimenté et moins argileux qui contient la nappe. On distingue deux types caractéristiques des circulations aquifères dans ces calcaires détritiques :

- perméabilités d'interstices, prépondérante dans les horizons sableux ( $3.10^{-5}$  m/s et un coefficient d'emménagement moyen de  $8.10^3$ ) ;
- perméabilité de fissures prédominante dans les horizons riches en ciment ( $6.10^{-4}$  m/s et un coefficient d'emménagement moyen de  $5.10^{-2}$ ).

A noter que ce sont des essais d'injection et non de pompage, qui ont permis de prouver la coexistence de ces deux types de perméabilités.

#### 3.2.1.6 Limons quaternaires

Les limons forment la quasi-totalité du recouvrement des Doukkala. Ainsi, les possibilités d'infiltration sont directement liées à la perméabilité de cette couverture. Une connaissance de données précises relatives aux caractéristiques hydrauliques permettra d'évaluer :

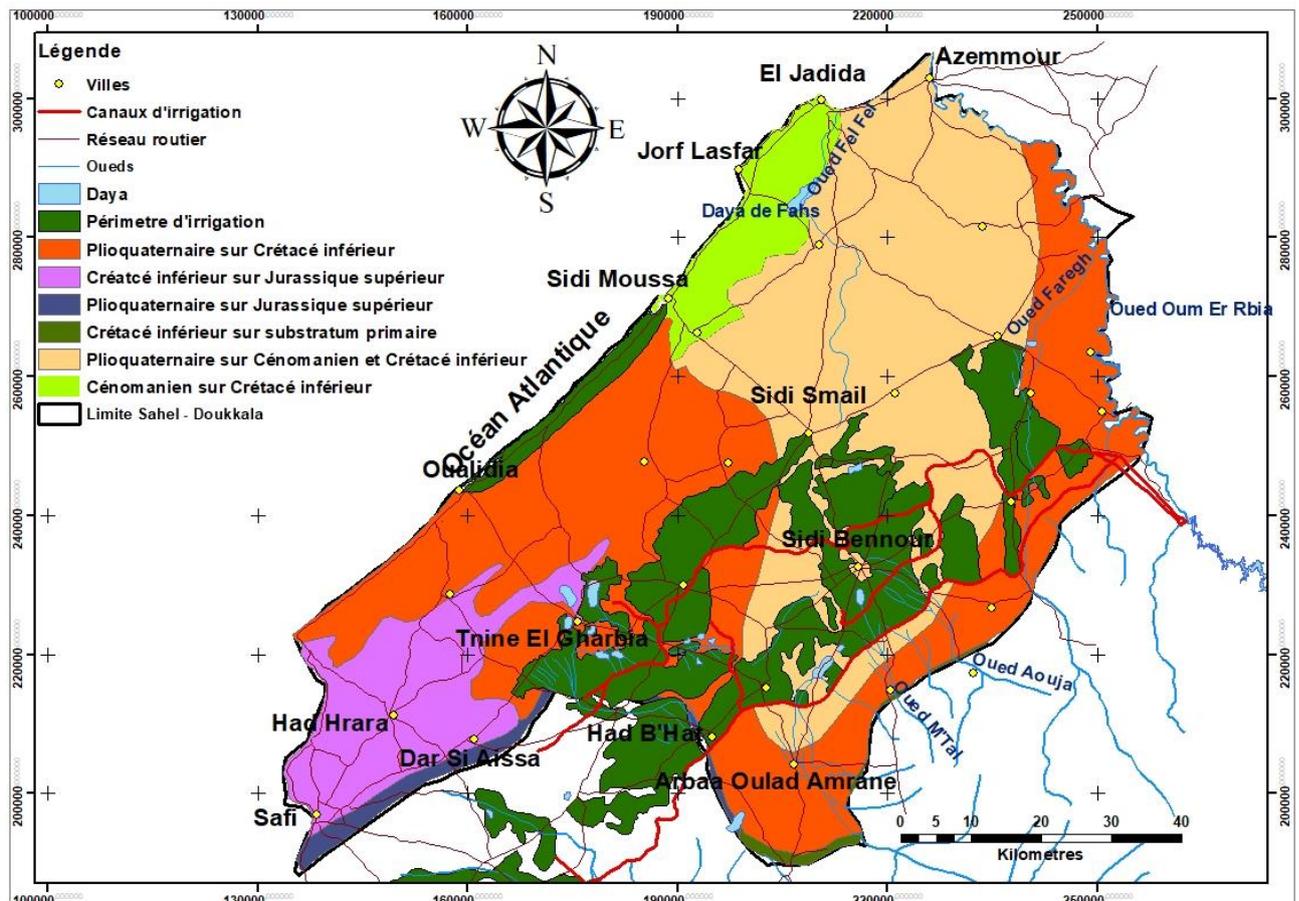
- les pertes profondes par irrigation, provoquant des remontées de la nappe phréatique ;
- les pertes dans les canaux d'irrigation en terre ;
- et l'alimentation de la nappe par sa surface.

On obtient les résultats d'ensemble obtenus dans les Doukkala se répartissent comme suit :

**Tableau 3. Perméabilité type des sols du Sahel - Doukkala**

Type de sol	Perméabilités (cm/s)
Sables dunaires récents, peu argileux	Comprise entre $5,5$ et $6,7 \cdot 10^{-3}$
Sables argileux	Comprise entre $1$ et $3,9 \cdot 10^{-6}$
Limons récents de plateaux, où le caractère argileux est encore plus accentué	Comprise entre $1,6$ et $4,2 \cdot 10^{-3}$
Les limons inférieurs encroûtés, essentiellement argileux	Compris entre $5 \cdot 10^{-8}$ et $5 \cdot 10^{-5}$
Les limons supérieurs sablo-argileux	Compris entre $10^{-6}$ et $10^{-3}$

D'un point de vue global, la densité des points d'eau est très différente entre le Sud-Ouest et le reste de la région. On trouve en effet au Sud que les puits se raréfient, et les dayas sont nombreux. Plus au Sud, les eaux sont profondes et de mauvaise qualité.



**Figure 19. Carte d'extension des principaux niveaux aquifères du bassin Sahel-Doukkala**

### 3.2.2 Caractéristiques hydrogéologiques des nappes de Doukkala

La densité des points d'eau est très variée ; on trouve par exemple très peu de puits au Sud de la région notamment, à proximité de la localité de Tnine El Gharbia et, sur l'axe qu'elle forme avec Youssoufia (plus au Sud). Cette zone d'environ 1 000 km<sup>2</sup> n'est pas en réalité une zone sans nappe, mais l'eau souterraine se situe dans le Jurassique supérieur ; profonde et de qualité chimique très mauvaise, elle n'est donc pas exploitée.

Il existe plusieurs types de nappes dans la région :

- des nappes profondes ;
- des nappes générales.

#### 3.2.2.1 Nappes profondes

##### **i. La nappe du Crétacé inférieur**

L'observation du plongement des niveaux crétacés de la bordure occidentale des Rehamna sous les limons des Doukkala, avait fait espérer l'existence de nappes ascendantes dans la plaine. Pour vérifier cette hypothèse, trois forages ont été réalisés dans la région de Sidi Bennour et du M'Tal dans les années 50. Dans le forage 202/35 près de Sidi-Bennour, l'eau a été ascendante à 350 m de profondeur dans les calcaires néocomiens et le niveau stabilisé à 35 m sous le sol ; un essai de pompage a donné 5 l/s pour un rabattement de 10 m.

Dans le forage 285/35 à 20 km au S de Sidi- Bennour, plusieurs niveaux se sont avérés aquifères :

- à 53 m, la nappe du Plio-Quaternaire ;
- à 161 m du sol, un niveau calcaire dans la série des marnes à gypse offrait un débit de 10 l/s pour un rabattement de 4 m ;
- à 320 m de profondeur, un essai dans les couches supérieures de l'Hauterivien produisit 2 l/s pour un rabattement de 10 m ; le résidu sec à 180°C était de 2,8 g/l et le faciès chloruré sodique ;
- à 380 m enfin, un essai effectué dans les couches rouges de base de l'Hauterivien fournit 1 l/s pour un rabattement de 13 m ; le résidu sec était de 4,4 g/l.

On a conclu après ces recherches que le Crétacé n'est pas exploitable sous les Doukkala en raison de sa profondeur importante, ne permettant pas de multiplier les forages, mais surtout de sa faible productivité et de la salure des eaux qu'il contient.

## **ii. La nappe du Jurassique supérieur**

Le Jurassique supérieur n'existe que dans le Sud de la plaine et sa limite nord correspond sensiblement à une ligne joignant Youssoufia à Tnine-Gharbia. Le Plio-Quaternaire repose directement sur le Jurassique et toute l'eau infiltrée en surface percole jusqu'aux marnes de la base du Jurassique, ne laissant que de rares niveaux perchés dans le Pliocène sus-jacent.

La perméabilité du Jurassique supérieur est de type karstique. L'écoulement se fait selon une direction générale E-W ; les pertes de charge étant faibles. La profondeur de la nappe est toujours importante : 80 à 130 m au Jemaa-Sahim, 50 à 60 m à Safi. La qualité chimique de l'eau est très mauvaise, étant donné l'abondance du gypse.

En conclusion de ce paragraphe concernant les nappes profondes, on peut dire que toutes ces nappes sont ascendantes (leurs niveaux piézométriques se situent entre 40 et 50 m de profondeur) mais que la médiocrité des débits et la mauvaise qualité chimique des eaux condamne toute exploitation de ces nappes profondes dans les Doukkala.

### **3.2.2.2 Nappes générales**

Ce terme a été adopté pour bien marquer que la nappe des Doukkala n'est pas entièrement liée à un niveau stratigraphique déterminé et qu'elle ne présente pas les caractères d'une nappe phréatique classique. Sur la moitié environ de la zone intéressée (1 200 sur 1 500 km<sup>2</sup>), la nappe circule dans les calcaires plioquaternaires. Son imperméable de base n'est pas très bien défini, car le Cénomaniien présente des faciès tantôt calcaires, tantôt marneux.

La disposition structurale en cuvette et l'absence d'affleurements quaternaires en bordure des Rehamna, rendent cette nappe tributaire, tant pour son alimentation que pour ses exutoires, des niveaux crétacés ; mais l'état actuel des études ne permet pas de préciser comment s'effectuent ces abouchements de nappes.

La nappe apparaît au total comme une nappe libre profonde qui, dans certaines conditions structurales, peut être captive sous les limons, avec une charge qui reste modeste.

### **i. Gradient hydraulique**

L'allure générale de la surface piézométrique apparaît complexe dans le détail. On peut distinguer :

- un secteur amont, limité à l'isopièze 180 m, où les courbes sont parallèles entre elles et très serrées ; le gradient hydraulique est fort et diminue vers l'aval et dans la vallée de l'oued Bouchane. L'influence des facteurs structuraux sur les directions d'écoulement est très nette ; la direction générale SE-NW jusqu'à l'oued Faregh, s'infléchit ensuite pour devenir E-W, en conformité avec le changement de direction entre le monoclinale des Aounate et la flexure de Daourate ;
- un secteur central, correspondant à la zone où la nappe circule dans le Plio-Quaternaire et où trois « dorsales » S-N cloisonnent la région dans le sens transversal. L'origine de ces protubérances de la nappe apparaît liée à une surélévation de l'imperméable correspondant aux axes anticlinaux.
- un secteur aval, moins bien connu, où la nappe circule dans les niveaux crétacés sous-jacents du Plio-Quaternaire : ceci tient à la structure anticlinale de la bordure sahélienne et à l'absence d'alimentation par la surface de la plaine.

### **ii. Profondeur de la nappe**

Le caractère profond de la nappe est mis en évidence par la carte des isobathes (figure 18). Dans l'ensemble, la profondeur est supérieure à 40 m et peut atteindre 70-80 m ; dans la vallée de l'oued Faregh seulement, elle demeure inférieure à 40 m (Ferré, 1964, 1969 ; Gigout, 1952, 1955, 1956 a, 1956 b, 1965 a, 1965 b ; Hazan et Ferré, 1963 ; Rouso, 1931 ; Wilbert, 1961).

Tableau 4. Répartition des profondeurs des nappes

Profondeur	Superficie (km <sup>2</sup> )	%	% cumulé	Observations
< 30 m	35	1.5		Environ 10 km <sup>2</sup> à moins de 20 m
De 30 à 40 m	385	15.5	17	
De 40 à 50 m	490	49.5	36.5	
De 50 à 60 m	820	33	69.5	
De 60 à 70 m	530	21	90.5	
De 70 à 80 m	150	6	96,5	
De 80 à 90 m	80	3	99,5	
>90 m	10	0.5	100	

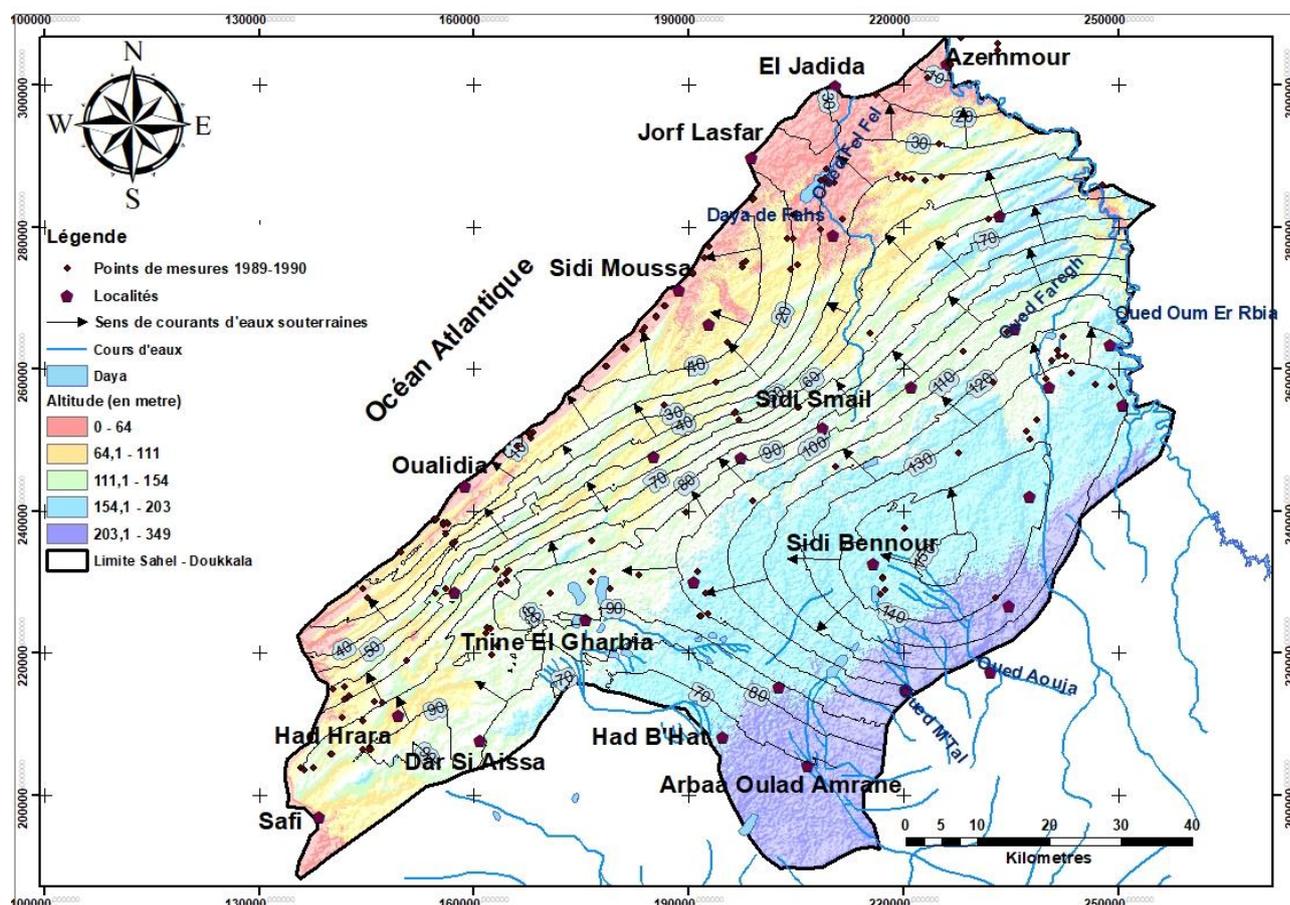


Figure 20. Carte représentative de la piézométrie moyenne 1989-1990

### **iii. Les puissances des aquifères**

En s'appuyant sur l'historique des isopaches de la région, nous remarquons que ce n'est que lorsque la nappe circule dans le Plio-Quaternaire qu'il est possible d'estimer son épaisseur. En effet, celle-ci est essentiellement comprise entre 10 et 20 m, à l'exception de deux gouttières synclinales où elle excède alors 20 m.

### **iv. Le régime de la nappe**

En 1963, le réseau de surveillance de la nappe comportait 55 puits-témoins, faisant l'objet de mesures mensuelles ce malgré leur faible densité, et homogénéité.

Il en ressort que le régime de fluctuation est beaucoup plus important en amont avec ; un minimum placé entre septembre – octobre et un maximum plus variable se répartissant de décembre à avril. Vers l'aval, les amplitudes de variation diminuent pour ne plus être sensibles dans le centre de la plaine. A l'approche du Sahel par contre, les variations annuelles redeviennent sensibles.

### **v. Alimentation et exutoires des nappes**

L'alimentation peut être due à une infiltration des eaux de pluie et d'épandage à partir de la surface de la plaine elle-même, des plateaux calcaires de bordure ou également à partir des oueds. Toutefois, au niveau de la plaine et en raison de l'absence de fluctuation annuelle de la nappe, de la présence d'une couverture limoneuse à faible perméabilité, mais aussi de la persistance de dayas à la surface de la plaine ; il convient de rejeter l'hypothèse de l'infiltration. Il existe néanmoins des infiltrations localisées, au niveau des dayas, surtout liés au réseau hydrographique.

Au niveau des calcaires du Crétacé, il y a bien infiltration, avec des modalités qui restent à déterminer.

L'apport principal est cependant celui des oueds et de leur nappe alluviale : il est continu, mais il s'y superpose une alimentation épisodique, liée aux crues des oueds et surtout aux décrues, lorsque les conditions de vitesse sont plus favorables à l'infiltration.

### 3.2.2.3 *Les nappes perchées des limons quaternaires*

Les nappes perchées sont les nappes issues de l'accumulation locale dans la partie superficielle des limons. Liées au réseau hydrographique actuel et même fossile, l'eau est contenue dans les limons alluviaux récents, dans les zones les plus sableuses. L'imperméable étant constitué par les limons anciens sous-jacents entre 2 à 10 mètres de profondeur. Ainsi, par leurs positions dans les creux des vallées, les espaces interdunaires, leur alimentation est assurée annuellement.

### 3.2.3 *Caractérisation des nappes du Sahel*

L'absence d'unité hydrogéologique caractérise le Sahel, car aucune nappe généralisée n'existe par suite de la structure des terrains. C'est pourquoi on distinguera successivement quatre régions de caractéristiques différentes et qui sont du S au N :

- le Sahel de Safi,
- le Sahel central,
- le plateau d'El-Jadida et
- le Sahel d'Haouzia.

#### 3.2.3.1 *Le Sahel de Safi*

Dans le Sahel Safi, situé dans la zone sud-ouest, les calcaires de Dridrate représentent le seul aquifère de par ses qualités hydrogéologiques. Son plancher semble imperméable et, est constitué par les argiles de Safi, tandis que les argiles supérieures sus-jacentes bloquent toute percolation vers lui. Toutefois, le Plio-Quaternaire repose directement sur les calcaires, ce qui favorise une infiltration à l'endroit de la nappe du Dridrate et, la non existence de nappe au-dessus. En effet, le calcaire de Dridrate affleure sur 220 km<sup>2</sup> et est enfoui directement sous du Plio-Quaternaire sur environ 240 km<sup>2</sup>.

En conclusion, le Sahel de Safi est pauvre en eau souterraine ; quelques structures synclinales du calcaire de Dridrate demeurent à explorer car elles sont susceptibles d'avoir accumulé quelques réserves.

### *3.2.3.2 Le Sahel central*

Situé plus au Nord, les circulations s'effectuent dans les calcaires de Dridrate avec des pertes de charge très faibles, indices d'une fissuration importante qui est confirmée par le bon rendement des forages d'exploitation.

La nappe est présente sur environ 400 km<sup>2</sup> de superficie et se met en charge du SE au NW par suite de la structure et de la présence des argiles supérieures.

Il existe dans cette région plusieurs nappes du Plio-Quaternaire. La nappe côtière (120 km<sup>2</sup> de superficie environ pour un bassin d'alimentation de près de 650 km<sup>2</sup>) est bien définie et ne s'étend pas au-delà de 3 km du rivage et la nappe du système Aïn-Rhor-Aïn-Rtem entre Tnine-Gharbia et Oualidia a un écoulement de type karstique bien caractérisé.

### *3.2.3.3 Le plateau d'El Jadida*

Situé au Nord de la précédente, on y trouve un manteau à peu près continu du Plio-Quaternaire reposant au sud, sur les calcaires et marnes du Cénomaniens. Au Nord, le Plio-Quaternaire est totalement érodé, laissant place à l'affleurement du Cénomaniens. De façon générale, des niveaux d'eau localisés ont été reconnus dans la couverture plioquaternaire, mais l'hydrogéologie de ce secteur est vraisemblablement conditionnée par le Cénomaniens. Il semblerait toutefois qu'un niveau d'eau généralisé existe dans le Cénomaniens au S avec quelques sources comme exutoires, alors qu'au N plusieurs réseaux karstiques indépendants semblent coexister en raison de l'observation de cotes très variables de l'eau dans des puits voisins.

### *3.2.3.4 Le Sahel de Haouzia*

Il s'agit ici, de la zone la plus au Nord, correspondant au synclinal de la localité d'Azemmour. Les dunes du Plioquaternaire affleurent tout en recouvrant le Crétacé inférieur et le Cénomaniens. La nappe existante est généralisée, et existe grâce aux infiltrations de la pluie dans le Plio-Quaternaire.

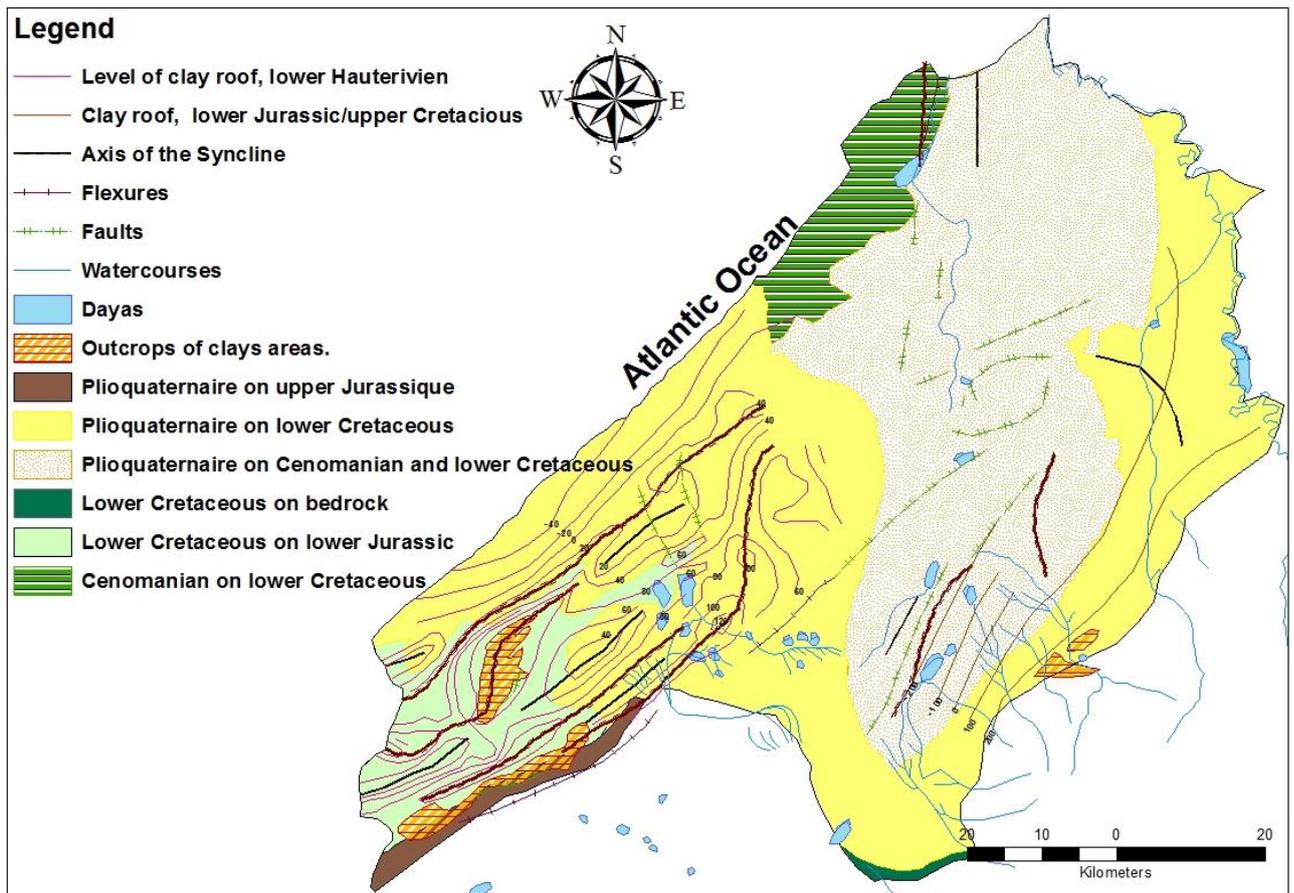


Figure 21. Aperçu des principaux niveaux aquifères du bassin Sahel-Doukkala

### 3.3 Etude du comportement piézométrique des nappes de la région du Sahel Doukkala

La connaissance des mécanismes de transit de l'eau à travers les premières tranches du sol non saturées est nécessaire pour évaluer l'alimentation des nappes superficielles par des apports de surface.

C'est donc un paramètre fondamental à introduire dans les modèles de gestion des nappes, dans le but de parvenir à des prévisions valables de leur comportement futur consécutif à diverses modifications d'exploitations envisagées.

Dans un premier temps, il convient de noter qu'il existe très peu de travaux récents publiés sur la région et un panel de données très restreint par endroit. On compte néanmoins les travaux réalisés par Younsi (2001) sur l'influence de la pluviométrie sur les aquifères côtiers dans la région de Chaouia située au nord du Sahel Doukkala ; Fadili (2015) dans l'évaluation de la minéralisation des aquifères côtiers à Oualidia pour le coup, comprise dans notre région d'étude.

Répondre aux questions relatives aux fluctuations de la nappe revient à déterminer la relation entre les eaux météorologiques, les cours d'eaux et les nappes ; les courants dits « préférentiels » aux seins des nappes, les prélèvements anthropiques auxquels les nappes peuvent être sujettes pour des raisons variées.

### 3.3.1 Matériels et méthodes

La collecte de données piézométriques est un travail qui se veut minutieux. Dans un premier temps, nous avons procédé par la recherche et la sélection de points sur une base de données disponibles. Il s'en suit, la campagne de terrain de terrain ; munie d'une sonde piézométrique, d'un GPS et de l'équipement nécessaire pour la logistique. Enfin, l'étude expérimentale permettant l'interprétation des données.

#### 3.3.1.1 Recherche et mesure des points

Environ une centaine de points valides ont été sélectionnés et répartis de manière à uniformiser la région sur une densité d'un point minimum par 100 km<sup>2</sup>. On distingue deux types d'ouvrages : les puits, de diamètres larges et peu profonds, et des forages / piézomètres.

#### 3.3.1.2 Campagne de mesures

Les campagnes de mesures ont lieu dans de courts délais, afin de limiter les erreurs dues aux changements brusques. L'idée est d'effectuer les mesures sous les mêmes conditions pour éviter les changements liés à la pluviométrie, et d'autres variations de la pression d'eaux liées à un pompage excessif.

Ainsi, sur une période de 7 jours, nous avons réunis plus de 100 valeurs.

A chacun des points, nous avons procédé à :

- la vérification ou modification si nécessaire, de la localisation de l'ouvrage ;
- le report de mesures et des observations sur la feuille de terrain ;
- la mesure du niveau statique de la nappe ;
- ainsi celle de l'altitude du point mesuré.

Ce protocole permet une mise à jour de données, ce qui garantit un contrôle permanent.

$$H_p = Z - H_z \quad (2)$$

Avec ;

$H_p$  : correspondant à la hauteur piézométrique (en m)

$Z$  : l'altitude au point de mesure (en m)

$H_z$  : la profondeur du toit de la nappe (en m)

### 3.3.1.3 Procédé expérimental

Les données sont traitées à l'aide de l'interpolation spatiale. C'est une méthode mathématique qui nous permet d'assigner des valeurs à un espace non mesuré à partir des zones évaluées. Utilisée dans de nombreuses études (Lu et Wong, 2008 ; Creutin et Obled, 1982), nous avons appliqué l'outil géostatistique, notamment le krigeage (Matheron 1971), dans le but d'établir la carte représentative des niveaux piézométriques. D'autre part, l>IDW (inverse distance weighting) pour les estimations plus locales.

### 3.3.2 Résultats et discussion

Comprendre le comportement hydrodynamique revient à déterminer les fluctuations piézométriques. Dans cette optique, les mesures de pressions d'eaux effectuées en décembre 2015 vont servir de référence qui permettrait de comprendre la dynamique des toits de nappes.

#### 3.3.2.1 Piézométrie de Décembre 2015

Elle décrit la vision ponctuelle de la nappe en décembre (figure 20). Son utilité réside dans :

- la réalisation de la carte piézométrique de décembre 2015 ;
- la déduction du sens de l'écoulement ;
- l'interprétation des géométries de courbes, pouvant nous renseigner davantage sur la nappe.

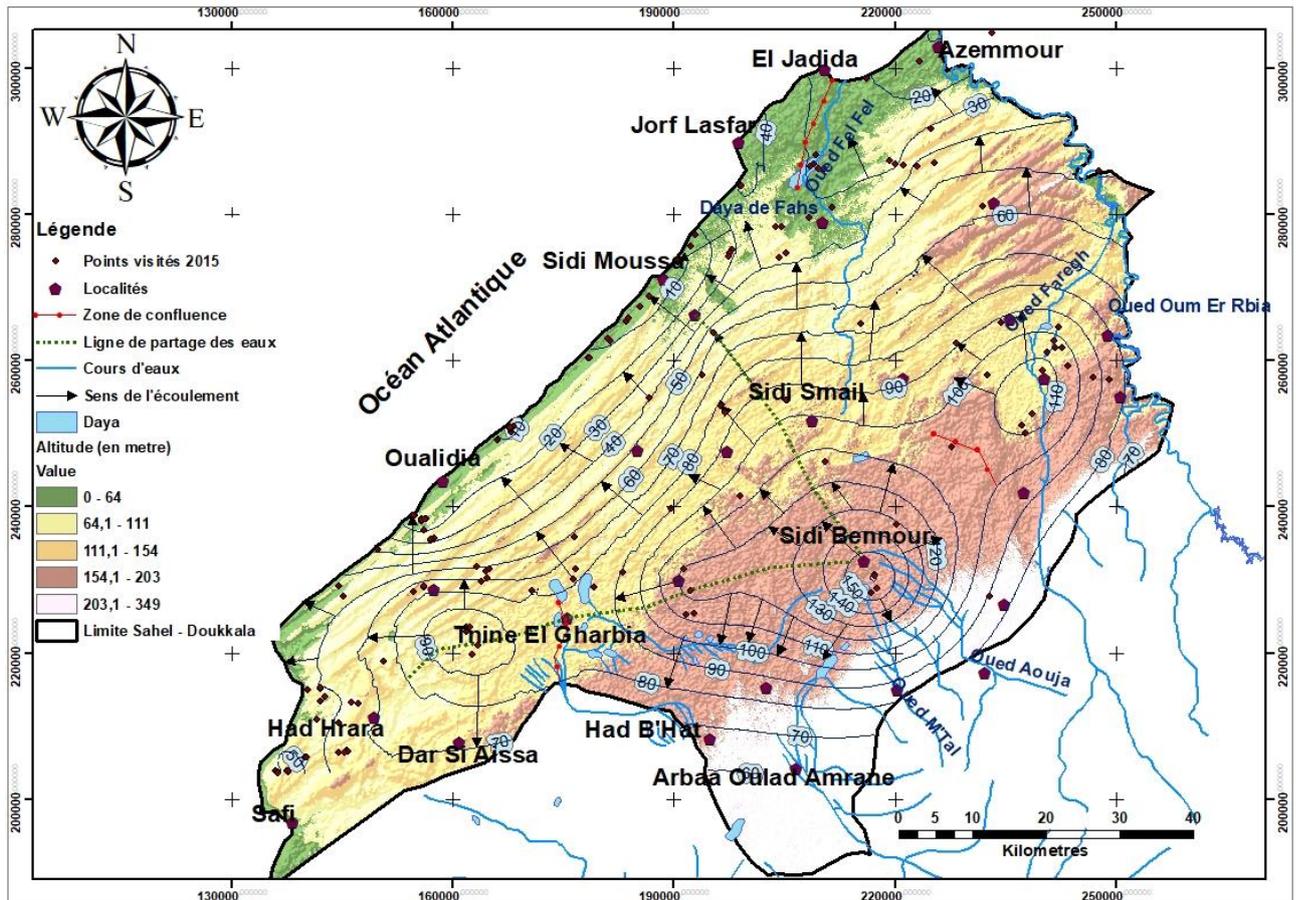


Figure 22. Carte représentative des mesures piézométriques sur fond modèle numérique de terrain (MNT) en décembre 2015

Dans un premier temps, on note la diversité des écoulements souterrains. En effet, les écoulements semblent beaucoup plus diffus dans les Doukkala situé en amont, que dans le Sahel (aval). A la limite Nord Est, ils longent l’oued Oum Er R’bia (Nord), tandis partout ailleurs ; les courants sont orientés vers le Nord-Ouest.

En deuxième lieu, les écarts de courbes piézométriques sont réguliers dans les Doukkala, avant de se resserrer considérablement dans le Sahel. Il témoigne un changement de gradient hydraulique, pouvant se traduire du fait du changement de la géomorphologie et, de la capacité de l’aquifère à mobiliser l’eau qu’il contient. En effet, les apports coteaux des eaux météoriques, concentrent celles-ci au niveau des espaces interdunaires favorisant ou pas la prolifération des dayas selon les caractéristiques hydrodynamiques du sol (Ekouele Mbaki, 2016).

Selon les sites, nous distinguons des continuités linéaires avec des flux rectilignes et parallèles, traduisant un flux relativement uniforme. Les concavités définissent les axes de drainages privilégiés tandis que les courbes fermées représentent les dômes piézométriques ou lignes de partages des eaux.

**Tableau 5. Tableau récapitulatif des gradients hydrauliques dans la région**

<b>Plioquaternaire sur Crétacé</b>			
Localisation	Limite Est (Rehamna)	Limite Sud Est (Mouissate)	Centre (Zemamra)
Direction du courant	Nord Nord Est	Ouest et Sud Ouest	Nord Ouest
Gradient hydraulique ( $\Delta H$ %)	$0,12 < \Delta H \leq 0,16$	$0,13 < \Delta H < 0,2$	$0,2 < \Delta H < 1$
<b>Plioquaternaire sur Cénomanien et le Crétacé inférieur</b>			
Localisation	Limite Est (Rehamna)	Limite Sud Est (Mouissate)	Centre (Zemamra)
Direction du courant	Nord et Nord Est	Ouest et Sud Ouest	Nord
Gradient hydraulique ( $\Delta H$ %)	$0,07 < \Delta H \leq 0,2$	$0,13 < \Delta H < 0,16$	$0,07 < \Delta H < 1,7$
<b>Plioquaternaire sur Cénomanien et Crétacé inférieur</b>			
Localisation	-	Centre (Had Hrara)	Zone Nord
Direction du courant	Nord et Nord Est	Ouest et Sud Ouest	Nord Ouest
Gradient hydraulique ( $\Delta H$ %)	Non- appliqué	$0,11 < \Delta H < 0,3$	$0,14 < \Delta H < 0,43$
<b>Cenomanien sur Crétacé inférieur</b>			
Localisation	Zone sud (Sidi Moussa)	Centre (Had Hrara)	Zone Sud (Sidi Moussa)
Direction du courant	Nord et Nord Est	Ouest et Sud Ouest	Nord Ouest
Gradient hydraulique ( $\Delta H$ %)	$0,09 < \Delta H < 1,3$	Non- appliqué	$0,14 < \Delta H < 0,4$

Les valeurs des gradients obtenues par les systèmes aquifères sont inférieures à 2%. Suivant l'équation de débit de Darcy (1856), appliqué au flux des eaux souterraines.

$$Q = K.A.i \quad (3)$$

$$\text{Où } i = \frac{\Delta h}{L} \quad (4)$$

On peut donc déduire que le gradient hydraulique  $i$  (équation 3) traduit un bon écoulement de l'eau souterraine. En effet, nous avons trouvé des cours d'eau temporaires qui rechargent l'eau souterraine

pendant les périodes sèches, aidés par la géomorphologie (plateau plus ou moins irrégulier) ainsi que par la nature des roches et des couches de limon récents.

Tout semble nous indiquer qu'il existe une continuité dans les écoulements des eaux souterraines dans la région de Doukkala, du Sahel malgré la répartition spatiale des zones non saturées. De la limite Est des Doukkala (formations de Plioquaternaire sur le Crétacé inférieur) les flux sont orientés vers le Nord-Est (Crétacé inférieur sur le Jurassique supérieur) en passant par la formation du Plioquaternaire sur le Cénomaniens et le Crétacé inférieur.

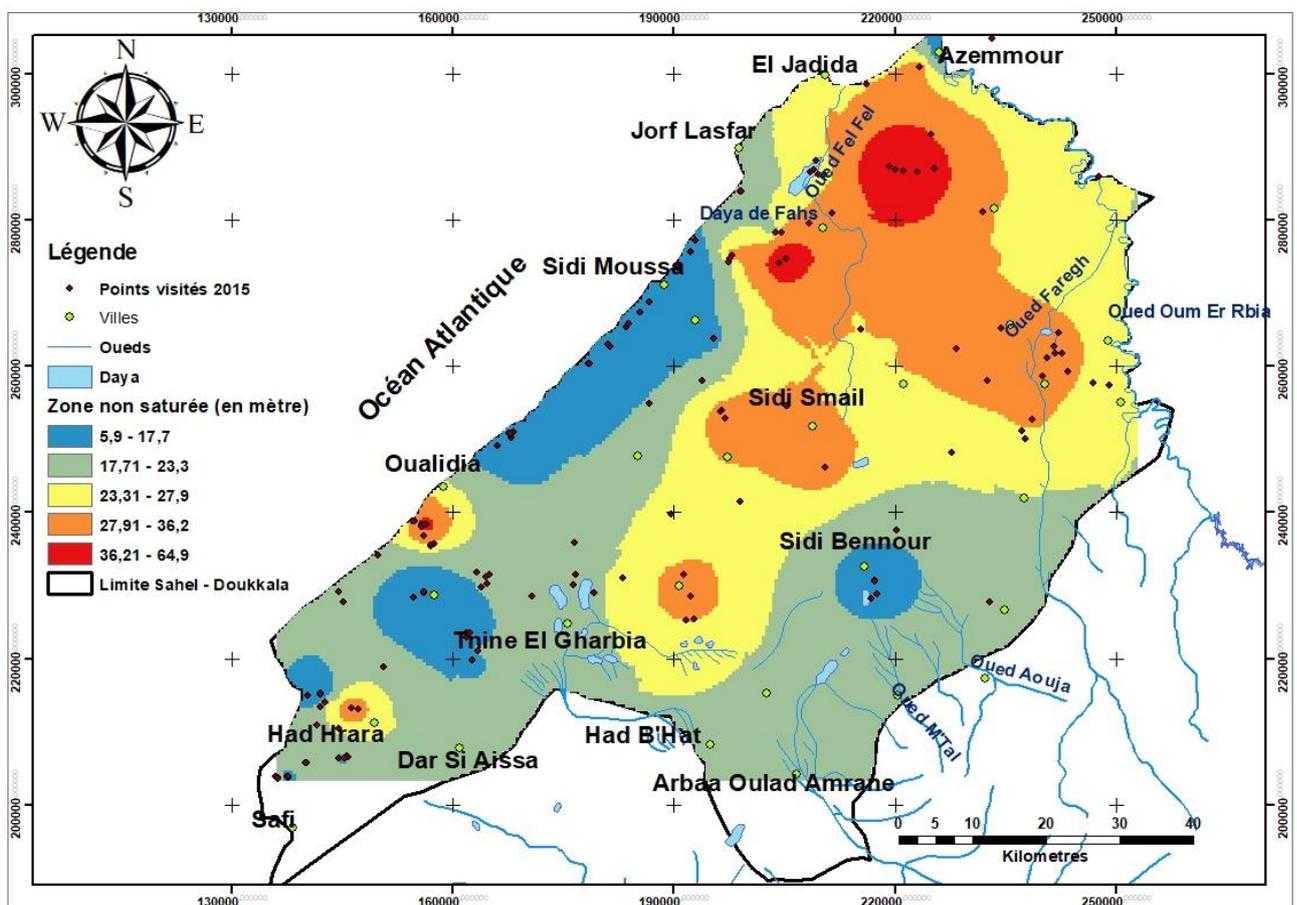


Figure 23. Carte de répartition des zones non saturées de la région du Sahel Doukkala (d'après la prospection de Décembre 2015)

Les zones non saturées les moins puissantes se situent le long du littoral ainsi que les thalwegs presque actifs (Sidi Bennour au Sud de Thine El Gharbia et des deux côtés de l'Oued Oum Er R'bia). Ces régions montrent une stabilité du type d'écoulement et d'orientation dans les eaux souterraines (figure 21).

D'autre part, nous avons essentiellement au centre de la région, des eaux souterraines situées à plus 25 mètres de profondeur, atteignant parfois les 70 mètres. Les prospections nous ont permis de remarquer la présence d'un réseau karstique (au sud, près de Safi), alternant de très près, des puits actifs et des puits vides, alors que le limon forme presque toute la couche superficielle des Doukkala.

### *3.3.2.2 Analyse et comparaison des données historiques.*

Les résultats nous ont permis de déterminer la direction de l'écoulement ainsi que le gradient hydraulique en certains points. Nous avons commencé à partir de données discrètes pour établir via l'outil géostatistique le reste des données sur l'ensemble de la zone étudiée, ceci malgré sa superficie. Il semble que pendant la saison hydrologique, nous avons une succession de phase influençant l'eau souterraine ; ce qui nous permet d'observer la variation de la pression de l'eau sur chacun des piézomètres. En plus de cela, nous avons les changements anthropiques causés par le pompage ainsi que le retour d'eau dû à l'infiltration et la percolation.

Avec l'historique des pluies et la mesure piézométrique, nous avons pu étudier les différentes fluctuations de l'eau souterraine pour bien comprendre sa fonction.

#### **i. Les précipitations**

La pluviométrie de la région du Sahel Doukkala obéit à la même loi que celle du bassin versant dans son ensemble. En effet, la pluviométrie joue un rôle majeur dans la recharge des nappes aquifères (Bear, 1979) ; et Sophocleous (1991) a suggéré une méthode de modélisation simple pour obtenir la recharge à partir des enregistrements de précipitations, de l'analyse du bilan hydrique, de la zone vadose et des fluctuations des puits.

Les valeurs moyennes mensuelles ont été obtenues à partir des mesures de plus de 30 stations entre 1989 et 2011 pour l'ensemble du bassin d'oued Oum Er R'bia et les mesures historiques sur 39 ans environs dans le Sahel-Doukkala.

On voit à travers la figure 5 ; que les valeurs moyennes de l'ensemble du bassin sont nettement supérieures à celles de la région du Sahel Doukkala. La pluviométrie baisse à mesure que l'on approche de l'océan ; de l'amont vers l'aval, au même titre que l'altimétrie.

Cependant, deux pics se distinguent ; d'abord celui du Sahel Doukkala en décembre et le pic correspondant à l'ensemble du bassin versant se situant en janvier. Cela nous permet de dire qu'à partir du mois de décembre, la pluviométrie dans la région du Sahel Doukkala atteint son pic et ; les rivières permanentes qui s'y trouvent, se réalimentent à l'aide des pluies de l'Est.

Dans le but de comprendre le fonctionnement hydrodynamique de la région, nous avons ainsi, divisé l'année en deux grandes périodes :

- celle allant de septembre à février et,
- une autre période allant de mars à aout.

Avec le mois de février correspondant au temps de réponse de l'eau souterraine (2 mois environ) selon les travaux réalisés par Younsi (2001).

*Tableau 6. Historique des précipitations dans le Sahel - Doukkala de 1990 à 2002*

Hydrological years	Number of stations	Average annual rainfall (mm)	Min (mm)	Max (mm)
1990-1991	10	281,55	114,6	480,7
1991-1992	24	110,77	30,4	269
1992-1993	24	130,35	33	246,6
1993-1994	24	327	133,6	506,5
1994-1995	23	121,39	71,5	165
1995-1996	23	553,735	30	911,3
1996-1997	23	482,58	187,2	687,2
1997-1998	23	256,504	53,9	414,5
1998-1999	23	164,169	97	291
1999-2000	23	202,3956	132,5	327,6
2000-2001	23	138,087	74,9	255,3
2001-2002	9	237,22	150,5	327,8

L'historique de la pluviométrie de la région est d'une importance capitale en ce sens où elle nous permet, d'étudier les fluctuations de la nappe. En effet, de 1990 à 2002, les moyennes annuelles relevées à partir

de plus d'une vingtaine de stations nous permettent de distinguer les saisons fortement pluvieuses de celles qui ne le sont pas dans le but d'obtenir les valeurs maximales de rabattement et d'établir des plans de gestion efficaces.

Il nous permet ainsi de notifier que sur la douzaine d'années enregistrées ; 1991-1992 est la période la plus sèche avec en moyenne 110,77 mm annuelle, contre 553,73 mm enregistrés entre septembre 1995 et aout 1996 sur 24 stations.

## **ii. Etude comparative des zones non saturées**

Comprise entre la surface du sol et celle de la nappe libre, la zone non saturée constitue un tampon crucial pour le transport des eaux, mais aussi celui des divers polluants. La vulnérabilité des aquifères et le risque de pollution dépendent de la structure et de l'importance de cette zone.

L'efficacité de la prévention contre une éventuelle pollution par l'utilisation d'un modèle dépend de ce dernier. C'est une étape qui, à son tour, repose sur une connaissance approfondie du système. En effet, la zone non saturée présente deux aspects majeurs en matière de transfert :

- le stockage de l'eau et des substances dissoutes et,
- le drainage profond de la fraction mobile d'eau ou de substances toxiques conditionnant la recharge des aquifères.

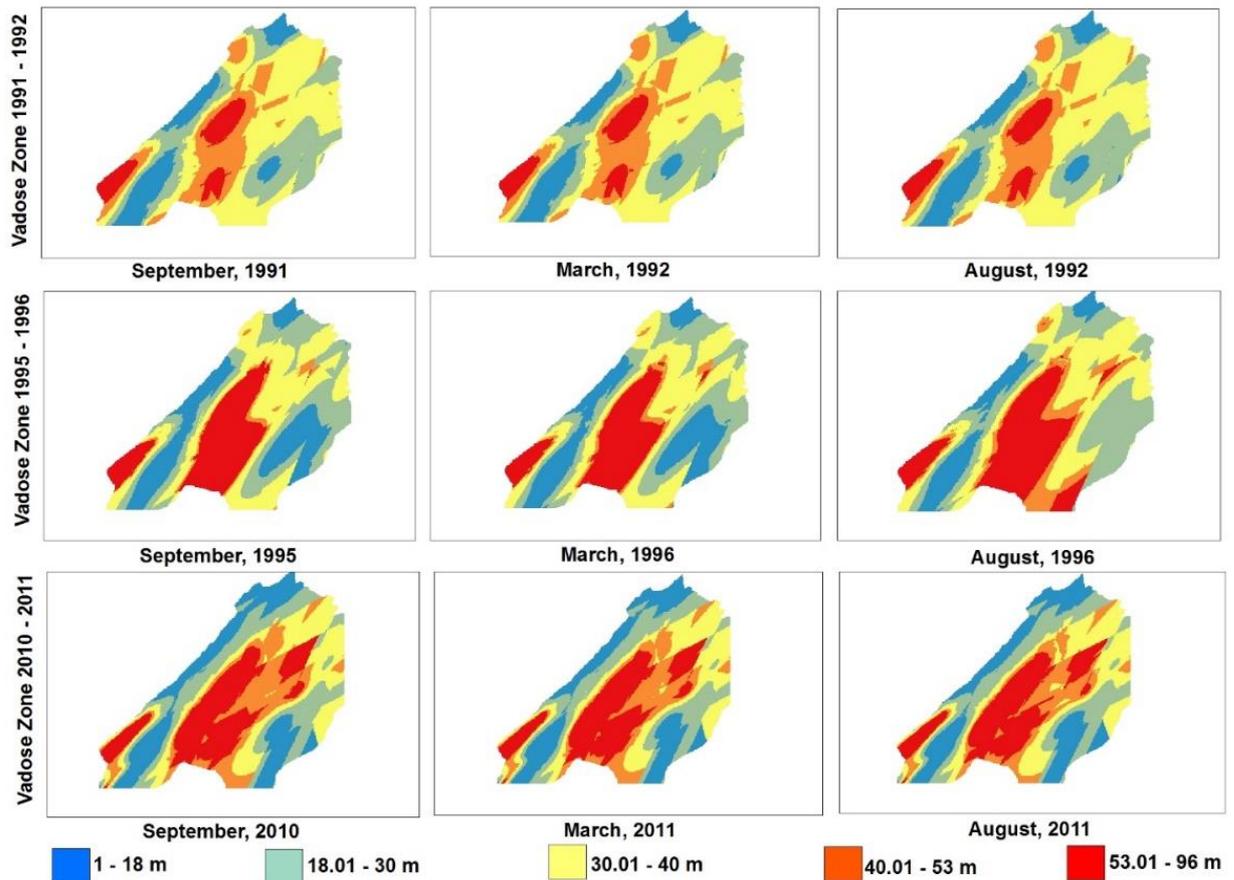


Figure 24. Cartes représentatives des zones non saturées sur 3 années spécifiques (1991 – 1992 ; 1995 – 1996 ; 2010 – 2011) de la région du Sahel Doukkala

On sait que la différence entre les saisons se résume par la pluviométrie. Sur les trois années sélectionnées, la tendance veut les zones non saturées soient plus épaisses au centre et au contraire ; moins épaisses autour.

En ce qui concerne les années, on remarque que la répartition spatiale est quasi identique. En effet, de septembre à aout, sur chaque année, la tendance est la même. Cela témoigne un certain équilibre sur les entrées et les sorties qu'il s'agisse de la saison la plus pluvieuse à la saison en défaut de pluie.

Toutefois, si l'on compare entre les années, on trouve une grande différence sur les répartitions spatiales des zones non saturées. Certaines gagnent en superficies, tandis que d'autres tendent à diminuer ; voire disparaître.

Pour comprendre ces différentes variations, nous avons effectué des analyses par années traduites par les graphes suivants :

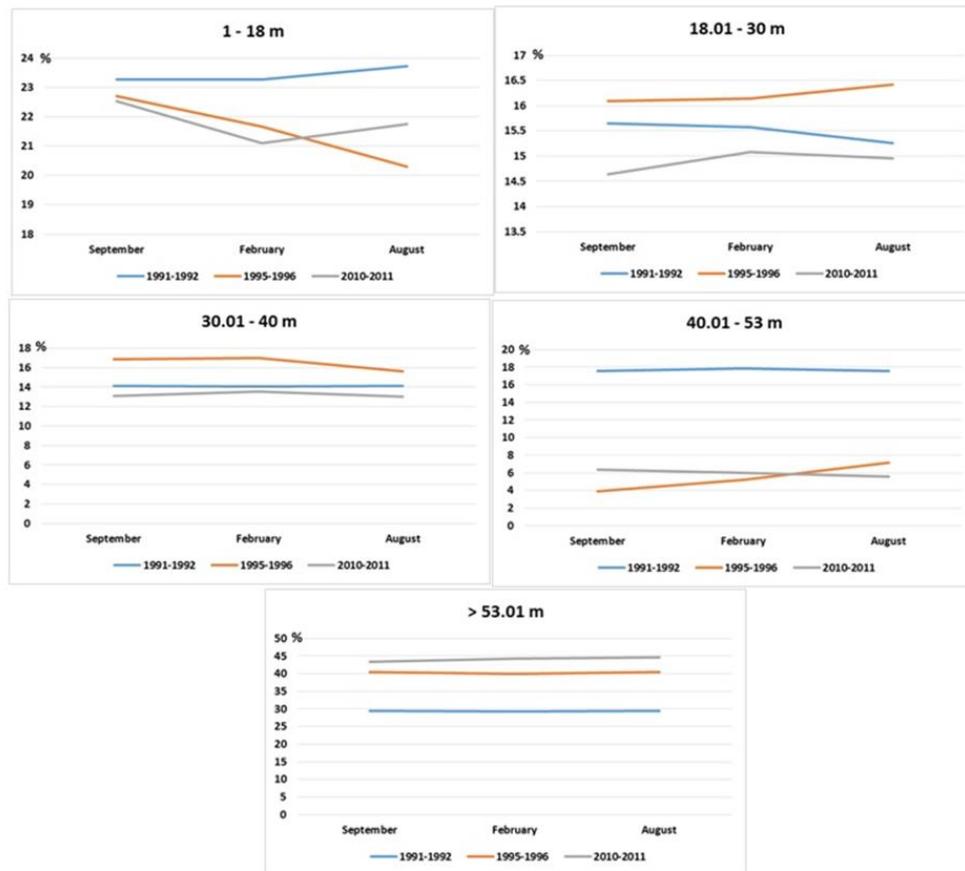


Figure 25. Répartition spatiale des zones non saturées en fonction de la profondeur dans le Sahel Doukkala

Tout d'abord, il faut remarquer l'évolution croissante des zones non saturées de plus de 53 mètres de puissance. Relativement faible entre 1991 et 1992, occupant 30 % de la région, elle augmente à mesure que l'on avance dans le temps atteignant presque les 45 %.

Par ailleurs, les variations qui concernent les tranches inférieures évoluent dans les deux sens. A titre d'exemple, les intervalles de 18 à 30 m de profondeurs et celles de 30 à 40 augmentent respectivement de 5.13% et 21,48% entre 1995 et 1996, avant de passer à 7,92 % pour le premier et une légère diminution pour le second (20,6 %) en 2011.

Toutes ces variations peuvent se traduire par :

- la poussée démographique ; en effet, avec un taux d'accroissement de 2.02 % de 1960 à aujourd'hui, dont 3,46 % pour la population urbaine contre 0,98 % pour la population rurale selon l'office régional de la mise en valeur agricole des Doukkala (2009),

- les activités agricoles sur plus de 35000 ha, justifiant la présence de plusieurs ouvrages de captage (puits et forages),
- les industries, situées le long du littorale, ayant pour principale source ; les eaux souterraines
- le climat semi-aride ne facilitant pas grandement le bilan hydrique.

### 3.3.2.3 *Revue historique des mesures piézométriques*

Une estimation précise d'une recharge artificielle est très importante pour la bonne gestion du système d'eau souterraine. Il existe différentes approches pour l'estimation d'une recharge artificielle ; Entre autres, celui basé sur les données sur le niveau des eaux souterraines (Simmers 1988, 1997; Sharma 1989 ; Lerner et al., 1990 et Scanlon et al., 2002).

Les changements sur divers niveaux d'eau souterraine peuvent être considérés comme une recharge ou un écoulement ; recharge lorsque le niveau augmente malgré les courants existants etc et perte ou simplement écoulement voire pompage excessif, lors des baisses de niveau piézométrique.

Considérant l'évaporation ou non ; deux équations ont été établies :

$$R = \Delta S^{gw} + Q^{hf} + ET^{gw} + Q^{gwoff} + Q^{gwon} \quad (5)$$

Où R est le coefficient de recharge  $\Delta S^{gw}$  la variation de stockage,  $Q^{hf}$  la limite de base,  $ET^{gw}$  l'évapotranspiration et  $Q^{gwoff}, Q^{gwon}$ , le flux d'eau incluant les pompages.

Tous les termes sont exprimés en taux.

$$R = S_y \left( \frac{dh}{dt} \right) = S_y \left( \frac{\Delta h}{\Delta t} \right) \quad (6)$$

En ce qui concerne cette équation ci-dessus,  $S_y$  représente le coefficient de rendement spécifique, h la hauteur de la nappe et t le temps.

L'élévation du niveau piézométrique débute pendant la phase descendante de la pluviométrie ; juste peu après le pic. Pour une estimation de la recharge nette,  $\Delta h$  est la différence entre deux mesures (la deuxième et la première).

Cette méthode a été appliquée depuis 1920 (Meinzer 1923, Meinzer et Stearns 1929). Depuis lors, la méthode a été appliquée dans diverses études (Rasmussen et Andreassen 1959 Gerhart 1986 et Hall et Risser 1993).

Sur la base des années précédemment choisies, nous obtenons la cartographie de l'amplitude de la fluctuation sur les périodes de haute eau (HE) mais aussi celle des basses eau (BE).

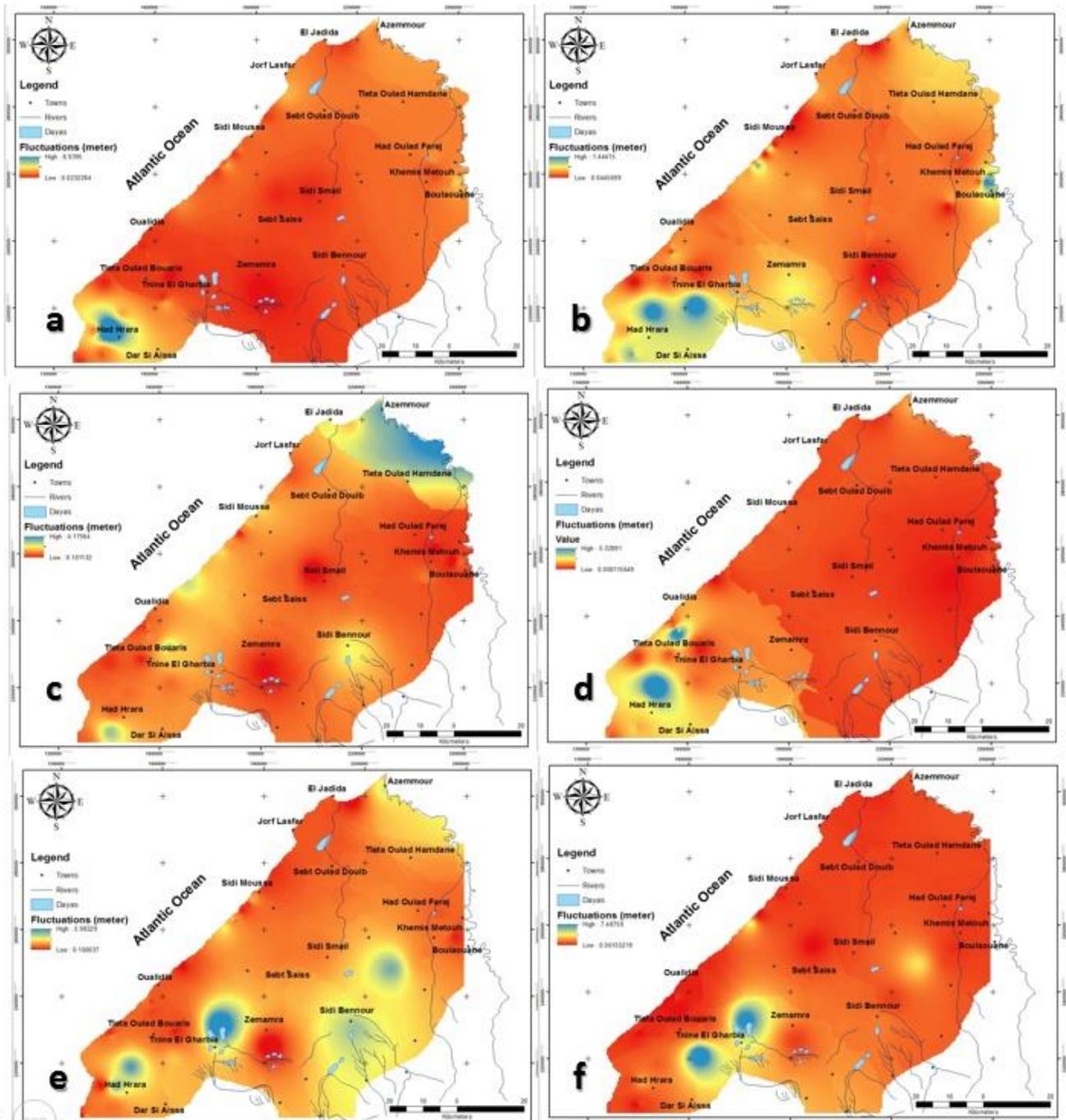


Figure 26. Représentation cartographique des fluctuations piézométriques globales (HE-BE) dans la région pendant 3 années distinctes (1991-1992, 1995-1996, 2010-2011) dans le Sahel Doukkala

A partir de la figure 23, a, c et e ; correspondent aux variations enregistrées pendant la période ascendante d'eau (septembre à février), b, d et f quant à eux ; sont des données enregistrées de mars à août couvrant jusqu'à l'été. Les mesures de 1991 à 1992 correspondent à a et b alors que celles de 1995 à 1996 correspondent à c, d et que d, f sont de 2010 à 2011.

Compte tenu de ces résultats, on constate clairement que la région est uniforme malgré quelques différences. Les faiblesses des puits / forage sont plus marquées au centre de la région (Zemamra, Sidi Smail, Tleta Oulad Bouaris).

Toutefois, les différences résident dans les années, en raison de la pluviométrie variable qui influence sur l'infiltration dans la région. Ainsi, nous notons que les périodes de basse eau ont de faibles fluctuations tandis qu'à haute eau, elles sont plus élevées. Les fluctuations sont plus faibles au centre de la région, entre les localités telles que Zemamra, Sidi Smail, Tleta Oulad Bouaris en raison des zones de confluences des eaux souterraines présentes en ces endroits.

Sur les années par ailleurs, en raison des moyennes de pluviométrie ; l'influence n'est pas la même. En effet, pendant les périodes sèches ; nous observons de faibles fluctuations et, qui croissent lors des hautes eaux.

#### *3.3.2.4 Régime des niveaux piézométriques*

Il est clair que jusqu'à présent il a été question de différencier les zones en fonction des fluctuations enregistrées. Cette analyse spatiale a révélé entre autres ; les zones en fonction des profondeurs piézométriques. A partir de cette distribution spatiale, nous nous sommes intéressés davantage à certains puits ou forages pour avoir une idée de la limite maximale afin de déduire la variation de stockage de tous les aquifères (figure 25).

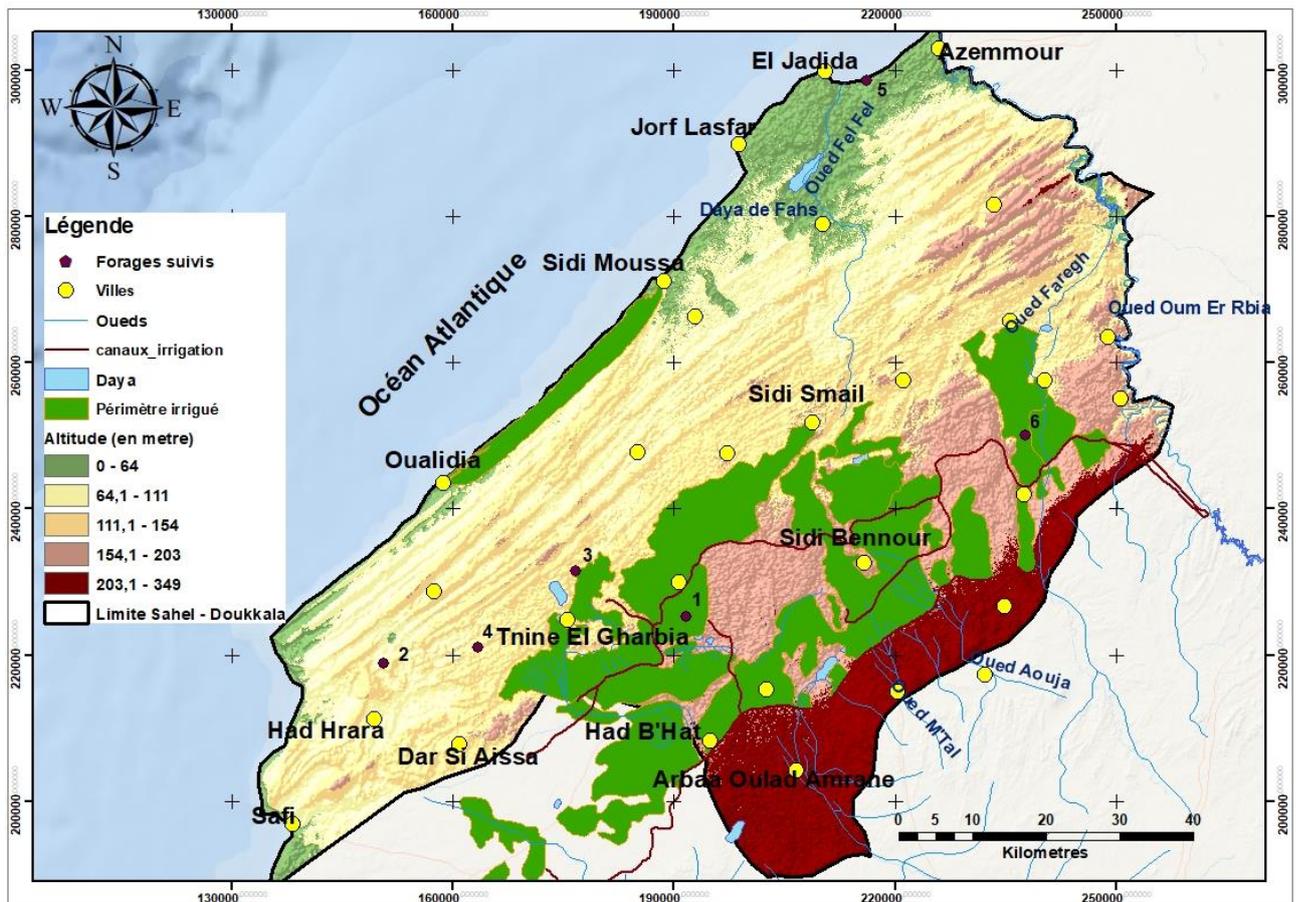
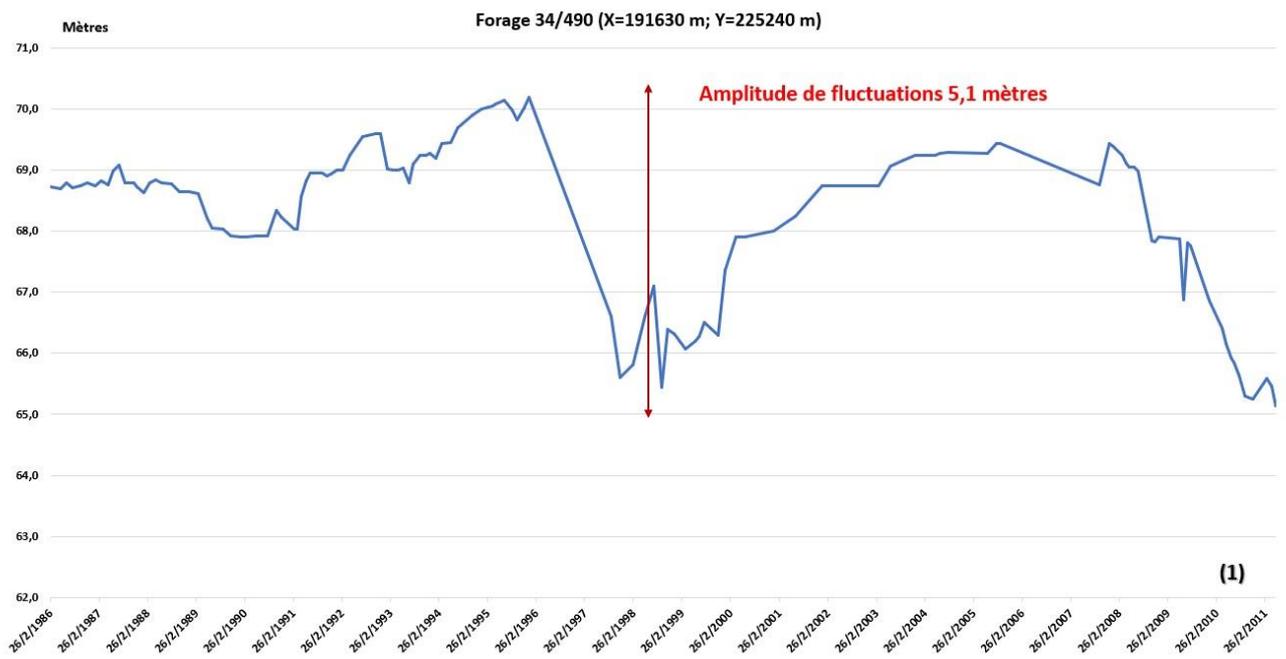
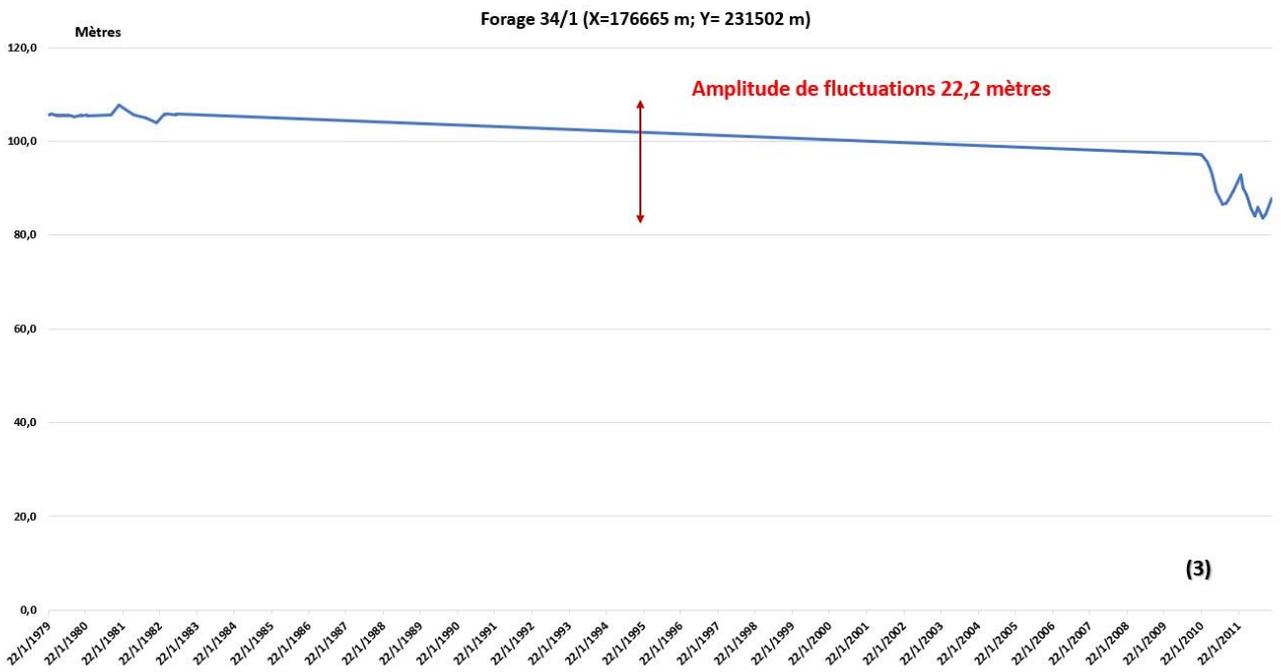
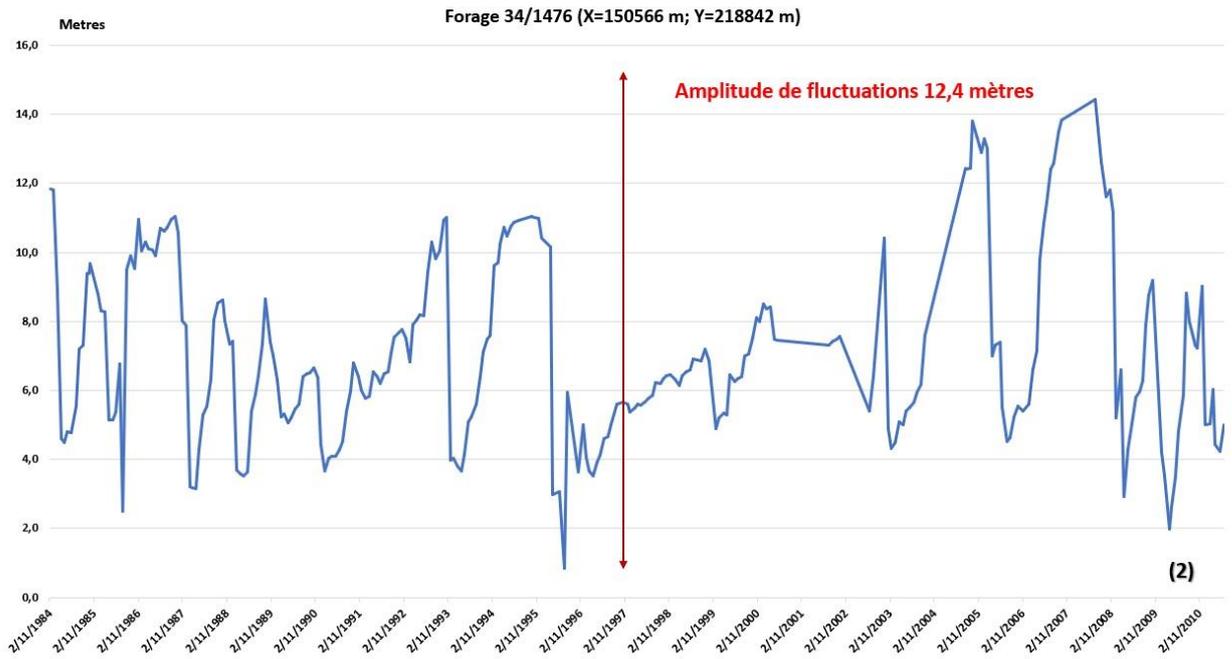
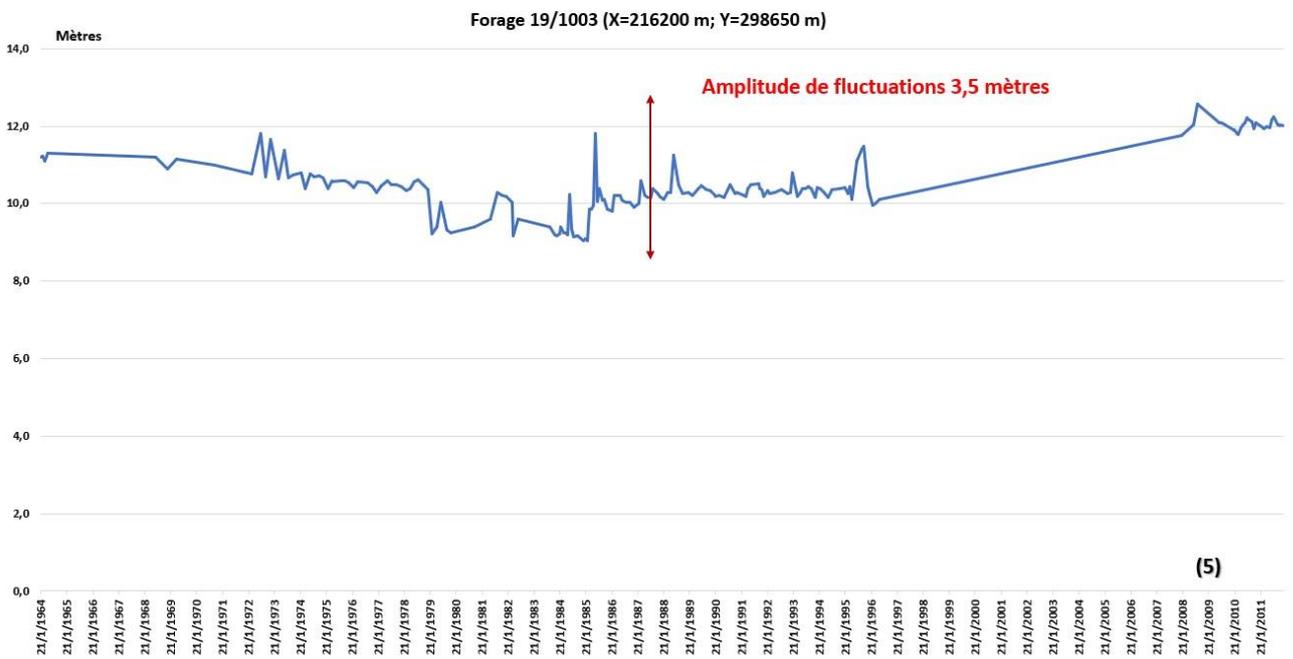
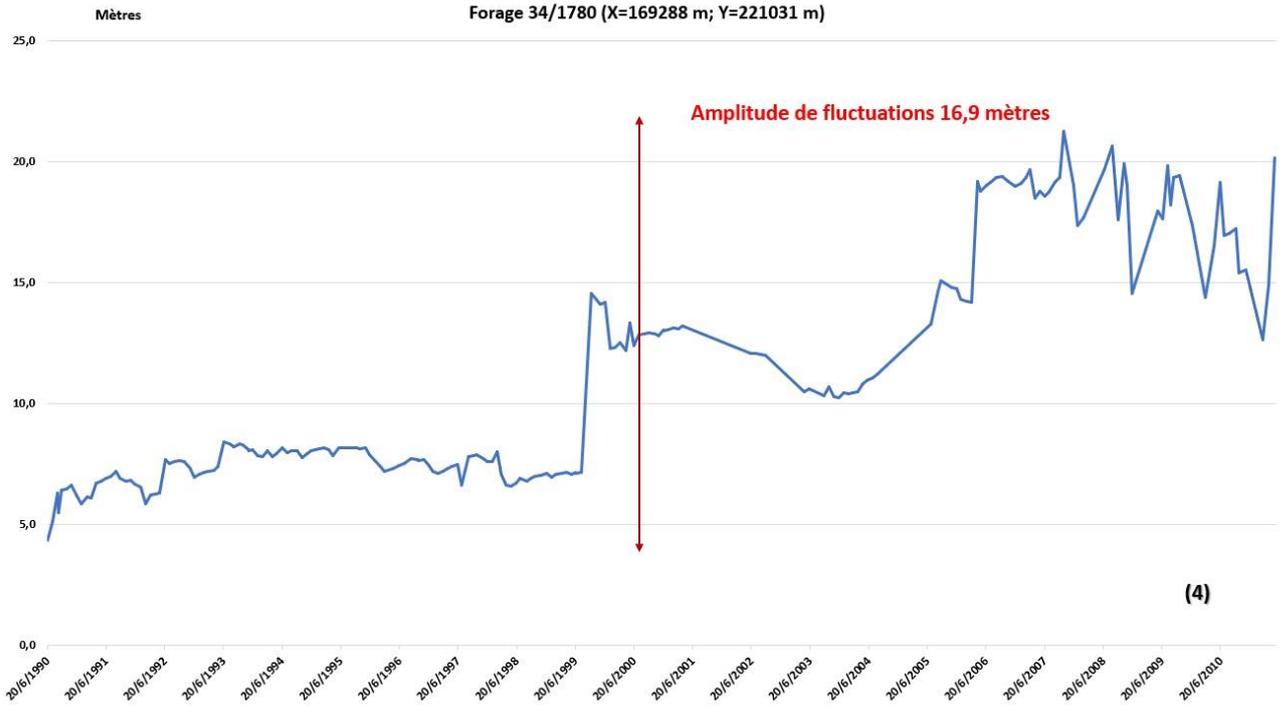
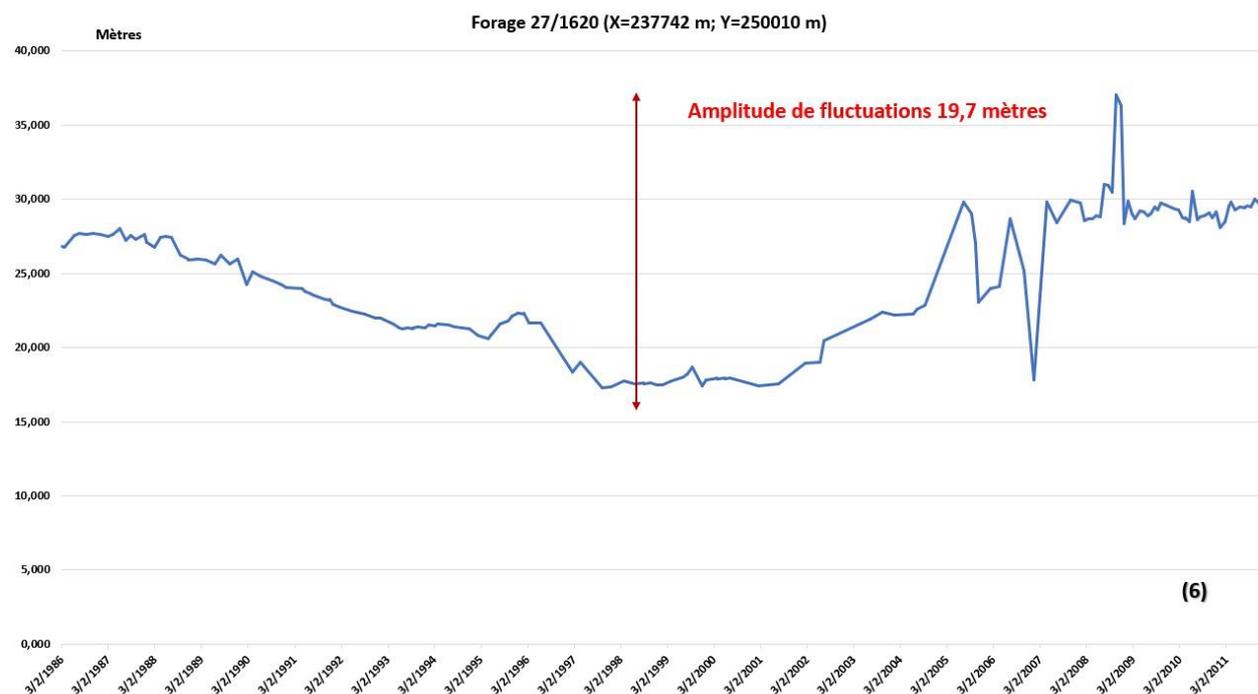


Figure 27. Carte représentative de la situation des points d'eaux évalués









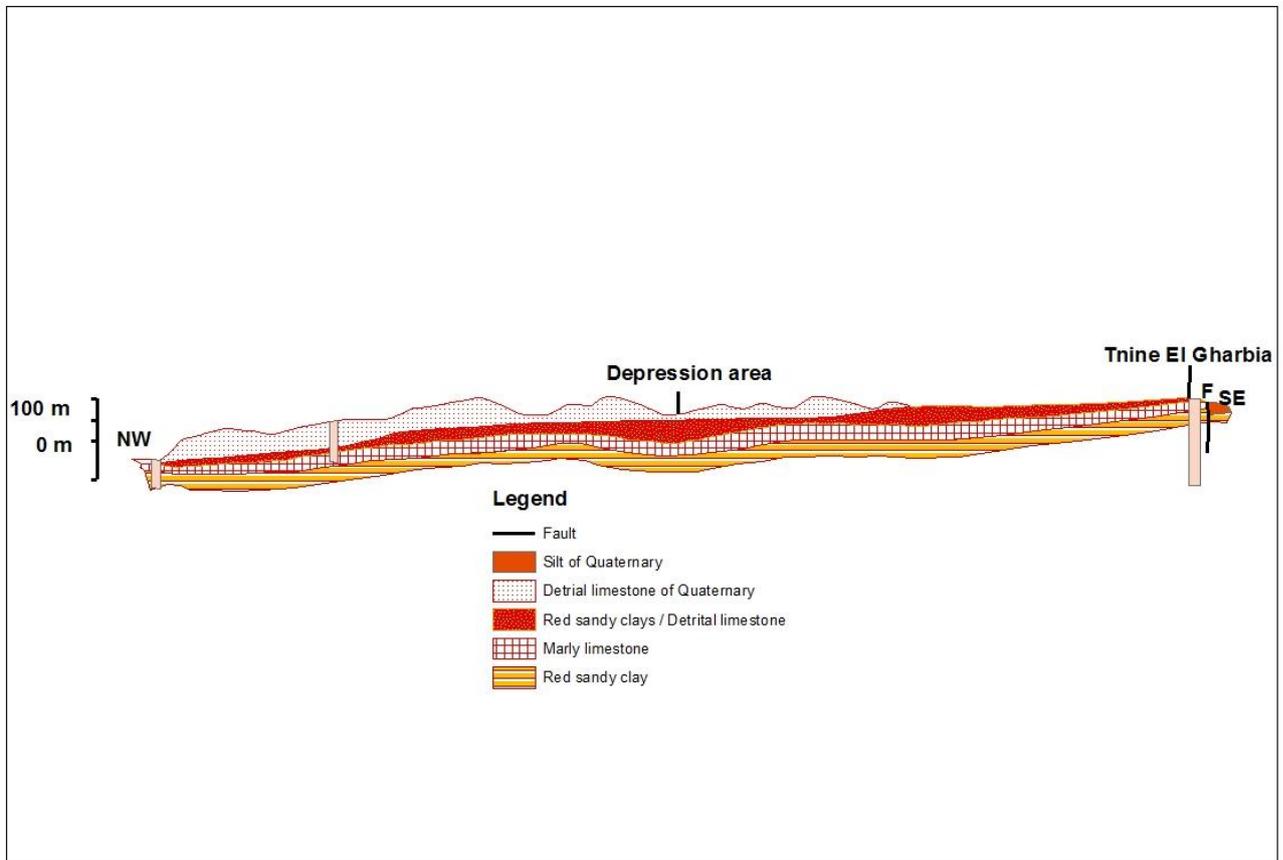
**Figure 28. Carte illustrative des historiques piézométriques des points de mesures (1,2,3,4,5 et 6) dans le Sahel Doukkala**

Tout comme les travaux réalisés par Moon et al., (2004), nous avons établis les graphes de l'historique des mesures. Hautement représentatifs des zones aux valeurs de fluctuations extrêmes, les puits situés en amont se distinguent fortement des puits/forage en aval. Cette différence notable est d'autant plus frappante du fait des répartitions des zones saturées.

Pour les zones non saturées puissantes (notamment au centre), les fluctuations n'excèdent pas, ou très peu 5 mètres tandis qu'en aval, pour les faibles puissances de zones non saturées, on trouve de fortes fluctuations atteignant les 16 mètres.

Cela nous laisse supposer la présence des nappes captives, d'un réseau karstique en amont, en raison d'un rabattement plus ou moins constant même en période d'étiage. Les nappes situées dans le Sahel, témoignent d'étroites relations avec les eaux issues de la pluviométrie.

Afin de comprendre les résultats précédents, nous avons réalisé deux profils géologiques à partir des données géophysiques et des travaux de Choubert (1995, 1996). Ces profils sont une représentation symbolique portant certains des points de mesures.



*Figure 29. Extrait de la coupe géologique à travers le Sahel (tiré de Ressources en eau Tome 2)*

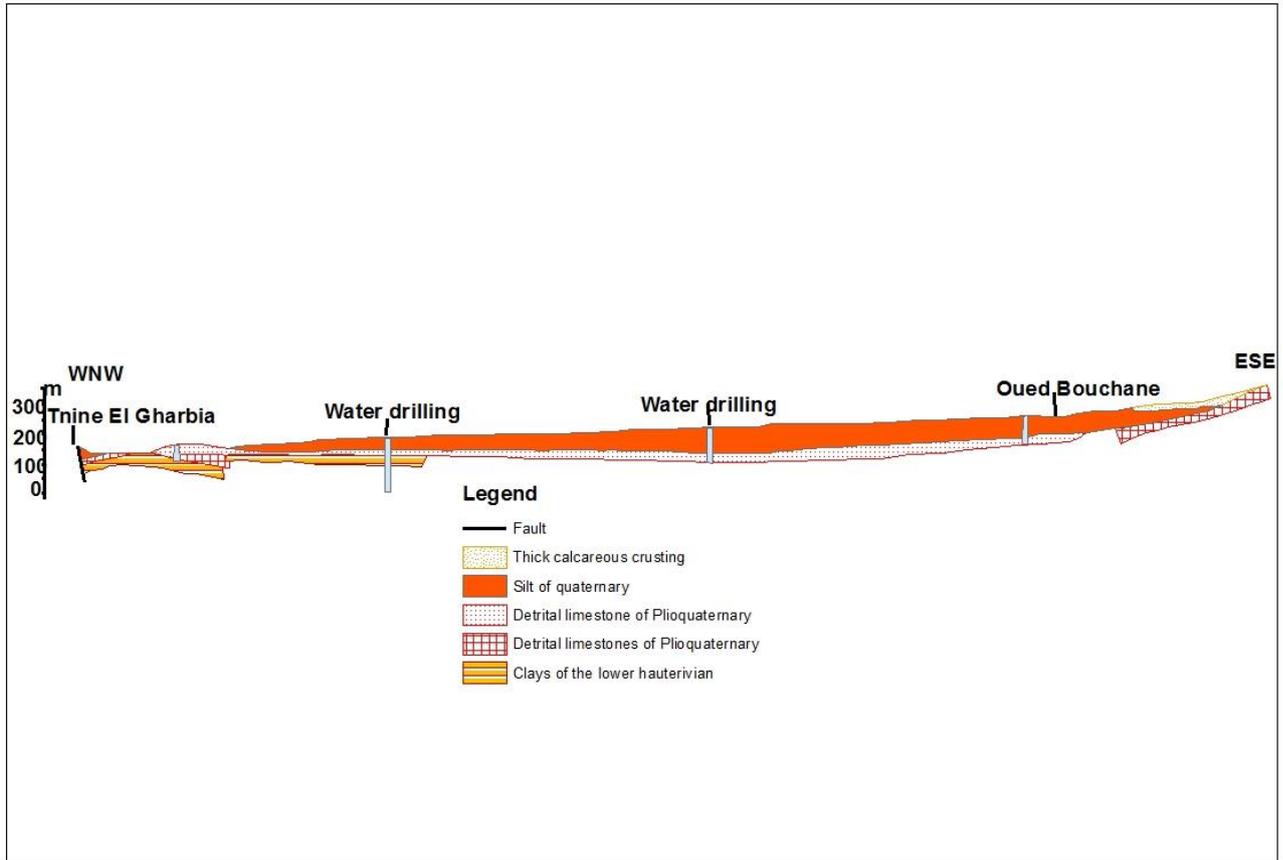


Figure 30. Extrait de la coupe géologique à travers les Doukkala (tiré de Ressources en eau du Maroc, tome 2)

On peut ainsi percevoir la différence notable entre les deux zones, car en effet les aquifères situés en amont et suivant la direction du courant sont captifs, même semi-captifs, parfois karstiques et recouverts par d'importantes couches d'argiles. La coupe géologique permet également d'entrevoir un synclinal qui permet de maintenir la variation de stockage.

Toujours selon la direction des courants, la géomorphologie, les aquifères de Doukkala couverts d'argiles ont des formations calcaires détritiques datant du Plioquaternaire, pourvues d'eau. Les eaux souterraines, qui se rechargent plus en amont, tendent à s'accumuler aux différents axes synclinaux, d'où la faible variation de fluctuations sur plusieurs années. On ajoutera à cela, les nombreux pompages pour des fins agricoles et les recharges par percolation suite à des opérations d'irrigations.

Plus loin en aval, suivant le même axe de courants, ces formations calcaires autrefois masquées, s'émergent dans le Sahel. Cela donne naturellement des axes anticlinaux à contrario des Doukkala et la

présence d'un cordon de dune important. Le phénomène est complètement différent à ce niveau, les variations de stockage sont plus que variables et atteignent les 20 mètres ; malgré la faible profondeur des zones saturées et une altimétrie relativement en baisse.

En effet, il a été démontré dans des travaux antérieurs (Ekouele Mbaki, 2016) que le Sahel a plusieurs lacs en raison des coteaux. Ici, on peut ajouter que ces lacs dépendent fortement de la perméabilité du sol, mais aussi des activités liées à cette dernière.

En fonction de la direction des courants, des axes anticlinaux et des lignes de partage des eaux souterraines, on peut déduire qu'il y a de nombreux points de recharge actifs dans la région du Sahel à la limite orientale du Sahel mais aussi à certains endroits plus internes.

### 3.4 Conclusion partielle

Pilier important pour le développement des régions, la gestion des ressources devrait attirer plus souvent notre attention. Ce chapitre, nous a permis de réaliser la mise à jour des données hydrogéologiques en présentant

- le contexte actuel des différents niveaux stratigraphiques,
- les caractéristiques des nappes du Sahel – Doukkala,
- l'étude du comportement piézométrique au niveau des nappes ainsi que la déduction des variations des zones non saturées.

La zone non saturée nous a permis de distinguer de bas en haut, la frange capillaire, la zone de transition et la zone d'évapotranspiration. A partir des cartographies établies sur le temps, et en fonction de la pluviométrie, on note une grande variation des profondeurs sur le temps. En effet, les zones non saturées sont de plus en plus profondes en amont du Sahel central ; notamment à la limite Sahel/Doukkala en haute et basses eaux mais tendent à baisser le long du littoral (figure 24).

Cette étude nous a permis de réaliser une carte représentative du niveau piézométrique récente, sur la base de laquelle nous avons été conduits à déduire les différents gradients hydrauliques, les répartitions spatiales des zones en fonction de degrés de saturation ou non.

Selon les résultats obtenus, l'on peut déduire qu'il existe de nombreux aquifères captifs, semi captifs, en amont (Doukkala) et d'aquifères plutôt libres et superficiels en aval.

Ainsi, on comprend que le Sahel est hautement vulnérable d'un point de vue quantitatif et se voit confronté en plus de sur pompages, à des invasions marines à travers le littoral (limite Ouest).

Ainsi, nous avons pu dresser des graphes traduisant différents taux d'accroissements de la zone non saturée dans la région (figure 28) ; ce qui d'ailleurs est sensiblement égal au taux d'accroissement de la population.

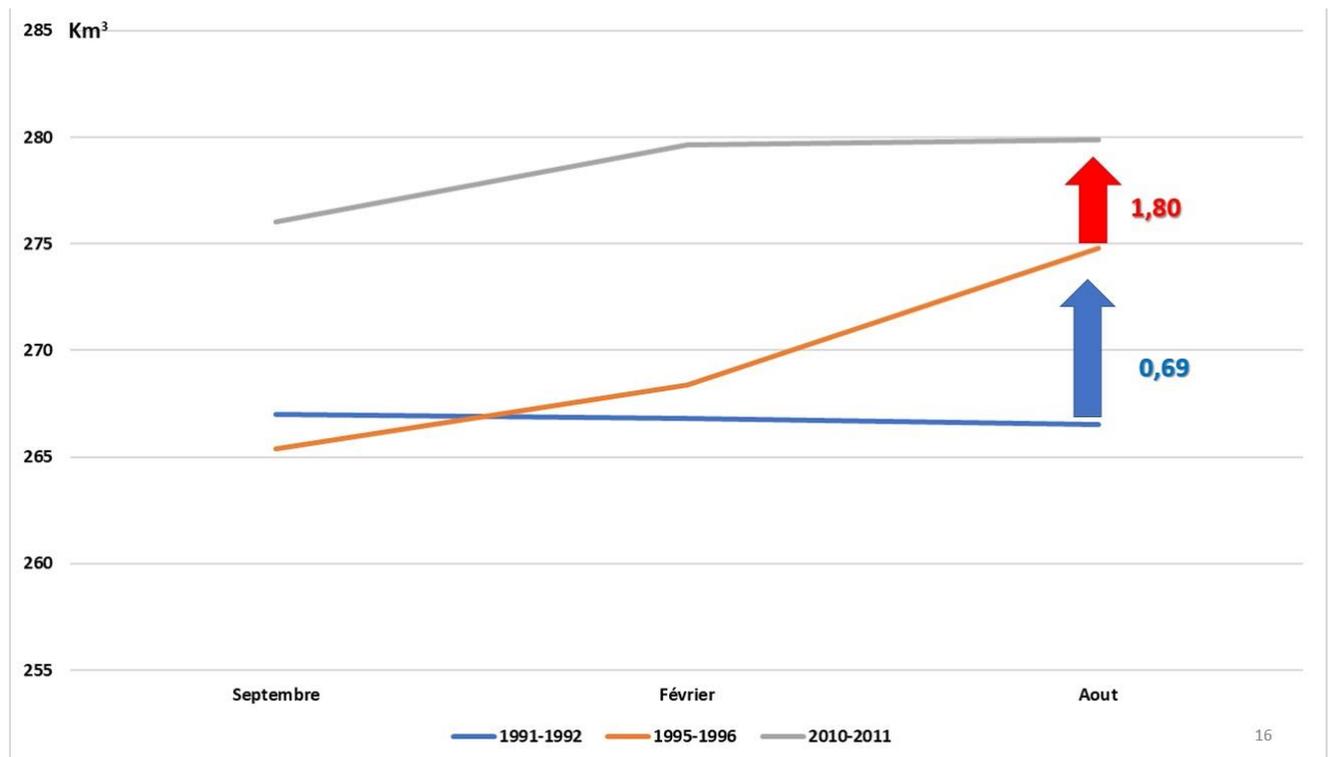


Figure 31. Graphes représentatifs du volume des zones non saturées et du taux d'accroissement

## **Partie II. Analyse qualitative & compléments d'études**

## 4 Chapitre 4. Etude qualitative des eaux souterraines de la région

La compréhension des propriétés hydrauliques des couches aquifères et la caractérisation hydrochimique de l'eau qu'elles contiennent sont nécessaires pour la planification et la gestion des ressources en eau souterraine d'un secteur d'étude quel qu'il soit. D'un point de vue global, la circulation des eaux souterraines dans la nappe favorise l'augmentation des concentrations en éléments chimiques (Domenico et Schwartz, 1990 ; Kortatsi, 2007). Ainsi, nous pouvons lire des informations pertinentes sur la lithologie des formations aquifères à travers le faciès chimique des eaux. Cette lecture est d'autant plus importante qu'elle nous permet de déduire le comportement hydrologique, et donc, le type d'usage auxquels les eaux souterraines peuvent servir.

L'hydrochimie étudie les processus chimiques qui affectent la distribution et la circulation des composés chimiques des eaux (Stumm et Morgan, 1981). Elle vient compléter les analyses quantitatives précédentes en mettant en place des modèles propres tels que la dissolution du dioxygène de carbone, la précipitation et la dissolution des minéraux (Oxyde, dioxydes carbonates...), ainsi que la spéciation des métaux et les interactions solides-liquides.

On peut également ranger dans l'hydrochimie, les techniques et protocoles d'échantillonnage des eaux, l'étude de la pollution des milieux aquatiques et de nombreuses autres applications qui sont devenues des sciences à part entière au vu de leur complexité.

Nous avons précédemment noté, les répartitions, les courants, et évalué le potentiel hydrique de la région. Par ailleurs, à travers l'analyse qualitative des ressources en eau de la région, nous nous donnons les moyens supplémentaires pour répondre aux questions préoccupantes à savoir ; le model conceptuel des nappes présentes dans la région.

La caractérisation hydrochimique des eaux souterraines est le plus souvent basée sur la disponibilité d'une grande quantité de données physico-chimiques (Aghazadeh et Mogadam ; 2004, Hossien ; 2004). Plusieurs facteurs tels que la géomorphologie, la météorisation, la qualité des eaux de recharge ainsi les diverses sources d'alimentation de formations aquifères, de telles sortes que les interactions résument d'une qualité complexe des eaux profondes

Ainsi, dans le but de déterminer ces facteurs et mécanismes nous réaliserons dans ce chapitre :

- l'examen physique, hydrogéologique et physico-chimique des eaux,
- le rapport entre les courants souterrains et les propriétés hydrochimiques.

#### 4.1 Matériel et méthode

Bien que vitale, les eaux souterraines sont liées à plusieurs paramètres distincts les uns des autres. C'est ainsi que l'on entend dire qu'il n'existe pas une eau, mais différents types d'eaux selon leurs origines et leurs passées.

Tout commence par son cycle alimenté par l'énergie solaire, au-dessus des océans où les nuages poussés vers les continents libèrent suivant deux principales voies ; les eaux.

- D'une part celles qui s'infiltrent sur le sol perméable ; traversant les terrains multiples et variés
- D'autre part ; le ruissellement par-dessus un sol imperméable ; transportant ainsi différentes matières en suspension avant de rejoindre les ruisseaux, rivières et fleuves pour aboutir à la mère.

La gestion maîtrisée de l'eau est un des enjeux majeurs des décennies à venir ; elle permet l'optimisation des procédés ; ce qui à terme réduit de manière considérable les coûts liés aux réparations. C'est donc une nécessité économique.

On utilise bien souvent dans la littérature ; des isotopes chimiques ainsi que la conductivité électrique dans le but de clarifier les relations hydrologiques, l'évaluation de l'importance des sources de recharge d'eau souterraines (El Hammoumi et al. 2012, Peng et al. 2014).

On rappelle par ailleurs que la vocation agricole de la région conduit à des sur pompages réguliers pouvant accélérer les affaissements du sol, entraîner une augmentation de la salinité des eaux souterraines en plus d'une détérioration possible de la qualité du sol.

Ainsi, parvenir à une gestion adéquate des eaux souterraines revient à comprendre la mécanique de la recharge des nappes revient à évaluer chimiquement les eaux souterraines et, réaliser une analyse spatiale à partir des mesures de terrain.

#### 4.1.1 Elaboration et mise en place du réseau de prélèvements à des fins hydrochimiques

L'idée qui présidait la mise en place du réseau de surveillance était d'acquérir des informations sur la quasi-totalité de la région. De manière à disposer des pôles hydrochimiques représentatifs. D'autres part, il s'agissait de repérer les secteurs où des mélanges et des communications entre aquifères seraient visibles d'un point de vue hydrochimique.

En ce qui nous concerne, et à l'image de l'établissement de la carte piézométrique ; une seule récente campagne de prélèvement d'eau, destinée à réaliser des analyses chimiques avant d'établir une étude comparative avec les mesures historiques fournies par l'agence de bassin versant de l'oued Oum Er R'bia.

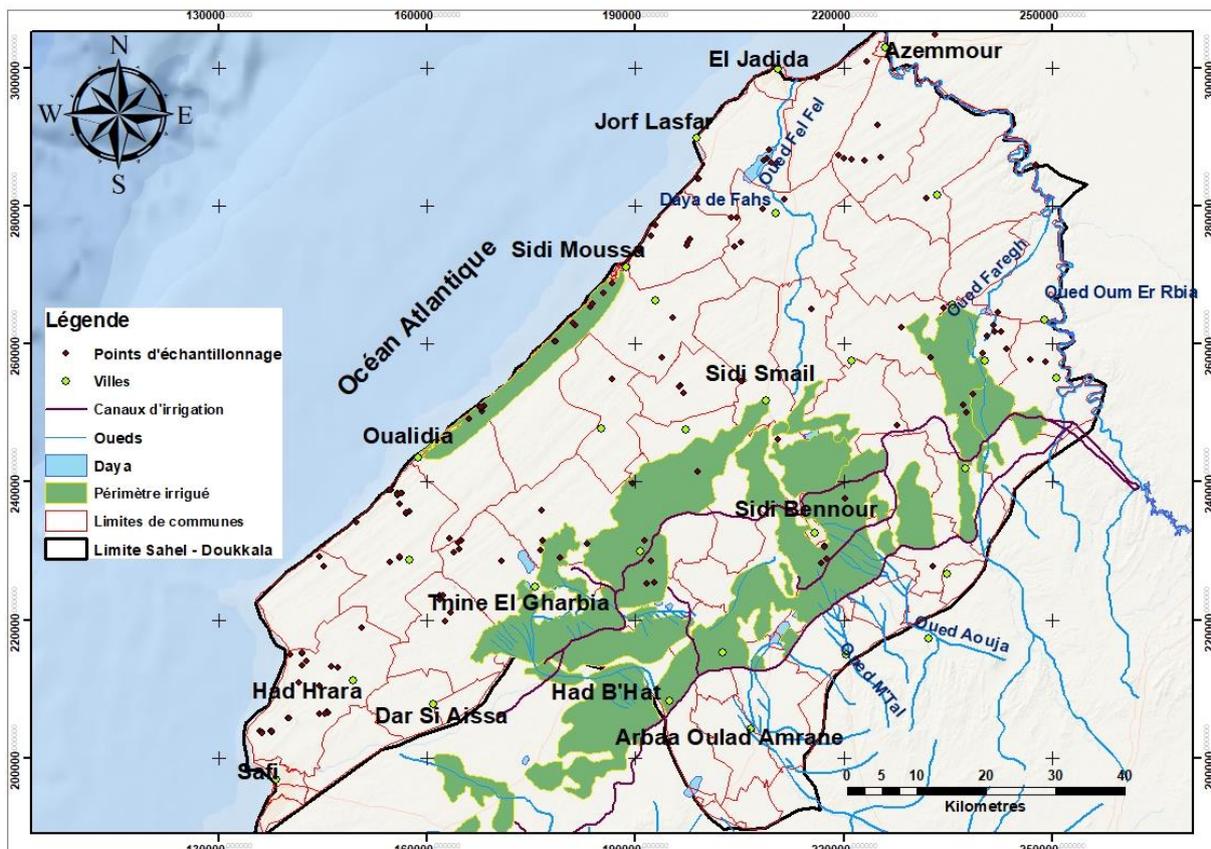


Figure 32. Cartes représentative des points prospectés (116)

Plus concentrés dans la partie aval, la disposition des points nous a permis de parcourir la région en 7 jours. A chacune des stations, on y trouvait des ouvrages ; puits, forage, réservoirs de tous genres à partir desquels l'on échantillonnait.

L'acquisition des données s'est déroulée en deux phase ;

- Phase de mesure in situ ;
- Phase d'analyse en laboratoire.

#### 4.1.2 Appareillage

En plus des moyens de logistiques, l'appareillage est composé d'un boîtier d'acquisition et d'une sonde. La sonde est constituée d'une électrode de température, d'une électrode de mesure constituée de deux ou plusieurs capteurs ou d'un dispositif d'électrodes groupées.

Les appareils modernes permettent la correction automatique des mesures en fonction de la température ; en ramenant les valeurs à une température de référence. L'opérateur veillera toutefois à contrôler que la température de référence programmée est bien celle demandée.

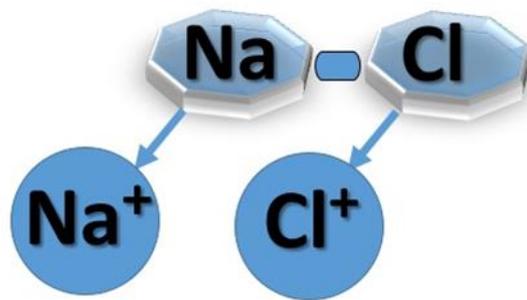


Figure 33. Photo illustrative de l'appareillage utilisé

## 4.2 Bilan des mesures réalisées

### 4.2.1 Conductivité électrique

La conductivité exprime la propriété d'un matériau à conduire le courant électrique. On observe dans les cas des métaux, le mouvement des électrons qui assure le passage du courant tandis que dans les solutions aqueuses, ce sont les ions qui effectuent le transport des charges. Ces ions résultent de la dissolution de sels, acides et bases. En effet, plus le liquide contient les ions, mieux il conduit le courant.



**Les sels se décomposent en ions chargés positivement et négativement**

*Figure 34. Aperçu de la décomposition du sel (NaCl)*

Cette relation entre la concentration en ions et la capacité de conduire le courant électrique fait de la conductivité une grandeur intéressante à mesurer dans l'analyse de l'eau. Elle convient très bien pour déterminer la concentration en sels dissous.

Le résultat de la mesure de conductivité ne s'exprime pas en mg/l, ni en pourcentage, mais en S/m (siemens par mètre). En pratique, les unités usitées sont les sous-multiples  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $\text{mS}/\text{cm}$ .

**Tableau 7. Conversion des unités de conductivités**

	S/m	S/cm	mS/cm	µS/cm
S/m	1	0,01	10	10.000
S/cm	100	1	1.000	1.000.000
mS/cm	0,1	0,001	1	1.000
µS/cm	0,0001	0,0000001	0,001	1

Le tableau suivant (Tableau 8), rappelle la relation entre concentration de sel et conductivité.

**Tableau 8. Exemples de valeurs de conductivité**

Eau en solution aqueuse	Plage de conductivité à 25°C	Concentration en sel
Eau ultra pure	0,0055 µS/cm	0 mg/l
Eau déminéralisée	0,055 à 2 µS/cm	0 à 1 mg/l
Eau de pluie	10 à 50 µS/cm	5 à 20 mg/l
Eaux souterraines, eaux de ruissellement et eau potable	50 à 1000 µS/cm	20 à 50 mg/l
Eau de mer	20 à 60 mS/cm	10 à 40 g/l
Solution de sel de cuisine	77 à 250 mS/cm	50 à 250 g/l

La mesure de conductivité est un procédé simple à mettre en œuvre pour déterminer et surveiller la concentration totale en sels dans les eaux. On la rencontre dans de nombreux domaines d'analyses industrielles et de l'environnement. Qu'il s'agisse du nettoyage des conduites de remplissage dans une laiterie ou de la protection du système de refroidissement dans une usine de production d'énergie, les opérations correctes dépendent bien souvent de la valeur de la conductivité.

En effet, les mesures in situ réalisés nous ont permis de dresser la cartographie relative aux valeurs de conductivités à 25°C en décembre 2015.

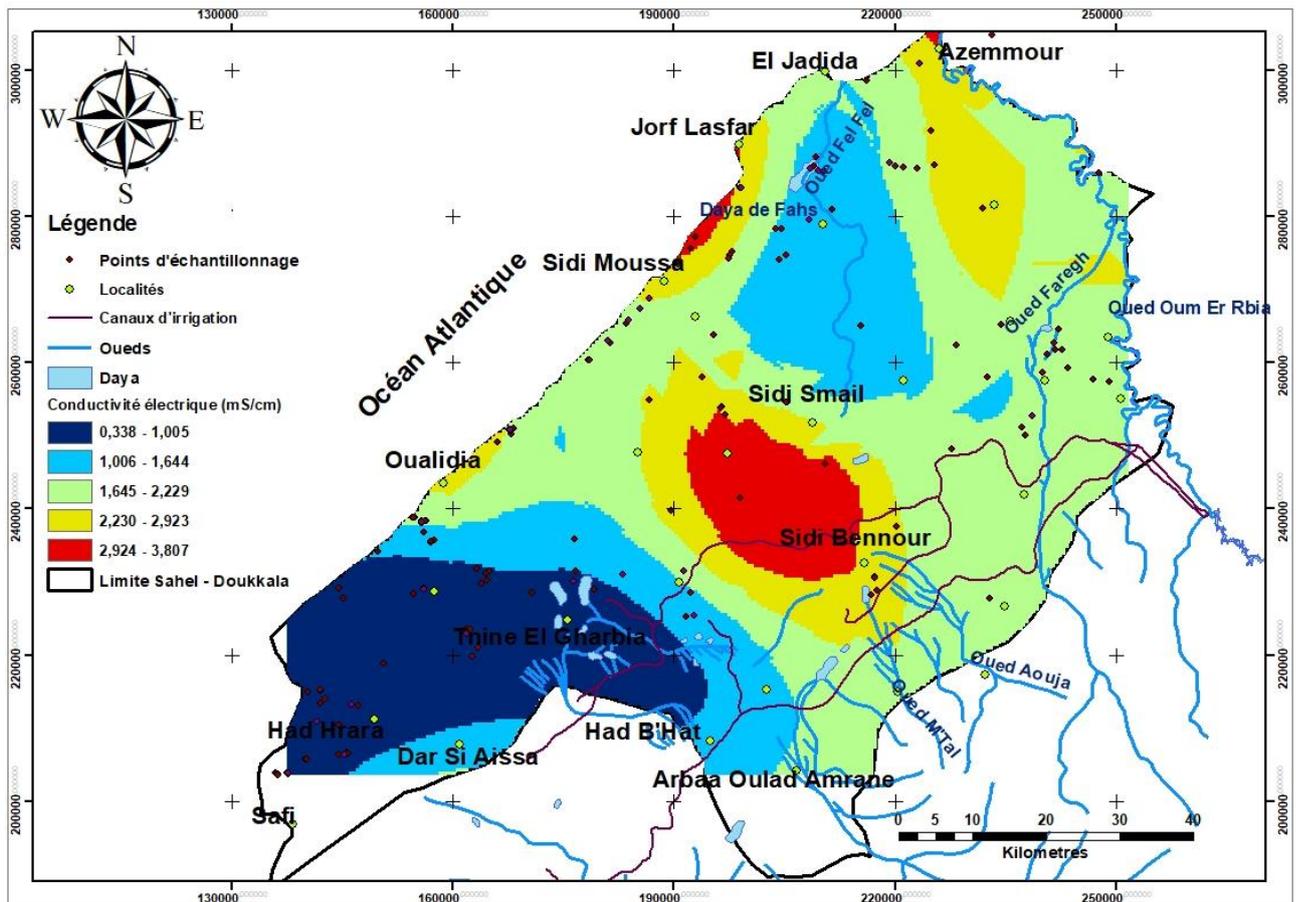


Figure 35. Carte représentative de la conductivité électrique dans la région du Sahel Doukkala (Selon les mesures de terrain réalisées en Décembre 2015)

Dans un premier temps, force est de constater que les valeurs sont inférieures à celles de l’océan Atlantique (50 mS/cm) et, varient fortement du Sud au Nord entre 0,3 mS/cm et 7,59 mS/cm. Elle n’obéit pas au sens des courant (Sud Est /Nord-Ouest) du fait de leurs croissances du Sud-Ouest au Nord-Est. Toutefois, on observe des pics de conductivités électriques dans le Sahel central ; entre Sidi Smail et Sidi Bennour ; mais aussi sur le littoral à Oualidia, et plus au Nord entre Jorf Lasfar et Sidi Moussa.

Tableau 9. Récapitulatif de la conductivité électrique (décembre 2015)

	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Conductivité (mS/cm)	0,386	7,59	2,257	1,634

Sachant que l’écart type permet de mesurer la dispersion des valeurs autour de la moyenne, dans ce cas les valeurs de l’écart type sont plus petites, ce qui indique que les valeurs des variables sont moins dispersées.

#### 4.2.2 pH des eaux

Le pH traduit la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14, 7 étant le pH de neutralité. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau. Mesuré impérativement sur le terrain, il nous permet d'établir la classification des eaux (Tableau 10).

**Tableau 10. Classification des eaux, selon le pH**

pH < 5	Acidité forte ; présence d'acides minéraux ou organiques dans les eaux naturelles
pH = 7	pH neutre
7 < pH < 8	Neutralité approchée ; plus souvent les eaux de surfaces
5,5 < pH < 8	Cas de la plupart des eaux souterraines
pH = 8	Alcalinité forte, évaporation intense

Selon les bases de discussions établies par Nisbet et Verneaux (1970), le pH des eaux naturelles est généralement compris entre 6,6 et 7,8 ; pour Rodier (1984), il varie entre 7,2 et 7,6 tandis que Chapman et Kimstach (1996) les classent entre 6 et 8,5. La nature des terrains traversés par les eaux est la cause naturelle, provoquant des variations importantes du pH. On trouve ainsi suivant les mesures effectuées, une variation inversement proportionnelle aux tendances de la conductivité.

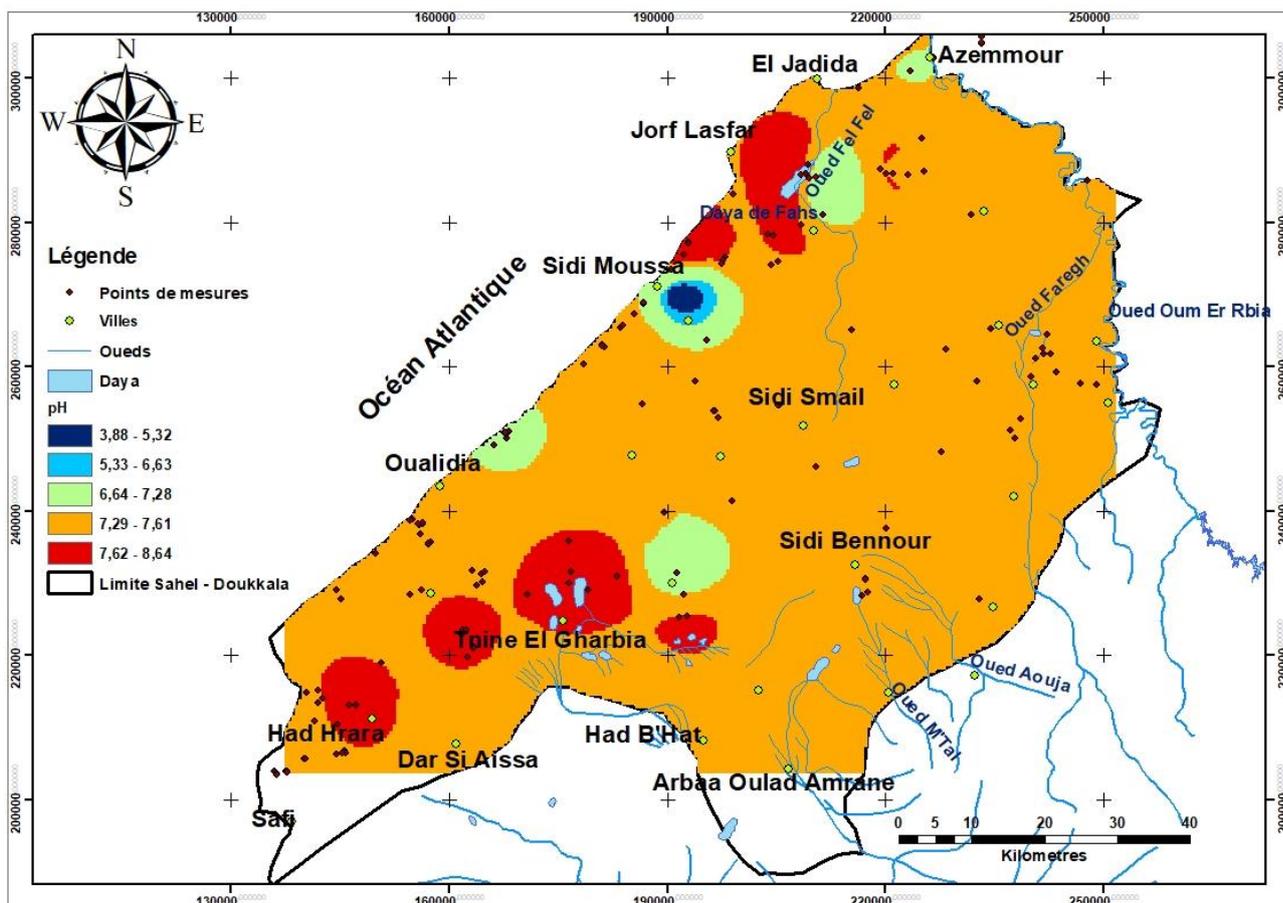


Figure 36. Carte représentative du pH dans la région du Sahel Doukkala (Selon les mesures de terrain réalisées en Décembre 2015)

On voit à travers la figure 34, une répartition spatiale des valeurs de pH. Elles sont comprises entre 7,02 et 8,22 et rejoignent les valeurs classées par Rodier (1984) mais aussi Chapman et Kimstach (1996) avec quelques basses valeurs localisées à l'Est de Sidi Moussa. D'un point de vue global, le pH des eaux souterraines de la région est supérieur à 7. On enregistre toutefois dans les localités telles que Had Hrara, Tnine El Gharbia, Jorf Lasfar et plus au sud, des valeurs comprises entre 7,6 et 8,64.

Tableau 11. Récapitulatif du pH (Décembre 2015)

	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
pH	7,02	8,22	7,22	0,3

L'écart type témoigne de l'homogénéité du pH autour de la valeur moyenne. Elle est d'autant plus importante du fait de sa corrélation négative avec la conductivité électrique ; de l'ordre de -0,58 ; où nos

analyses montrent que la conductivité électrique de la nappe tend à augmenter, chose opposée au pH qui décroît comme le témoigne la figure ci-après.

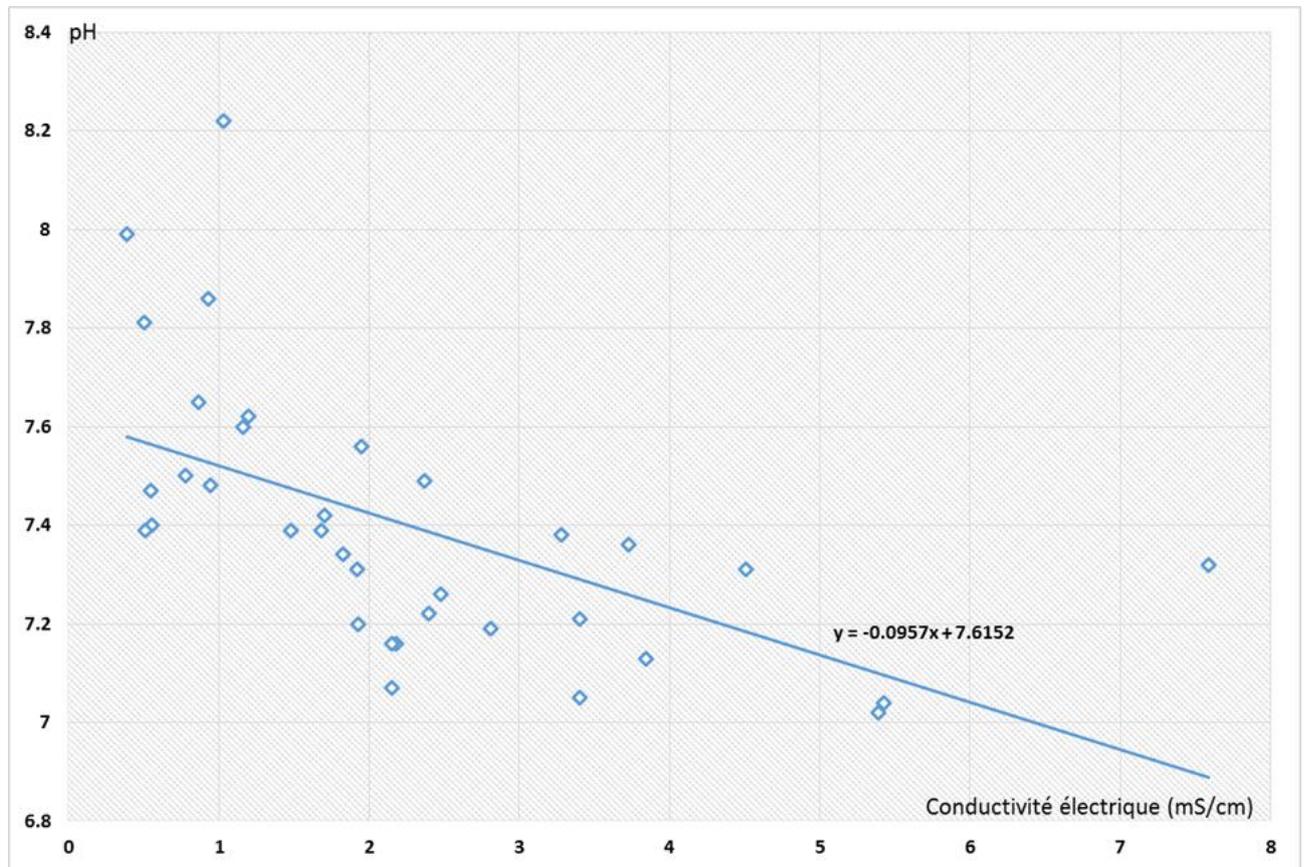


Figure 37. Corrélation entre le pH et la conductivité électrique (Décembre 2015)

#### 4.3 Évaluation de l'état qualitatif des masses d'eau souterraine de la région.

La vulnérabilité dépend du type de nappe, libre ou captive, et du mode de circulation de l'eau dans l'aquifère. Les nappes libres sont les plus vulnérables : les polluants d'origine superficielle peuvent diffuser librement dans le sol et la zone non saturée jusqu'au niveau piézométrique ; d'autre part, la fluctuation verticale saisonnière du niveau piézométrique aboutit à rincer les particules de la zone non saturée et entraîner les substances qui y sont adsorbées. Les nappes captives en revanche sont mieux protégées par les couches imperméables qui les surmontent. Leur alimentation en eau superficielle est plus circonscrite, donc plus aisée à protéger. Leur pollution apparaît lorsque le niveau protecteur imperméable est percé par un ouvrage (ancien forage, fouille profonde...) Enfin, la percolation de l'eau

dans un milieu poreux peut produire une fixation des substances sur les particules et donc une épuration de l'eau. Ce phénomène n'existe pas dans les milieux fissurés où la circulation est bien plus rapide.

Les mesures de conductivités électriques et de pH, conditionnent les équilibres physico-chimiques, en particulier l'équilibre calco-carbonique et donc l'action de l'eau sur les carbonates (attaque ou dépôt). Le pH est acide dans les eaux des aquifères sableux ou granitiques. Il est alcalin dans les calcaires. Il est cependant corrigé selon le cas par élimination du CO<sub>2</sub> dissous en excès ou par correction de la dureté carbonatée.

On observe à travers les figures précédentes (Fig.34), relative à la représentation spatiale du pH qu'il est beaucoup plus élevé dans la région de Tnine El Gharbia et aux alentours. Et comparés aux fluctuations piézométriques globales ; elle correspond également à la zone qui connaît des amplitudes les plus élevées. L'apport des eaux superficielles (météoriques et des dayas) contribue fortement à l'augmentation du pH et montre l'étroite relation entre les deux ensembles.

Les zones les plus exposées aux dégradations appartiennent de ce fait au Sahel central et, dans ce cadre, aux vues des difficultés liées aux moyens logistiques, nous avons réduit la zone d'étude avec ses 121 points échantillonnés par nos soins et répartis sur toute la région, en se concentrant davantage sur une série d'échantillons dans le Sahel Central concentré sur 13 zones recouvrant le centre y compris le périmètre d'irrigation (Fig. 36).

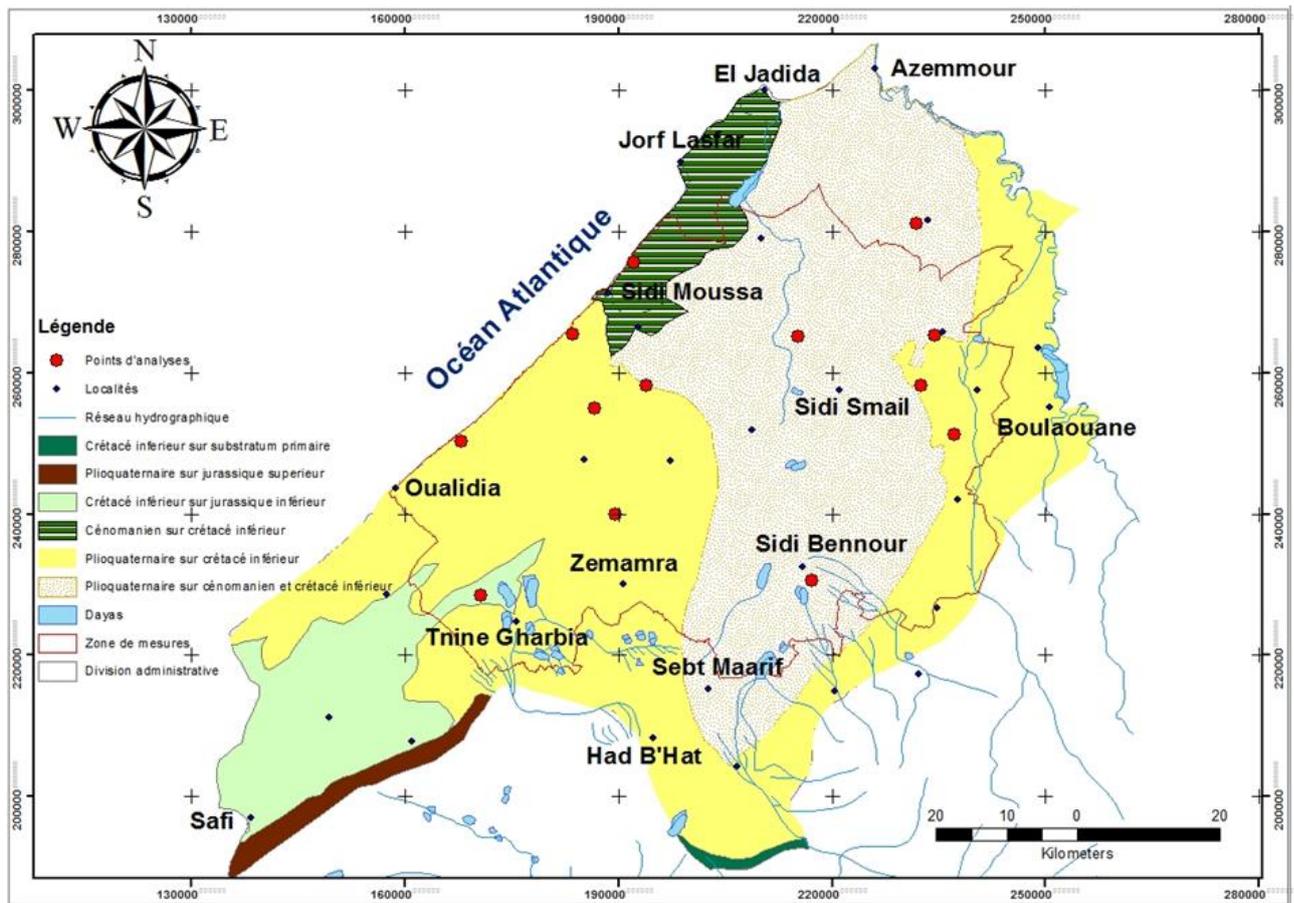


Figure 38. Présentation des points d'analyses physico chimiques choisis après réduction de l'échantillonnage global

L'analyse des paramètres chimiques se base sur la quasi-totalité des aquifères. Dans un premier temps, une mesure par an entre 2011 et 2013 suivi d'une double mesure en hausse et basse 2014. Le principe consiste en effet à évaluer : la température, la conductivité électrique, pH, TDS,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , FeT, streptocoques fécaux, coliformes fécaux et totaux.

#### 4.3.1 Les ions sodium

Une fois dans la nappe, mais surtout en solution ; aucune réaction ne permet de l'extraire. Le sodium est ainsi un élément dit conservatif. Les précipitations apportent une quantité de sodium minime dans l'eau souterraine, les teneurs anormalement élevées peuvent provenir du lessivage de sels, ou de la percolation à travers des terrains salés ou de l'infiltration d'eaux saumâtres (Bermond et Perrdon, 1979 ;

Rodier et al, 2009). Dans les eaux souterraines non polluées et sans contact avec des évaporites, la teneur en sodium se situe entre 1 et 20 mg/l.

En ce qui nous concerne, l'analyse des données montre que les teneurs moyennes en sodium sont supérieures à celles enregistrées dans les nappes non exposées à des évaporites et aux polluants.

**Tableau 12. Présentation de l'historique de teneurs en ion sodium [Na<sup>+</sup>] en mg/L**

[Na <sup>+</sup> ]	Oct–Nov 2011	Juin–Juil 2012	Déc 2013	Juin 2014	Déc. 2014
Minimum	23,8	136	47	62	54
Moyenne	378,02	366,62	297,9	294,38	294,77
Maximum	1100	975	900	772	830
Ecart type	289,8	228,13	232,78	208,58	217,34

Comme l'indique le précédent tableau, les valeurs varient de 23,8 à 1100 mg/l selon la période de mesure mais aussi le point évalué. On observe de manière général un pic de concentration dans les localités de Zemamra, Tnine El Gharbia et ; des valeurs faibles, approchant la normale à mesure que l'on s'approche de l'océan.

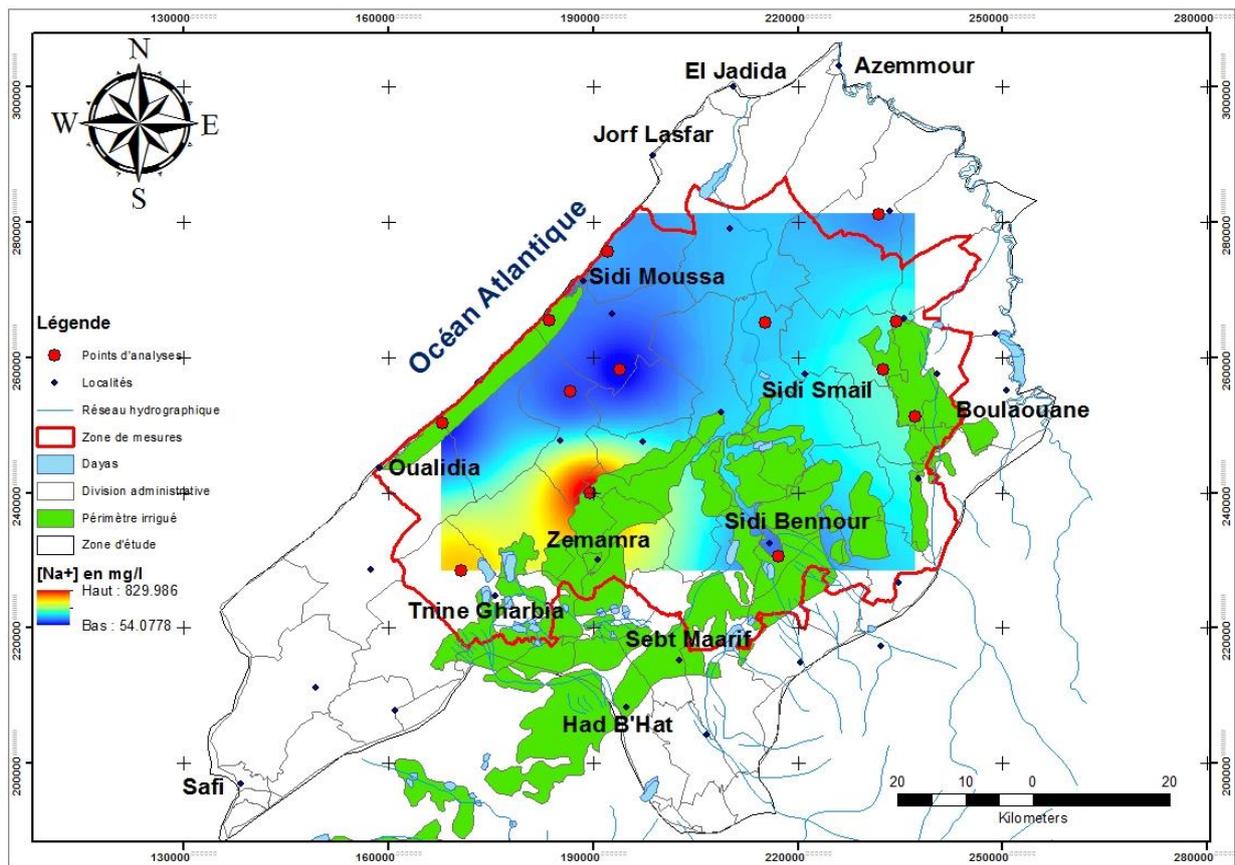


Figure 39. Variation spatiale des teneurs en ions sodium des eaux souterraines du Sahel Doukkala central (Juin 2014)

#### 4.3.2 Les ions Chlorures

Le plus souvent utilisé comme indice de pollution, les chlorures sont des anions inorganiques importants contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles (N'Diaye et al ; 2014) ; On les trouve généralement sous deux formes de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Des chlorures peuvent être localement impliqués dans les pluies acides et phénomènes d'acidification d'eaux superficielles ou souterraines.

Les chlorures existent dans toutes les eaux à des concentrations variables. Il peut s'agir :

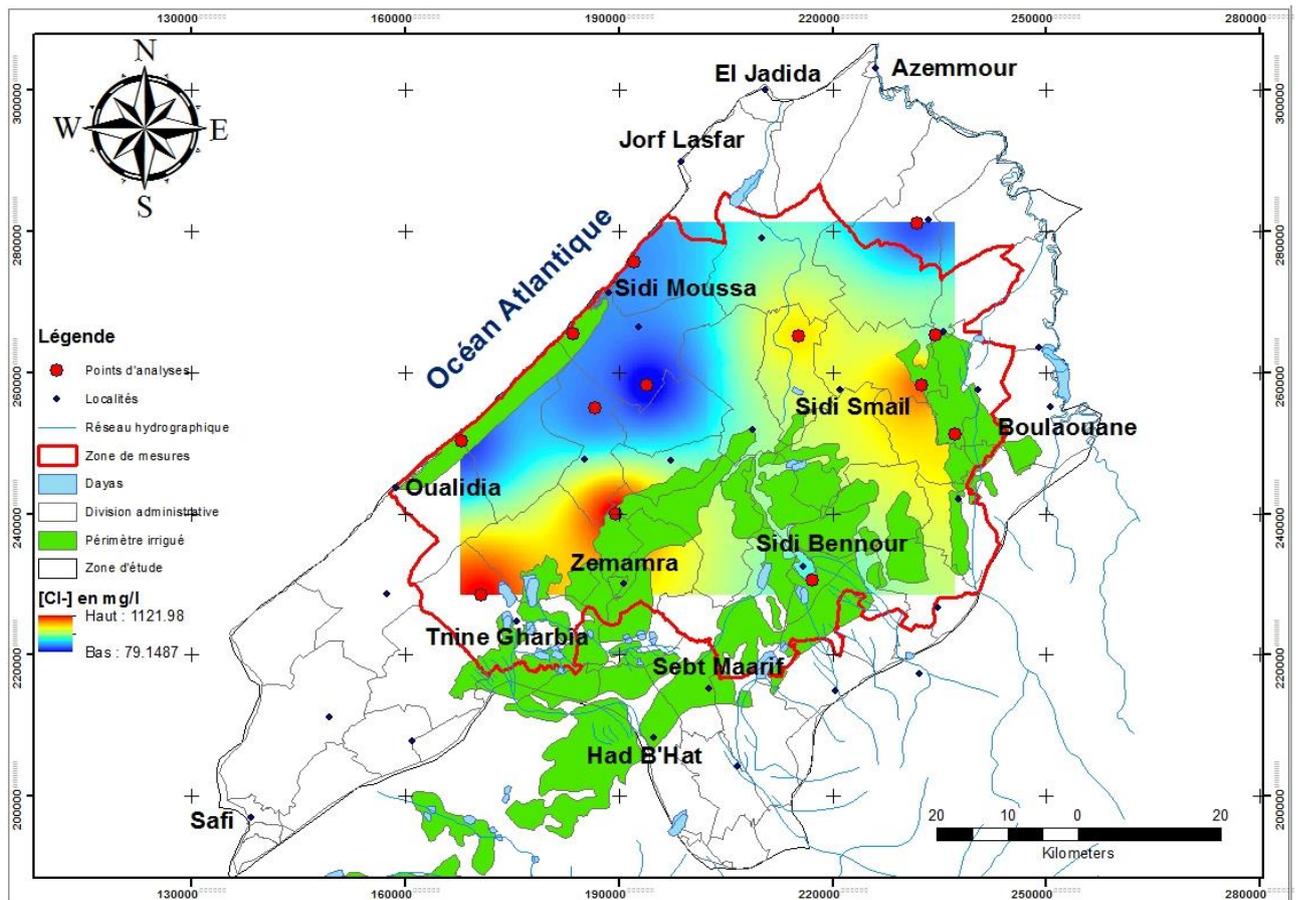
- de la percolation au niveau des terrains salés
- de l'invasion marine, notamment dans les nappes profondes du littoral
- des actions anthropiques etc.

**Tableau 13. Présentation de l'historique de teneurs en ion chlorures [Cl<sup>-</sup>] en mg/L**

[Cl <sup>-</sup> ]	Oct–Nov 2011	Juin–Juil 2012	Déc 2013	Juin 2014	Déc. 2014
Minimum	53,2	225	80	79	82
Moyenne	837,63	709,58	467,09	552,62	579,23
Maximum	2302	1487	1396	1122	1340
Ecart type	608,51	431,70	359,09	370,54	392,13

Les teneurs en chlorures des échantillons d'eau analysés varient de 53,2 à 2302 mg/l et en se référant à la directive européenne 98/83 du 3 novembre 1998 qui est entrée en vigueur le 23 décembre 2003 ; on se rend bien compte que certaines mesures sont supérieures au point maximum fixé de 250 mg/l dans de l'eau potable.

En nous référant à nos mesures, notamment celle enregistrées en juin 2014 ; nous nous rendons compte de l'existence de pics de teneurs sur la partie est, tandis qu'elles sont basses le long du littoral.



**Figure 40. Variation spatiale des teneurs en ions chlorure des eaux souterraines du Sahel Doukkala central (Juin 2014)**

En plus des localités de Tnine El Gharbia et de Zemamra, on ajoutera celles de Sidi Smail Boulaouane, situées plus au Nord Est. Avec des taux de chlorures élevés, ces zones contrastent avec les localités situées à l'ouest, notamment le long du littoral.

#### 4.3.3 Les ions Calcium

Plus dominant dans les eaux potables, sa teneur varie suivant la nature du terrain traversé. On les distingue dans les terrains calcaires, et des terrains gypseux, voire au-delà ; du fait qu'il représente le cinquième élément le plus abondant de la croûte terrestre (plus de 3 %).

**Tableau 14. Présentation de l'historique de teneurs en ion Calcium [ $Ca^{2+}$ ] en mg/L**

[ $Ca^{2+}$ ]	Oct–Nov 2011	Juin–Juil 2012	Déc 2013	Juin 2014	Déc. 2014
Minimum	61,1	48,1	57	47	56
Moyenne	160,79	187,11	144	141,15	135,92
Maximum	295	421	220	240	200
Ecart type	64,27	107,69	60,68	50,89	44,44

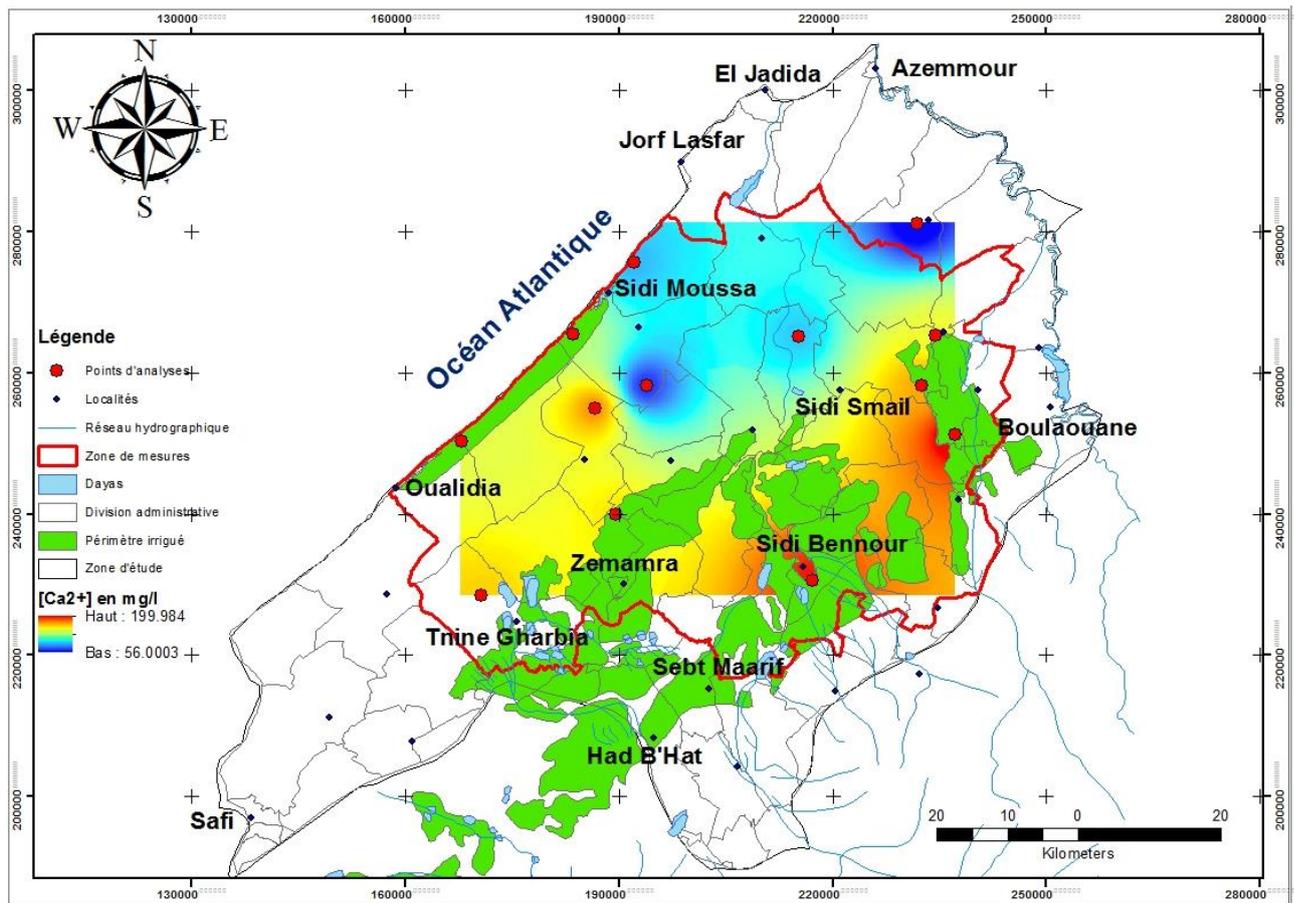


Figure 41. Variation spatiale des teneurs en ions calcium des eaux souterraines du Sahel Doukkala central (Juin 2014)

En ce qui concerne les teneurs des ions calcium, force est de constater que les pics sont observés sur la partie Est ; allant de Sidi Smail à Sidi Bennour. Quelques valeurs élevées restent mêlées à des teneurs basses le long du littoral.

#### 4.3.4 Les bicarbonates

La teneur en bicarbonates dans les eaux souterraines dépend surtout de la présence des minéraux carbonatés dans le sol et l'aquifère, ainsi que la teneur en CO<sub>2</sub> de l'air et du sol dans le bassin d'alimentation. Non soumises aux influences anthropiques, elle varie entre 50 et 400 mg/l avec des valeurs médianes avoisinant 302 mg/l pour des masses d'eaux souterraines non polluées.

**Tableau 15. Présentation de l'historique de teneurs en Bicarbonates [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>] en mg/L**

[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	Oct–Nov 2011	Juin–Juil 2012	Déc 2013	Juin 2014	Déc. 2014
Minimum	132	207	200	180	190
Moyenne	284,31	299,54	289,09	271,54	278,46
Maximum	464	598	410	390	380
Ecart type	90,78	100,15	71,62	61,62	50,97

En ce qui nous concerne, nous pouvons dire que les échantillons prélevés sont conformes aux valeurs des aquifères non soumis à l'action anthropique. On enregistre la plus forte moyenne en Juillet 2012 (299,54) et des écarts – types montrant que le grand nombre de valeurs avoisinent la moyenne.

D'un point de vue graphique, les faibles teneurs se trouvent le long du littoral avec gradient ascendant à mesure que l'on s'éloigne des côtes. En effet, certaines villes témoignent des pics ; il s'agit des localités de Tnine El Gharbia, Zemamra, Sidi Bennour ; situées au sud, et de Tleta Oulad Hamdane, Had Oulad Farej, Arbaa Aounat, et les environs situés au Nord Est.

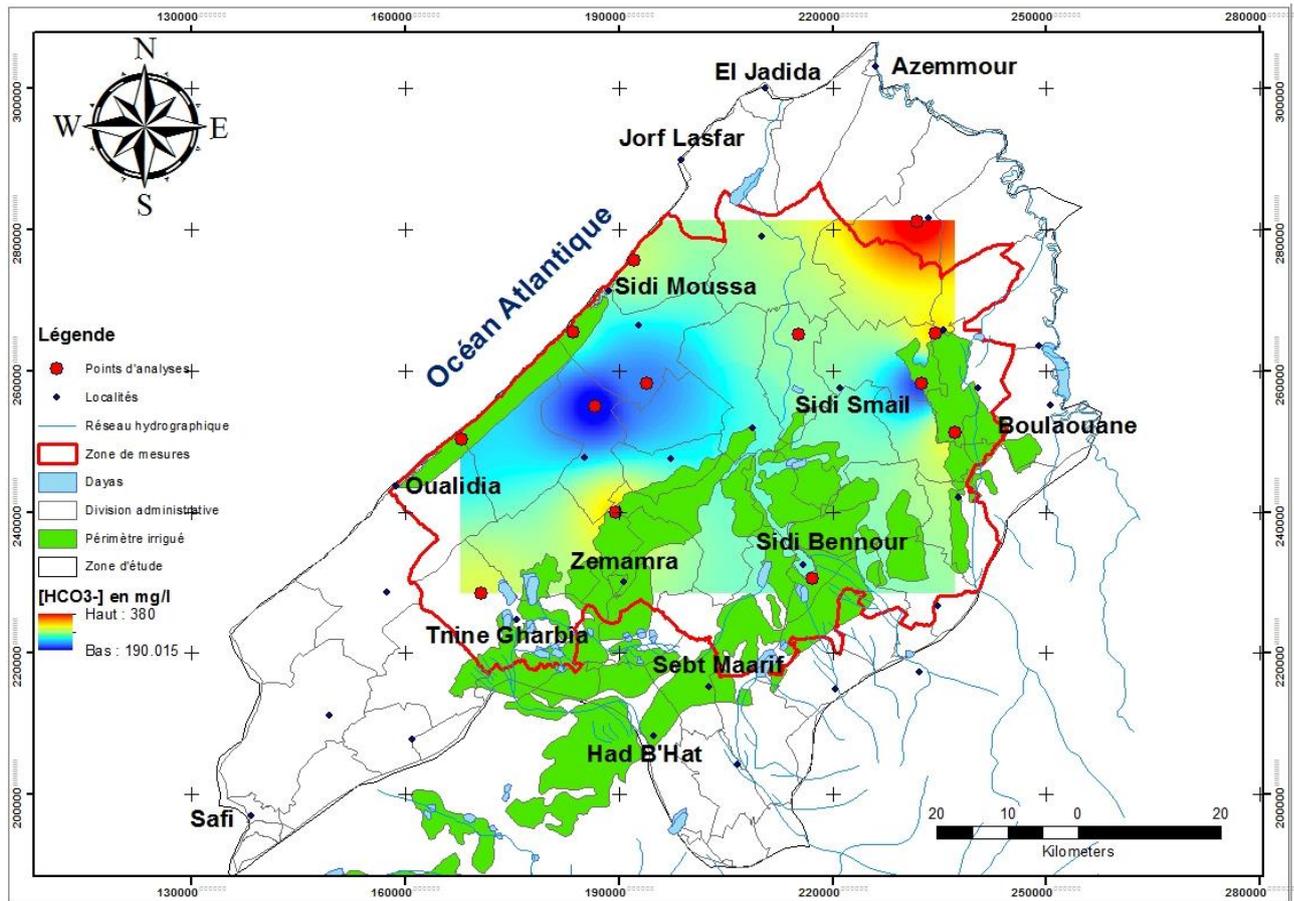


Figure 42. Variation spatiale des teneurs en bicarbonates  $[HCO_3^-]$  des eaux souterraines du Sahel Doukkala central (Juin 2014)

#### 4.3.5 Les ions Magnésium

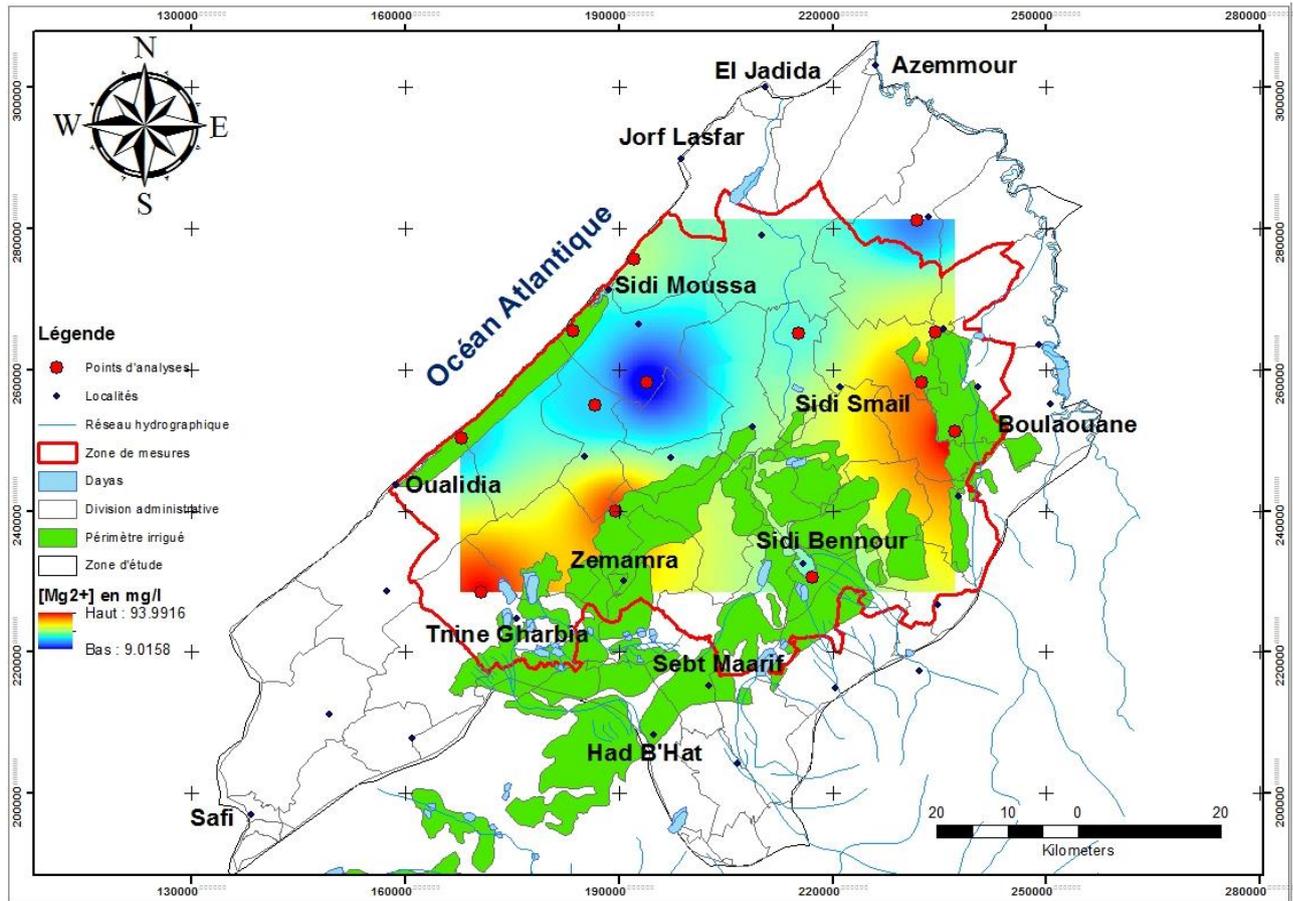
Les teneurs en magnésium dépendent fortement de la composition des roches sédimentaires rencontrées. Ainsi, on rencontre de manière générale ; des petites quantités dans les eaux naturelles. Le magnésium doit sa présence aux attaques par l'acide carbonique des roches dites magnésiennes, mais aussi de la mise en solution sous forme de carbonates et de bicarbonates.

Les valeurs décrites par le tableau 16 montrent que les teneurs varient de 9 à 204 mg/l ; ce en fonction du point de mesure et de la période de mesure. Les moyennes ont tendance à baisser au fil du temps et, l'ensemble des points reste assez proche des valeurs moyennes.

D'un point de vue spatial, les pics sont enregistrés dans la partie Est de la zone ; notamment à Sidi Smail et ses environs, mais aussi au Sud (Tnine El Gharbia, Zemamra) tandis que le littoral, semble avoir les concentrations faibles.

**Tableau 16. Présentation de l'historique de teneurs en ions magnésium en mg/L**

[Mg <sup>2+</sup> ]	Oct–Nov 2011	Juin–Juil 2012	Déc 2013	Juin 2014	Déc. 2014
Minimum	11,5	32,8	9	10	9
Moyenne	103,73	86,9	68,91	55,08	53,54
Maximum	204	128	210	110	94
Ecart type	64,03	36,28	57,52	29,55	26,94



**Figure 43. Variation spatiale des teneurs en ions magnésium [Mg<sup>2+</sup>] des eaux souterraines du Sahel Doukkala central (Juin 2014)**

#### 4.3.6 Les ions Sulfates

Il s'agit de la forme de Soufre la plus dissoute et la plus répandue dans des eaux naturelles. Ils peuvent avoir plusieurs origines, parmi elles :

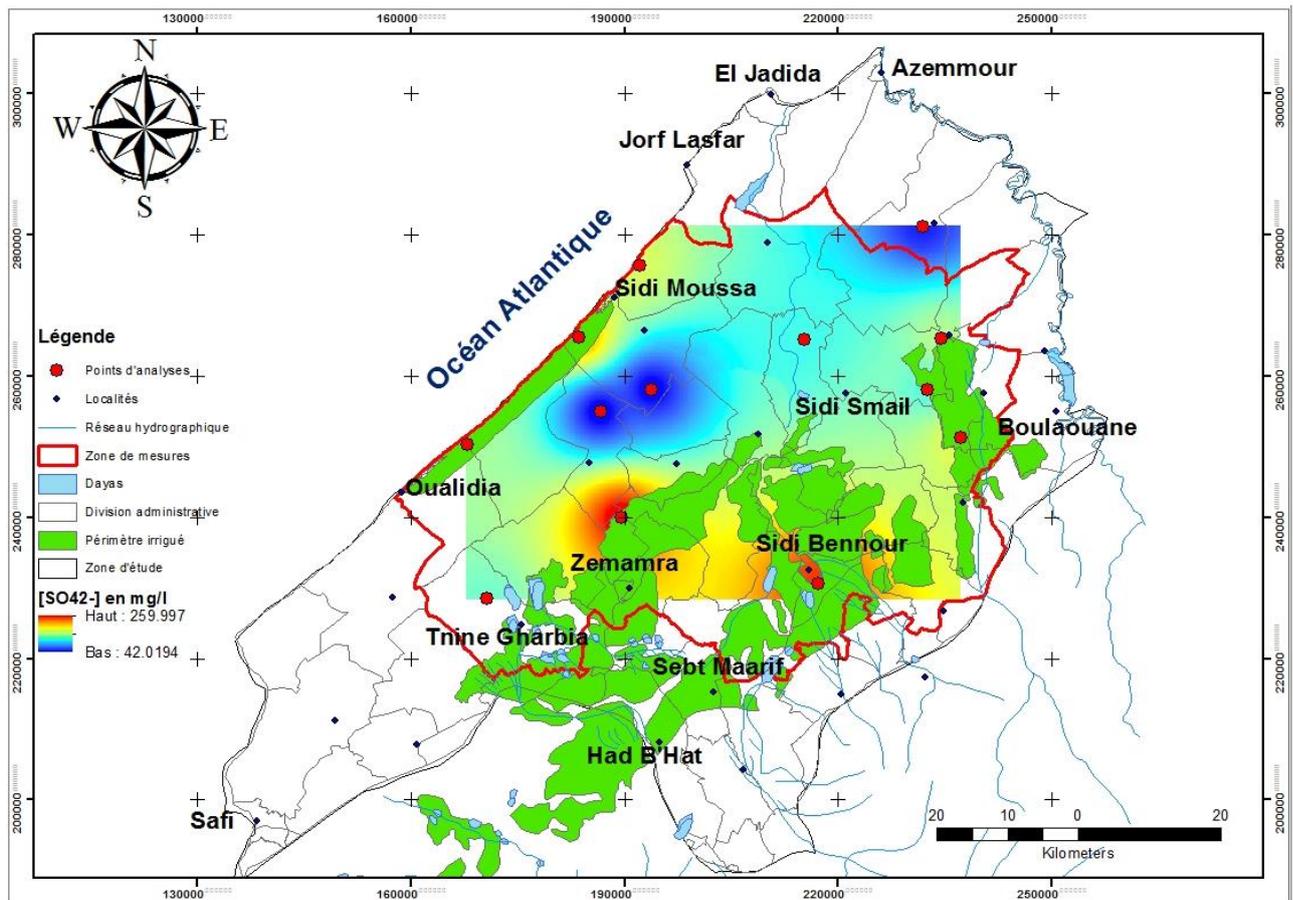
- les origines géochimiques ;
- les origines atmosphériques.

En effet, on voit dans la littérature que l'eau souterraine peut contenir jusqu'à 1,5 g/l du fait de la solubilité élevée des sulfates. A cela, on peut rajouter l'oxydation des sulfures ainsi que la dégradation de la biomasse dans le sol, comme éventuelle source.

De nombreuses activités anthropiques peuvent en générer d'autres ; notamment l'application des engrais, sulfatés tels : les sulfates d'ammonium, de magnésium anhydre, de magnésium monohydrate, etc. Mais aussi, les apports naturels notamment certaines précipitations chargées en dioxyde de soufre.

**Tableau 17. Présentation de l'historique de teneurs en ions sulfates en mg/L**

[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]	Oct–Nov 2011	Juin–Juil 2012	Déc 2013	Juin 2014	Déc. 2014
Minimum	19	74,6	14	34	42
Moyenne	231,65	234,51	155,91	130,77	143,38
Maximum	740	924,34	330	230	260
Ecart type	234,39	233,89	98,22	66,08	70,60



**Figure 44. Variation spatiale des teneurs en Sulfates [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] des eaux souterraines du Sahel Doukkala central (Juin 2014)**

On voit à travers la précédente figure (Fig. 42), des concentrations élevées aux alentours de Zemamra à Sidi Bennour en plus de quelques points situés au sud de Sidi Moussa. Il montre notamment le lien entre les périmètres irrigués et les sulfures.

#### 4.3.7 Les ions Potassium

C'est un gros cation peu coordonnant et donc difficile à précipiter en solution aqueuse. Il est généralement l'élément majeur le moins abondant dans les eaux après le sodium, le calcium, et le magnésium. Le potassium se rencontre sous forme de chlorures doubles dans de nombreux minerais tels que la sylvinite. Egalement présent dans les cendres des végétaux sous forme de carbonates, il constitue un élément indispensable à la vie ; notamment celle des végétaux. En agriculture, il est utilisé sous forme d'engrais tel le sulfate de potassium, le chlorure de potassium, de nitrate de potassium.

**Tableau 18. Présentation de l'historique de teneurs en ions potassium en mg/L**

[K <sup>+</sup> ]	Oct–Nov 2011	Juin–Juil 2012	Déc 2013	Juin 2014	Déc. 2014
Minimum	0,76	0,5	1	1	1
Moyenne	8,34	12,2	10,56	4,68	4,8
Maximum	43,7	104	80	18	16
Ecart type	11,53	27,78	23,11	4,28	3,79

Les teneurs obtenues décrivent une hausse entre 2012 et 2013 avant de baisser considérablement en 2014. Les valeurs ne sont pas cependant uniformes aux valeurs moyennes. Les teneurs élevées se concentrent en un seul point tandis le reste de la région se caractérise par des valeurs moyennes. L'Est comporte de teneurs basses tandis à l'ouest on enregistre des valeurs supérieures.

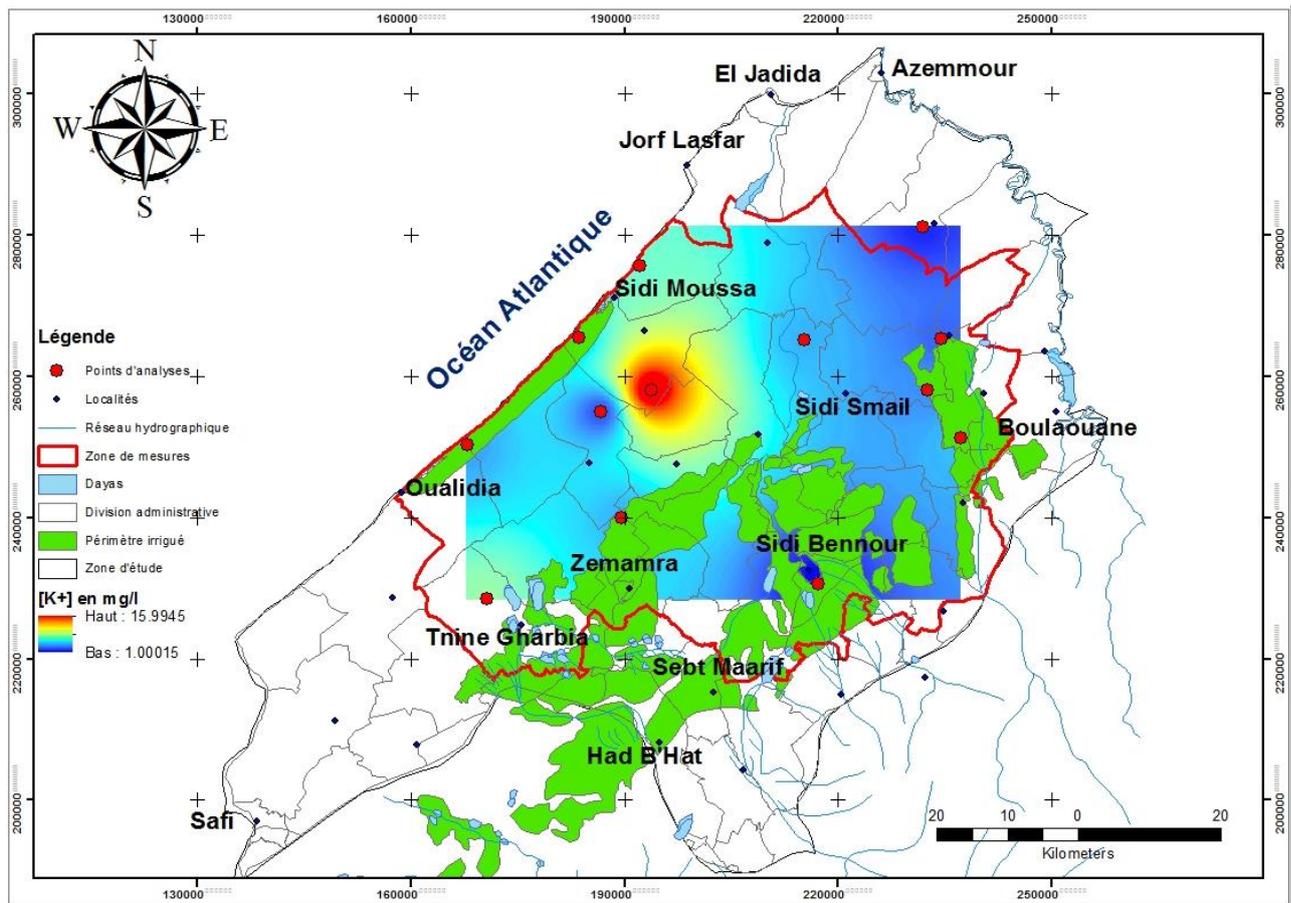


Figure 45. Variation spatiale des teneurs en Potassium [K<sup>+</sup>] des eaux souterraines du Sahel Doukkala central (Juin 2014)

#### 4.3.8 Les Nitrates

La présence d'un excès de nitrates dissous dans l'eau est un indice de pollution d'origine agricole par les engrais mais aussi urbaine par les dysfonctionnements des réseaux d'assainissements et par les industries.

Les nitrates étant très solubles dans l'eau, il est normal d'en trouver de faibles quantités partout, dans les eaux douces et marines, en surface et dans les nappes. À faible dose, ils sont un nutriment important pour les plantes, algues et certaines bactéries photosynthétiques (cyanophycées).

Ils constituent le stade final de l'oxydation de l'azote organique, leur présence dans une eau polluée atteste que le processus d'autoépuration est déjà entamé. L'activité humaine accélère le processus d'enrichissement en cet élément sur les sols subissant l'érosion, ce qui provoque l'infiltration des eaux usées, par les rejets des industries minérales et d'engrais azoté.

Dans des eaux de surface non-polluées, la teneur en nitrates varie selon les zones, l'origine de l'eau selon qu'il s'agisse du ruissellement ou de la remontée de la nappe à cela on ajoute les saisons avec les variations de pluviométriques. Cette teneur varie de 1 à 10 mg/l, et peut atteindre les 15 mg/l.

**Tableau 19. Présentation de l'historique de teneurs en nitrates en mg/L**

[NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	Oct–Nov 2011	Juin–Juil 2012	Déc 2013	Juin 2014	Déc. 2014
Minimum	26,8	13,3	3	21	16
Moyenne	78,58	54,79	67,45	64,15	67,15
Maximum	218	133	280	290	285
Ecart type	64,83	38,90	76,18	70,62	71,04

Le tableau nous révèle les teneurs moyennes élevées comparée à celles des eaux non polluées. On enregistre des valeurs allant de 3 à 290 mg/l en quatre années de mesure et, une tendance légère à la baisse au fil du temps.

En ce qui concerne la répartition spatiale, force est de remarquer que les basses teneurs sont en amont (dans les Doukkala) tandis que les teneurs élevées sont enregistrées en aval (dans le Sahel) avec notamment un pic au Nord de Zemamra.

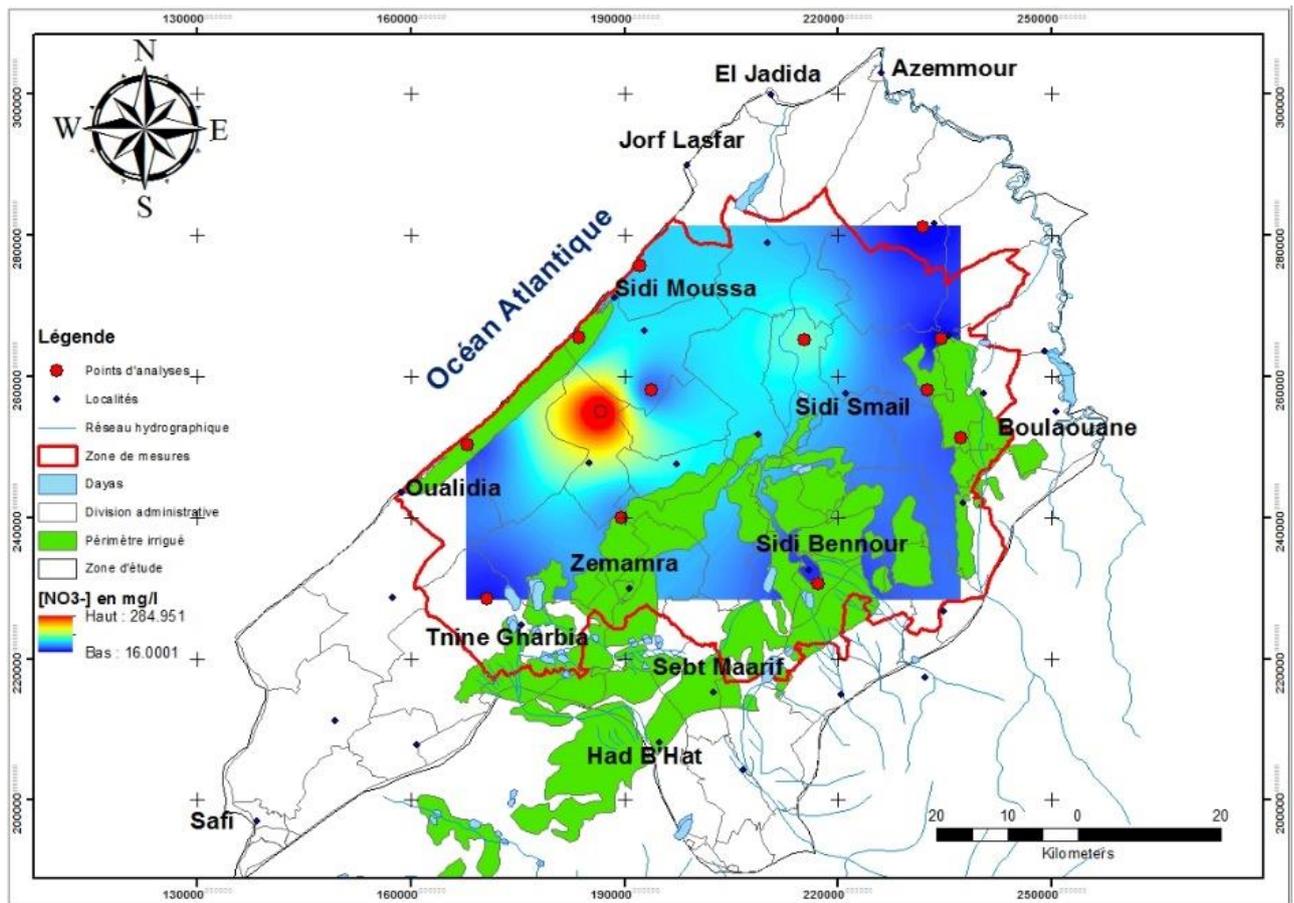


Figure 46. Variation spatiale des teneurs en Nitrates  $[NO_3^-]$  des eaux souterraines du Sahel Doukkala central (Juin 2014)

Les reports de donner nous ont permis de réaliser plusieurs cartes avec des différents éléments chimiques. Les concentrations montrent une variation selon le temps et l'espace mais aussi selon les différents usages de ressource même. Nous avons déterminé les tendances, les différents gradients ; tantôt les concentrations élevées se trouvaient à proximité des périmètres irrigués (c.à.d. à l'Est), et dans certains cas, nous avons enregistré de pics de valeurs dans les zones dites intermédiaires.

#### 4.4 Analyse et interprétation des données

L'étude chimique des eaux a pour but d'identifier les faciès chimiques des eaux, leur qualité, le degré de potabilité, ainsi que leur aptitude à l'irrigation. Elle permet aussi de suivre l'évolution spatiale des paramètres physico-chimiques et d'estimer leur origine en les corrélant avec la géologie et la piézométrie de la nappe (Gibbs, 1970).

**Tableau 20. Présentation du bilan des éléments physico-chimiques des eaux souterraines de la région du Sahel Doukkala**

Variabiles	Minimum	Maximum	Moyen	Unités
Température de l'eau	16,2	28,7	21,26	°C
Température de l'air	17,5	31	23,78	°C
pH	6,97	7,92	7,38	-
Conductivité électrique	0,42	6,54	2,513	mS/cm
Indice de permanganate	0,03	10,4	3,33	mg/l
Ammonium [NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ]	-	0,229	0,005	mg/l
Sodium [Na <sup>+</sup> ]	23,8	1100	326,34	mg/l
Potassium [K <sup>+</sup> ]	0,5	104	8,12	mg/l
Calcium [Ca <sup>2+</sup> ]	47	421	153,80	mg/l
Magnésium [Mg <sup>2+</sup> ]	9	210	73,63	mg/l
Manganèse [Mn <sup>2+</sup> ]	0,003	0,17	0,02	mg/l
Chlore [Cl <sup>-</sup> ]	53,2	2302	629,23	mg/l
Nitrites [NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ]	0,0001	0,591	0,045	mg/l
Nitrates [NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	3	290	66,43	mg/l
Hydrocarbonates [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	132	598	284,59	mg/l
Sulfates [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]	14	924,34	179,25	mg/l
Titre d'alcalinité complet (TAC)	3	54	19,72	°F
Titre hydrotimétrique (la dureté)	5,8	168	65,52	°F
Résidu sec (RS)	12,93	5670	1943,38	mg/l
Fer total	0,0062	8	0,22	mg/l
Coliformes fécaux	0	72000	5183,44	/100ml
Coliformes totaux	16	930000	61665,765	/100ml
Streptocoques fécaux	0	46000	3700,411	/100ml

On peut voir à partir de la description, le récapitulatifs des données enregistrées sur plusieurs années, suivant les mêmes points. D'un point de vue physique, la température de l'air est supérieure à celle de la nappe avec une différence moyenne de plus de 2°C. Cette information nous permet d'écarter l'hypothèse géothermique. Les valeurs de pH varient très peu, de 6,97 à 7,92 avec des moyennes de 7,38. Quant à la conductivité électrique, on enregistre 0,42 à 6,52 ; avec des moyennes 2,513 mS/cm.

D'un point de vue chimique, nous avons obtenus deux groupes d'éléments chimiques ; celles présentant des teneurs dominantes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , suivi de  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et le  $\text{Mg}^{2+}$ . La présence de ces ions est liée à la dissolution des minéraux susceptibles de se former par évaporation des eaux chargées en sels et à la dissolution des formations évaporitiques. Par contre la présence des éléments  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  est liée à la dissolution des carbonates (El Hammoumi et al., 2012).

Ainsi, on peut procéder par traçage des échantillons, afin d'évaluer l'origine des ions dissous ; en se basant sur le rapport de  $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})$  et  $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HCO}_3)$  en fonction des Solides Totaux Dissous.

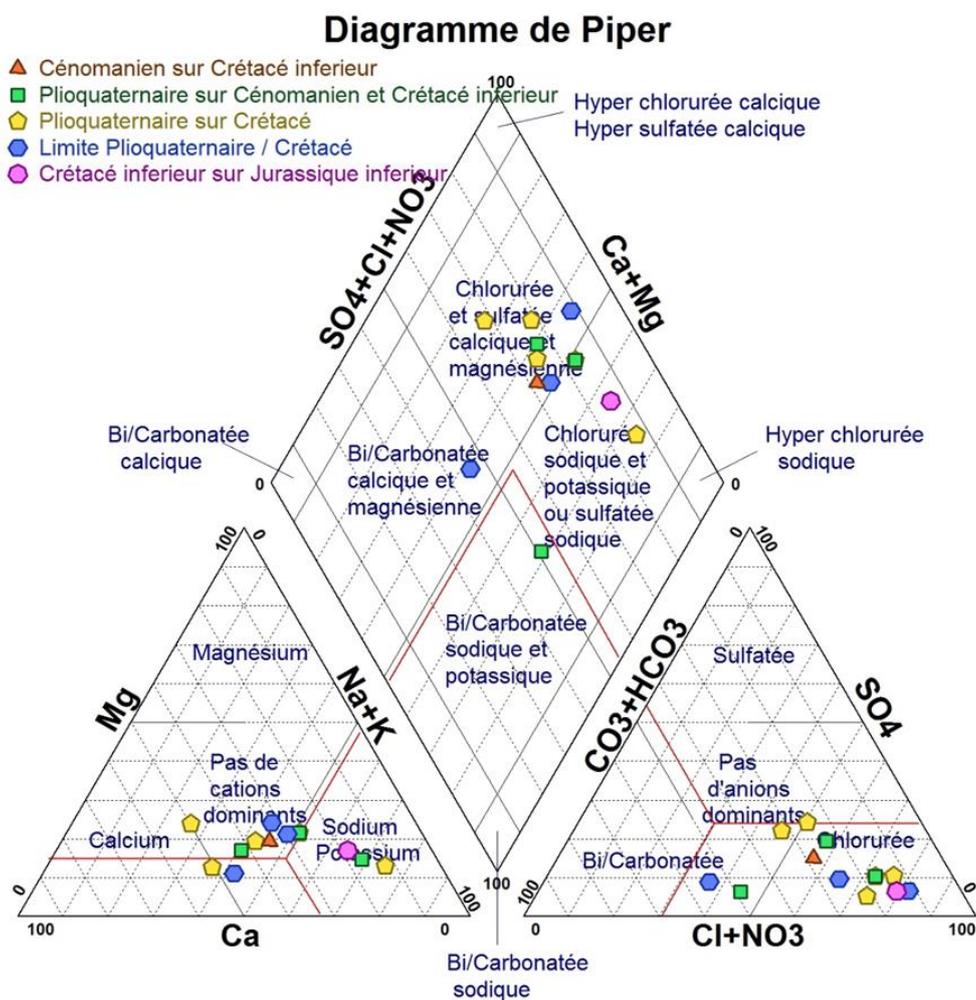
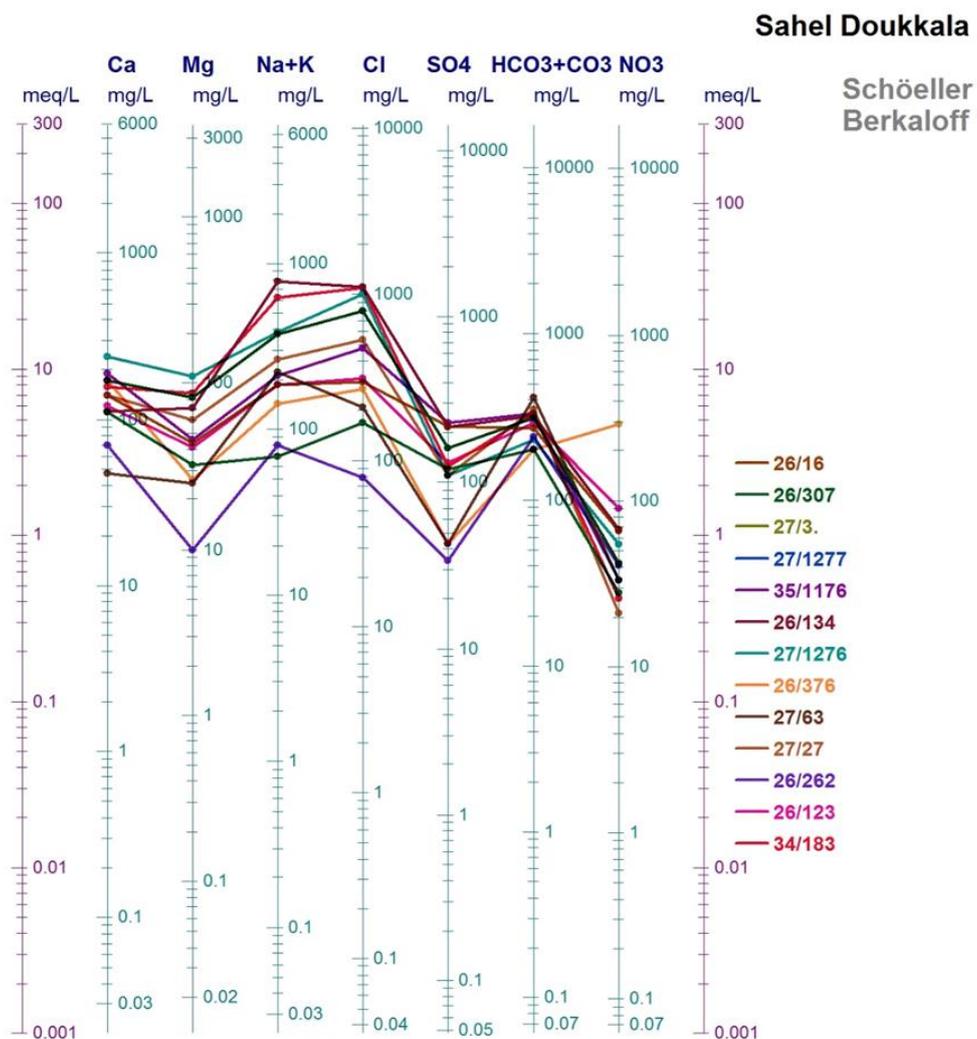


Figure 47. Diagramme triangulaire de Piper pour les eaux souterraines de la région du Sahel Doukkala (Juin 2014)



**Figure 48. Projection sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff des résultats des analyses des puits /forages du Sahel Doukkala (Juin 2014)**

Le diagramme de Piper utilise les éléments majeurs dans le but de représenter les différents faciès des eaux souterraines. Il permet également de voir l'évolution de l'eau, en passant d'un faciès à un autre, grâce aux analyses espacées dans le temps mais aussi des échantillons pris à des endroits différents. En ce qui nous concerne, nous pouvons d'ores et déjà établir un classement selon les familles des eaux.

- 12 échantillons sur 13, sont Chlorurés dont 4 présentent un faciès chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique et 7 chlorurés et sulfaté calcique et magnésiens avec 2 se trouvant à la limite des deux classes ;
- 2 échantillons bicarbonatés, respectivement calcique magnésien et sodique potassique.

Il est aussi important de préciser qu'il n'existe pas de solutions hyper chlorurées calcique, ni hyper sulfatée calcique encore moins des solutions hyper chlorurées sodiques ce malgré les présences relativement importantes de Sodium, de Potassium et de Calcium.

La répartition spatiale de ces faciès chimiques dépend de la nature lithologique de l'aquifère et des conditions de recharge. Dans ces différentes formations géologiques, nous remarquons quelques similitudes à partir des teneurs obtenues au niveau du toit de la nappe.

#### **i. Facies bicarbonaté calcique et magnésien / sodique et potassique**

Le faciès bicarbonaté représente 15,38% des analyses. C'est le faciès le moins dominant dans la zone d'étude qui représente en général, les eaux faiblement minéralisées. En effet, les conductivités des eaux varient entre 742  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 1421  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Les teneurs des ions bicarbonatés quant à eux, sont de l'ordre de 240 à 410 mg/l pour des teneurs en calcium allant de 40 à 70 mg/l et 220 à 62 mg/l pour les ions sodium.

Le faciès bicarbonaté indique un régime local des écoulements, les eaux ne sont pas encore chargées et sont sous saturées vis-à-vis de pas mal de minéraux et notamment la calcite, la dolomite et le gypse. La présence de ce faciès peut être liée aux apports des eaux météoriques ou aux apports des eaux qui lessivent les calcaires gréseux et les calcaires dolomitiques des formations du Crétacé.

#### **ii. Facies chloruré sodique et potassique ou sulfatée-sodique**

Le faciès chloruré sodique et sulfato-potassique est moyennement fréquent ; représentant 23,08 % des analyses. Essentiellement localisé à proximité de Zemamra, la différence entre la température de l'air et de l'eau s'élève à 2,95°C. Caractérisé par des conductivités élevées ; allant de 3300 à 4740  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ; les eaux sont fortement minéralisées et sont représentatives des eaux situées en aval.

En termes d'ions chlorure, la région enregistre des pics de concentration allant de 800 à 1122 mg/l et 125 à 215 mg/l en ce qui concerne les sulfates.

L'origine des ions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{Na}^+$  serait liée à un régime d'écoulement régional dont les distances parcourues sont importantes en allant de l'amont vers l'aval. Le temps de transit étant important, les

eaux se chargent en ions dissous. Il nous indique la présence des minéraux, roches carbonatées telles que : calcite, dolomite et gypse.

### **iii. Faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien**

Ce faciès représente plus de la moitié des eaux échantillons analysés soient ; 61,54%. Il s'agit là du faciès de plus dominant de la région ; aussi bien présent en amont dans les plaines des Doukkala qu'en aval, le long du littoral (Sahel). Les conductivités sont élevées, avec une moyenne de 2255  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et des valeurs allant de 1555 à 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Les eaux sont moyennement riches et très variées en différentes éléments chimiques.

La différence entre les températures de l'air et de l'eau, semble influencer la conductivité de la nappe. En effet, la conductivité électrique reste élevée dans le Sahel ; à proximité du littoral où, le différentiel de températures atteint des valeurs supérieurs.

#### 4.4.1 Indice de saturation

Sur la base des équilibres thermodynamiques, il est possible de définir une évolution chimique dans l'aquifère Plio-quadernaire de la région d'étude. Pour cela la tendance des formes chimiques entre la phase dissoute et la phase minérale a été examinée. L'indice de saturation calculé exprime le degré d'équilibre chimique entre l'eau et le minéral dans la matrice de l'aquifère et peut être considéré comme une mesure du processus de dissolution et/ou précipitation concernant l'interaction eau-roche (Maas & Homan, 1976).

C'est un modèle d'équilibre extrait de la notion de saturation théorique et fournit un indicateur du degré de saturation de l'eau par rapport au carbonate de calcium. Le niveau de saturation de Langelier se rapproche de la notion de saturation en utilisant le pH comme variable principale. L'IS peut être interprété comme le changement de pH nécessaire pour amener l'eau à l'équilibre calco-carbonique.

L'IS est probablement l'indicateur le plus largement utilisé comme l'échelle potentielle d'entartrage de l'eau. C'est simplement un indice d'équilibre et ne traite que de la force motrice thermodynamique de la formation de tartre de carbonate de calcium et de sa croissance. Il ne donne aucune indication de la

valeur quantitative de l'entartrage ou de la quantité de carbonate de calcium à précipiter pour amener l'eau à l'équilibre.

Il indique simplement la tendance pour la formation de tartre et l'accroissement du pH comme variable principale.

On utilise notamment le logiciel Diagrammes contenant l'outil PHREEQ, à l'image des travaux réalisés par Parkhurst, et Appelo (1999) ; dans le but de déduire les indices de saturations de certains minéraux.

Si IS est négatif : Pas d'incrustation potentielle, l'eau va dissoudre le  $\text{CaCO}_3$

Si IS est positif : l'incrustation peut se former et la précipitation du  $\text{CaCO}_3$  peut se produire

Si IS est proche de zéro : le potentiel d'incrustation est limité. Des changements dans la qualité de l'eau et la température (ou l'évaporation) peuvent modifier l'indice.

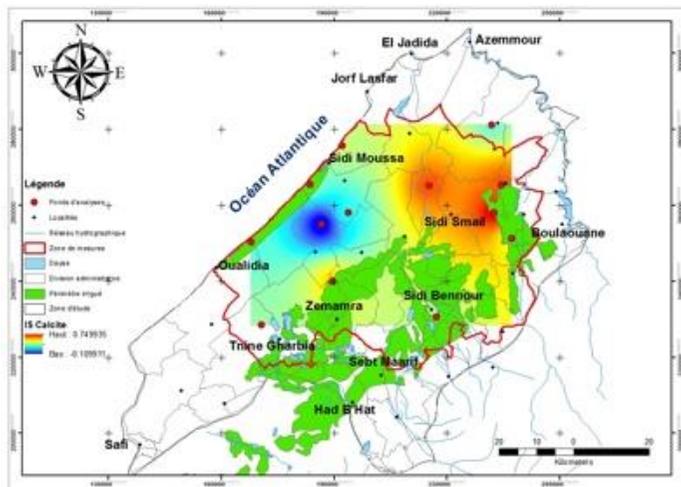
**Tableau 21. Indices de saturation des eaux souterraines de la région du Sahel Doukkala**

Variable	Min	Max	Moyenne
IS Calcite	-0,38	0,75	0,08
IS Aragonite	-0,52	0,61	-0,07
IS Dolomites	-1,21	1,7	0,132
IS Gypse	-2,39	0,03	-1,205
IS Anhydrite	-2,61	-0,19	-1,43

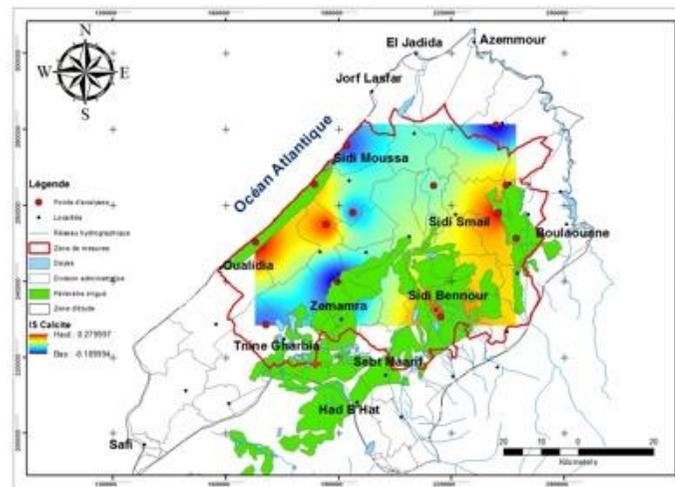
On remarque d'un point de vue global ; que les valeurs indiquent un état d'équilibre par rapport aux minéraux cités précédemment (Tableau 21). D'un point de vue spatial ; force est de noter les eaux situées en amont le sont davantage ; comparé à celles situées en aval.

En effet, la dissolution d'un minéral dans l'eau peut être décrite par un état d'équilibre : quand l'eau est en contact avec un minéral, la concentration de la solution augmente pour atteindre un maximum pour des conditions physico-chimiques données. On dit alors que la solution est saturée en ce minéral (Cidu et al. 2009).

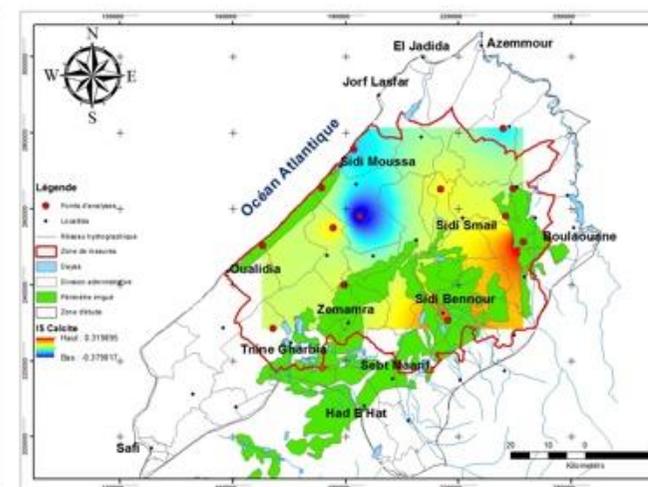
Selon la géologie, on peut rajouter que la calcite est le principal constituant de nombreuses roches sédimentaires : calcaires, marnes, c'est un des carbonates abondants. Il se forme après précipitation chimique lors de l'évaporation des solutions riches en bicarbonate de calcium et par extraction de micro-organismes vivants à partir des mêmes solutions : calcaire organogène.



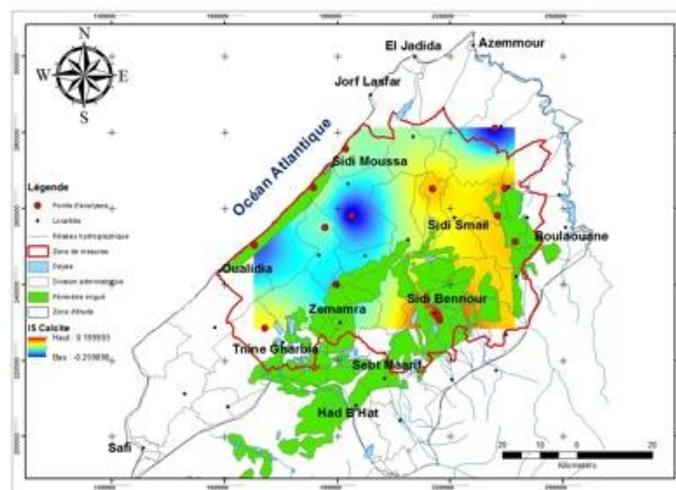
2011



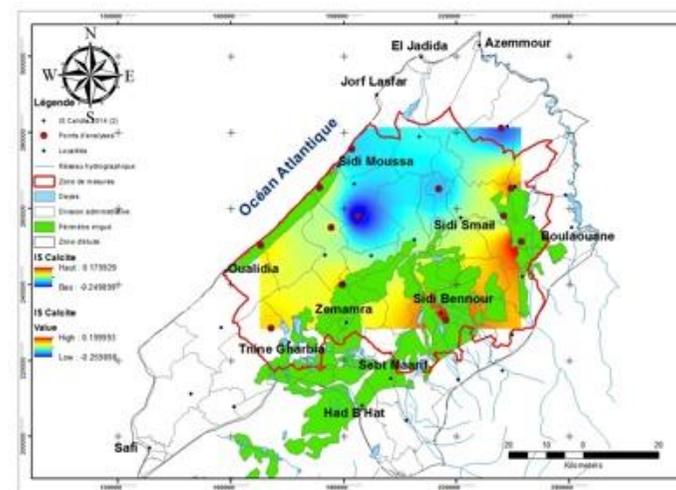
2012



2013



Juin 2014



Décembre 2014

Figure 49. Cartographie représentative des indices de saturations des aquifères de la région dans le Sahel Central de 2011 à 2014

Deux points se démarquent en indiquant une sursaturation avec des valeurs supérieures à 0 ; il s'agit des ouvrages 35/1176 et 27/27 situés en amont mais surtout dans le périmètre irrigué des Doukkala (à proximité de Boulaouane, et de Sidi Bennour). On note malgré tout, des valeurs acceptables sur l'ensemble de la région et idéales en quelques points.

#### 4.4.2 Mise en évidence des échanges de base

L'utilisation de l'indice d'échange de base (i.e.b.) permet de mettre en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son trajet souterrain. Par définition, l'i.e.b est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants dans l'eau. Il est obtenu par la relation suivante (Dib, 2010 ; Scholler, 1956) :

$$\mathbf{i.e.b. = [rCl - r(Na + K)] / rCl \text{ (7)}}$$

- Si l'i.e.b. est négatif alors les ions  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  de l'eau sont échangés contre les ions  $K^+$  et  $Na^+$  des formations encaissantes.
- Si l'i.e.b. est positif alors les ions  $Na^+$  et  $K^+$  de l'eau sont remplacés par les ions  $Mg^{2+}$  et  $Ca^{2+}$  des formations encaissantes.
- Si l'i.e.b. = 0 alors il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et celle du terrain encaissant.

**Tableau 22. Récapitulatif de l'indice d'échanges de bases de 2011 à 2015**

Ouvrage	2011	2012	2013	Juin 2014	Déc. 2014
26/16	0,415	0,408	-	0,06	0,09
26/307	0,279	0,304	-0,335	0,39	0,272
27/3	0,433	0,329	0,007	0,282	0,234
27/1277	0,382	0,223	0,01	0,282	0,393
35/1176	0,343	0,292	0,023	0,323	0,255
26/134	0,07	-0,075	0,003	-0,064	0,042
27/1276	0,335	0,42	0,012	0,41	0,387
26/376	0,292	0,439	0,025	0,195	0,23
27/63	-0,206	-0,499	0,021	-0,622	-0,213
27/27	0,53	0,369	0,008	0,253	0,066
26/262	-0,059	0,083	0,004	-0,417	-0,192
26/123	0,246	0,086	0,005	0,091	0,419
34/183	0,143	-0,946	-	0,132	0,215

Le bilan comptable nous permet de noter que plusieurs mesures sont positives soient 52 contre 11 mesures à valeurs négatives dont 21 sensiblement égales à 0. Les ions magnésium et calcium contenus dans le réservoir, tendent à remplacer les ions sodium et potassium de l'eau.

#### 4.5 Analyse en Composantes Principales (ACP)

Cette analyse multidimensionnelle des données est une méthode factorielle et linéaire qui traite des caractères numériques (dans notre cas, les résultats des analyses physico - chimiques). Elle permet de mettre en évidence les ressemblances chimiques entre les différentes eaux et/ou les différents pôles d'acquisition de la minéralisation.

Au cours de ce travail, une analyse statistique (ACP) a été réalisée sur des variables centrées réduites à l'aide des logiciels XLSTAT et SPSS. Les données portent sur l'ensemble des 13 stations des eaux de la nappe sur différentes années de mesures. 14 variables ont été traitées, à savoir les paramètres physico-chimiques (T, pH, conductivité) et les ions majeurs ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{NH}_4^+$ ).

L'utilisation de l'analyse en composantes principales (ACP) pour l'étude globale des eaux souterraines permet une différenciation sur leurs particularités chimiques, une détermination de leurs variations d'ensemble (facteurs) suivant les axes principaux et surtout une caractérisation des différents pôles d'acquisition de la minéralisation. Les coefficients de corrélation entre les éléments sont reportés dans le tableau

**Tableau 23. Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques**

	T air	T eau	pH	Cond.	IP	Na	K	Ca	Mg	Cl	NO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	TH	RS
T air	<b>1</b>	<b>0.623</b>	-0.025	0.175	-0.102	0.221	-0.413	-0.338	0.009	0.197	-0.378	<b>0.570</b>	<b>-0.573</b>	0.074	0.133
T eau	<b>0.623</b>	<b>1</b>	0.091	0.228	-0.167	0.107	-0.279	-0.015	0.047	0.120	0.232	0.343	-0.240	0.305	0.174
pH	-0.025	0.091	<b>1</b>	-0.286	0.110	-0.017	0.424	<b>-0.595</b>	-0.471	-0.136	0.496	-0.270	-0.306	<b>-0.556</b>	-0.319
Cond.	0.175	0.228	-0.286	<b>1</b>	0.066	<b>0.881</b>	0.261	0.480	<b>0.808</b>	<b>0.958</b>	-0.080	0.321	0.315	<b>0.605</b>	<b>0.990</b>
IP	-0.102	-0.167	0.110	0.066	<b>1</b>	0.246	0.086	-0.399	-0.045	0.189	0.053	0.432	-0.067	-0.292	-0.001
Na	0.221	0.107	-0.017	<b>0.881</b>	0.246	<b>1</b>	0.394	0.069	<b>0.528</b>	<b>0.941</b>	0.021	0.449	0.117	0.208	<b>0.874</b>
K	-0.413	-0.279	0.424	0.261	0.086	0.394	<b>1</b>	-0.022	0.035	0.274	0.139	-0.303	0.539	-0.184	0.279
Ca	-0.338	-0.015	<b>-0.595</b>	0.480	-0.399	0.069	-0.022	<b>1</b>	<b>0.673</b>	0.297	-0.091	-0.354	<b>0.639</b>	<b>0.778</b>	0.521
Mg	0.009	0.047	-0.471	<b>0.808</b>	-0.045	0.528	0.035	<b>0.673</b>	<b>1</b>	<b>0.739</b>	-0.165	0.117	0.316	<b>0.806</b>	<b>0.798</b>
Cl	0.197	0.120	-0.136	<b>0.958</b>	0.189	<b>0.941</b>	0.274	0.297	<b>0.739</b>	<b>1</b>	-0.060	0.342	0.149	0.435	<b>0.944</b>
NO <sub>3</sub>	-0.378	0.232	0.496	-0.080	0.053	0.021	0.139	-0.091	-0.165	-0.060	<b>1</b>	-0.176	-0.048	-0.198	-0.076
HCO <sub>3</sub>	<b>0.570</b>	0.343	-0.270	0.321	0.432	0.449	-0.303	-0.354	0.117	0.342	-0.176	<b>1</b>	-0.384	0.076	0.253
SO <sub>4</sub>	<b>-0.573</b>	-0.240	-0.306	0.315	-0.067	0.117	0.539	<b>0.639</b>	0.316	0.149	-0.048	-0.348	<b>1</b>	0.408	0.369
TH	0.074	0.305	<b>-0.556</b>	<b>0.605</b>	-0.292	0.208	-0.184	<b>0.778</b>	<b>0.806</b>	0.435	-0.198	0.076	0.408	<b>1</b>	<b>0.591</b>
RS	0.133	0.174	-0.319	<b>0.990</b>	-0.001	<b>0.874</b>	0.279	0.521	<b>0.798</b>	<b>0.944</b>	-0.076	0.253	0.369	<b>0.591</b>	<b>1</b>

Dans un premier temps, la corrélation obtenue est de l'ordre de 57,51% (F1 x F2) avec 5 axes de composants entre

- Le résidu sec, la conductivité électrique le sodium et les chlorures, le magnésium, les nitrates et les bicarbonates
- Les magnésiums, le sodium, résidu sec et la conductivité, le TH et le magnésium
- Les magnésiums et les chlorures, le TH et le calcium,
- Températures de l'air et l'eau, le TH et la conductivité, le magnésium et le calcium, les sulfates et les calciums

- Les bicarbonates les sulfates et la température de l'air,
- Le calcium le TH, résidu sec et le pH, le magnésium et le sodium.

On ne retiendra bien évidemment que les deux principaux axes et, pour se faire on limite les variables en éliminant le pH, les nitrates, la température de l'eau, l'indice de permanganates. Le but étant, d'obtenir une variance totale de 74,24% ; soit une progression de 16,73%.

L'analyse des variables montre que :

- **Le facteur 1** exprimant 48,49% de l'inertie totale, est essentiellement bien corrélé avec les variables : conductivité, les résidus secs, les chlorures, le magnésium, le TH, le sodium. Il s'agit bien du pôle de minéralisation issue en partie ; de l'interaction eau – roche.
- **Le facteur 2** exprime 25,74 % de l'inertie totale du nuage, il est caractérisé par la température de l'air, de l'eau, les bicarbonates.

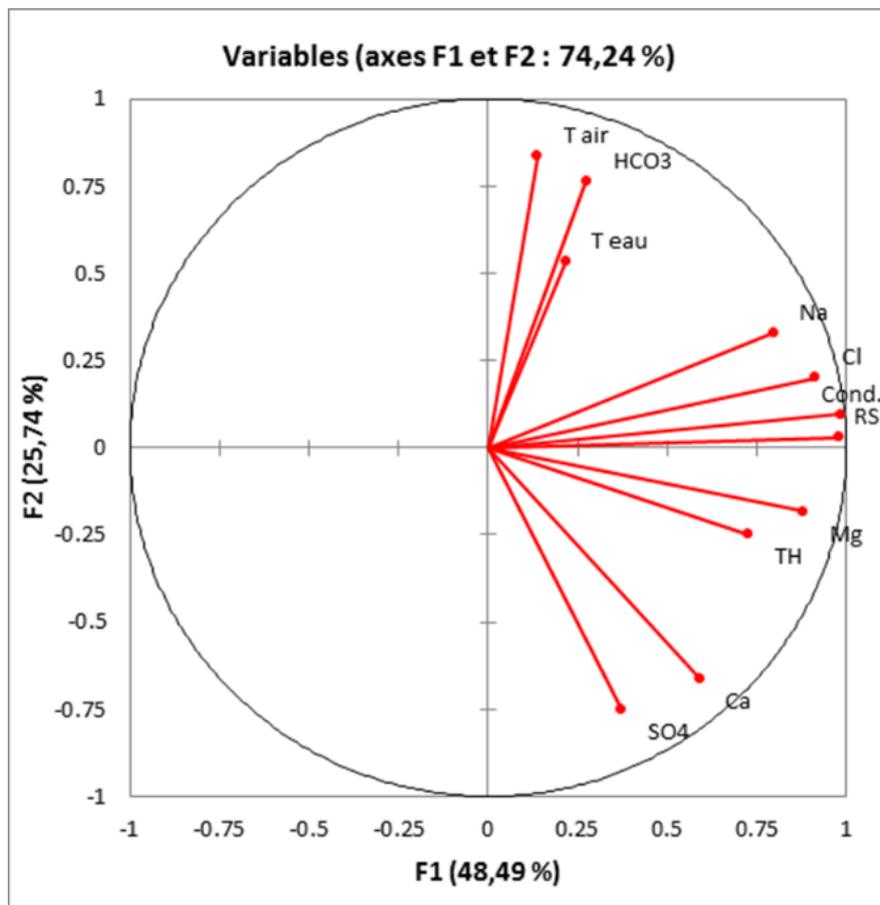


Figure 50. Projection des variables dans le plan factoriel F1-F2 des eaux souterraines du Sahel Central

L'analyse de la projection des individus dans le plan factoriel F1-F2 montre qu'on peut subdiviser les points de mesure en trois groupes (fig. 47) :

- Premier groupe (Obs. 6, 7, 3, 10) : caractérisé par des puits minéralisés par rapport aux autres,
- Deuxième groupe (Obs. 5,8, 11) : il regroupe les stations les moins minéralisées ayant quelques fois des fortes teneurs en bicarbonates, et inversement corrélé au sulfate.
- Troisième groupe (Obs. 13) ; celui des puits caractérisés par des valeurs faibles voire moyenne de conductivités, ainsi que de minéralisation.

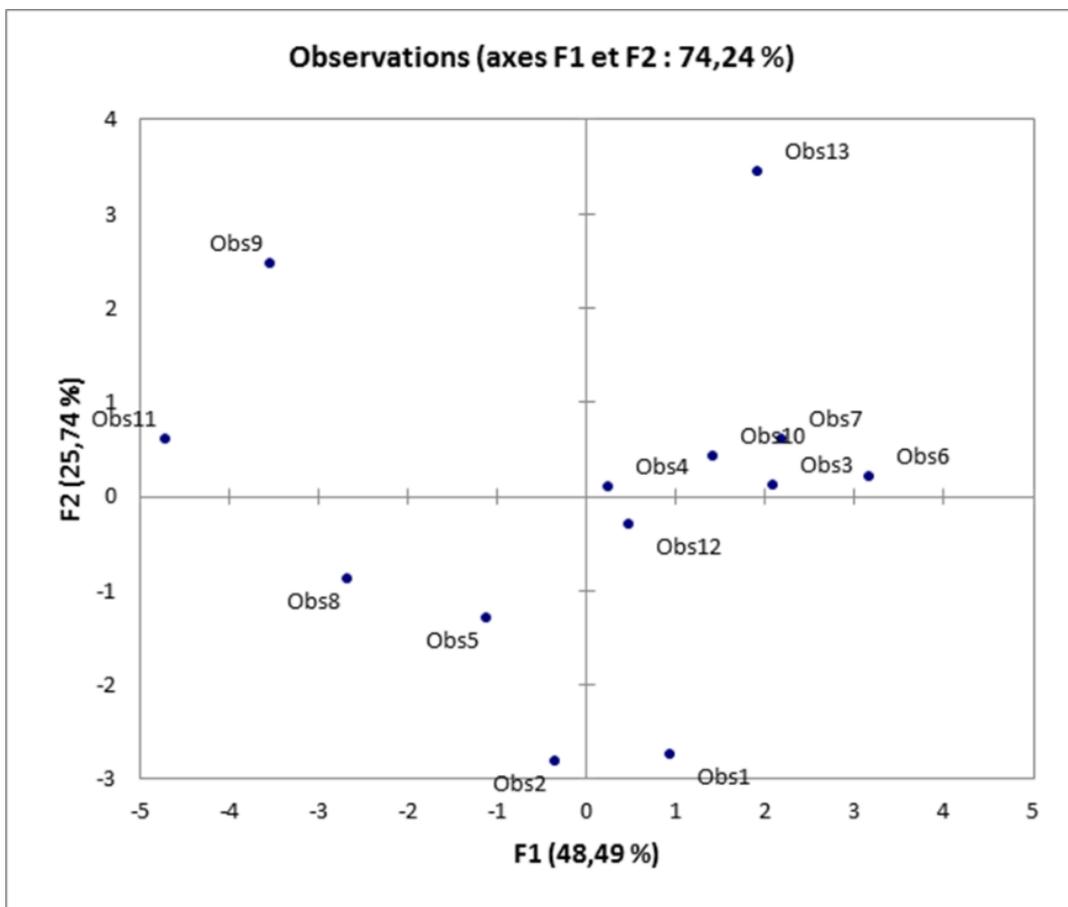


Figure 51. Projection des stations de mesure des eaux souterraines sur le plan factoriel F1-F2

#### 4.6 Bilan qualitatif

On rappelle que les eaux souterraines, considérées comme relativement exemptes d'agents pathogènes d'origine hydrique, constituent l'une des sources d'eau douce les plus précieuses utilisées à des fins de

consommation dans le monde entier. La qualité de l'eau est identifiée en termes de paramètres physiques, chimiques et biologiques (Sargaonkar and Deshpande, 2003). Elle présente ainsi une importance capitale (Crévecoeur et al., 2011).

A titre d'exemple, le sulfate et le nitrates sont d'importants indicateurs de qualités de l'eau. Les concentrations élevées présentent des risques car associées à des problèmes respiratoires (Subba Rao, 1993) alors que les fortes concentrations de nitrates sont susceptibles de provoquer une méthémoglobine, un cancer gastrique, un goitre, des malformations congénitales et de l'hypertension (Majumdar et Gupta, 2000).

Le système national d'évaluation de la qualité de l'eau est considéré comme un des indices de développement durable. Il est basé sur les grilles de qualité simplifiées fixées par l'arrêté n° 1275-02 du 17 Octobre 2002. Selon les paramètres évalués, on obtient le tableau (24).

**Tableau 24. Grille simplifiée pour l'évaluation de la qualité globale des eaux souterraines selon**

	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	MO	CF /100 ml	Cond.
Excellente	< 0.1	< 5	< 200	< 3	< 20	< 400
Bonne	0,1 – 0,5	5 – 25	200 – 300	3 – 5	20 – 2000	400 – 1300
Moyenne	0,5 – 2	25 – 50	300 – 750	5 – 8	2000 – 20000	1300 – 2700
Mauvaise	2 – 8	50 – 100	750 – 1000	> 8	20000	2700 – 3000
Très mauvaise	>8	>100	>1000	-	-	> 3000

En se référant au tableau précédent, nous avons établi un récapitulatif qualitatif de notre échantillonnage (Tableau 25).

L'ammonium dans La nappe phréatique traduit habituellement un processus de dégradation incomplet de la matière organique, provient de la réaction de minéraux contenant du fer avec des nitrates. C'est donc un excellent indicateur de la pollution de l'eau par des rejets organiques d'origine agricole, domestique ou industriel. Ces effets directs sur la santé sont encore méconnus cependant il peut être lié à plusieurs problèmes environnementaux.

Concernant les nitrates, il indique une pollution d'origine agricole par les engrais, d'un dysfonctionnement du réseau d'assainissement et d'une pollution industrielle. S'agissant de notre échantillonnage, nous n'avons en moyenne aucune teneur probante. En effet, seulement 36,48% de points possèdent une qualité moyenne (la meilleure), contre 61,45% jugé mauvais voire très mauvais.

Le chlorure se retrouve dans les eaux souterraines en raison de l'altération météorique et la lixiviation des roches sédimentaires et des sols, ainsi que de la dissolution des dépôts de sel, l'intrusion de l'eau salée et embruns dans les régions côtières, les lixiviats issus des décharges d'ordures ou des sites d'enfouissement des déchets, voire des puits d'exploration profonds ou de mines (rare).

On dénombre six (06) ouvrages sur treize (13) ; soit un peu plus de 46 % ayant des concentrations allant de 826 à 1329,4 mg/l. Un puit excellent contre six (06) de bonne qualité.

S'agissant de l'indice de permanganate, c'est une mesure conventionnelle de la contamination par les matières organiques et les matières inorganiques oxydables dans un échantillon d'eau. Elle est essentiellement utilisée pour juger aussi bien de la qualité d'eaux potables que d'eaux brutes telles que les eaux superficielles. On note dans notre cas, que les concentrations de matière organiques sont bonnes.

Pour déterminer la potabilité d'une eau, trois micro-organismes indicateurs de pollutions sont recherchés parmi lesquels : les coliformes fécaux.

Les coliformes fécaux et les entérocoques proviennent d'une pollution fécale animale ou humaine et démontrent la présence potentielle d'organismes pathogènes capables de causer des maladies entériques. Aucun de ceux-ci ne doit être présent par 100 ml d'eau potable pour que l'eau soit propre à la consommation.

Cette contamination peut provenir de l'infiltration de l'eau de surface dans les puits, soit une eau restée stagnante, ou encore de l'encrassement d'une tuyauterie. Elle indique la présence d'une source de matières fécales (fumier, fosse septique ou autre). On compte cependant très peu de puits contaminés, soit un (01) puits sur 13 présentant une valeur supérieure à 20000 /100 ml.

En ce qui concerne la conductivité électrique, près de la moitié des points possèdent des concentrations élevées, contre un seul de bonne qualité (26/262), et le reste avec des valeurs moyennes.

**Tableau 25. Qualité globale des eaux souterraines du Sahel Central (2011 - 2014)**

Points de mesures	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	MO	CF /100 ml	Cond.	Qualité
26/16	0,04	62,6	569,5	2,985	8625	2635	Mauvaise
26/307	0,023	59,24	337,2	2,51	73,8	2322	Mauvaise
27/3	0,06	37,55	826	2,428	310	3165	Très mauvaise
27/1277	0,04	56,4	625,6	3,102	1428	2569	Mauvaise
35/1176	0,06	29,28	420,4	3,312	4040	2003	Moyenne
26/134	0,02	77,42	1329,4	3,494	43404	4113	Très mauvaise
27/1276	0,08	41,68	1008	3,438	302	3514	Très mauvaise
26/376	0,06	184,40	244,04	2,098	1482,8	1470	Très mauvaise
27/63	0,02	35,28	247,4	5,526	136,8	1321	Moyenne
27/27	0,02	18,78	831,72	2,412	510	2922	Mauvaise
26/262	0,04	48,84	115,2	2,02	1200	820	Moyenne
26/123	0,14	119,23	874,6	6,352	4540	2790	Très mauvaise
34/183	0,02	98	847,5	2,98	90,5	3373	Très mauvaise

#### 4.7 Conclusion partielle

Cette étude a permis une évaluation de la qualité physico-chimique des eaux des aquifères du Sahel central. L'analyse des résultats a révélé que les eaux des points contrôlés sont affectées par une pollution d'origine géologique et anthropique.

Trois zones se démarquent, ayant une qualité globale moyenne :

- La division administrative de Laatatra, situé en amont ; au Sud-Est de Sidi Bennour,
- La division administrative de Oulad Hamdane, toujours en amont mais un peu plus au Nord
- Et la division administrative de Oulad Aissa, plus à l'Ouest, à proximité du littoral.

D'autre part, les zones critiques sont plus nombreuses, notamment :

- Les divisions administratives de Mettough, Zaouiat Lakouacem, plus en amont ;

- La localité de Zemamra, Tnine El Gharbia et ses environs plus au Sud ;
- La localité de Tleta Oulad Gnahem, Sidi Moussa et ses environs.

En amont de la zone d'étude la dégradation de la qualité des eaux peut s'expliquer par la présence du périmètre d'irrigation. En effet, l'utilisation des engrais et d'autres rejets urbains ; contribuent à altérer les ressources naturelles. Cette action est d'autant plus importante en raison du manque de cours d'eaux permanents.

Les eaux de la partie aval du bassin sont caractérisées par des valeurs élevées de la conductivité électrique et des chlorures associées aux sédiments évaporitiques. Dans cette zone restreinte, 46 % de points contrôlés affichent une très mauvaise qualité, contre 54% de moyenne voire bonne qualité.

En définitive, dresser le bilan global qualitatif vient compléter les précédentes investigations dans le but de déterminer clairement les zones critiques de celles qui ne le sont pas. En comparaison avec les mesures effectuées en amont du bassin versant, nous avons obtenu le tableau ci-après (Tableau 26).

On note clairement la dégradation des eaux souterraines en aval, qui contraste avec les points d'eaux situés en amont. De la même manière, nous avons effectué la comparaison avec les mesures datant de 1997 à 2002 dans la zone d'étude où l'on note une légère dégradation temporelle en certains points.

**Tableau 26. Données physico-chimiques entre les points d'eaux situés en amont et ceux situés en aval du bassin versant de l'oued Oum Er R'Bia**

	NO <sub>3</sub>	Cl	CF	CE
Amont du bassin versant	14.97	7.04	69.14	548.64
Sahel Doukkala	66.82	636.66	5087.92	2539.77
Différentiel	51.85	629.62	5018.78	1991.13

Tableau 27. Bilan qualitatif des eaux souterraines du Sahel Central (1997 - 2002)

Points de mesures	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	MO	CF /100 ml	Cond.	Qualité
34/183	0,037	156,13	495,35	2,44	668,33	2297	Très mauvaise
26/376	0,052	26,26	44,47	2,336	942,67	398	Moyenne
26/63	0,07	61,42	206,02	0,975	3766,67	1215	Mauvaise
27/27	0,014	358,87	1132,52	1,713	476,67	3695	Très mauvaise
34/1430	0,056	84,28	186,17	1,318	575,5	1035	Mauvaise
35/1771	0,037	121,27	618,28	1,56	309,5	2804	Très mauvaise
34/1462	0,03	79,88	80,4	1,33	337,33	684	Mauvaise
34/1517	0,027	64,565	98,35	1,425	3286,67	759	Mauvaise
34/1586	0,059	102,74	260,03	2,13	1425	1958	Très mauvaise
26/262	0,039	65,795	77,23	1,67	493,33	712	Mauvaise
26/123	0,056	152,215	1047,18	2,22	1156,33	3908	Très mauvaise
34/1536	0,12	58,09	622,37	1,58	1408	2546	Mauvaise
26/116	0,05	59,16	426,15	1,578	4835,67	2119	Mauvaise
26/307	0,0295	81	460,18	1,88	248,33	2230	Mauvaise
27/3	0,025	32,66	1013,71	1,668	204,17	3453	Très mauvaise
27/1277	0,031	28,37	423,18	0,982	625,33	2105	Moyenne
35/1176	0,04	19,52	490,32	1,197	815,17	1805	Moyenne
26/134	0,041	61,66	740,35	1,895	1108,33	3007	Très mauvaise
27/1276	0,029	21,93	1317,27	2,352	3370	4298	Très mauvaise
34/1550	0,05	19,41	165,88	2,337	78,33	1079	Bonne

## **Partie III. Synthèse & applications**

## 5 Chapitre 5. Choix de sites et scénario de recharges

Malgré l'hétérogénéité et les rendements limités des aquifères, les ressources en eaux dans de nombreuses régions en particulier dans les contextes arides et semi arides où aucune eau de surface n'est disponible de manière permanente pour la majeure partie de l'année ; la mise en œuvre de la recharge des nappes de la région, devrait se faire tenant compte d'un scénario unique. En effet, les confluences du réseau hydrographique moins dense, de l'accroissement de la population, du développement industriel et agricole, nous permettent de constater une diminution rapide des rendements de puits et du potentiel de stockage.

### 5.1 Récapitulatif des historiques de données

#### 5.1.1 Présentation de la situation des ressources en eau souterraines du Sahel

Les ressources en eau n'ont été modifiées par rapport aux conditions naturelles que dans le Sahel côtier où leur baisse a été compensée par des entrées d'eau de mer et une augmentation corrélative de la salinité et, dans le Sahel intérieur, avec une croissance des réserves dans les secteurs influencés par les eaux d'irrigation. Elles n'ont pas varié de manière significative pour les plateaux calcaires des Sahel d'El Jadida et de Safi.

Dans le Sahel côtier, les pompages sont irrégulièrement répartis et varient entre les secteurs selon la disponibilité en sols et la présence de lagunes ou de marais qui limitent la surface utile de la basse plaine côtière. La disparité entre les prélèvements et les ressources à l'échelle des secteurs du Sahel côtier explique les anomalies de forte salinité observées dans plusieurs secteurs en état de surexploitation tels qu'Oualidia, Sidi Echeikh et Sidi Moussa.

Parmi ces secteurs en état de surexploitation, seul celui de Oualidia est caractérisé par une situation critique avec des prélèvements supérieurs d'un tiers aux ressources locales de la nappe (étude DRHT, 1994 et étude du PDAIRE). La forte entrée d'eau de mer et la baisse d'emménagement indiquent que l'évolution n'est pas stabilisée et que la salinité des eaux devrait encore se dégrader.

La situation est moins préoccupante pour les secteurs de Sidi Echeikh et de Sidi Moussa où les pompages sont du même ordre que les apports d'eau douce et les entrées d'eau de mer sont encore peu importantes. Ils constituent néanmoins des secteurs sensibles.

Pour les autres secteurs côtiers, des ressources continuent à se perdre vers la mer et disposent donc d'un potentiel de développement des pompages non négligeable dont la mise en valeur ne devra toutefois s'effectuer que par étapes afin de préserver des conditions de salinité acceptables, notamment dans la basse plaine côtière.

Les principaux secteurs en état de surexploitation dans le Sahel côtier sont reportés sur la carte donnée ci-après

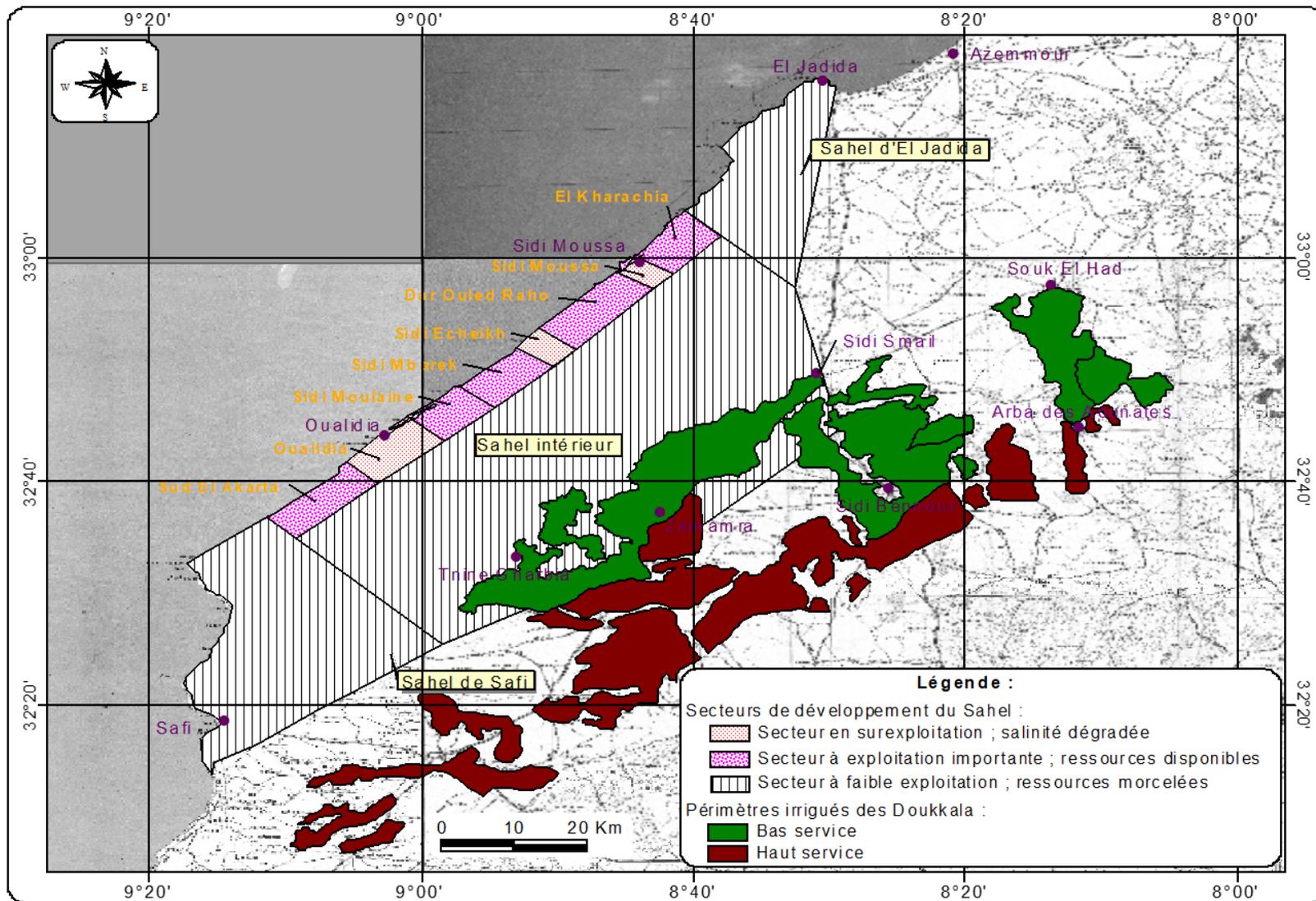


Figure 52. Présentation des secteurs en exploitation dans le Sahel (étude DRHT et rapport PDAIRE 1994)

Dans ces mêmes régions côtières, on dresse le bilan hydrologique présenté par la DRHT (1994) sur une distance de moins de 1 km de la cote

**Tableau 28. Situation des ressources en eau et de la salinité dans le Sahel côtier**

Secteur côtier	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Bilan hydrologique calculé au début de 1993					
		Entrées (l/s)			Sorties (l/s)		
	Distance <1km de la mer	Apport eau douce	Entrée eau de mer	Baisse des réserves	Pompage	Sortie vers la mer	Augmentation des réserves
Sud El Akarta	-	249	0	8	84	173	0
Oualidia	3700	244	114	10	365	3	0
Sidi Moulaine	2300	164	0	3	78	89	0
Sidi Mbarek	1900	511	0	4	173	341	1
Sidi Echeikh	2900	117	12	2	107	24	0
Dar Ouled Raho	2000	465	0	4	151	317	1
Sidi Moussa	2700	24	2	1	23	4	0
El Kharachia	2100	116	0	1	37	80	0

Dans les autres secteurs du Sahel, les ressources en eau souterraine constituent un potentiel encore peu exploité, car les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère principal sont très variables et souvent peu favorables avec des débits ponctuels faibles, des profondeurs de nappe importantes et une minéralisation localement élevée dans plusieurs zones.

### 5.1.2 Ressources en eau potentielles pour la recharge artificielle du Sahel

Les ressources en eau de surface générées localement sont inexistantes en raison du développement de la karstification. Les volumes régularisés qui sont transférés de l'Oum Er Rbia vers le périmètre d'irrigation des Doukkala et les eaux de drainage représentent, par contre, des ressources en eau potentielles pour la recharge du Sahel. Les pertes participent déjà positivement au bilan hydrologique du système aquifère, même si leurs effets sont encore limités sur les ressources exploitables de la frange côtière.

Une meilleure efficacité des irrigations dans le périmètre Bas Service réduira ces apports indirects non contrôlés et permettra ainsi de fournir des volumes supplémentaires susceptibles d'être utilisés pour une recharge artificielle en bordure des casiers de Tnine Gharbia et de Zemamra dans le Sahel intérieur et de transférer aussi une part vers le Sahel côtier.

Le réseau d'irrigation du périmètre Bas Service constitue également une ressource potentielle d'eau de bonne qualité et régulière qui pourrait être utilisée pour restaurer la qualité des eaux dans les secteurs surexploités du Sahel côtier.

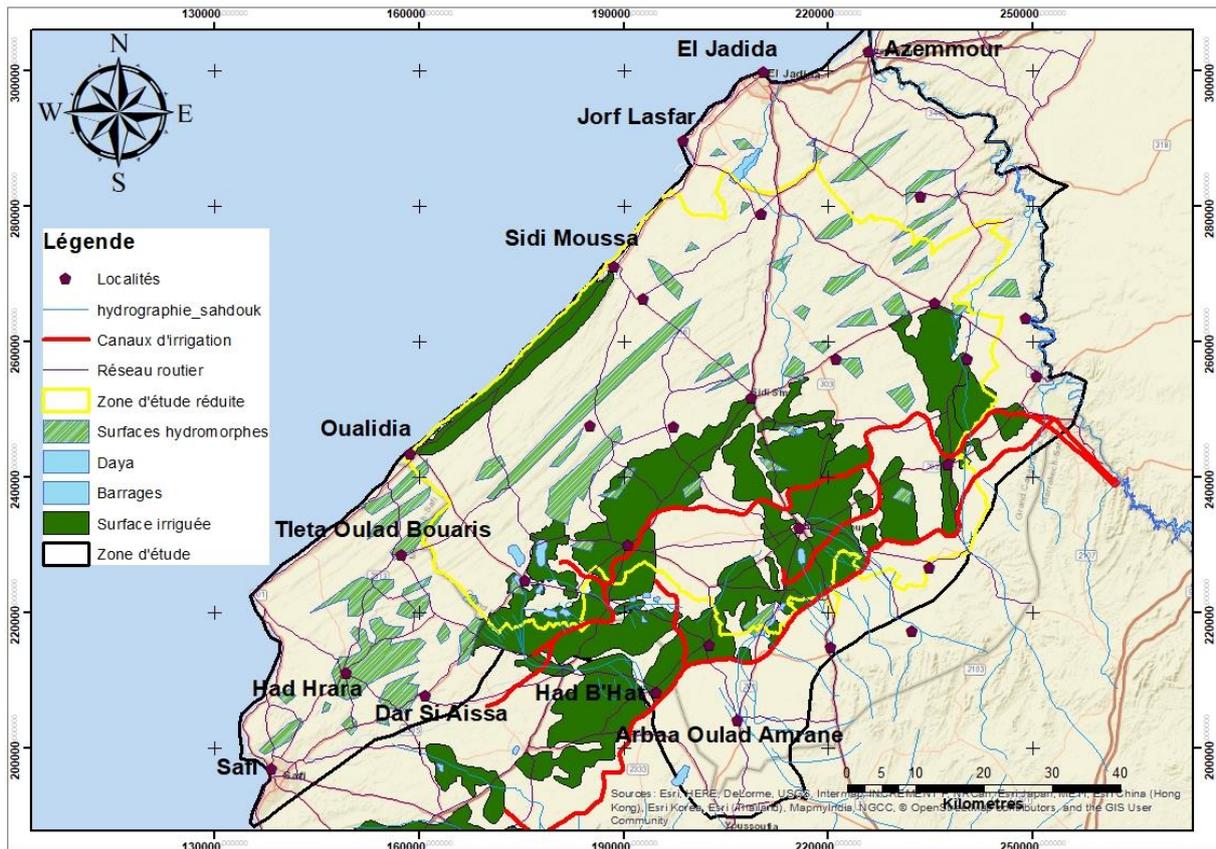
La daya Fahs, située 13 km au Sud d'El Jadida, constitue aussi une ressource potentielle d'eau qui pourrait être utilisée pour la recharge artificielle de la nappe Sahel, cette daya possède les caractéristiques suivantes :

- superficie : 600 ha ;
- capacité maximum : 8 Mm<sup>3</sup> pouvant être portée à 10 Mm<sup>3</sup> par batardage ;
- utilisation pour la protection d'El Jadida contre les crues ; le déversoir de la Daya alimente un dernier tronçon de l'oued de 13 km de long, doublé par un collecteur (capacité 4 m<sup>3</sup>/s).

## 5.2 Scénarios et variantes proposées pour la recharge artificielle

Les ressources en eau utilisables proviennent du périmètre Bas Service ou des dayas. Cinq scénarios et variantes de ressources sont proposés pour l'étude de la recharge artificielle du Sahel ; il s'agit de :

- **Variante 1** : Eau dérivée du réseau de drainage du périmètre Bas Service des Doukkala.
- **Variante 2** : Apport en eau à partir du périmètre Bas Service.
- **Variante 3** : Eau dérivée du réseau d'irrigation Bas Service du casier Sidi Smail.
- **Variante 4** : Eau dérivée du daya Fahs.
- **Variante 5** : Eau dérivée des deux dayas situées au Nord de Tnine Gharbia



**Figure 53. Carte représentative du cadre d'étude réduit de la région du Sahel Doukkala**

L'analyse de ces variantes est la résultante des précédents résultats et, tient compte des objectifs principaux de la recharge de la nappe. En effet, les dispositions des ouvrages nous ont permis de retenir trois (03) sites potentiels principaux.

Le choix d'une méthode de recharge artificiel dépend fortement des facteurs présentés dans les chapitres précédents. Qu'il s'agisse d'un dispositif de recharge (quantitatif/qualitatif), du contexte hydrogéologique local, le type d'eau disponible de recharge disponible et ses caractéristiques. On parle de volumes d'eaux disponibles et des propriétés chimiques et microbiologiques de ces eaux, les processus géochimiques et microbiologiques se mettant en place dans la zone non saturée et favorisant les éliminations de nombreux contaminants, la législation règlementant l'établissement et le fonctionnement des dispositifs de recharge et le cout financier (Pyne, 2005).

### 5.3 Analyses multicritères des scénarios de ressources

Les critères d'analyses retenues pour la classification des zones qui pourront être retenues pour une éventuelle injection sont présentés comme suit :

- **Critère 1** : Proximité au biseau salé dans le but de stopper l'invasion marine
- **Critère 2** : Proximité aux zones de fortes baisses du niveau piézométrique pour des fins d'équilibre de la nappe
- **Critère 3** : Proximité aux zones de forte dégradation de la qualité des eaux pour préserver la qualité des eaux de la nappe
- **Critère 4** : Dimensions, quantités, volumes ou débits.
- **Critère 5** : Qualité de l'eau notamment la charge solide et la qualité chimique et biologique.

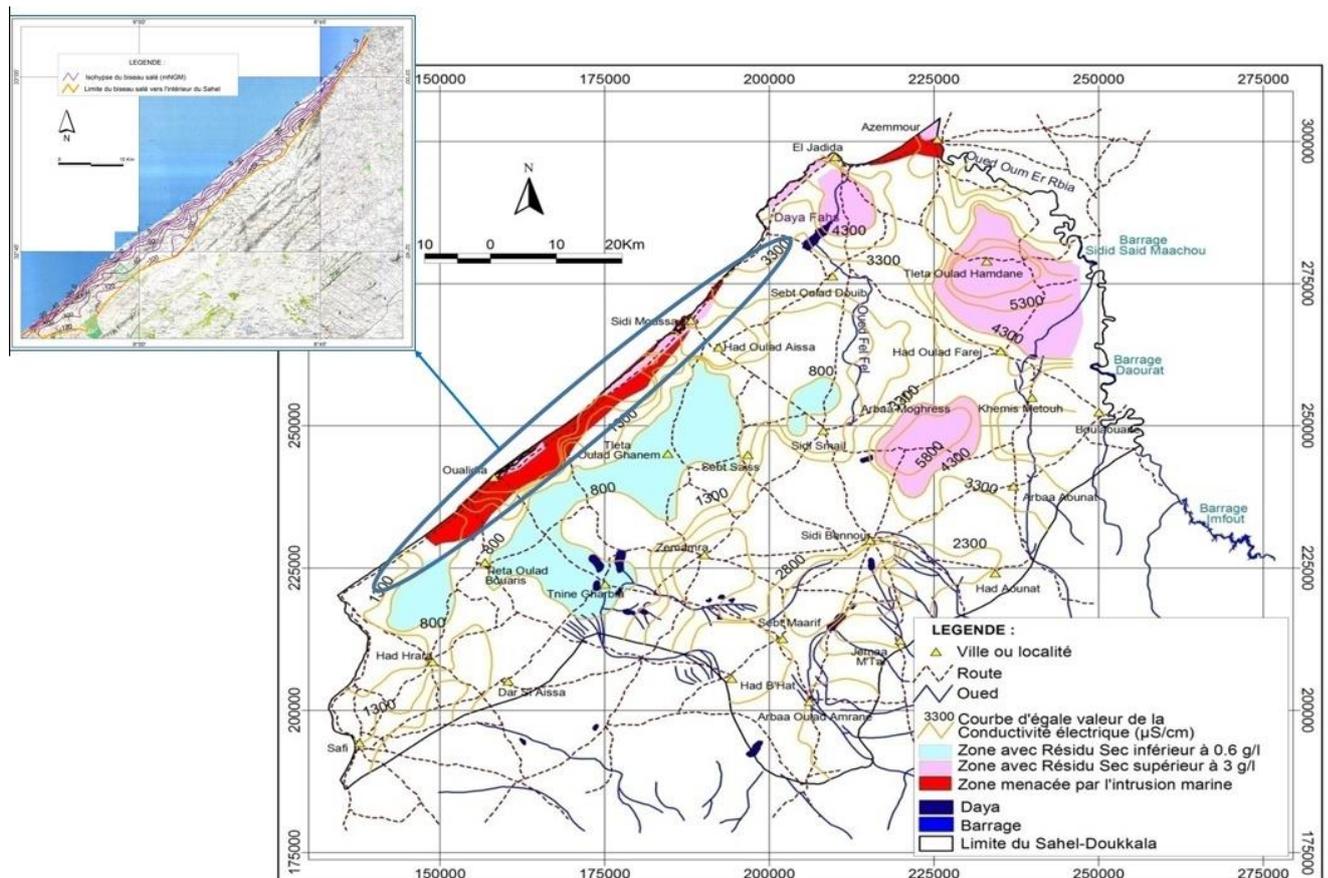


Figure 54. Carte représentative de la conductivité électrique des eaux et zones menacées par l'intrusion marine (ABHOER, 2005)

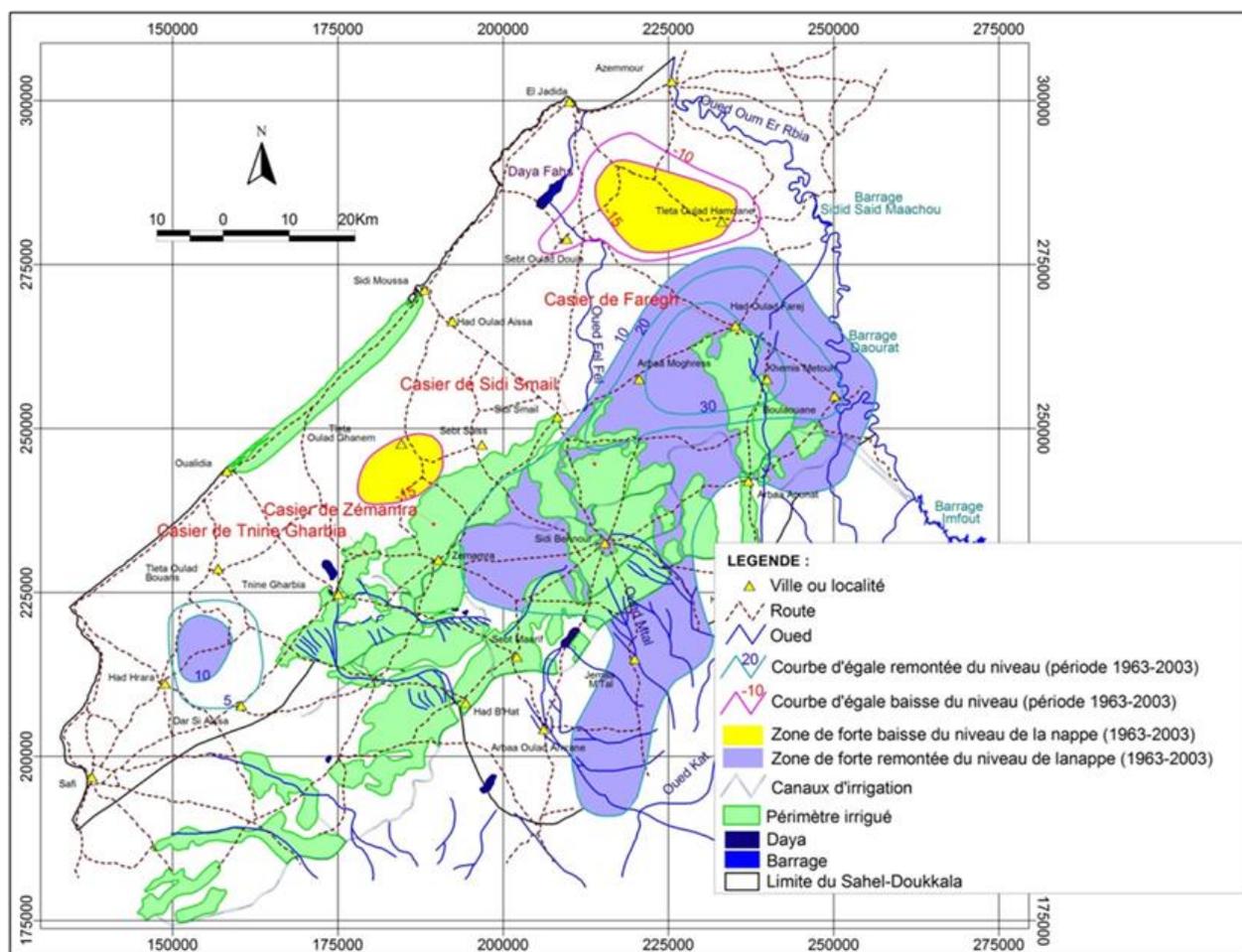


Figure 55. Cartographie de l'évolution des iso variations des niveaux piézométriques entre 1963 et 2003 (ABHOER, 2005)

#### 5.4 Classement des variantes de ressources

La matrice suivante montre l'importance des cinq variantes retenues. Dans cette matrice de classement, on a adopté les coefficients de pondération suivants :

- **Coefficient 1** pour des variantes très lointaines, de faibles dimensions ou de mauvaise qualité.
- **Coefficient 2** pour des variantes moyennement lointaines, de moyennes dimensions ou à qualité moyenne.
- **Coefficient 3** pour des variantes proches, de grandes dimensions ou de bonne qualité.

Le tableau donné ci-dessous récapitule le classement des variantes des ressources.

**Tableau 29. Matrice des variantes de ressources**

	<b>Critère-1</b>	<b>Critère-2</b>	<b>Critère-3</b>	<b>Critère-4</b>	<b>Critère-5</b>	<b>Total</b>
<b>Variante-1</b>	1	2	1	2	2	8
<b>Variante-2</b>	1	2	1	2	2	8
<b>Variante-3</b>	1	2	1	2	2	8
<b>Variante-4</b>	2	2	2	3	2	11
<b>Variante-5</b>	2	3	2	3	2	12

Ces variantes de ressources sont classées, par ordre d'importance, comme suit :

- 1ère : Variante-5.
- 2ème : Variante-4.
- 3ème : Variante-1, Variante-2 et Variante-3

## 5.5 Etude des sites potentiels de la recharge

Dans les sections qui suivent, sont décrits les critères notamment géologiques et hydrogéologiques qui conditionnent la faisabilité de la recharge artificielle du Sahel.

### 5.5.1 Géologie de surface et de subsurface

L'analyse de la géologie de surface et de subsurface du Sahel-Doukkala montre une stratigraphie dominée des changements latéraux de faciès et de fréquentes variations d'épaisseur qui affectent principalement les niveaux crétacés (Choubert, 1955 ; Choubert et al, 1956 ; Gigout 1956 a et b ; Gigout, 1965 a et b). Ce qui influence sur le schéma litho stratigraphique sur lequel doit se baser l'analyse hydrogéologique (type, épaisseur, géométrie, limites d'extension des aquifères).

Il est rappelé que les niveaux du Crétacé inférieur affleurent principalement dans le Sahel de Safi. Ils ne pointent que localement dans le reste du Sahel où ils sont recouverts par le Cénomaniens et/ou par le Plioquaternaire.

Dans le Sahel central, l'épaisseur du Valanginien augmente et les calcaires francs de l'Hautérivien moyen sont progressivement remplacés vers l'Est par des calcaires marneux à intercalations d'argiles et

de grès. Les argiles de l'Hautérivien supérieur sont caractérisées par de fortes variations d'épaisseur (de 0 à plus de 60 m).

La lithologie du Plioquaternaire est variable avec des faciès imbriqués : calcaires gréseux, calcaires détritiques et lumachelliques poreux, calcaires fréquemment karstifiés et des marnes sableuses. L'épaisseur du Plioquaternaire peut atteindre 80 m dans le Sahel central.

Les structures sont également diversifiées et complexes. Ce qui conditionne et détermine les écoulements souterrains, souvent tributaires des directions tectoniques. De même que les phases d'érosion, en supprimant des niveaux imperméables, provoquent des déversements de nappes et déterminent les échanges ou continuités entre aquifères.

La région du Sahel-Doukkala est riche en formes karstiques qui témoignent d'un état karstique des dépôts jurassiques, crétacés et plioquaternaires. Les phénomènes karstiques jouent un rôle important dans l'hydrologie superficielle et souterraine de la région.

### 5.5.2 Paramètres hydrodynamiques (transmissivités et perméabilités)

On sait que l'étude des paramètres hydrodynamiques (en particulier les transmissivités et les perméabilités) dans les processus de recharge artificielle joue un rôle primordial pour l'identification des sites potentiels perméables contribuant ainsi à une infiltration d'une quantité d'eau vers la nappe.

Il en ressort que dans le Sahel, les valeurs de transmissivités supérieures à  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s correspondent aux formations calcaires karstifiées et sont situées dans les secteurs à piézométrie déprimée et à faible gradient hydraulique, essentiellement dans la frange côtière du Sahel, entre le Sud de Oualidia et Sidi Moussa. Dans le reste du Sahel intérieur, les valeurs des transmissivités sont généralement comprises entre  $10^{-3}$  et  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s et reflètent la réduction d'épaisseur des couches aquifères, l'augmentation de leurs teneurs en argile et la nature essentiellement microfissurale de la perméabilité.

Le tableau suivant présente les tranches de transmissivités considérées et leurs coefficients de pondération.

Tableau 30. Présentation des tranches de transmissivités et leurs coefficients de pondération

Intervalle de T (en m <sup>2</sup> /s)	Coefficients de pondération
$T > 10^{-2}$	3
$10^{-3} < T < 10^{-2}$	2
$10^{-5} < T < 10^{-3}$	1

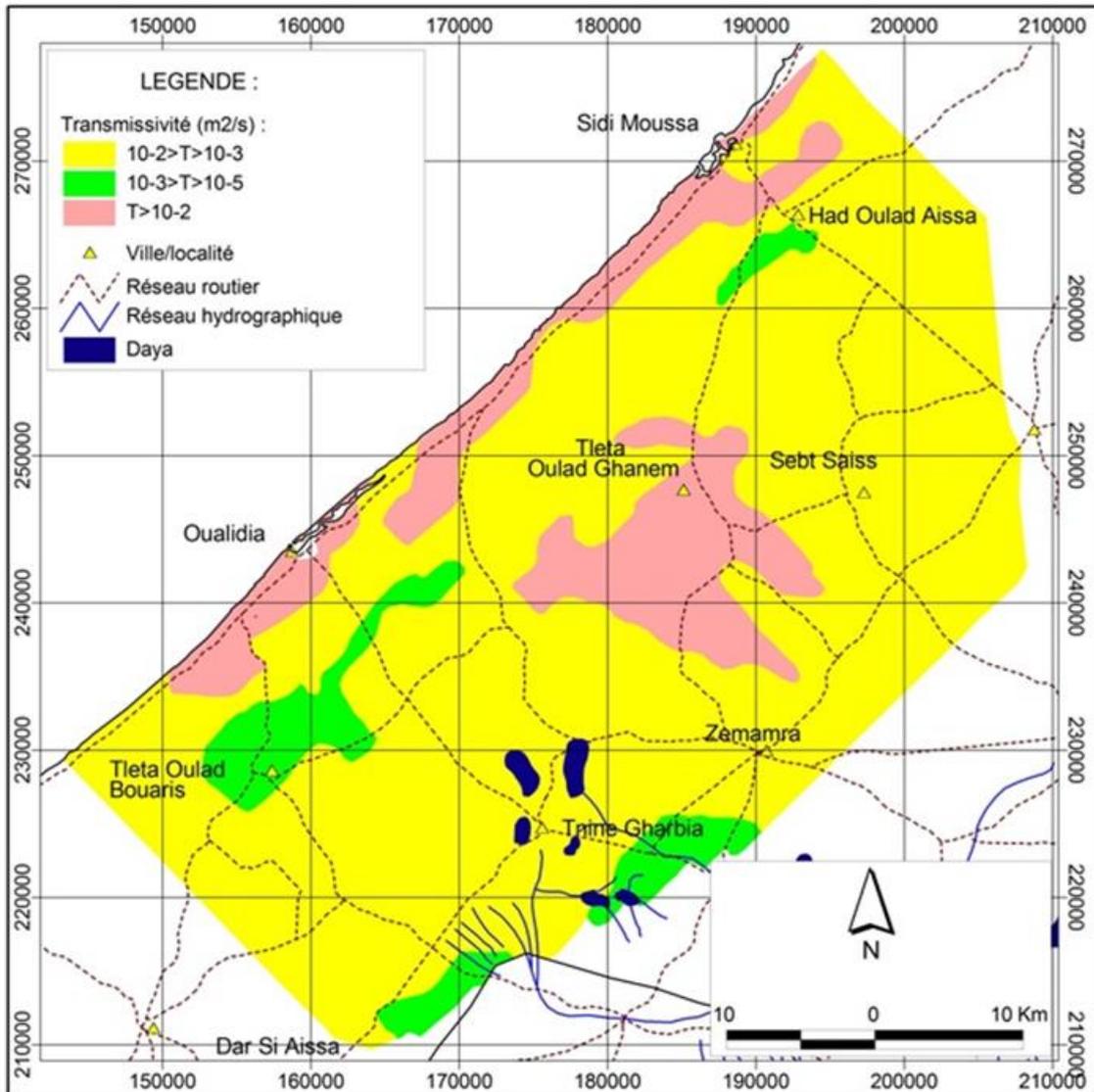


Figure 56. Carte représentative de la répartition spatiale des zones de transmissivités dans le Sahel central

### 5.5.3 Emmagasinement

Concernant les valeurs d'emmagasinement, les coefficients estimés pour différentes zones du Sahel-Doukkala, sont récapitulés dans le tableau suivant :

**Tableau 31. Coefficients d'emménagement estimés pour différentes zones du Sahel-Doukkala et leurs coefficients de pondération**

Nappe	S min	S max	Coefficient de pondération
Sahel côtier	>4	>8	4
Sahel central	3	6	3
Sahel de safi	2	6	2
Doukkala	1	6	1

Le Sahel côtier reste le secteur ayant un coefficient d'emménagement le plus élevé par rapport à celui du Sahel central et sahel de Safi.

#### 5.5.4 Epaisseur de la zone non saturée

Le critère adopté dans ce cas repose sur la détermination de l'épaisseur de la zone non saturée qui joue un rôle essentiel dans l'aptitude à la recharge de la nappe. Ce critère permet de définir la quantité d'eau possible à injecter dans la nappe du Sahel.

**Tableau 32. Epaisseur des zones non saturées**

Zone	Epaisseur en m	Coefficient de pondération
A	80-60	4
B	60-40	3
C	40-20	2
D	<20	1

D'un point de vue spatial, les grandeurs des zones non saturées sont plus faibles (inférieur à 20 m) au nord-est, et plus élevées (entre 60 et 80 m) au sud. Plus au centre, les valeurs sont comprises entre 20 et 60 mètres. Avec les variations que cela comporte, le Sahel constitue un atout déterminant en vue de la mise en place de la recharge.

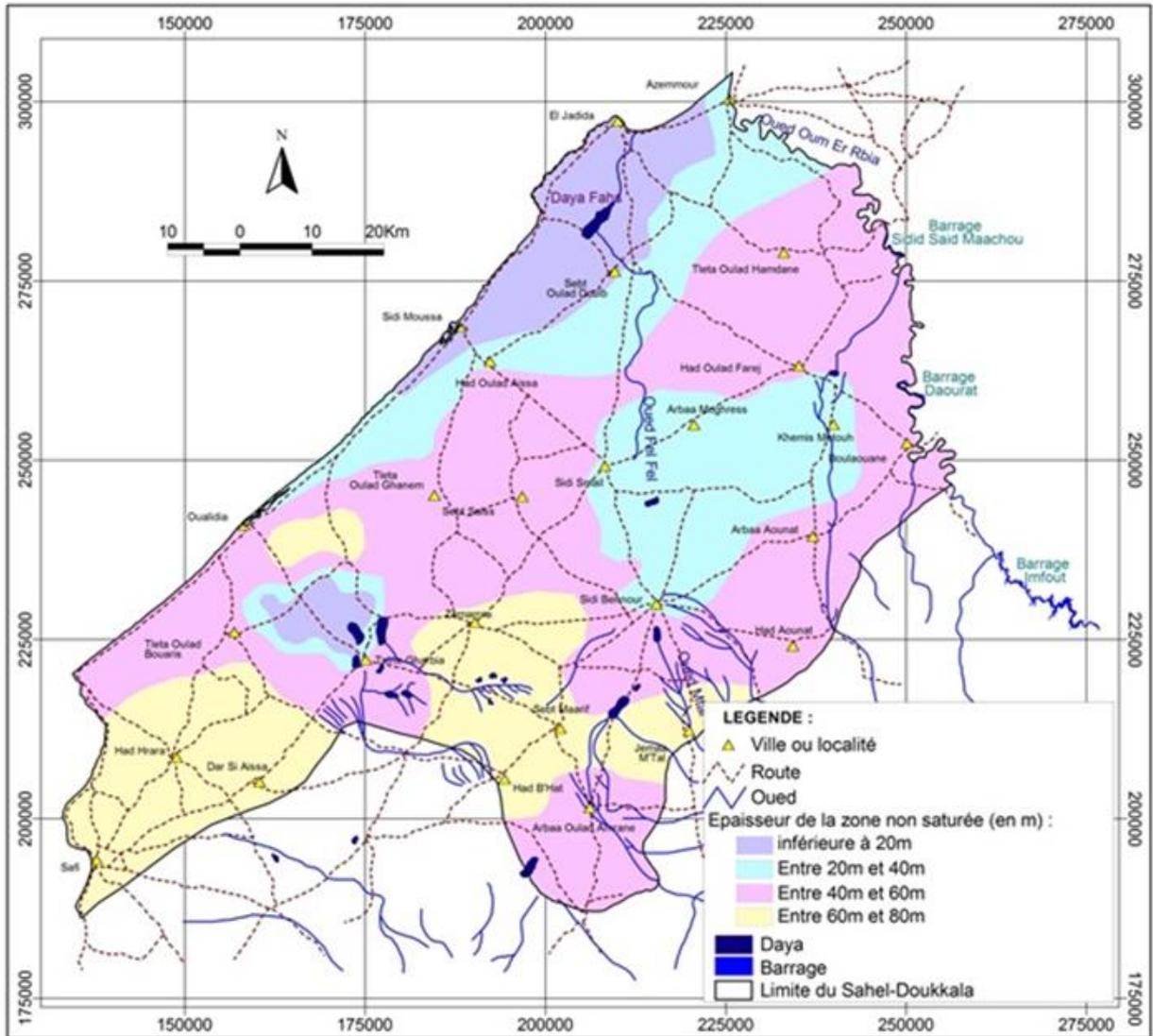


Figure 57. Carte globale d'évolution spatiale de la puissance de la zone non saturée d'après les données enregistrées par l'ABHOER

### 5.5.5 Zones de forte baisse du niveau piézométrique

Sur la base de l'analyse des cartes d'isovariation piézométrique (1992 – 2003), on révèle deux secteurs où sont observées des baisses sérieuses du niveau piézométrique ; il s'agit du premier secteur situé au Sud d'El Jadida, en allant de daya Fahs vers Tleta Oulad Hamdane, et le deuxième secteur situé à l'Est de Oualidia en allant vers Tleta Oulad Ghanem.

Le contraste dans l'évolution des réserves dans le Sahel est lié à l'origine des eaux utilisées par les irrigations. L'extension de l'aire de drainage souterrain est toutefois insuffisante pour compenser les importants pompages qui provoquent des baisses piézométriques de 1 à 2m dans le secteur de Oualidia.

Dans la partie amont du Sahel, les apports issus des eaux d'irrigation importées par le réseau Bas Service provoquent des remontées de la nappe en bordure du casier de Zemamra qui bénéficient aussi des transferts souterrains provenant des Doukkala. Cette remontée peut atteindre 3m voir même 5m dans le secteur de Tnine Gharbia. Toutefois, en 1992, la durée depuis la mise en eau du périmètre est insuffisante compte tenu des faibles perméabilités de l'aquifère pour avoir un effet significatif sur les écoulements atteignant la bande côtière.

**Tableau 33. Zones de forte baisse et remontée du niveau**

<b>Zone</b>	<b>Baisse et remontée du NP (en m)</b>	<b>Coefficient de Pondération</b>
<b>A</b>	-15	3
<b>B</b>	-10	2
<b>C</b>	0	1
<b>D</b>	> +10	0

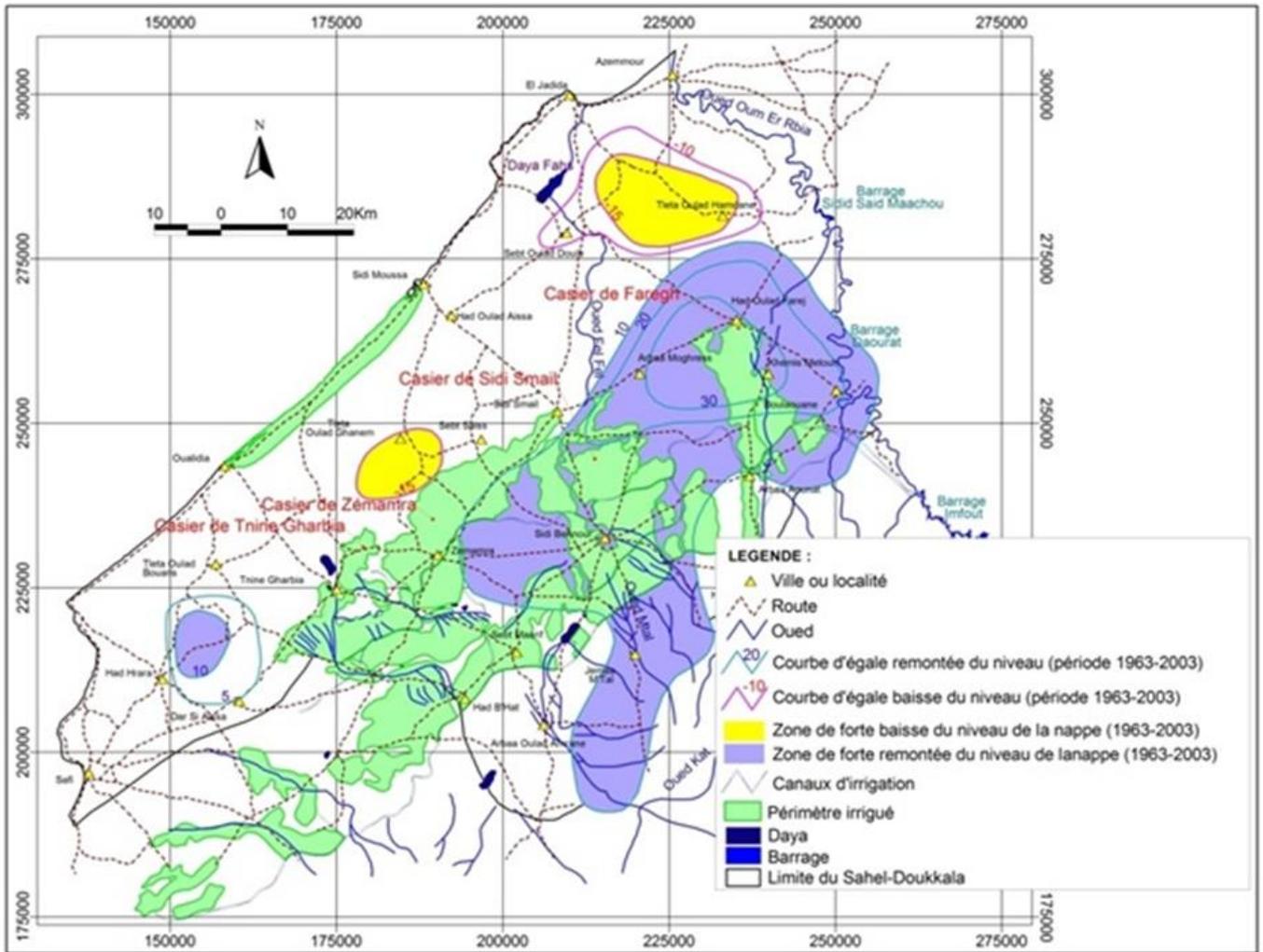


Figure 58. Cartographie représentative des zones en fonction de l'historique de fluctuations de niveau des nappes de 1963 à 2003 ; d'après les données de l'ABHOER, 2005

### 5.5.6 Proximité du Biseau Salé

Ce critère reflète l'étendue du biseau salé pour laquelle le procédé de recharge artificielle devra en tenir compte. Il permet également de se situer près de la zone envahie par l'intrusion marine dans le but de mieux sélectionner les sites pouvant avoir un effet positif dans le freinage du biseau salé suite à une injection d'eau douce dans l'aquifère.

On rappelle que dans la basse plaine côtière du Sahel, l'interface eau douce/eau salée est située à moins de 20 m de profondeur et localement à moins de 10 m, lorsque des lagunes et des zones marécageuses occupent une partie du littoral. Sous les moyennes et hautes terrasses, l'interface s'approfondit

rapidement jusqu'à -70, -80 m de profondeur. Plus à l'Est, en bordure du Sahel intérieur, la pente du biseau salé redevient faible puis il disparaît au-delà de -100 m, -110 m de profondeur.

L'extension latérale du biseau salé varie d'une distance à la côte de 1 km, près de Jorf Al Asfar et entre Cap Bedouzza et El Akarta, jusqu'à près de 6 km dans le secteur de Oualidia (figure 50).

### 5.5.7 Proximité aux zones de forte dégradation de la qualité des eaux

Nous comptons aussi parmi les objectifs principaux de la recharge artificielle ; l'amélioration de la qualité des eaux de la nappe du Sahel. Dans cette optique, la recherche des zones montrant une dégradation de la qualité des eaux reste parmi les orientations de la présente étude vers des sites pouvant faire l'objet d'une recharge artificielle.

L'analyse des données disponibles sur la qualité des eaux et des cartes élaborées à ce sujet montrent que la salinité des eaux souterraines dans le Sahel intérieur reste relativement faible : conductivités généralement inférieures à 1300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La salinité réduite dans ce secteur serait due à une recharge relative favorisée par la karstification superficielle des affleurements des calcaires plioquaternaires et crétacés.

Le gradient de la salinité augmente progressivement vers l'Est dans la zone de transition avec les Doukkala, en particulier en bordure du casier de Tnine Gharbia.

Dans le Sahel d'El Jadida, apparaissent des anomalies locales de forte salinité qui sont dues, soit à une intrusion marine profonde dans les calcaires karstiques du Cénomaniens sur le littoral, soit à la présence de passées gypseuses.

Dans toute la frange côtière où sont concentrés les pompages, de l'extrémité sud de l'Oulja à Jorf Al Asfar, les eaux possèdent des conductivités généralement supérieures à 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Dans les secteurs de Oualidia et de Sidi Moussa où les irrigations sont les plus importantes et anciennes, les conductivités peuvent dépasser 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### 5.5.8 Proximité des forages d'eau qui seront utilisés pour injection

Dans le cas du choix d'un procédé de recharge artificielle par injection dans des forages, le recours à ces forages est d'une priorité primordiale. La proximité des forages qui serviront d'injection doit répondre à plusieurs critères (disponibilité de l'information sur le forage en particulier la lithologie du réservoir aquifère, les caractéristiques hydrodynamiques favorables, profondeur totale, niveau d'eau, etc.).

La zone du Sahel par le biais des travaux de forages est une zone qui compte parmi les zones du Maroc les plus prospectées sur le plan hydrogéologique. Cet atout dont dispose le Sahel lui confère un système aquifère bien prospecté. Dans une analyse d'ensemble des travaux de forages (forages de reconnaissance, forages d'exploitation), le critère de la proximité des forages d'eau qui seront utilisés pour l'injection reste très favorable dans la zone du Sahel.

### 5.6 Proximité de la ressource en eau mobilisable

Le critère de la proximité de la ressource en eau mobilisable est aussi d'une importance dans le choix des variantes de recharge. La zone du projet est caractérisée par la disponibilité des ressources en eau, en particulier les eaux de surface utilisées pour l'irrigation des périmètres Bas Service.

### 5.7 Classement des variantes

L'analyse des variantes, compte tenu des principaux objectifs de la recharge de la nappe du Sahel-Doukkala a permis de retenir trois sites potentiels principaux pour la recharge de la nappe :

- **Site A** : Proximité du forage 496/34 ;
- **Site B** : Zone Sud de Tleta Oulad Ghanem ;
- **Site C** : Zone Est de Sidi Moussa

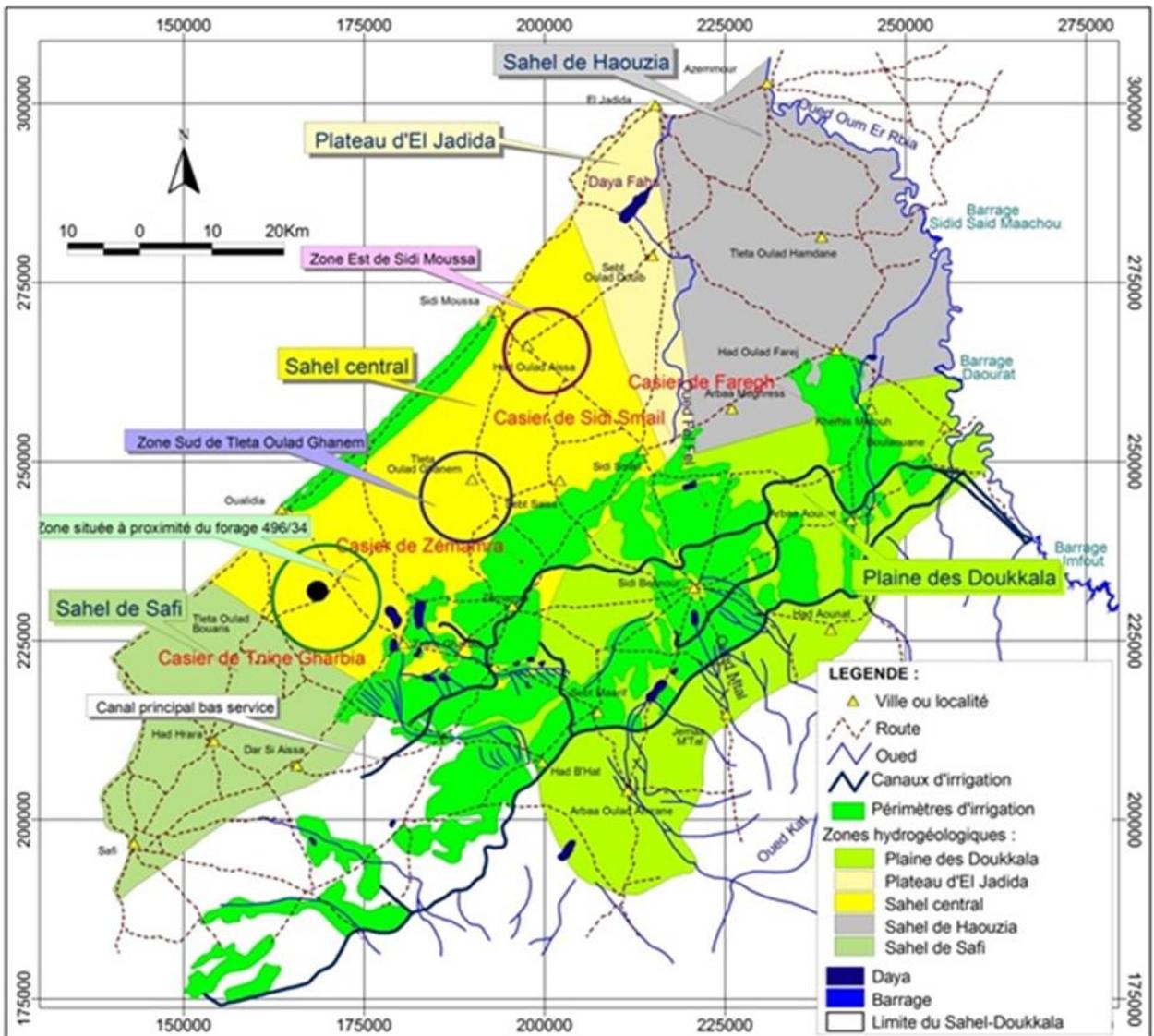


Figure 59. Présentation des trois sites potentiels principaux pour la recharge de la nappe

Le recouplement de ces variantes de sites avec les variantes retenues de ressources a permis de retenir les six scénarios de recharge résumés dans le tableau suivant

**Tableau 34. Bilan des scénarios de recharge retenus pour la nappe**

<b>N° du Scénario</b>	<b>Ressource en eau</b>	<b>Site potentiel</b>	<b>Longueur du transfert</b>
<b>Scénario-1</b>	Daya Ouest Tnine Gharbia	Zone du forage 496/34	12Km
<b>Scénario-2</b>	Daya Est Tnine Gharbia	Zone Sud Tleta Oulad Ghanem (Forage 318/16)	17Km
<b>Scénario-3</b>	Daya Fahs	Zone Est Sidi Moussa (Forage 402/26)	24Km
<b>Scénario-4</b>	Eau dérivée du réseau d'irrigation Bas Service	Zone du forage 496/34	27Km
<b>Scénario-5</b>	Eau dérivée du casier Sidi Smail	Zone Est Sidi Moussa (forage 402/26)	40Km
<b>Scénario-6</b>	Eau dérivée du réseau de drainage	Zone Sud Tleta Oulad Ghanem (Forage 318/16)	14Km

Ce tableau ci-dessus reporte les données nécessaires en vue d'une mise en œuvre de la recharge dans la nappe du Sahel. Décrit en six (06) scénarios, on y trouve des sites de ressource en eau et des zones potentielles de recharge avec à chaque fois ; la distance correspondant au transfert ; à la mobilisation de l'eau.

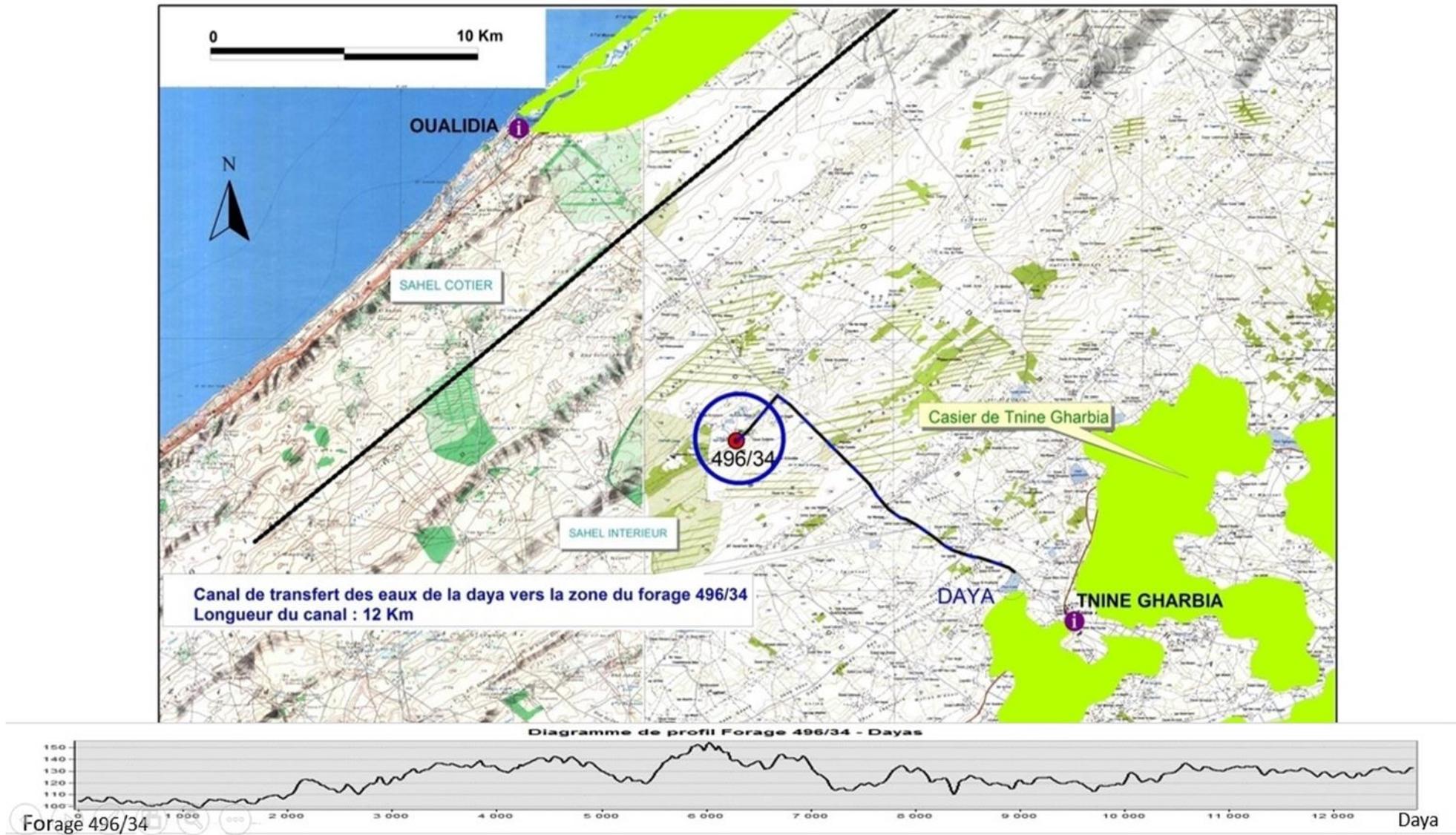


Figure 60. Scénario 1 : Transfert d'eau de Daya Ouest Tnine Gharbia vers le site potentiel d'injection situé dans la zone du forage N°IRE 496/34 et aperçu topographique

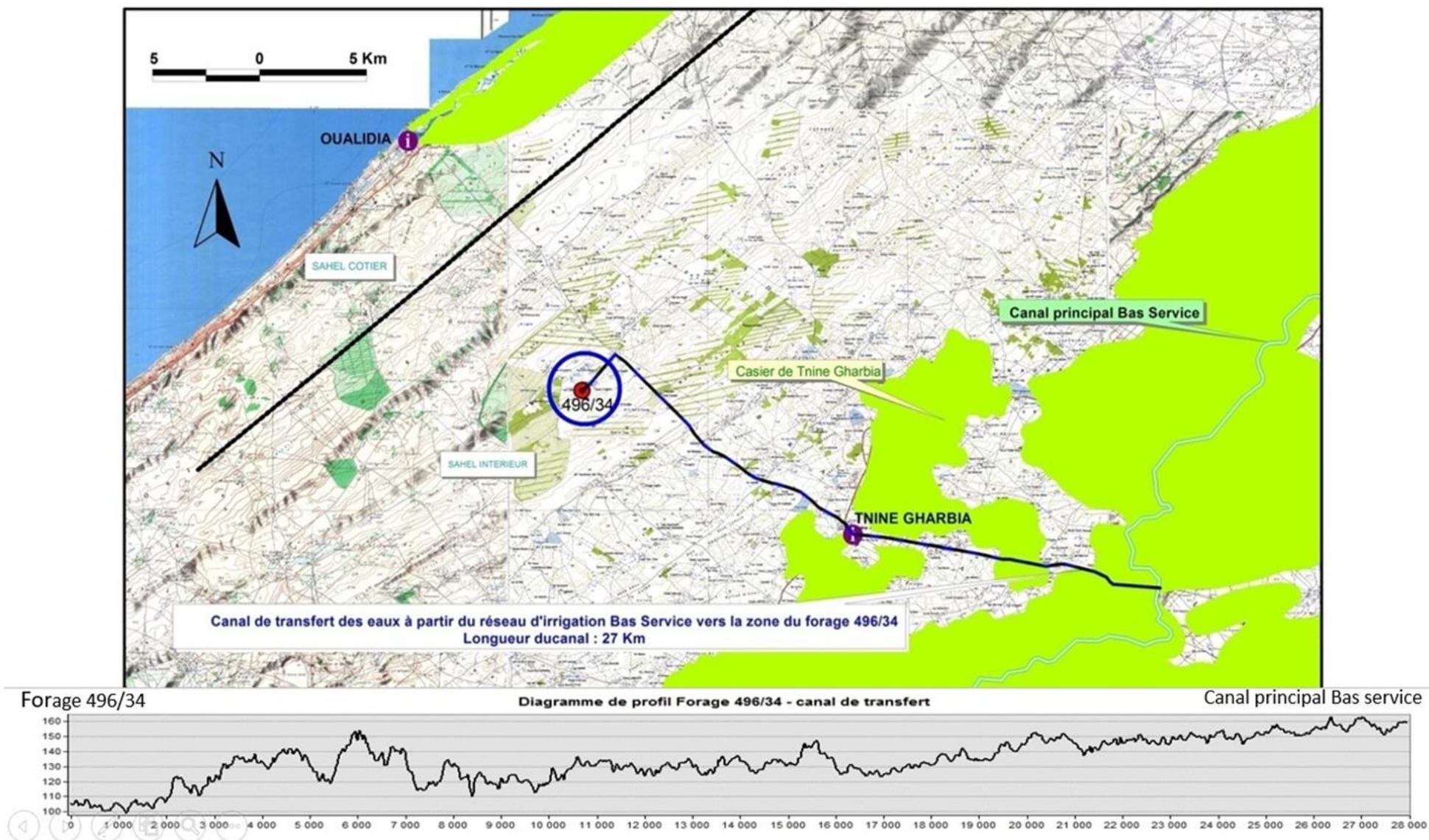


Figure 61. Scénario 4 : Transfert d'eau à partir du réseau d'irrigation Bas Service vers la zone du forage 496/34 et aperçu topographique

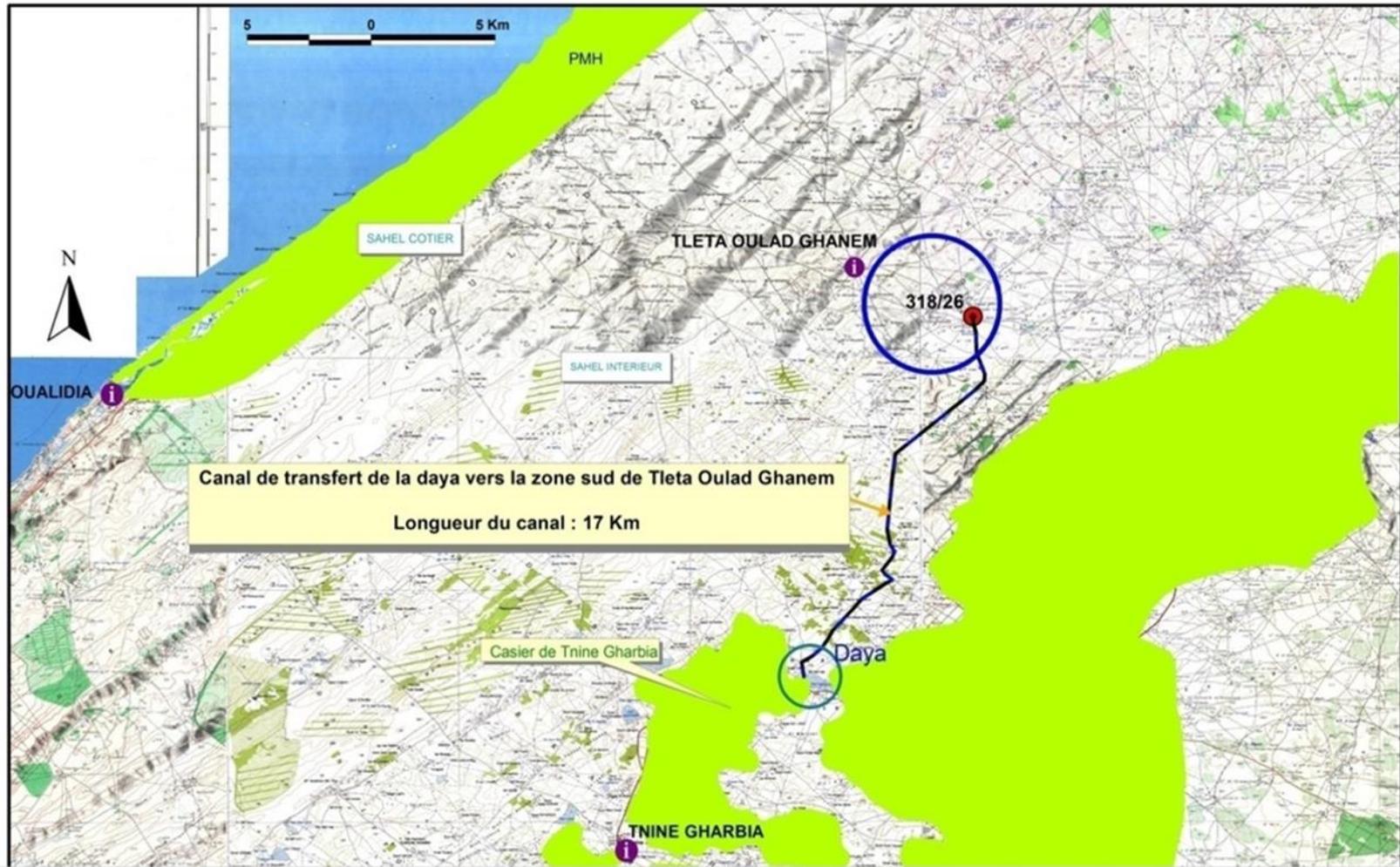


Figure 62. Scénario 2 : Transfert d'eau de Daya au Nord Est Tnine Gharbia vers le site d'injection au Sud de Tleta Oulad Ghanem (forage 318/26) et aperçu topographique

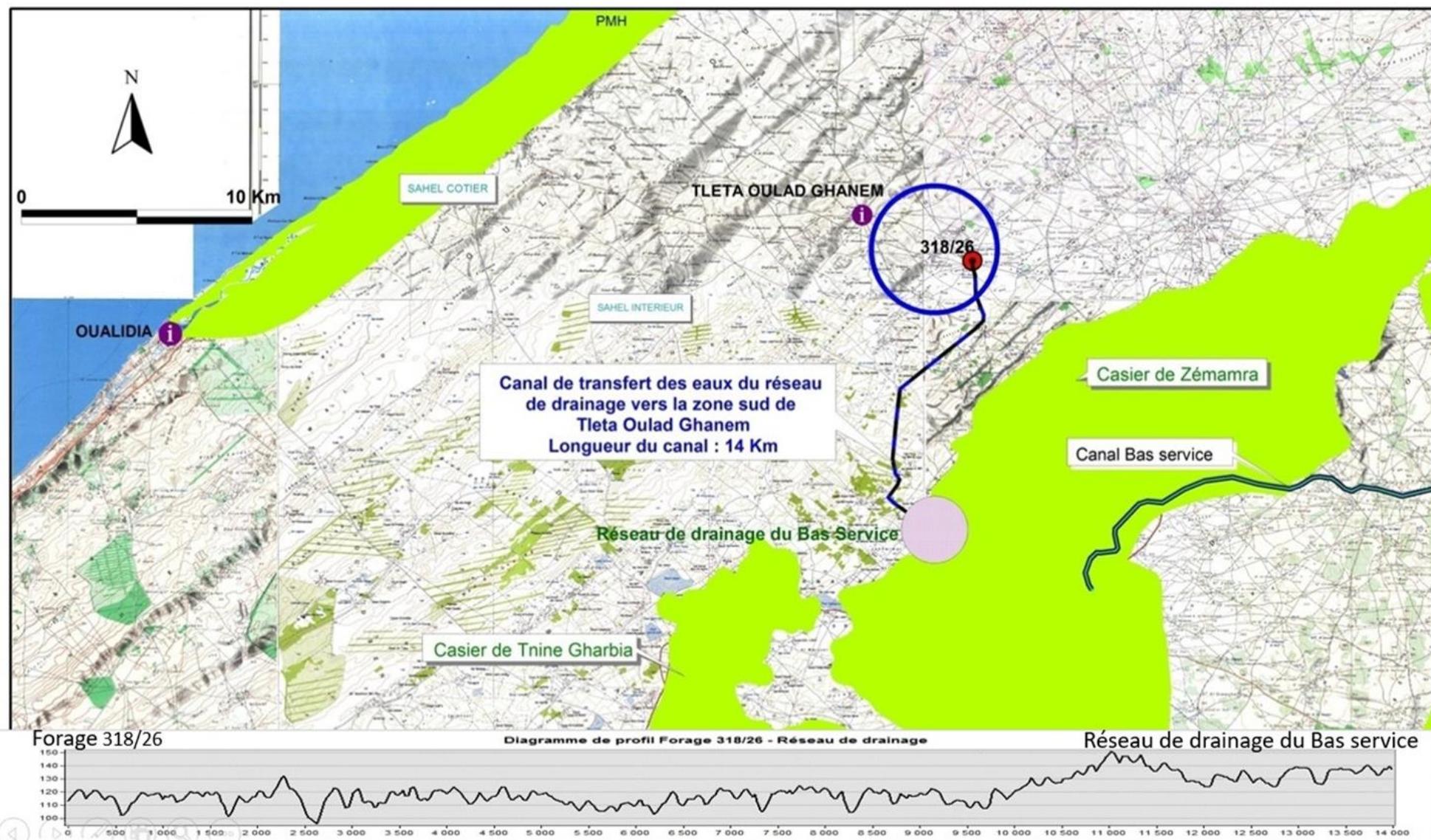


Figure 63. Scénario 6 : Transfert d'eau à partir du réseau de drainage vers la zone Sud de Tleta Oulad Ghanem (forage 318/26), aperçu topographique

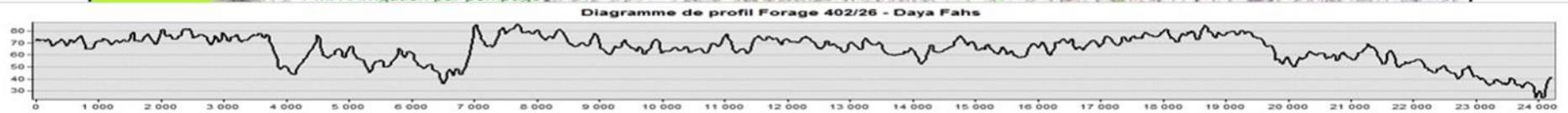


Figure 64. Scénario 3 : Transfert d'eau de Daya Fahs vers la zone du sud est de Sidi Moussa (forage 402/06), et aperçu topographique

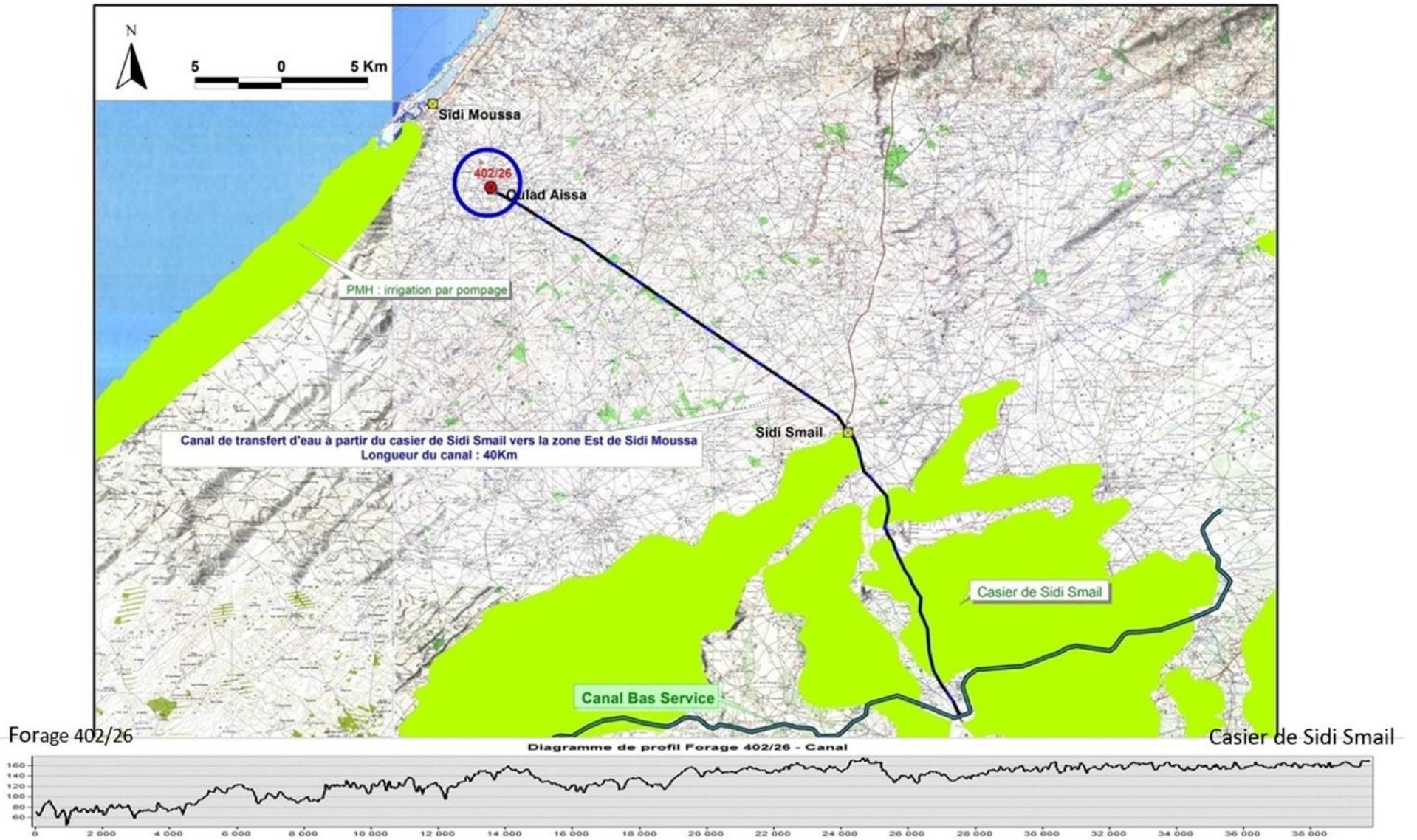


Figure 65. Scénario 5 : Transfert d'eau à partir du casier Sidi Smail vers la zone d'Oulad Aissa (forage 402/26) et aperçu topographique

## 5.8 Conclusion partielle

La recharge artificielle dans la partie aval du Sahel intérieur pourrait avoir des effets directs sur la salinité de la zone côtière en réduisant les entrées d'eau de mer et en provoquant une remontée de la piézométrie. Ces effets ne se feront toutefois sentir que progressivement et des volumes importants seront nécessaires pour obtenir une amélioration significative de la salinité dans les secteurs en surexploitation et forte salinité tels que les secteurs de Oualidia, Sidi Moussa et même pour d'autres secteurs menacés par l'intrusion marine dans la zone du Sahel côtier.

Pour qu'une restauration de la qualité des eaux soit obtenue avant qu'un état critique soit dépassé dans le secteur du Sahel côtier, en particulier le secteur de Oualidia, il faut rapprocher, de la frange côtière, les points d'injection afin de réduire les temps d'écoulement dans le système aquifère.

On pourra évaluer de la performance de l'opération de recharge en comparant les valeurs de salinité dans le Sahel côtier, par rapport à la zone de transition entre le Sahel cotier et le Sahel intérieur.

Une extension de la conduite jusqu'à la haute terrasse quaternaire permettrait alors d'irriguer directement les cultures maraîchères qui s'y sont développées suite à l'augmentation de la salinité dans la basse plaine côtière. Une réduction des volumes pompés aurait alors pour conséquence une diminution de la salinité dans le secteur d'Oualidia.

Dans ce chapitre, nous nous sommes servis de l'ensemble des travaux afin d'effectuer le choix des sites dédiés à la réalisation.

## 6 Conclusion générale

Au terme de cette analyse, force est de noter ici que la recharge artificielle des nappes (RAN) est une technique émergente de développement durable de plus en plus utilisée et ayant fait ses preuves avec notamment des résultats encourageants aussi bien sur le plan social économiques et politiques. Elle est considérée comme une solution à plusieurs des problèmes d'alimentation et de gestion des ressources en eau, surtout dans les zones arides et semi-arides. De plus, elle a été identifiée comme un facteur clé dans la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) surtout dans les zones arides. Le pourtour méditerranéen est l'une de ces zones où les aquifères font face au littoral et, forment la quasi-totalité des ressources en eau souterraine. En raison du climat et des contraintes démographiques, industrielles et agronomiques, les demandes ne cessent de croître, et ce qui a suscité de nombreuses interrogations sur la quantité la qualité des ressources naturelles de la région du Sahel Doukkala en plus des problématiques liées à l'invasion marine à partir même du littoral.

Cette étude, motivée par la recherche d'une compréhension de la variabilité du régime pluviométrique de la région du Sahel et son impact sur les processus hydrologiques à l'échelle de la région ; nous a permis de relever les conséquences dramatiques du déficit pluviométrique sur les ressources en eau au cours des trente (30) dernières années.

L'évaluation des ressources en eaux souterraines vise à dresser le constat afin de maintenir une gestion durable. Elle constitue un défi dans l'hydrogéologie appliquée, en particulier dans les zones arides où cette ressource est cruciale pour le développement socioéconomique et, en certains cas, pour la survie de l'homme.

Outre la dégradation de ses acquis, la question n'est pas tant d'y remédier par des méthodes nouvelles, fortement coûteuses ; mais plutôt de mettre en œuvre le modèle de gestion durable pour limiter dans le temps et l'espace des réfugiés environnementaux.

Ainsi, les analyses des données climatiques observées et simulées sur le territoire du Sahel Doukkala, et des simulations hydrologiques et hydrogéologiques ont été menées avec quatre objectifs :

- Evaluation quantitative des potentialités en eau de surface de la région ;
- Analyse des données piézométriques de la région selon les années hydrologiques ;
- Etude physico chimique des nappes de la région, et déterminations des zones de pollution ;
- Mise en place de scénarii de recharge des nappes présentes dans la région.

### 6.1.1 Evaluation quantitative des potentialités en eau de surface de la région

Cette étude est motivée par la recherche d'une compréhension de la variabilité des zones humides potentielles et de son impact sur la région. En effet, la présence ou pas des zones humides nous renseigne sur biens de plans.

Dans un premier temps, sur la faible perméabilité du sol ou, la capacité du terrain à retenir les flux superficiels ; créant ainsi des marres, des lacs, et autres étendues d'eaux stagnantes. Les méthodes utilisées nous ont ainsi révélées de faibles surfaces rependues dans les cordons interdunaires et, plus représentatives en aval de la région (le Sahel) où l'on trouve quelques sous bassins de natures endoréiques.

Ainsi, on évalue à près de 200 Mm<sup>3</sup> sur les 400 Mm<sup>3</sup> nécessaires pour la recharge artificielle, les volumes cumulés. La solution de remobilisation des ressources en eau en période de crue peut à cet effet, être envisagée de manière à mettre à disposition ces eaux en vue de la recharge artificielle. On peut à cet effet prévoir des aménagements tels que les bassins de retentions en certains points, pour accroître ce potentiel en eau mobilisable.

En second lieu, les visites de terrain nous ont permis de noter la présence dans le Sahel ; d'un genre végétal de la famille des Juncaceae ; plantes herbacées vivaces vivant en milieu aquatique ou humide et de nombreuses étendues d'eaux aux dimensions variables. En plus des nombreux sols hydromorphes ; le Sahel montre des signes d'eaux stagnantes et compte par rapport aux Doukkala, situées en amont, un grand nombre dayas importants ; ce qui conforte sa position de réserve en eau superficielle.

### 6.1.2 Analyse des données piézométriques de la région selon les années hydrologiques

Le fonctionnement hydrologique des bassins présents dans la région du Sahel Doukkala se caractérise par un régime hydrologique temporaire avec des écoulements conditionnés par des fortes pluies. Sachant le lien étroit entre les eaux de superficielles et souterraines, nous avons déterminé les cartes piézométriques dans le but de déduire le sens des courants, les zones de confluence et de divergence ainsi que la puissance des zones non saturées et sa variabilité dans le temps. On ajoutera les différents gradients afin de localiser les zones de forte recharge et celles qui le sont moins. Les résultats nous ont permis de montrer que les courants d'une manière globale, s'orientent du sud-est vers le nord-ouest ; de même que le tronçon de l'oued Oum Er R'Bia situé sur la limite de cette zone jusqu'à l'exutoire, constituant la limite nord de la région. En effet, de l'historique de pluviométrie de la région, les années choisies pour les analyses se démarquent par les lames d'eaux ; ce qui nous a conduit à déterminer les zones de fluctuations par des outils géostatistiques. Il en ressort que la région du Sahel centrale est la zone la plus active comparée à l'ensemble de la région en raison de la grande réactivité du toit de la nappe en fonction des pics de la pluviométrie. Les Doukkala plus en amont possèdent de faibles fluctuations ce malgré l'épaisseur des zones non saturées ; en raison de la présence de nombreuses nappes captives. Un niveau d'amplitude de variations faibles et constantes est observé dans les Doukkala, situé en amont et possédant un réseau hydrographique apparent tandis qu'on observe dans le Sahel plus en aval, les nappes plus réceptives témoignent de fortes amplitudes de fluctuation qui avec une zone non saturée moins profondes.

### 6.1.3 Etude physico chimique des nappes de la région, et déterminations des zones de pollution

Concernant les études qualitatives, il est important de rappeler que les eaux souterraines, considérées comme relativement exemptes d'agents pathogènes d'origine hydrique, constituent l'une des sources d'eau douce les plus précieuses utilisées à des fins de consommation dans le monde entier. La qualité de l'eau est identifiée en termes de paramètres physiques, chimiques et biologiques. Elle présente ainsi une importance capitale.

Dans notre cas, les études se sont appuyées sur les mêmes points de mesures, avec cette fois ci des mesures d'éléments physico chimiques.

Comparé aux sources situées en amont du bassin versant de l'oued Oum Er R'Bia, dans la région de Béni Mellal ; les eaux du Sahel Doukkala présentent des taux élevés des minéraux. Localement, la cartographie de vulnérabilité de la nappe témoigne d'une forte pollution au niveau du Sahel central avec des pics de valeurs autour de Zemamra, Sidi Bennour mais aussi le long du littoral autour des villes telles que Oualidia et Sidi Moussa.

Ces zones se caractérisent par des activités agricoles, par ailleurs à Tnine El Gharbia, il y a plusieurs dépressions inondées. Les eaux issues de l'irrigation sont celles-là même qui contribuent fortement aux fluctuations des hauteurs piézométriques avec pour conséquence, des taux élevées de nitrates, des ions chlorures, et de la conductivité électrique et par conséquent des eaux souterraines de mauvaise qualité voire très mauvaises en certains endroits.

#### 6.1.4 Modélisation des scénarii de recharge artificielle

Le choix des sites tient de la confluence de toutes les études réalisées en amont. Car, pour endiguer les problèmes liés aux eaux souterraines, il faut tenir compte :

- de la quantité de l'eau à remobiliser
- de la qualité de l'eau à recharger
- mais aussi du temps nécessaire et,
- plus important des lieux susceptibles d'accueillir la recharge artificielle des nappes.

En effet, outre la forte dégradation causée par l'usage des fertilisants, la région du Sahel compte aussi une invasion marine en certains points situées sur le littoral. Les sites de recharges devraient ainsi remplir plusieurs critères de manière à se positionner dans une zone tampon permettant d'optimiser l'opération.

Il convient d'être aussi proche des ressources en eau de surface mobilisables ; c'est-à-dire du réseau d'irrigation bas service et des dayas importants sans oublier de se situer le plus près possible des zones à fort gradient hydrauliques, synonyme de points de recharge.

Les trois points sélectionnés peuvent aussi bien faire l'objet d'une injection ou alors de la mise place d'un bassin d'infiltration ; selon les capacités et les orientations des maitres d'œuvres. On retient en chacun des points, deux possibilités en fonction de l'eau mobilisable.

Dans un cas, il s'agira de puiser dans les dayas importantes les plus proches ; et dans l'autre l'on s'appuiera dans les canaux d'irrigations de bas services existants qui drainent les eaux des barrages situés plus en amont. A chaque fois, il conviendra toutefois d'aménager des conduits ce malgré la topographique accidentée qui caractérise le Sahel.

## 6.2 Perspectives et recommandations

La question de gestion raisonnable des ressources naturelles et de l'eau en particulier est une opération qui permet le renouvellement et la conservation pérenne sans être menacée d'une quelconque surexploitation.

Cela constitue d'ailleurs un enjeu majeur pour la survie de la région du Sahel Doukkala. Car en effet, le cas extrême de mauvaise gestion de l'eau, avec dépassements de seuils irréversibles pourrait conduire au collapsus écologique (effondrement écologique) avec destruction des différentes espèces nécessaires dans la région, les activités humaines et d'une partie de son environnement par elle-même.

Etant donné la situation du Sahel Doukkala ; région à climat semi-aride et de faible densité hydrographique, la pluviométrie conditionnera les faits de recharge. En effet, les eaux apportées au sous-sol ne doivent en aucun cas dégrader davantage celles des aquifères. Il convient de procéder à des recharges régulières mais en période de crues où la qualité est assurée ; et dont l'abondance nuira moins aux usagers de l'eau et aux riverains.

Il existe cependant de nombreuses contraintes. Parmi elles ; les difficultés résultant du colmatage rendant l'emploi des forages d'injections beaucoup plus délicat que celui des bassins d'infiltration dans lesquels la présence notable d'une biosphère offre de surcroit l'avantage évident de contribuer naturellement à la purification des eaux à remobiliser. Cependant, les forages restent le seul dispositif permettant de recharger les nappes captives.

Il est nécessaire d'analyser l'hydraulique des milieux poreux :

- Déterminer des coefficients de remplissage, R et R' et déduire les relations existantes avec les coefficients d'emmagasinements S et S' (immédiat et retardé en nappe libre).
- Prévoir des écoulements en milieu initialement non saturé ; en mesurant notamment la conductivité hydraulique, l'influence de l'air contenu dans le terrain, etc.
- Analyser l'influence de la charge hydraulique sur le colmatage des forages.

En ce qui concerne l'épuration :

- Contrôler les effets « lagunage » dans les bassins ;
- Ainsi que la hauteur de la lame d'eau en ensemençant par des espèces végétales et animales sélective
- Analyser les modifications apportées par le transfert dans la zone non saturée à la composition des effluents
- Pratiquer des injections intermittentes surtout lorsqu'il s'agit des aquifères sableux et des nappes côtières en zones dunaires.

Pratiquer régulièrement les entretiens des ouvrages afin de prévenir les différents colmatages.

Pour terminer, le choix entre les injections et le bassin d'infiltrations devrait faire l'objet d'études plus accrues. Car chacune des situations possèdent d'avantages et d'inconvénients en fonction des lieux présélectionner. Tenir compte de l'évapotranspiration, et d'autres paramètres environnementaux est aussi important qu'étudier davantage la litho stratigraphie, le débit d'injection.

Dans le premier cas, il peut permettre d'éviter les pertes d'eaux considérables du fait de l'évaporation. En effet, la mise en œuvre des bassins peut, suite à des vents et les températures élevées favoriser l'évaporation et donc occasionner les pertes des eaux prédestinées à la recharge. D'autre part, il peut constituer un atout aux abords de la localité en contribuant à la modération du microclimat ou alors en garantissant l'irrigation des lieux. Sachant que la percolation constitue une des issues des eaux d'irrigation. Dans cette optique ; les couts d'investissements s'amenuisent.

En second lieu, nous avons l'injection au niveau d'un forage. A ce niveau, les débits d'injections sont plus importants. Et la méthode pourrait exposer à des colmatages. Car au fond, l'impact entre les eaux injectées et les courants souterrains peut éroder les couches empêchant l'infiltration.

La difficulté réside du manque d'aperçu des couches souterraines. Mais le plus important reste de garantir la quantité d'eau nécessaire pour la réalimentation, sa qualité et surtout ne pas effectuer de recharge pendant les périodes de basses eaux.

## Références

- Abou Maria K., (1993). Les formations quaternaires du Sahel des Doukkala (Méséta occidentale marocaine) : mise en place et évolution post-sédimentaire. D.E.S., Thèse de 3 ème cycle, Fac. Sci, Rabat, 8 tab., 88 fig., 186 p.
- Adams B., Civita M., Gilbrich W.H., Vrba J. & Van Waegeningh H. (1994). Model legend for groundwater vulnerability maps. In: J. Vrba and A. Zaporozec (Editors), Guidebook on mapping groundwater vulnerability. IAH, Verlag Heinz Heise, Hannover, pp. 87-99.
- Agence de bassin hydraulique de l'Oum Errbia (2003). Etude Hydrogéologique de la nappe du Sahel-Doukkala, rapport de l'Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er Rbia
- Aghazadeh N., and Mogadam A.A. (2004). Evaluation effect of geological formation on groundwater quality in the Harzandat plain aquifer, Symposium of Geosciences of Iran, Vol. 22, 392-395
- Aller J.R., Bennet, T., Feher J.H., Petty R.J. & Hackett G. (1987). DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings, US Environmental Protection Agency, EPA/600/2-87-036, 455 p.
- Andreo B., Vías J.M., Mejías M., Ballesteros B.J. & Marín A.I. (2007). Estimation of the recharge by APLIS method in the Jurassic aquifer of El Maestrazgo (Castellón, NE Spain). II International Symposium on Coastal Aquifers, Almería, Spain, October 2007.
- Amisigo B. (2006). Modelling riverflow in the Volta Basin of West Africa: a data-driven framework number 34, Cuvillier Verlag
- Amroggi R. Tamise G. (1952) Abda-Doukkala, in : Hydrogéologie du Maroc. Notes & M. Serv. géol. Maroc, n° 97, pp. 187-194
- Appelo, C.A.J. & Geirnaert, W. (1983). Processes accompanying the intrusion of salt water. GeoZ. AppZ. IdrogeoZ. 18-11, 29-40.

Aquilina L., Ladouche B. & Dorfliger N. (2006). Water storage and transfer in the epikarst of karstic systems during high flow periods. *Journal of Hydrology*, 327(3-4) : 472-485.

Arfib B., Cavalera T., Gilli E. (2006). Influence de l'hydrodynamique sur l'intrusion en aquifère karstique côtier. *Géoscience*, 338 : 757-767.

Aris, A. Z., Praveena, S. M., & Abdullah, M. H., (2010). The influence of seawater on the chemical composition of groundwater in a small island : the example of Manukan Island, East Malaysia. *Journal of Coastal Research*, 28(1), 64-75.

Ariza-Villaverde A.B., Jiménez-Hornero F.J., Gutiérrez de Ravé E. (2015) Influence of DEM resolution on drainage network extraction : A multifractal analysis. *Geomorphology*, Vol 241, pp 243–254.

Artificial Recharge of groundwater: Hydrogeology and engineering. *Hydrogeology journal*, (2002), vol 10, issue 1

Asano T., Burton F.L., Leverenz H.L., Tsuchihashi R. & Tchobanoglous G. (2007). Water reuse - issues, technologies, and applications - chapter 22: Groundwater recharge with reclaimed water, Mc Graw Hill, New York, p. 1245-1302.

Bahir, M., Mennani, M., Oliveira da Silva, M., & Blavoux B., (2003). Impact de la sécheresse sur la ressource en eau en zone semi-aride : Cas de l'aquifère barremien-aptien de la zone cotiere d'Essaouira (Maroc). *Technologia de l'intrusion de agua de mar en acuiferos*.

Bakalowicz M. (1979). Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Doctorat ès Sciences naturelles Thesis, P. et M. Curie Paris-6, Paris, 269 pp.

Bakalowicz M. & Jusserand C. (1987). Etude de l'infiltration en milieu karstique par les méthodes géochimiques et isotopiques. Cas de la grotte de Niaux (Ariège, France). *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel*, 7 : 265-283.

Bazairi H, Bayed A, Glémarec M, Hily C. (2003) Spatial organisation of macrozoobenthic communities in response to environmental factors in a coastal lagoon of the NW African coast (Merja Zerga, Morocco), *Oceanol Acta* 26: 457–471

- Baron C. (2009). L'eau en Afrique : disponibilité et accès, *Futuribles* 359, 33–56
- Baumann P. (1952). Ground water movement controlled through spreading, *Trans. ASCE* 117 (Paper No 2525), 1034-1074.
- Baumann P. (1957). Basin recharge, *Trans. ASCE* 122, 458-501.
- Baumann P. (1961). Theoretical and practical aspects of well recharge, *J. Hydr. Div., ASCE* 87 [HY6] (Proc. Paper 2992, November 1961), 155-170.
- Bear J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*, pp. 37–41.
- Benkabbour, B., Toto, E. A., & Fakir, Y., (2004). Using DC resistivity method to characterize the geometry and the salinity of the Plioquaternary consolidated coastal aquifer of the Mamora plain, Morocco. *Environmental Geology*, 45(4), 518-526.
- Beven K. J. and Kirkby, M. J., (1979) A physically based, variable contributing area model or basin hydrology. *hydrolog. Sci. Bull.*, 24, 43-69
- Beven, K.J. and Moore, I.D. (eds.), (1991), *Terrain analysis and Distributed Modelling in Hydrology*, Chichester: John Wiley & Sons
- Bidet, J.C., & Carruesco, C., (1982). Sedimentologie d'un environnement lagunaire actuel : l'Oulja de Oualidia (côte atlantique marocaine) *Océanologica Acta*, N°SP, p. 29-37.
- Bize J., Bourguet L., Lemoine J. (1972). *L'alimentation artificielle des nappes souterraines*. Mason et Cie, Paris. 201 p.
- Boughriba M, Melloul A, Zarhloule Y, Ouardi A (2006), Extension spatiale de la salinisation des ressources en eau et modèle conceptuel des sources salées dans la plaine des Triffa (Maroc oriental). *C. R. Geoscience*, 338 (11), 768 – 774
- Bourguet L. (1971). Inventaire international des aménagements d'alimentation artificielle. Dépouillement et synthèse des réponses. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology* 16(3) : 51-101.

Boussinesq, J. (1877). Essai sur la théorie des eaux courantes. Mém. Acad. Sci. Paris, Imprimerie Nationale, Paris, 252 p.

Bouwer H., Rice R.C. (1976). A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. Volume 12, Issue 3, Pages 423–428

Bouwer H. (1989) The Bouwer and Rice slug test - an update. Ground Water, 27 (3): 304-309

Bouwer H. (1996). Issues in artificial recharge, Water Science and Technology, Volume 33, Issues 10–11, Pages 381-390

Bouwer H. (2002), Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering, Hydrogeology Journal (202) 10:121 142

Bye J. A., & Narayan, K. A., (2009). Groundwater response to the tide in wetlands : Observations from the Gillman Marshes, South Australia. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 84(2), 219-226.

Castany G. (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie Dunod paris

Chapman D., Kimstach V. (1996). Selection of water quality variables. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapman edition, 2nd ed. E & FN Spon, London, 59-126.

Chaussier J.-B. (1989). Initiation à la géologie et à la topographie. Editions BRGM, 177 p.

Chen X., Goeke J., Ayers J. F., & Summerside S. (2003). Observation well network design for pumping tests in unconfined aquifers. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 39(1), 17-32.

Choubert G. (1953). Le réseau hydrographique des Doukkala au Quaternaire récent (Würmien). *C.R. Acad. Sci.*, Paris, t. 237, n° 16, pp. 919-921.

Choubert G (1955) Note sur la géologie des terrains récents des Doukkala. Notes Serv. géol. Maroc t. 13, n° 128, pp. 9-46.

Choubert G., Joly F., Gigout M., Marçais J., Margat J. & Raynal R. (1956) : Essai de classification du Quaternaire continental du Maroc. C.R. Acad. Sci., Paris. t. 243, n° 5, pp. 504- 506.

Chtaini A (1987) Etude hydrogéologique du Sahel des Doukkala (Maroc). Applied geology. Université Scientifique et Médicale de Grenoble.

Cidu R., Biddau R. & Fanfani L. (2009). Impact of past mining activity on the quality of groundwater in SW Sardinia (Italy). Journal of Geochemical Exploration, 100: 125–132

Civita M. & De Malo M. (1998). Mapping groundwater vulnerability by the point count system model SINTACS, In Managing Hydrogeological Disasters in a vulnerable Environment (IHP UNESCO), GNDCI 1900, pp. 243-273.

Collin J-J. (2004). Les eaux souterraines, connaissance et gestion, BRGM Éditions et Hermann, 2004, 176 pages

Cooper H.H., Kohout F.A., Henry H.R. & Glover R.E. (1964). Sea water in coastal aquifers, U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 1613-C, 84 pp.

Costa-Cabral Mariza C. and Burge Stephen J. (1994) Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. Water Resources Research, Vol. 30, No. 6, pp. 1681-1692.

Creutin J D, and Obled C (1982) Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: An objective comparison: Water Resources Res., v. 18, no. 2, p. 413–43

Crévecoeur S., Debacker V., Joaquim-Justo C., Gobert S., Scippo M-L., Dejonghe W., Martin P., Thomé J-P. (2011). Groundwater quality assessment of one former industrial site in Belgium using a TRIAD-like approach. Environ. Pollut. 159, 2461–2466.

Custodio E, Llamas MR, Samper J Eds (1997). Evaluating recharge in aquifers, under hydrologic planning. IAH Spanish Chapter and ITGE, Madrid

De Vries J.J. & Simmers I. (2001). Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. Hydrogeology Journal, 10(1) : 5 - 17.

Debrach, J. (1953) Notes sur le climat du Maroc Occidental. Maroc Médical, 32, 1122-1134

Demba N'diaye A. et al. (2014). Contribution à l'étude de l'évolution Spatio-temporelle de la qualité physicochimique de l'Eau de la Rive droite du fleuve Sénégal (Contribution to Space and temporal Study of the physicochemical quality of water from the Senegal River right bank). J. Mater. Environ. Sci. 5 (1), 320-329

Detay M. (1997). La gestion active des aquifères, ed. Dunod, 440 pages

Dib I. (2010). L'impact de l'activité agricole et urbaine sur la qualité des eaux souterraines de la plaine de Gadaine - Ain yaghout (Est algérien). Université Hadj Lakhdar Batna, Faculté des sciences de l'ingénieur, Algérie, 127 p

Dillon P., Gale I., Contreras S., Pavelic P., Evans R. & Ward J. (2009). Managing aquifer recharge and discharge to sustain irrigation livelihoods under water scarcity and climate change. IAHS Publ. 330, 1-12

Direction Régionale de l'Hydraulique de Tensift, (1994). Elaboration d'un schéma d'exploitation des eaux souterraines du Sahel. Compte rendu final du projet FAO/TCP/MOR/2251

Domenico P.A., Schwartz F.W. (1990). Physical and chemical hydrogeology, John Wiley and Sons, New York, 824 pp.

Douguedroit A. et De Saintignon M-F. (1970). Méthode d'étude de la décroissance des températures en montagne de latitude moyenne : exemple des Alpes françaises du sud. Revue de Géographie Alpine, Tome LVIII, Fasc. 3, p. 453-472

Douguedroit A. et De Saintignon M-F. (1974). A propos des Alpes françaises du Sud, un nouveau mode de représentation des températures moyennes en montagne : l'orothermogramme. Revue de Géographie Alpine, Tome LXII, Fasc. 2, p. 205-217.

Douguedroit A. et De Saintignon M-F. (1981). Décroissance des températures mensuelles et annuelles avec l'altitude dans les Alpes du Sud et en Provence (séries 1959-1978). *Eaux et Climats. Mélanges Géographiques offerts à Ch. P. Péguy*, Grenoble E.R. 30, p. 179-194

Douguedroit A. et De Saintignon M-F. (1984). Les gradients de températures et de précipitations en montagne ; Revue de Géographie Alpine, Tome LXXII, p. 225-240.

Dresch J., Gigout M., Joly F., Le Coz J., & Raynal R. (1952). Aspects de la géomorphologie du Maroc. *Notes & M. Serv. géol. Maroc*, n° 96, 173 pp.

DRPE, (1992). Etude par prospection électrique : Région des Abda et des Doukkala. Tome 1 : texte et planches.

Dubuisson J., & Moussu H., (1965). Une étude expérimentale, au Sénégal, de l'intrusion des eaux marines dans nappe côtière sous l'effet de l'exploitation.

Ekouele Mbaki V.R., Boukdir A., Menga Okandza P., El Mahboul A., Hilali M., Zitouni A. (2016). Quantitative analysis of the water potential in the region of Sahel Doukkala. *Jowset*, (01), n°1, pp. 26-31

Ekouele Mbaki V.R., Boukdir A., Menga Okandza P., El Mahboul A., Hilali M., Zitouni A. (2017). Geomorphological analysis and estimating the water potential in the region of Sahel Doukkala (Morocco). *International Journal of innovation and applied studies*, Vol 19 n°1, pp. 242-251

Ekouele Mbaki V.R., Boukdir A., Menga Okandza P., Elissami A., Zitouni A., Sabri E. (2017). Estimation of the recharge potential of aquifer in the Sahel Doukkala region (Morocco). *Jowset* (02) N°01, pp. 173-182

El Achheb, A. (1993). Etude hydrogéologique et hydrochimique de la plaine des Doukkala. Thèse de 3ème cycle. Fac. Sc. Semlalià. Marrakech. 171p.

El Achheb A., (2002). Contributin à l'étude de la minéralisation et identification des sources de contamination des eaux souterraines. Application au système aquifère du bassin Sahel-Doukkala (Maroc). Thèse de Doctorat d'Etat Es-Sciences. Faculté des Sciences Semlalia-Marrakech.

El Attari, A., (2001). Etude lithostratigraphique et tectonique des terrains paléozoïques du Môle côtier (Méséta occidentale, Maroc). Doctorat d'Etat. Université Mohamed V, Rabat, 152p.

- El Bardai, R., Targuisti, K. and Aluni, K. (2015) A Contribution of GIS Methods to Assess the Aquifer Vulnerability to Contamination: A Case Study of the Calcareous Dorsal (Northern Rif, Morocco). *Journal of Water Resource and Protection*, 7, 485-495
- El Hammoumi N. et al. (2012). Evaluation de la qualité des eaux souterraines pour l'utilisation dans l'eau potable et l'agriculture : plaine de Tadla, Maroc. *Afrique Science* 08(1) 54 – 66
- El Yaouti, F., El Mandour, A., Khattach, D., & Kaufmann, O., (2008). Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco). *Journal of Hydro-environment Research*, 2(3), 192-209.
- El Yaouti, F., El Mandour, A., Khattach, D., Benavente, J. & Kaufmann, O. (2009). Salinization processes in the unconfined aquifer of Bou-Areg (NE Morocco): A geostatistical, geochemical, and tomographic study. *Applied Geochemistry*, 24: 16-31.
- Esteves M., Lapetite J. M. (2003). A multi-scale approach of runoff generation in a Sahelian gully catchment: a case study in Niger. *Catena*, 50, 255-271
- 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. *Milieux et Changements globaux. Thèse de Doctorat, Université de Chouaïb Doukkali Faculté Des Sciences El Jadida*, 2014.
- Fadili A., Mehdi K., Malaurent Ph., Riss J., Boutayeb K., & Guessir H., (2012). Influence de la marée océanique sur la variation du niveau piézométrique de l'aquifère karstique côtier de Oualidia (Maroc), *Africa Geoscience Review*, Vol. 19, No. 3, P. 135-150.
- Fadili A, Mehdi K, Riss J, Najib S, Makan A, Boutayab K (2015) Evaluation of groundwater mineralization processes and seawater intrusion extension in the coastal aquifer of Oualidia, Morocco: hydrochemical and geophysical approach. *Arabian Journal of Geosciences*. 8, 10, 8567

Faki Y., (1991). Caractérisation hydrogéologique et hydrochimique des aquifères côtiers entre Safi et Oualidia (Méséta côtière-Maroc). Thèse Doc. 3ème cycle. Faculté des Sciences Semlalia Marrakech 231p.

FAO, (Food and Agriculture Organization), (1997). Seawater intrusion in coastal aquifers : guidelines for study, monitoring and control. FAO Water Reports 11. Rome Italy : FAO;. 163 p.

Fekkoul A, Zarhloule Y, Boughriba M, Barkaoui A, Jilali A, Bouri S (2013) Impact of anthropogenic activities on the groundwater resources of the unconfined aquifer of Triffa plain (Eastern Morocco). Arabian Journal of Geosciences. 6, 4917

Ferré M (1964) Nappe du calcaire de Dridrate. Etat des travaux de reconnaissance et d'exploitation. Rapp. inéd. arch. MTPC/DH/DRE, 28 pp.

Ferré M. (1966). Etude hydrologique de l'Oued Aouja. Rapp. inéd. MTPC/DH/DRE, 10 pp., 5 tabl., 5 fig., 18 h.-t.

Ferré M. (1966). Périmètre des Abda-Doukkala Etat des connaissances sur l'hydrologie superficielle. Rapp. inéd. MTPC/DH/DRE, 12 pp., 12 tabl., 6 fig., 1 carte.

Ferré M (1969) Hydrologie et hydrogéologie des Abda-Doukkala (Maroc Occidental). Rapp. inéd. MTPC/ DH/DRE. Thèse de docteur ingénieur présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Nancy, 275 pp., 126 fig., 10 pl. h.-t., 1 tome d'annexes.

Flint A.L., Flint L.E., Edward E.M., Fabryka-Martin J.T., Bodvarsson G.S., (2002). Estimating recharge at Yucca Mountain, Nevada, USA: comparison of methods. Hydrogeol. J. 10: 180-204

Gale I., Dillon P. (2005). Strategies for managed aquifer recharge (MAR) in semi-arid areas, UNESCO-IHP, Paris

Gerhart JM (1986) Groundwater recharge and its effect on nitrate concentrations beneath a manured field site in Pennsylvania. Groundwater 24:483–489

Gibbs R.J. (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. Science, Vol. 17,1088-1090 pp

Gigout M. (1951). Etudes géologiques sur la méséta marocaine occidentale (Arrière-pays de Casablanca, Mazagan et Safi). 2 tomes, Travaux de l'Institut Scientifique Chérifien, Rabat.

Gigout M. (1952). Les ressources en eau souterraine des Doukkala et Abda (Maroc occidental). Rapp. inéd., seconde thèse.

Gigout M., (1955). Enseignement de trois forages sur la stratigraphie du Crétacé des Doukkala. *Notes Serv. géol. Maroc, t. 11, n° 123*, pp. 44-55.

Gigout M. (1956). Levés géologiques sur la feuille Sidi-Bennour (Méséta marocaine occidentale). *Notes Serv. géol. Maroc, t, 14, n° 133*, pp. 33-54.

Gigout M. (1956). Recherches sur le Pliocène et le Quaternaire atlantiques marocains. *Trav. Inst. sci. Chérif. sér. Géol. & Géogr. phys.*, n° 5, 94 pp.

Gigout M. (1965). Carte géologique de la Méséta marocaine entre Settat et Mazagan (El Jadida) (Doukkala et Chaouïa occidentale). Notice explicative. *Notes s M. Serv. géol. Maroc, n° 75 bis*, pp. 3-23.

Gigout M. (1965). Carte géologique de la Méséta entre Mechra ben Abbou et Safi (Doukkala et massif des Rehamna). Notice explicative. *Notes & M. Serv. géol. Maroc, n° 84 bis*, pp. 3-31

Gilli E. (2012). *Karstologie : Karsts, grottes et sources*, Dunod, 256 p.

Global Water Partnership, (GWP)<http://www.gwp.org/en/gwp-in-action/Mediterranean/#>, [consulted online April 2015]

Greenlee D.D. (1987). Raster and Vector Processing for Scanned Linework. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 53 (10): 1383-1387

Hall D.W., Risser D.W. (1993). Effects of agricultural nutrient management on nitrogen fate and transport in Lancaster County, Pennsylvania. *Water Resour Bull* 29 :55–76

Hazan, R., (1960). Contamination par les eaux de mer des nappes côtières du Maroc : étude préliminaire. *Notes du Service Géologique du Maroc*, pp. 185-194 Hazan, R. & Ferré, M. (1964). Exploitation d'une

nappe karstique à proximité de l'océan (région d'Oualidia). In : General Assembly of Berkeley, 19-31 August 1963 : Commission on Subterranean Waters, 561-563. IAHS Publ. N°. 64.

Hazan R., Ferré M. (1963). Exploitation d'une nappe karstique à proximité de l'Océan (région d'Oualidia). *Ass. Int. Hydrol. sci., comm., eaux souterr., Congr. Berkeley (Calif)*, publ. Gentbrugge, n° 64, 1964, pp. 561-563.

Hammer G.L., Hansen J.W., Phillips JG, Mjelde JW, Hill H, Love A., Potgieter A. (2001). Advances in application of climate prediction in agriculture. *Agric. Syst.* 70, 515–553

Hilali M., (2002). Hydrogéologie et modélisation de l'intrusion marine dans les aquifères côtiers de Martil et du Sahel-Maroc. Thèse de Doctorat. Ecole Mohammadia d'Ingénieurs Rabat. 158p.

Hossien M.T. (2004). Hydrochemical evaluation of groundwater in the Blue Nile Basin, eastern Sudan, using conventional and multivariate techniques. *Hydrogeology Journal*, Vol.12, 144-158.

Hsissou Y., Mudry J., Mania J., Bouchaou L. & Chauve P., (1999). Utilisation du rapport Br/Cl pour déterminer l'origine de la salinité des eaux souterraines : exemple de la plaine du Souss (Maroc). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 1999. 328, 381-386.

Hsissou, Y., Bouchaou, L., Mudry, J., Mania, J., & Chauve, P., (2002). Use of chemical tracing to study acquisition modalities of the mineralization and behaviour of unconfined groundwaters under a semi-arid climate : the case of the Souss plain (Morocco) *Environmental Geology* 42 :672-680.

Ibnoussina M, El Haroui M, Maslouhi A (2006) Expérimentation et modélisation de la lixiviation de l'azote nitrique dans un sol sableux. *C. R. Geoscience*. 338, 787

Jekel M., & Gruenheid S. (2005). Bank filtration and groundwater recharge for treatment of polluted surface waters. *Water Science and Technology: Water Supply* 5(5): 57-66.

Jenson, S. K. et Domingue J.O. (1988) Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (11): 1593-1600

- Jocson J.M.U., Jenson J.W. & Contractor D.N. (2002). Recharge and aquifer response: northern Guam Lens Aquifer, Guam Mariana Islands. *J Hydrol* 260 :231–254
- Kabbaj A, Combe M (1975) Présentation du domaine Atlantique, dans : Ressources en Eau du Maroc Tome 2 Plaines et bassins du Maroc atlantique'. editions du service geologique du Maroc rabat.
- Kortatsi B.K. (2007). Hydrochemical framework of groundwater in the Ankobra Basin, Ghana. *Aquatic Geochemistry*, Vol. 13(1) 41-74.
- Kovacs G., (1981). *Seepage Hydraulics, Development in Water Science*, Elsevier, N.Y.
- Kuehn W. & Mueller U. (2000). Riverbank filtration: An overview. *Journal / American Water Works Association* 92(12): 60-69.
- Laftouhi N-E, Vanclooster M, Jalal M, Witam O, Aboufirassi M, Bahir M, Persoons E (2003) Groundwater nitrate pollution in the Essaouira Basin (Morocco). *C. R. Geoscience* 335, pp. 307–317
- Lastennet R. (1994). Rôle de la zone non-saturée dans le fonctionnement des aquifers karstiques. Approche par l'étude physico-chimique et isotopique du signal d'entrée et des exutoires du massif du Ventoux (Vaucluse). *Laboratoire d'Hydrogéologie. Avignon, Université d'Avignon* : 239.
- Lebart, L., Piron, M., & Morineau, A., (2006). *Statistique Exploratoire Multidimensionnelle, Visualisation et interférence en fouilles de données*. (4ème édition ; DUNOD, Paris, 2006).
- Lee J.Y., Kim H. (2016). Projection of future temperature-related mortality due to climate and demographic changes, *Environment International* 94, 489–494
- Lerner D.N., Issar A.S., Simmers I. (1990) Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. *Int Contrib Hydrogeol Verlang Heinz Heise* 8, 345 p
- Lghoul M., Maqsoud A., Hakkou R., Kchikach A. (2014) Hydrogeochemical behavior around the abandoned Kettara mine site, Morocco. *Journal of Geochemical Exploration*. 144, 456
- Lu G.Y., Wong D.W. (2008). An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique, *Computers & Geosciences* 34 1044–1055

Maas E.V., et Homan G.B. (1976) « Tolérance des cultures au sel ». Riverside, USA.

Majumdar D., Gupta N., (2000). Nitrate pollution of groundwater and associated human health disorders. *Indian J. Environ. Health.* 42(1), 28–39.

Massaad B. (2000). Salt water intrusion in the Hadeth aquifer: groundwater rehabilitation techniques, Expert group meeting on Implications of groundwater rehabilitation for water resources protection and conservation. ESCWA, Beirut, pp. 1-40.

Massmann G., Pekdeger A. et al. (2007). "Drinking-water production in urban environments – Bank filtration in Berlin." *Trinkwassergewinnung in urbanen Räumen - Erkenntnisse zur Uferfiltration in Berlin* 12(3) : 232-245.

Matheron G. (1971). *The Theory of Regionalized Random Variables and its 610 Applications*. Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau

Meinzer O.E. (1923). *The occurrence of groundwater in the United States with a discussion of principles*. US Geol Surv Water-Supply Pap 489, 321 pp

Meinzer O.E., Stearns N.D. (1929). *A study of groundwater in the Pomperaug Basin, Conn. with special reference to intake and discharge*. US Geol Surv Water-Supply Pap 597B:73–146

Melkonyan A. (2015). Climate change impact on water resources and crop production in Armenia. *Agricultural Water Management* 161 86–101

Mende A., Astorga A., Neumann D. (2007). Strategy for groundwater management in developing countries: a case study in northern Costa Rica. *J Hydrol* 334:109–124

Missimer T.M., Weixing G.U.O., Walker C.W. & Maliva R.G. (2002). Hydraulic and density considerations in the design of aquifer storage and recovery systems. *Florida Water Resources Journal*, February 2002, pp. 31-35.

Moon S. K., Woo, N.C., Lee K.S., (2004). Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge. *J. Hydrol.* 292, 198-209

- Mougin G. (1955). Etude du ruissellement des eaux météoriques dans le périmètre d'irrigation des Abda-Doukkala. Rapp. inéd, MTPC.
- Nisbet E.G. et Verneau O. (1970). Composantes chimiques des eaux courantes, discussion et proposition de classes en tant que bases d'interprétation des analyses chimiques. *Ann. Limn*, 6(2), 161-190.
- NWP, Netherlands Water Partnership (2007).
- Oulaaross Z. (2009). Thèse de doctorat : Etude climatologique, hydrogéologique et géophysique du Sahel Côtier des Doukkala (Maroc). Apport de l'analyse statistique et de l'inversion des données géoélectriques à l'étude du biseau salé de la lagune de Sidi Moussa.
- Paquerot S. (2005). Eau douce : la nécessaire refondation du droit international, Puq
- Parkhust D.L., Appelo C.A.J. (1999). U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations.
- Peng T.-R., et al. (2014). Groundwater-recharge connectivity between a hills-and-plains' area of western Taiwan using water isotopes and electrical conductivity. *Journal of Hydrology* 517, 226–235
- Rasmussen W.C., Andreasen G.E. (1959). Hydrologic budget of the Beaverdam Creek Basin, Maryland. US Geol Surv Water-Supply Pap 1472: 106 p
- Reventa C., Murray S., Abramovitz J., Hammond A., (1999). In: Resources, World (Ed.), *Watersheds of the World: Ecological Value and Vulnerability*. Institute and Worldwatch Institute, Washington D.C. 200 pp.
- Rodier J. (1984). L'analyse de l'eau. Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 7ème édition, Dunod, Paris, 1353.
- Rodier J. et al. (2009). L'analyse de l'eau, 9e édition. DUNOD (éditeur), Paris, France. 1579.
- Rouso P. (1931). Hydrogéologie de la région de Safi à Mazagan dite Sahel, et des abords de la ville de Safi. *B. Com. et eaux souterr., Rabat, 1ère sér., t. 1, fasc. 1*, pp. 33-45.
- Salomon J.-N. (2006). Précis de karstologie, Presses Universitaires de Bordeaux, coll. « Scieteren »

Sargaonkar A., Deshpande V. (2003). Development of an overall index of pollution for surface water based on a general classification scheme in Indian context. *J. Environ. Monit. Assess.* 89, 43–67.

Scanlon B.R., Healy R.W., Cook P.G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeol J.* Volume 10, Issue 1, pp 18–39.

Schneebeli G. (1966). *Hydraulique souterraine*. ISSN 0399 4198, Eyrolles. 366 p.

Schoeller H. (1956). *Géochimie des eaux souterraines : Application aux eaux de gisement de pétrole*. Paris, 213p.

Schoeller., H., (1962). *Les eaux souterraines*. Masson et Cie, Editeurs, Paris, 642p.

Sharma M.L. (ed) (1989). *Groundwater recharge*. Balkema, Rotterdam, 323p

Sharma S.K., Vairavamoorthy K. (2009). Urban water demand management: prospects and challenges for the developing countries. *Water Environ J* 23:2–21018

Simmers I. (ed) (1988). *Estimation of natural groundwater recharge*. NATO ASI Series C 222. Reidel, Dordrecht, 510 p

Simmers I. (ed) (1997). *Recharge of phreatic aquifers in (semi-) arid areas*. Balkema, Rotterdam, 277p

Sophocleous M.A., (1991). Combining the soil water balance and water-level fluctuation methods to estimate natural groundwater recharge: practical aspects. *Journal of Hydrology* 124, 229–241.

Stumm W., Morgan J.J. (1981). *Aquatic Chemistry* 2d Edition, John Wiley & Sons Ed.

Stuyfzand P.J. (1998). Fate of pollutants during artificial recharge and bank filtration in the Netherlands. In: Peters J.H. (ed), *Artificial recharge of groundwater, Proc. 3rd Intern. Symp. On Artificial Recharge*, Amsterdam the Netherlands, Balkema, 119-125.

Subba Rao N., (1993). Environmental impact of industrial effluents in groundwater regions of Visakhapatnam Industrial Complex. *Indian J. Geol.* 65, 35–43.

Sumner, M.E., and Stewart B.A., (1992). *Soil Crusting: Chemical and Physical Processes*. 1st Edn., Lewis Publishers, Boca Raton, ISBN-10: 0873718690, 372p

Sun Z. et al. (2015). China's coastal wetlands: Conservation history, implementation efforts, existing issues and strategies for future improvement. *Environment International*, vol 79, pp 25–41.

Todd D.K. (1959). *Ground Water Hydrology* 336 New York: Wiley

Toth J. (1999). Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology journal* 7 (1): 1-14, Springer Verlag.

Tufenkji N., Ryan J.N. et al. (2002). The promise of Bank filtration. *Environmental Science and Technology* 36(21).

Wilbert J. (1961) : Le Quaternaire dans les Doukkala. *Notes Maroc.*, Rabat, n° 16, pp. 5-30

World Bank (2007). Making the most of scarcity: accountability for better water management results in the Middle East and North Africa. MENA development report.

Younsi, A. K. (2001). Méthodologie de mise en évidence des mécanismes de salure des eaux souterraines côtières en zone semi-aride irriguée (Chaouia côtière, Maroc). Thèse de Doctorat d'Etat es Science, Univ. Chouaib Doukkali, El Jadida.

Younsi, A., Lhadi E.K., & Mania J., (1997). Mise en évidence de l'intrusion marine de la nappe d'El Jadida, Maroc. *Fifth Scien. Ass. of IAHS*, Rabat, Maroc, IAHS publi., 244,115-122.

Younsi A., Mania J.E., Lhadi E.K., Mudry J. (2001). Incidences des pluies exceptionnelles sur un aquifère libre côtier en zone semi-aride (Chaouia, Maroc). *Revue Des sciences de l'eau, Rev. Sci. Eau* 14/2(2001). 115-130

Zouhri, L. (2010). Geoelectrical structure and hydrogeological investigations of the southern Rif Cordillera (Morocco), *Hydrol. Process*, 24 : 1308-1317

Zouhri, L., Carlier, E., Ben Kabbour, B., Toto, E.A., Gorini, C. & Louche, B. (2007). Groundwater interaction in the coastal environment : hydrochemical, electrical and seismic approaches. *Bull Eng Geol Environ*, 67 :123-128.

Zourarah, B. (2002). Les processus côtiers actuels et leur impact sur l'environnement littoral des Doukkala : Approches hydrodynamiques, morphologiques, sédimentologiques et géochimiques. Thèse de Doctorat d'Etat es Science, Univ. Chouaib Doukkali, El Jadida. 209p.

## **Annexes**

## Annexes 1

Périmètre d'étude : 458 Km, Surface : 7384 Km<sup>2</sup>

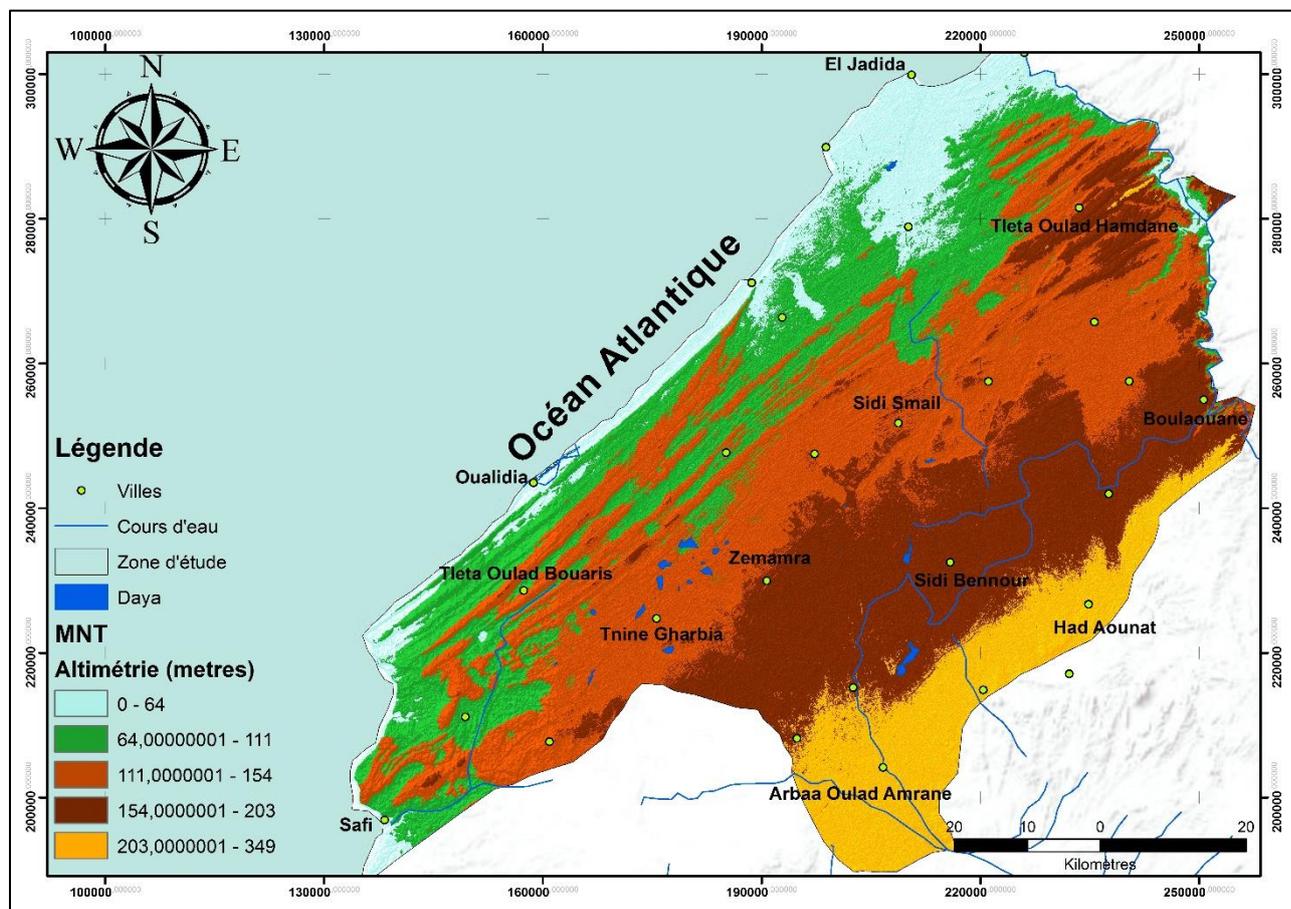


Figure 66. Carte représentative de l'altimétrie de la région du Sahel Doukkala

Tableau 35. Répartition spatiale à partir des données altimétriques

Altitudes	Proportion (%)	Pourcentage cumulé
[0 – 64]	18,34	18,34
[64 – 111]	13,47	31,81
[111 – 154]	12,32	44,13
[154 – 203]	14,04	58,17
[203 – 349]	41,83	100

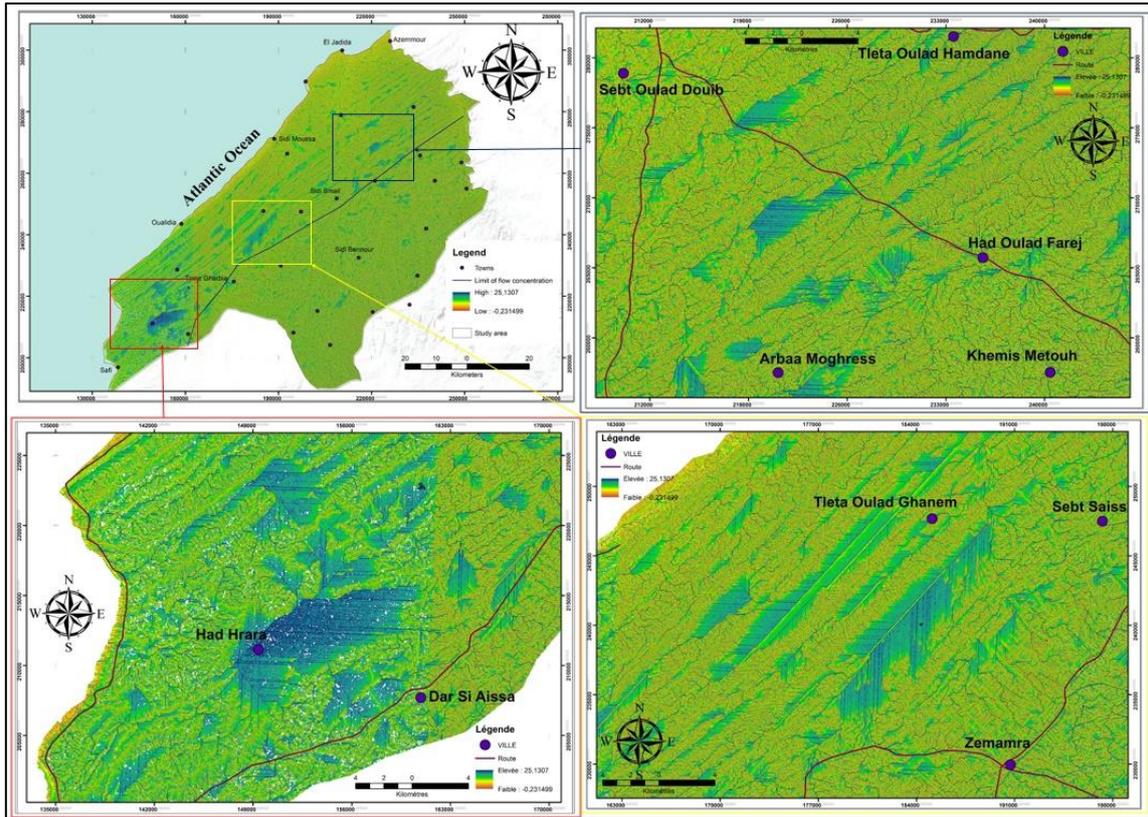


Figure 67. Indice topographique d'humidité d'après Beven & Kirkby (1979)

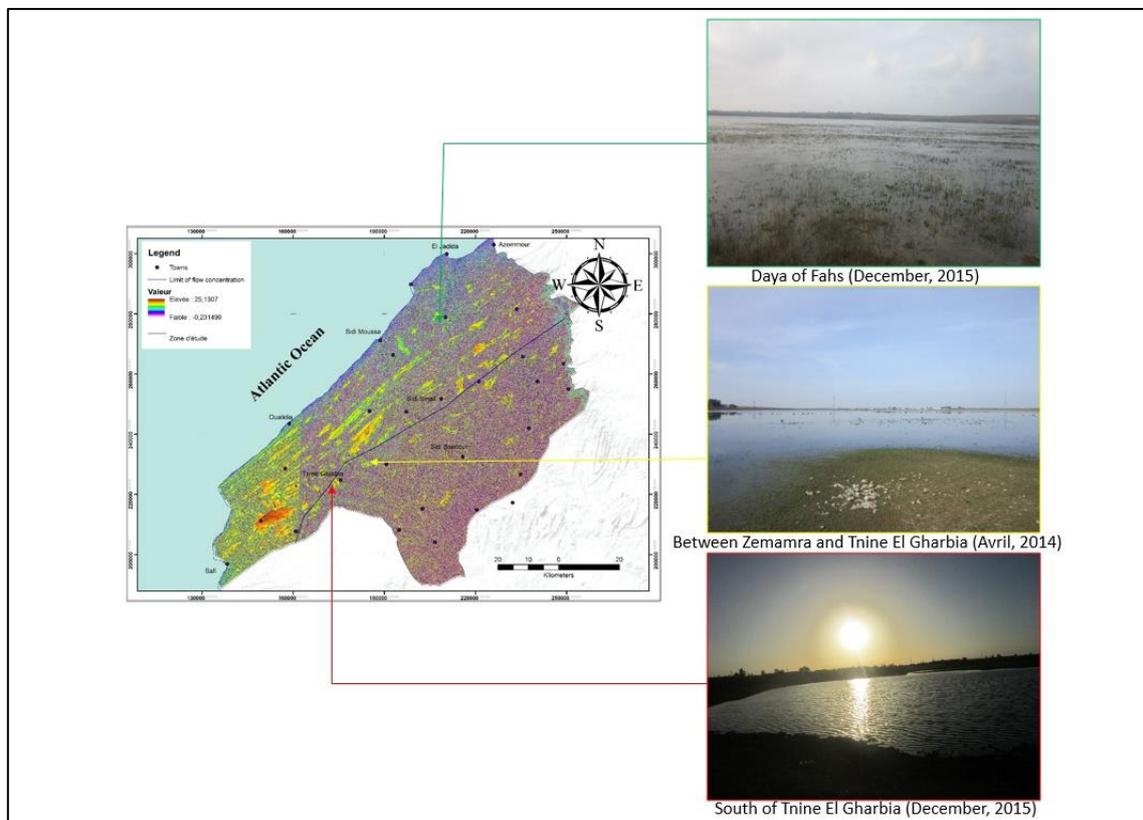


Figure 68. Aperçu général des points humides



*Figure 69. Canal sans berges à proximité de Sidi Bennour*



*Figure 70. Daya située à proximité de Zemamra*



*Figure 71. Photo d'une daya située à proximité de Tnine El Gharbia*



*Figure 72. Aperçu de la daya à proximité de la localité de Zémamra*

Annexes 2

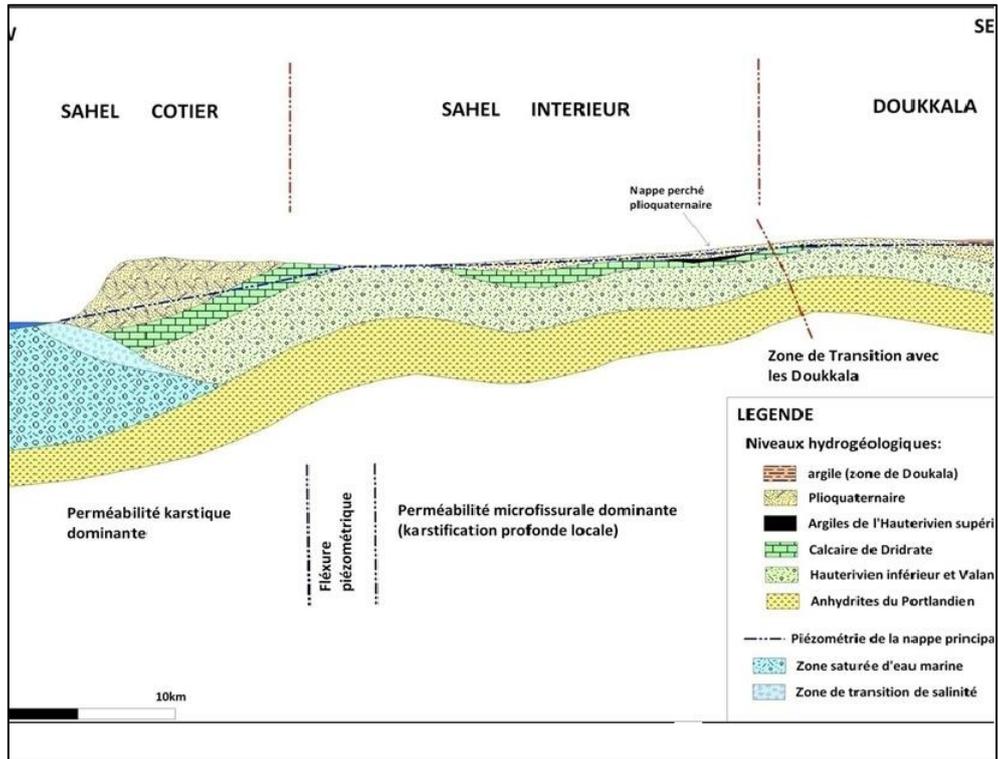


Figure 73. Coupe hydrogéologique synthétique du Sahel Doukkala

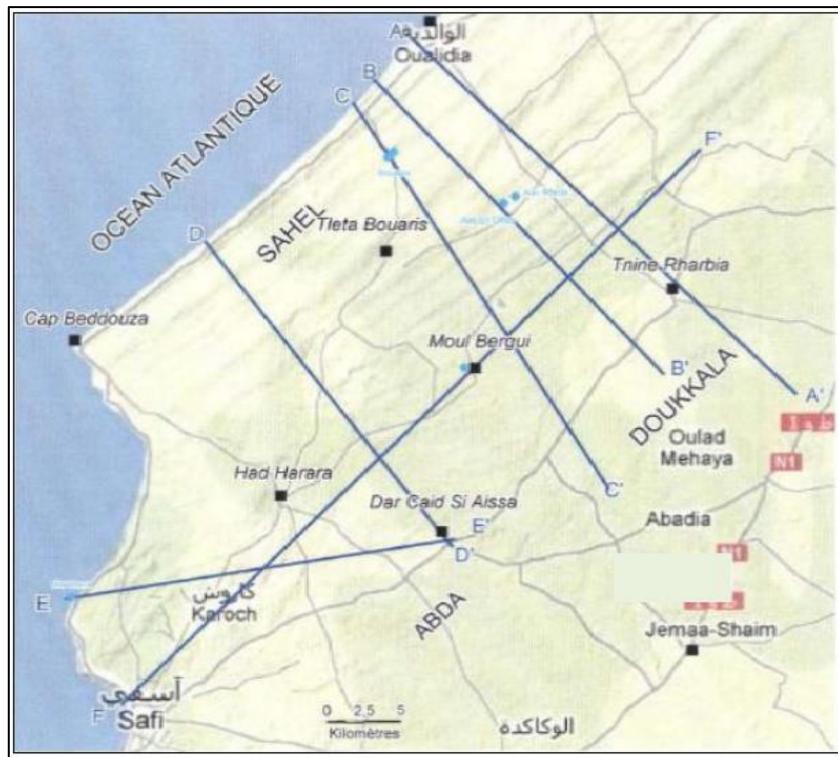


Figure 74. Situation des coupes hydrogéologiques (moitié sud de la zone du projet)



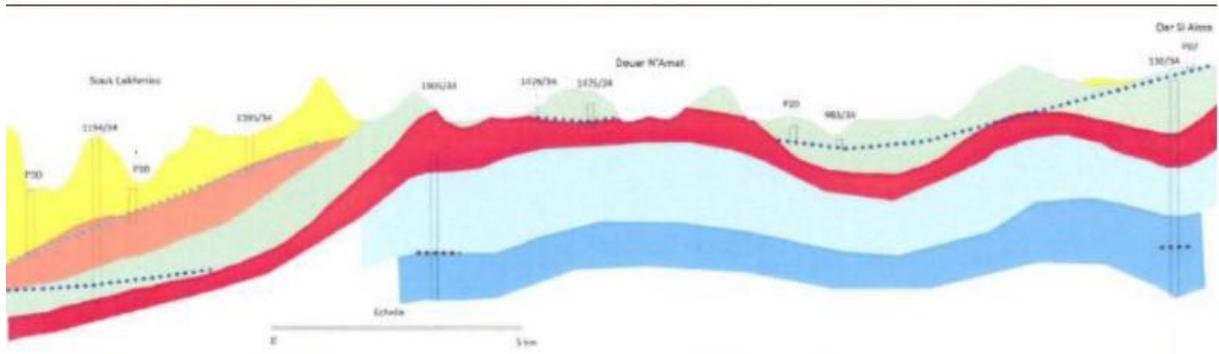


Figure 78. Coupe hydrogéologique D-D'Océan- Dar Si Aissa

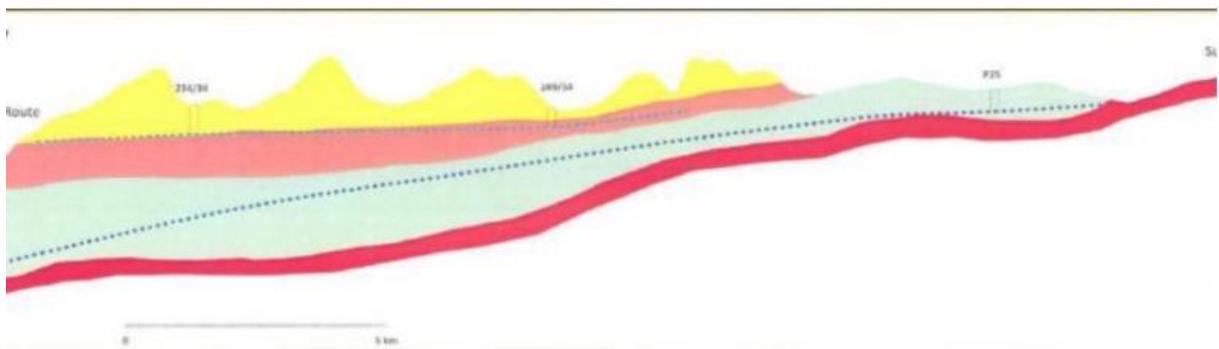


Figure 79. Coupe hydrogéologique E-E' Ain Thami-Sud Dar Si Aissa

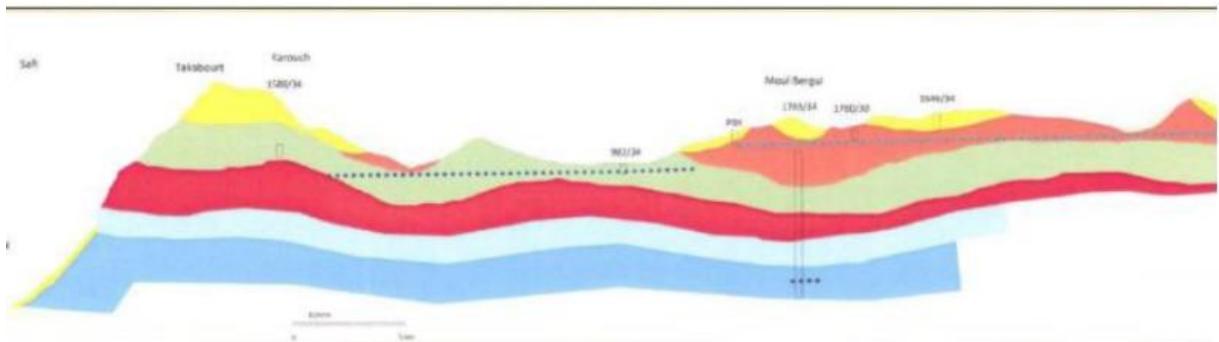


Figure 80. Coupe hydrogéologique F-F' Safi- Moul Bergui-Doukkala



*Figure 81. Légende des coupes hydrogéologiques*

Annexe 3

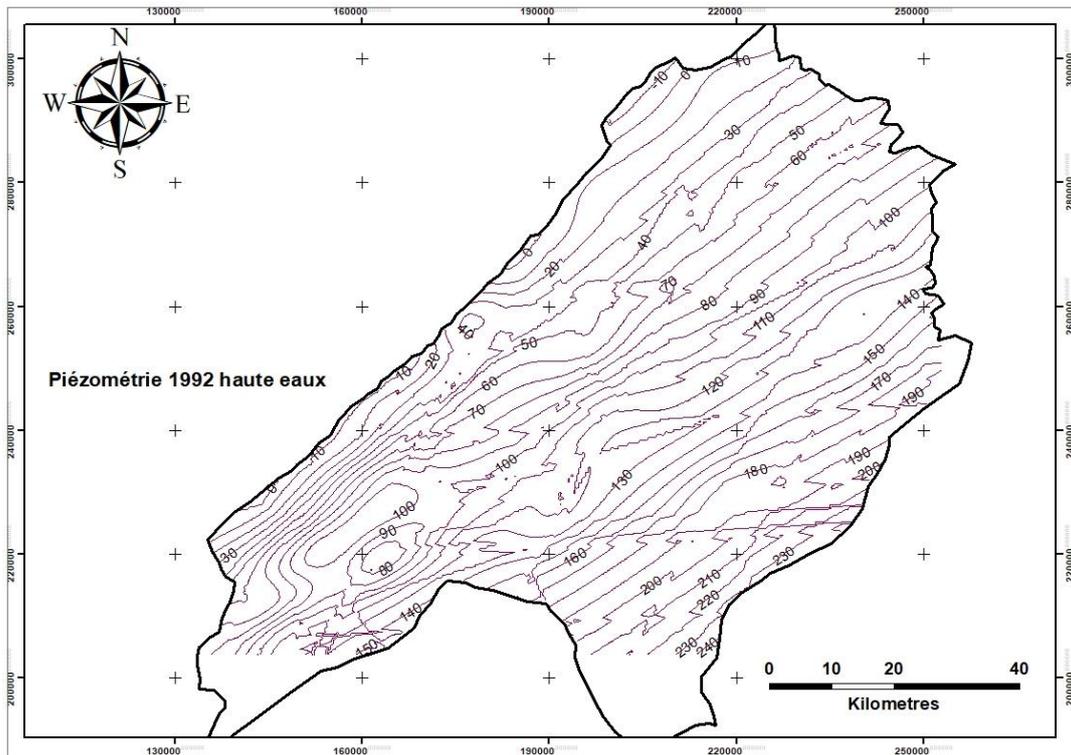


Figure 82. Esquisse de la piézométrie de Janvier 1992

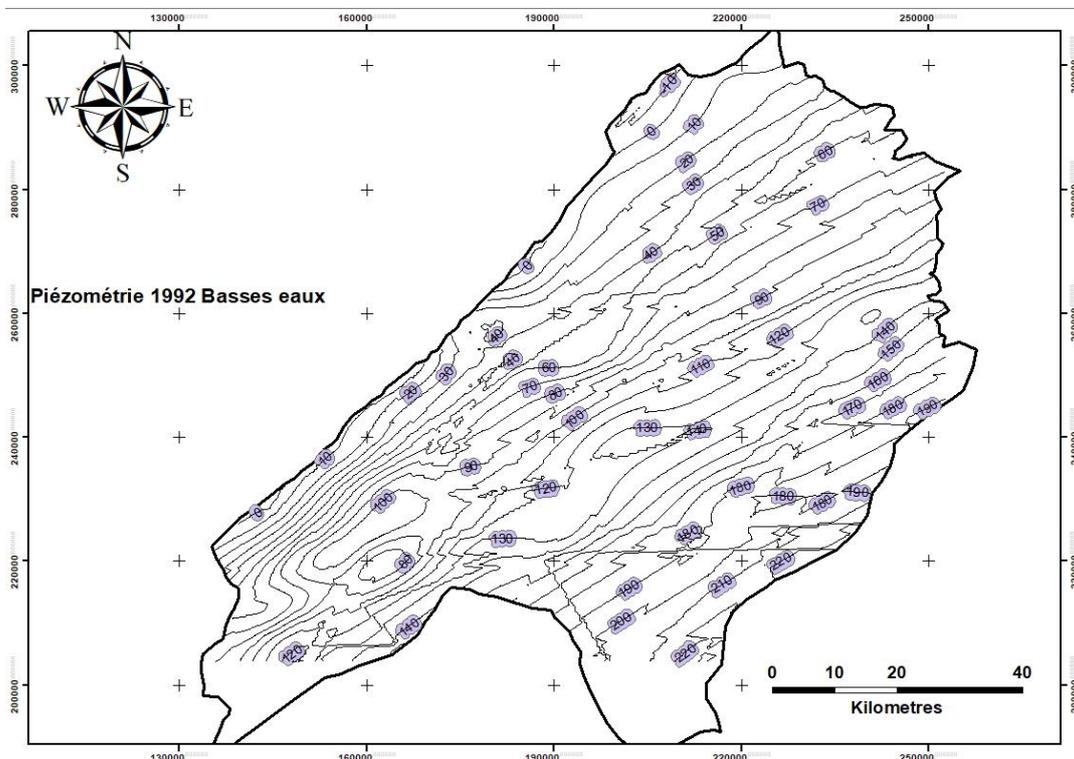


Figure 83. Esquisse de la piézométrie Aout 1992

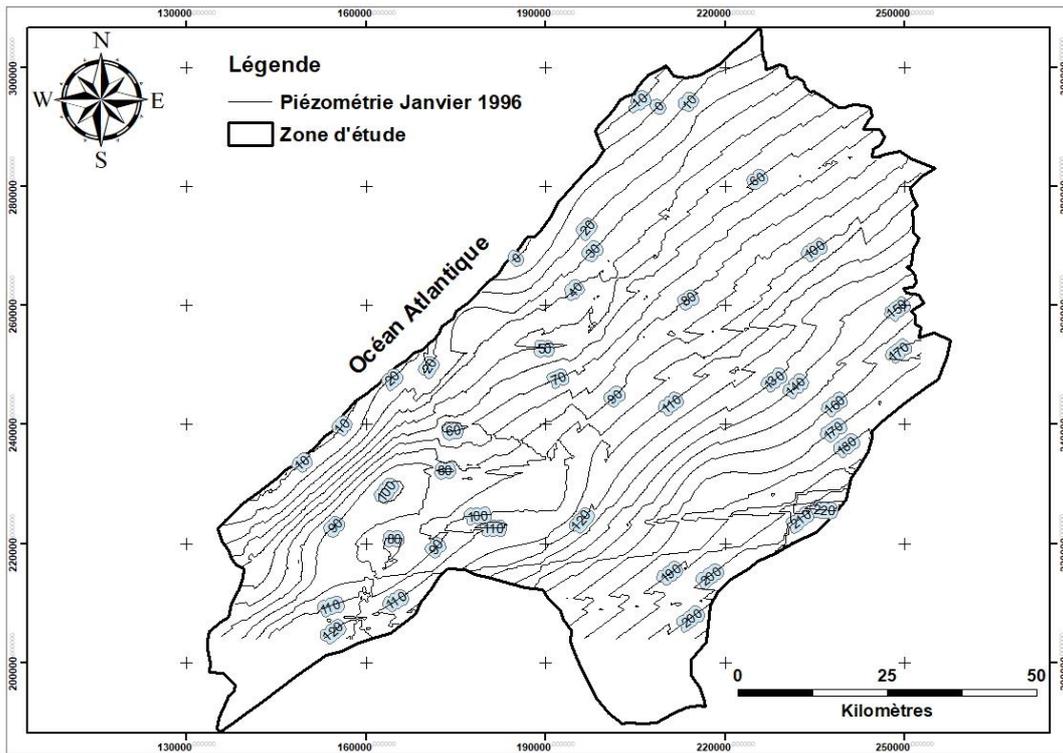


Figure 84. Esquisse de la piézométrie Janvier 1996

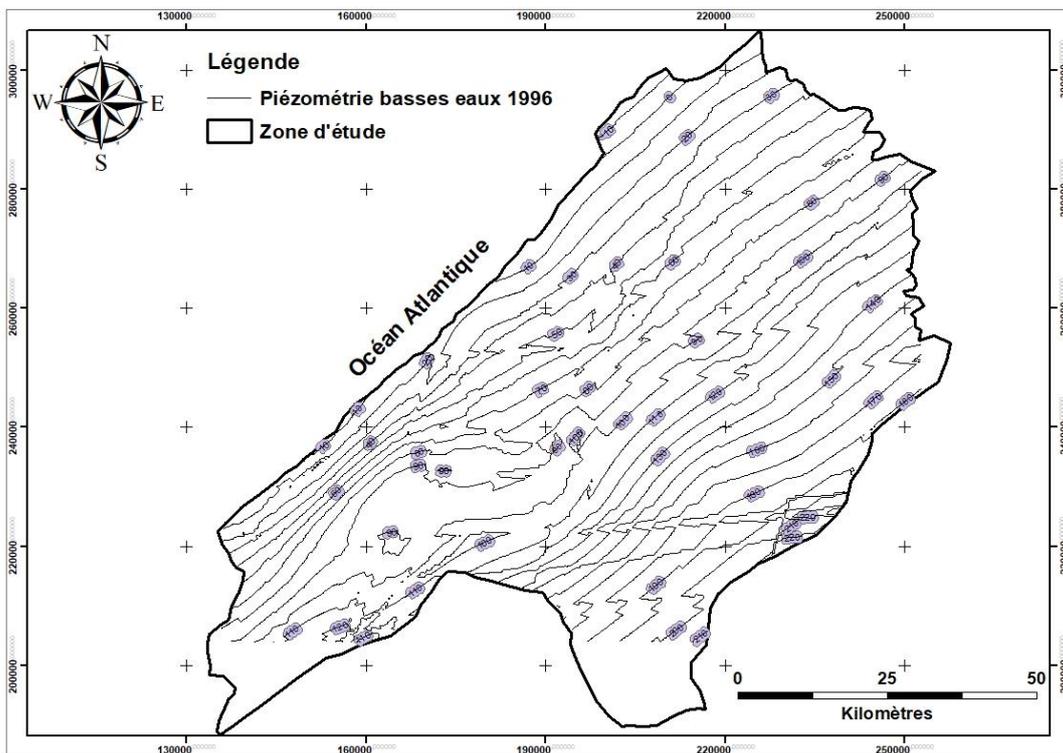


Figure 85. Esquisse de la piézométrie Aout 1996

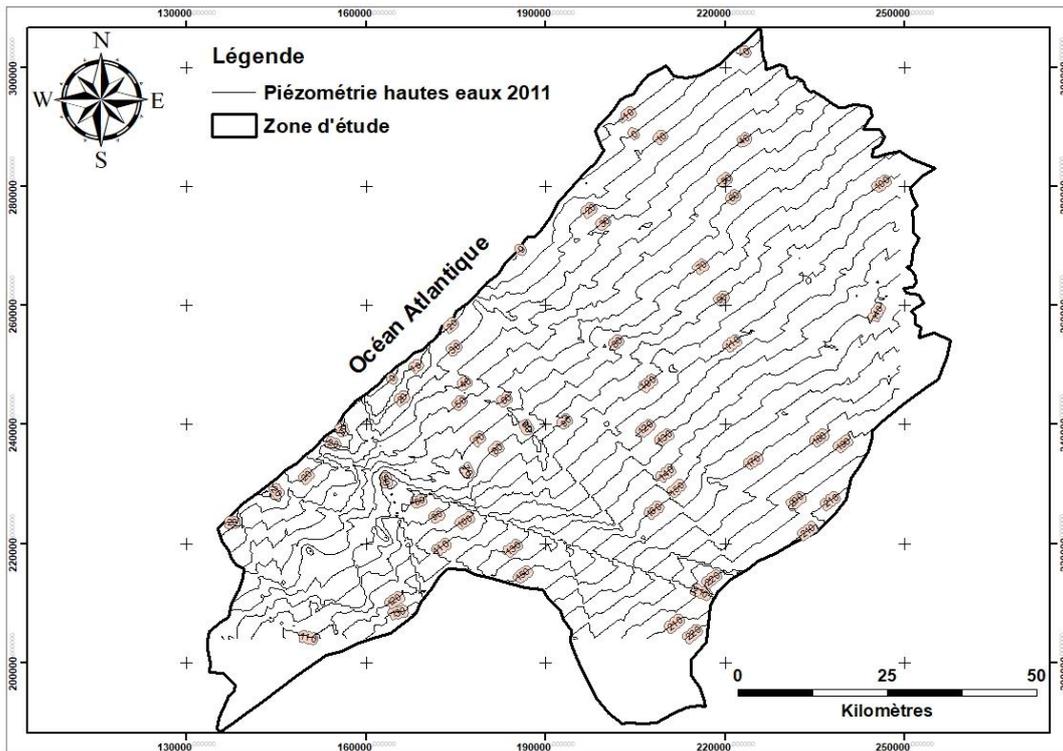


Figure 86. Esquisse de piézométrie Janvier 2011

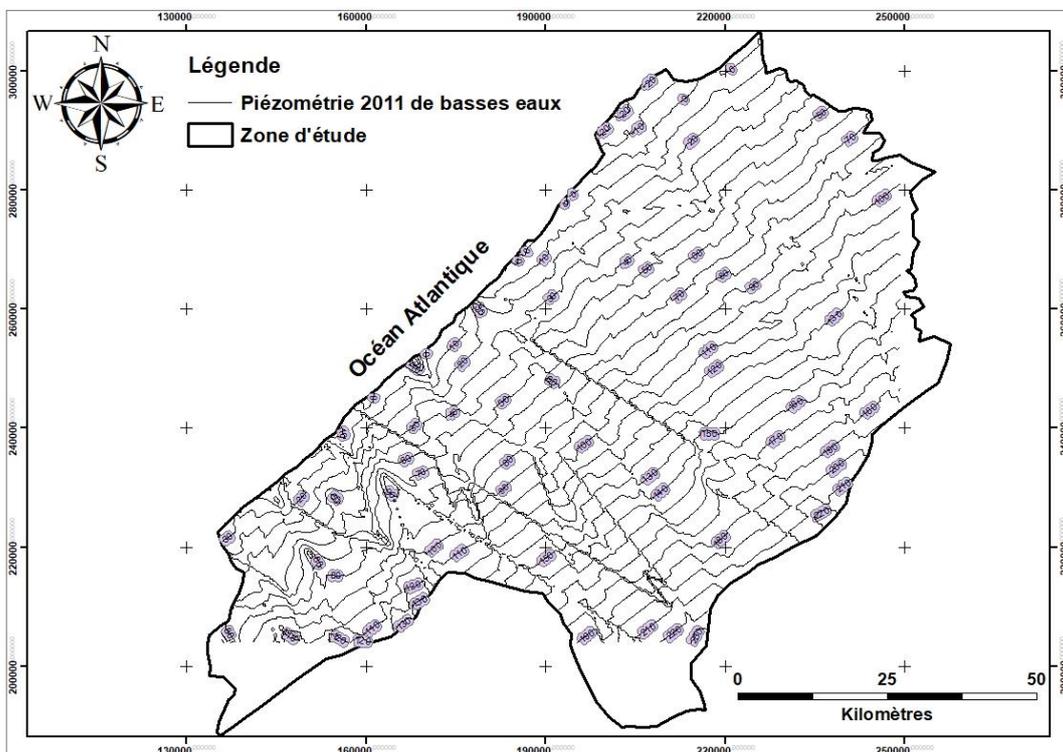


Figure 87. Esquisse de piézométrie en Aout 2011

## Annexe 4

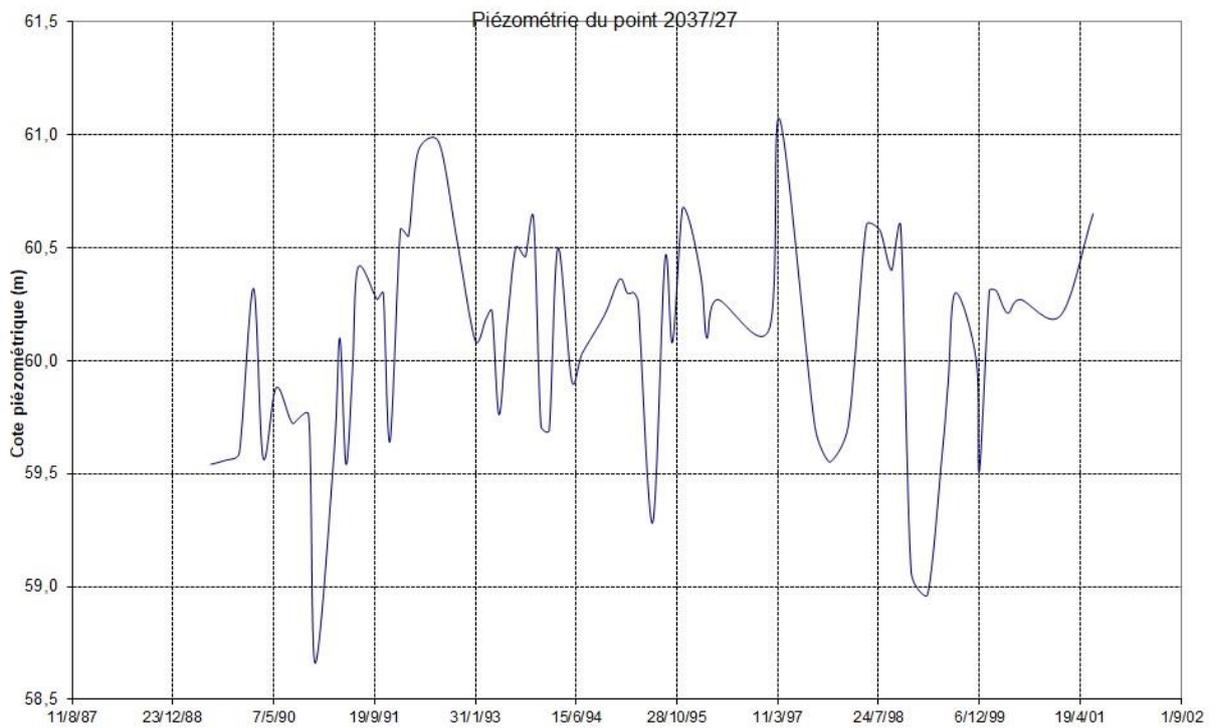


Figure 88. Aperçu de l'historique piézométrique du point 27/2037

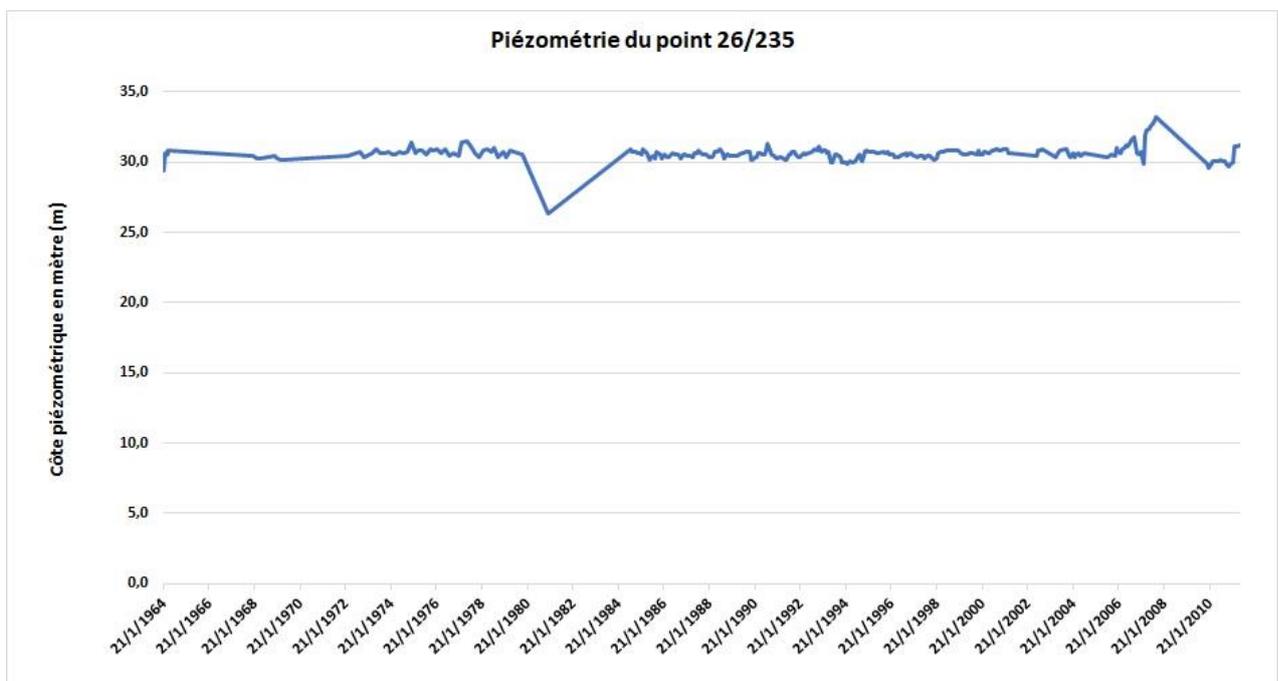


Figure 89. Aperçu de l'historique piézométrique du point 26/235

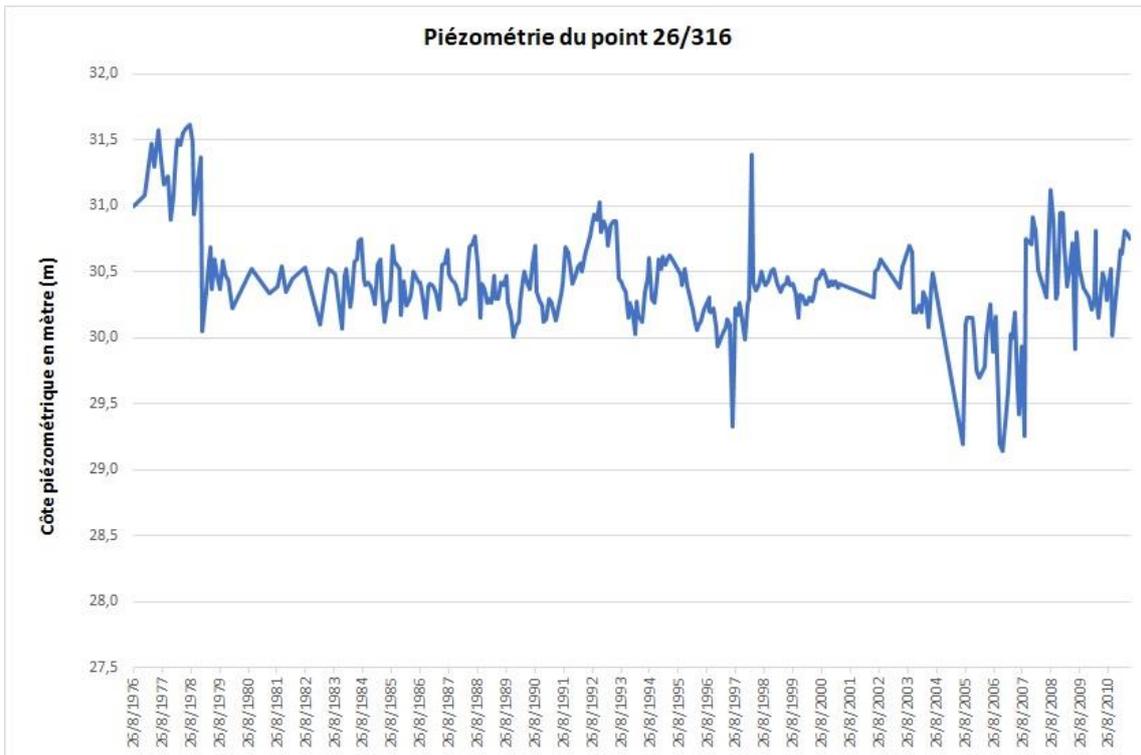


Figure 90. Aperçu de l'historique piézométrique du point 26/316

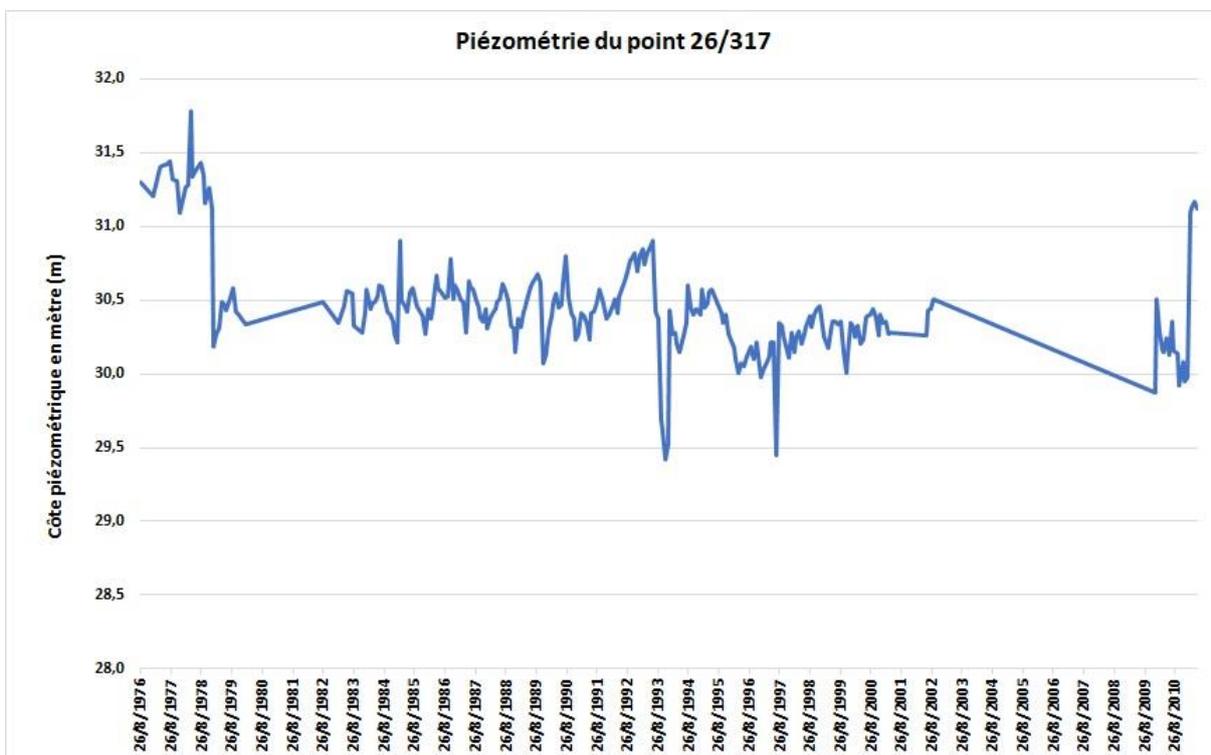


Figure 91. Aperçu de l'historique piézométrique du point 26/317



Figure 92. Aperçu de l'historique piézométrique du point 26/448

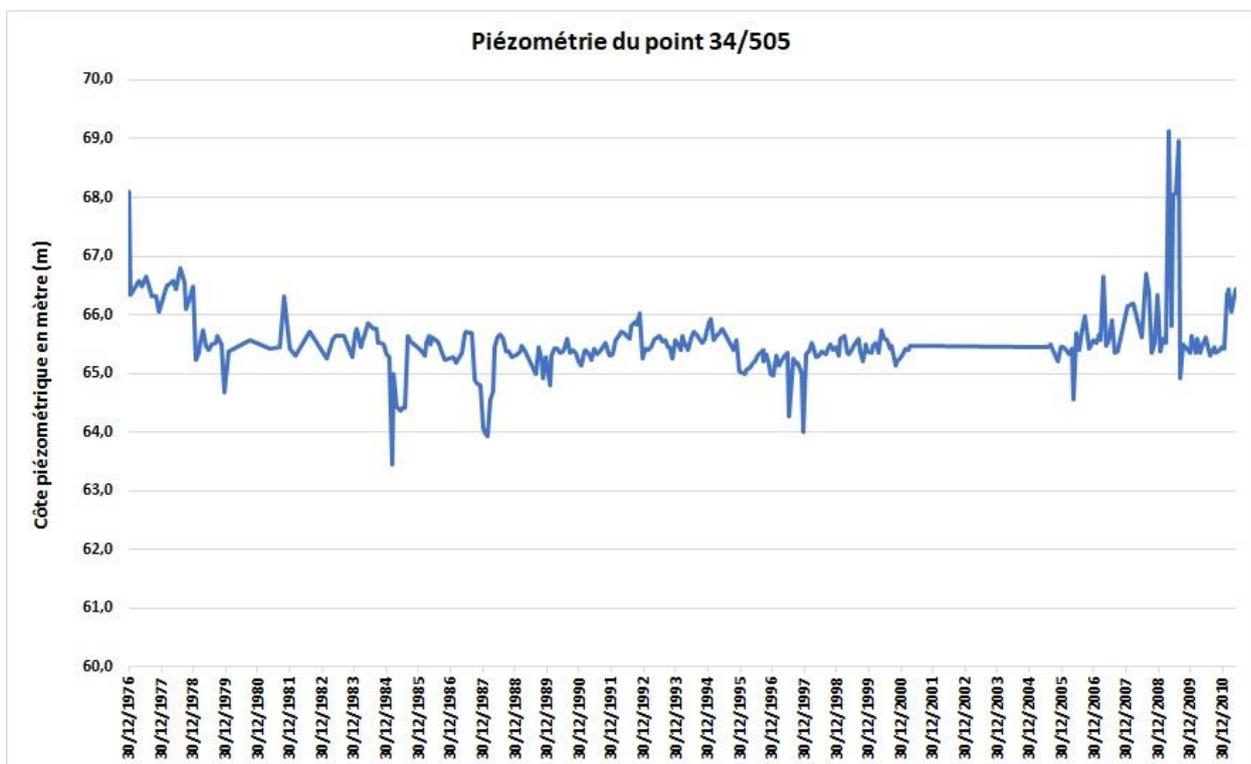


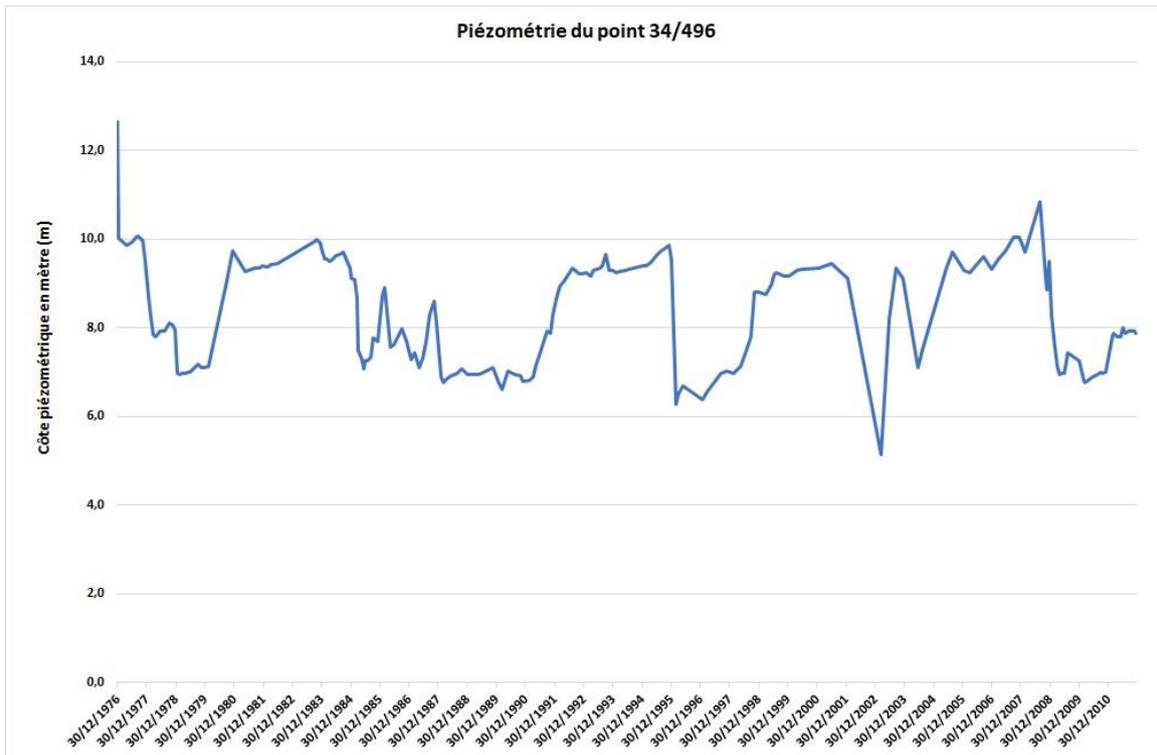
Figure 93. Aperçu de l'historique piézométrique du point 34/505



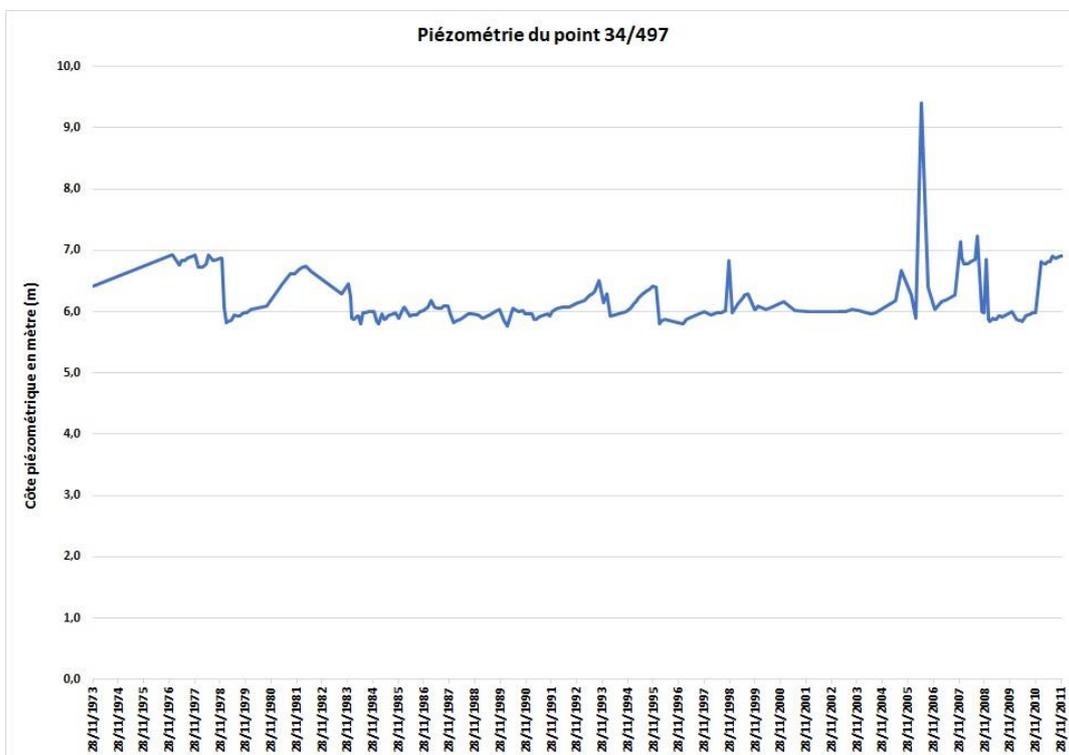
**Figure 94. Aperçu de l'historique piézométrique du point 34/1194**



**Figure 95. Aperçu de l'historique piézométrique du point 34/1398**



**Figure 96. Aperçu de l'historique piézométrique du point 34/496**



**Figure 97. Aperçu de l'historique piézométrique du point 34/497**

Annexe 5

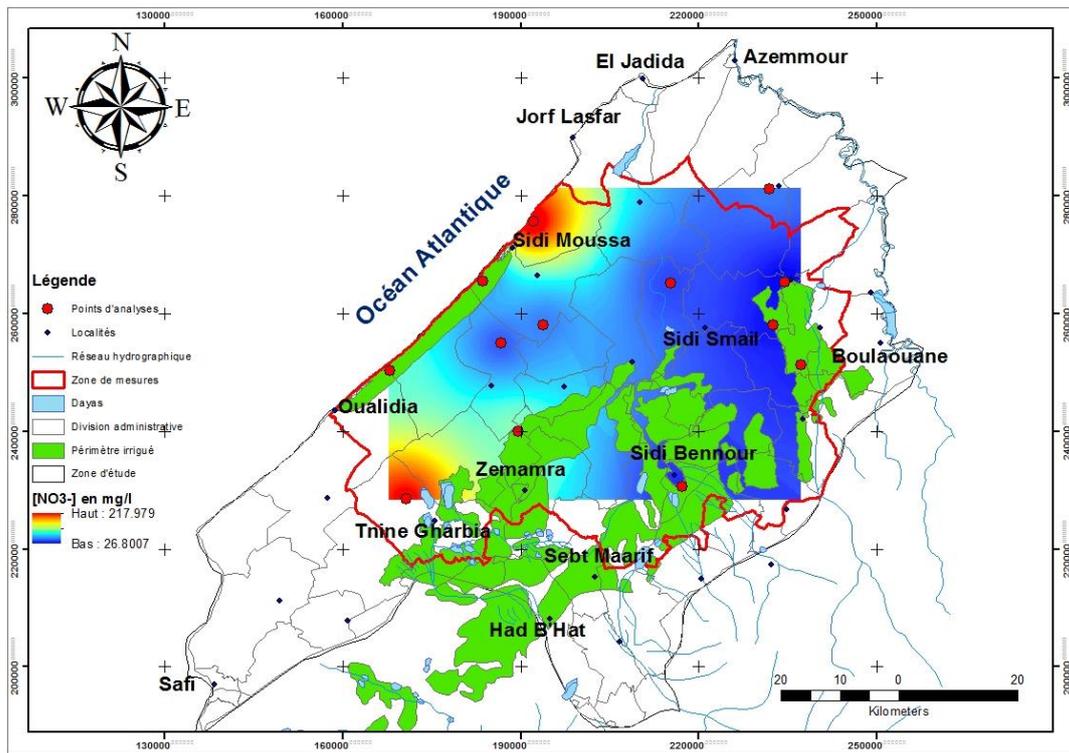


Figure 98. Cartographie représentative de la répartition spatiale des ions nitrates (2011)

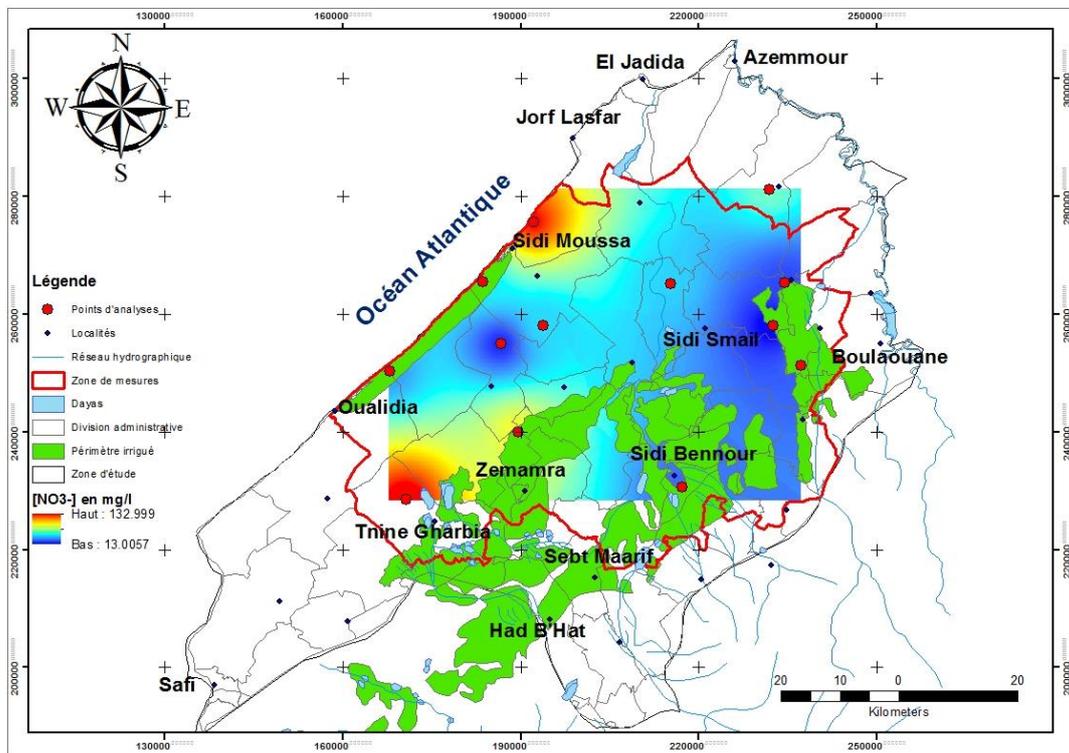


Figure 99. Cartographie représentative de la répartition spatiale des ions nitrates (2012)

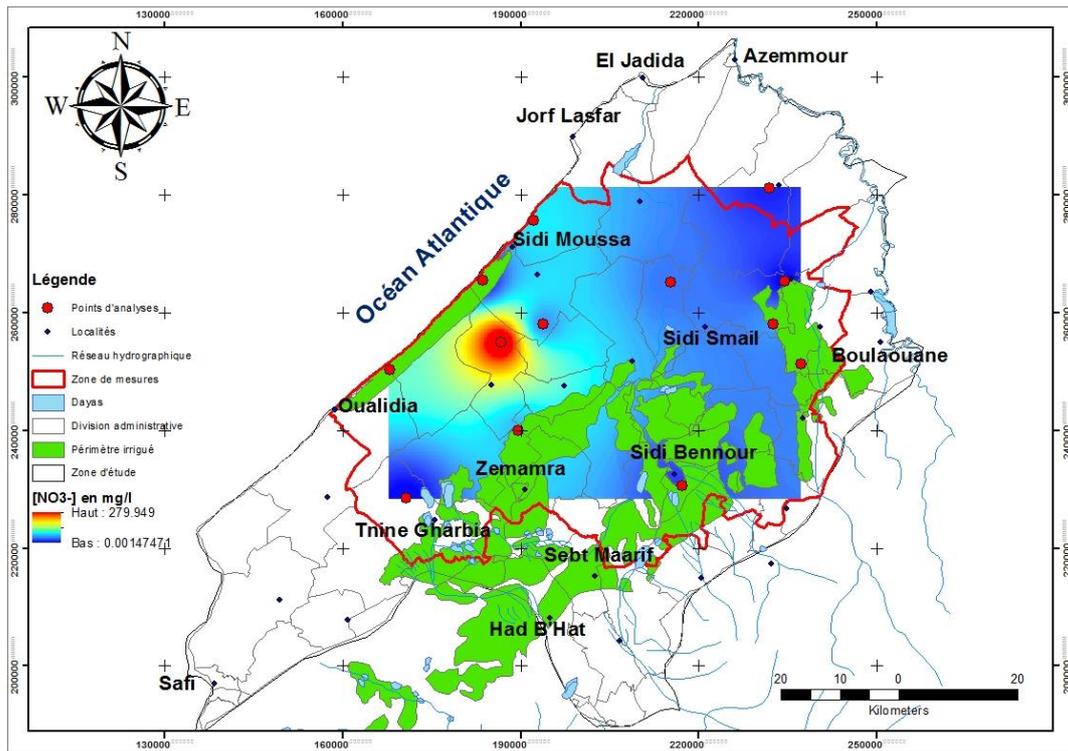


Figure 100. Cartographie représentative de la répartition spatiale des ions nitrates (2013)

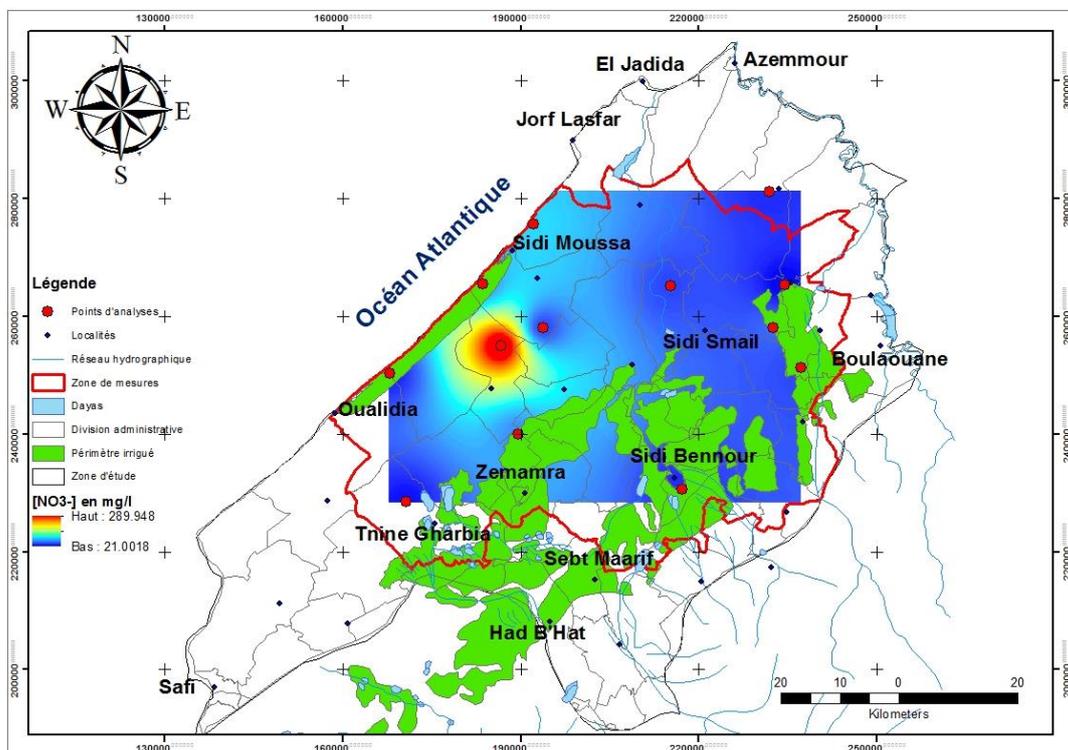


Figure 101. Cartographie représentative de la répartition spatiale des ions nitrates (Hautes eaux 2014)

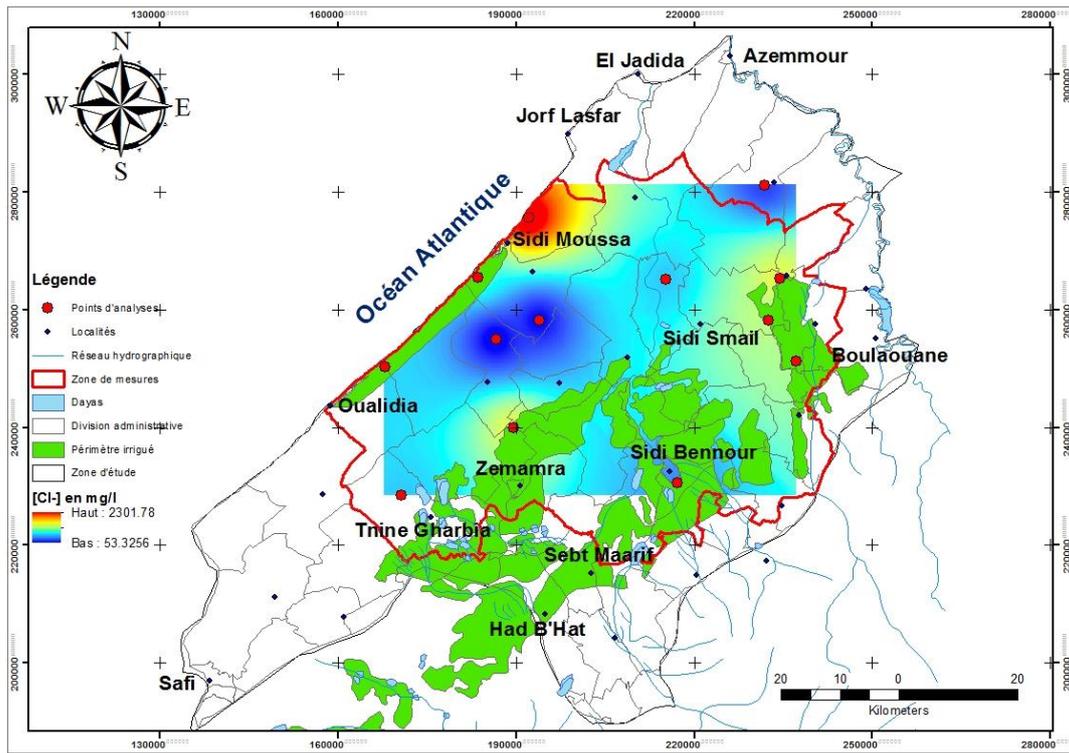


Figure 102. Cartographie représentative de la répartition spatiale des ions chlorure (2011)

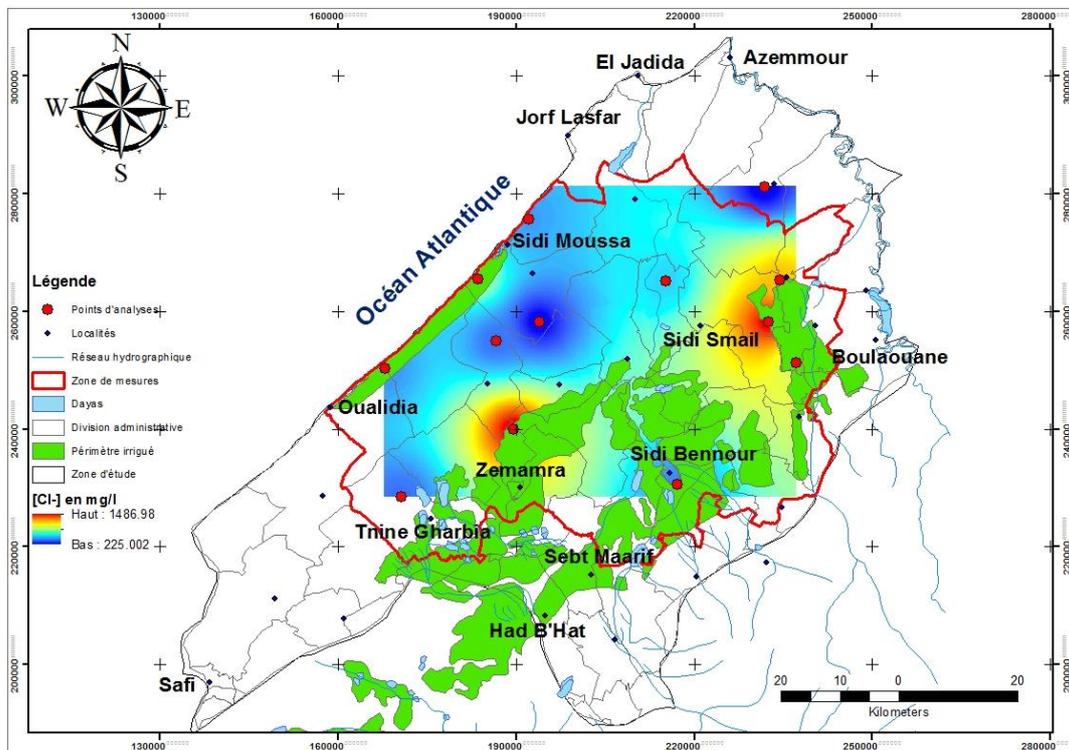


Figure 103. Cartographie représentative de la répartition spatiale des ions chlorure (2012)

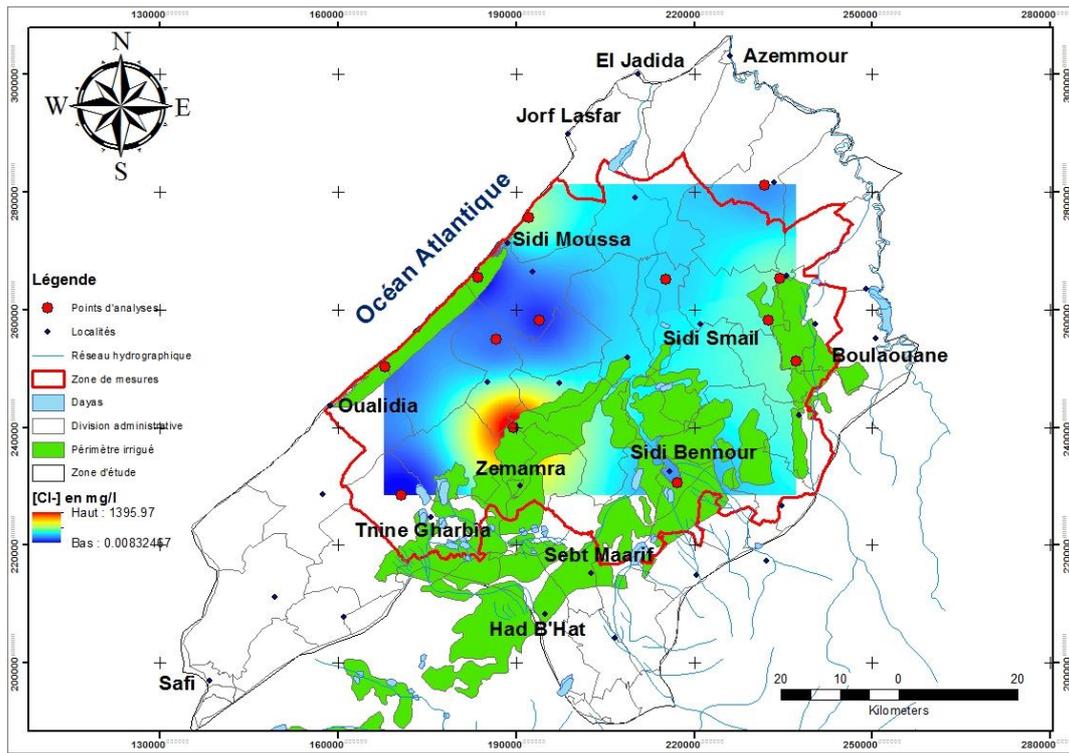


Figure 104. Cartographie représentative de la répartition spatiale des ions chlorure (2013)

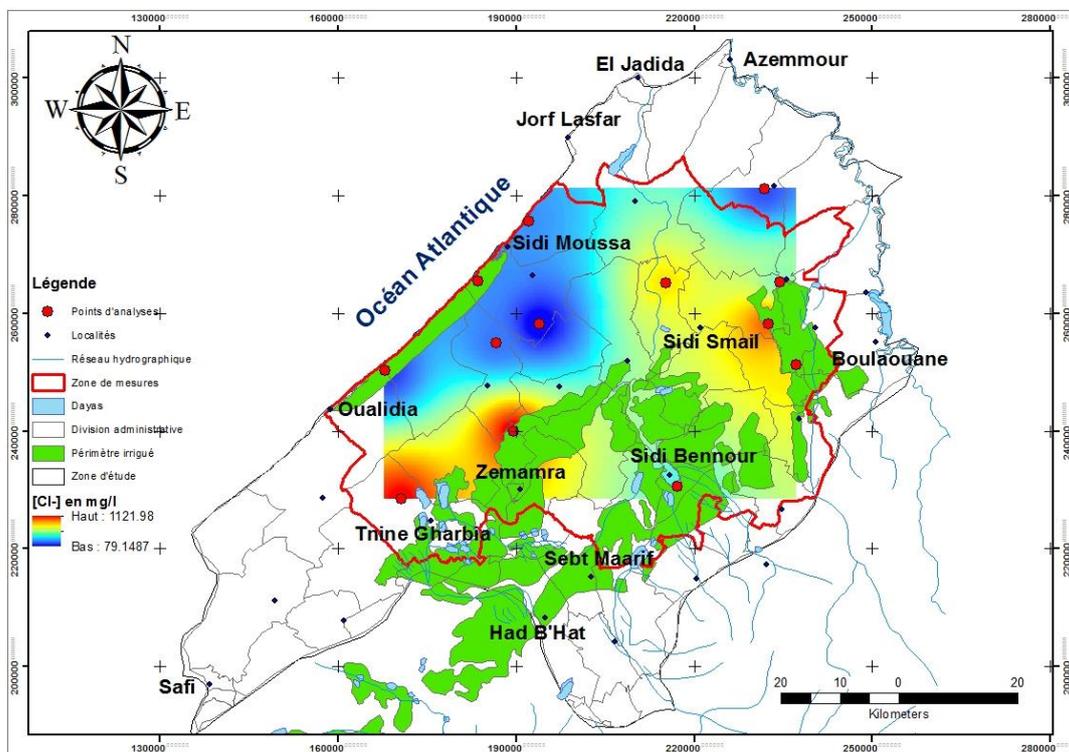


Figure 105. Cartographie représentative de la répartition spatiale des ions chlorure (Hautes eaux 2014)