



Université d'Oran 2

Faculté des Sciences de la Terre et de
l'Univers

THÈSE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences de la Terre

Option : Hydrogéologie

**APPORT DES SIG A LA REALISATION DE LA CARTE
DE VULNERABILITE A LA POLLUTION DU SYNCLINAL
D'EL BAYADH (ATLAS SAHARIEN CENTRAL, ALGERIE)**

Présenté par :

Rachid KERZABI

Soutenu le : 09/12/2023

Devant le jury composé de

M'hamed MAHBOUBI, Professeur à l'Université d'Oran, Président du jury

Naïma MEBROUK, Professeur à l'Université d'Oran, Examinatrice

Djamel BOUDJEMLINE, Docteur à l'Université USTO, Examineur

Mohammed BENYAHIA Professeur à l'Université Djilali Liabes, Sidi Bel Abbes

Hamidi MANSOUR, Professeur à l'Université d'Oran, Directeur de thèse

Madani STAMBOUL, Professeur à l'Université de Laghouat, Co-directeur de thèse

Année 2023-2024

Dédicace

À la mémoire de ma mère

À mon épouse

Et à mes fils Nibras & Rynas

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon Directeur de thèse Monsieur Hamidi MANSOUR pour sa confiance, son aide, ainsi que son expérience qu'il m'en a fait bénéficier. Merci pour sa disponibilité sans faille, son écoute et ses encouragements constants et toujours bienveillants.

Je tiens à remercier mon Co-Directeur Monsieur Madani STAMBOUL d'avoir accepté de co-diriger ma thèse et la confiance qu'il m'a accordée pour sa réalisation.

Je tiens également à remercier les membres du jury d'avoir pris le temps de juger mon travail : Monsieur M'hamed MAHBOUBI, président du jury, Madame Naïma MABROUK et Monsieur Djamel BOUDJEMLINE examinateurs ; merci pour toutes leurs remarques et conseils que j'essaierai de suivre pour finaliser ce document.

Je tiens ensuite à exprimer toute ma gratitude envers Monsieur Jacques MUDRY, pour sa gentillesse, son extrême compétence qu'il m'en a fait profiter, sa disponibilité et son accueil au laboratoire Chrono-Environnement à Besançon, et les conditions de travail privilégiées qui m'ont été offertes où j'ai dû utiliser son bureau personnelle durant plusieurs séjours scientifiques, et le libre accès à la bibliothèque numérique de l'université, et j'en suis très reconnaissant.

Je remercie aussi Monsieur Bertholomé NAVARO, directeur du centre de recherche CEHIUMA, et Madame Ana Isabel MARIN, membre de l'European Topic Centre de l'Université de Malaga, pour leurs accueils au centre durant les séjours scientifiques dont j'ai bénéficié de leur savoir et savoir-faire dans le domaine de vulnérabilité ; où j'étais même invité à maintes reprises à faire des stages sur terrain avec leurs doctorants du centre de recherche.

J'ajoute une mention spéciale à Monsieur Mohamed BENTOUMI et Abdellatif BENCHAIB pour leurs disponibilités, leurs apports en mathématique, outils informatiques et leurs précieux conseils.

Je remercie également Monsieur Mohammed BERRAHAL ingénieur à l'ANRH d'Oran, le personnel de la DHW d'El Bayadh et de l'ABH d'Oran pour m'avoir fait profiter des données.

Je remercie chaleureusement Monsieur Chikh MAAMMERI, ex-Chef de service Hydrogéologie à la DHW d'El Bayadh, actuellement enseignant à l'université de Laghouat et Monsieur Okkacha, directeur du bureau d'étude GEO-WATER (El Bayadh) pour leur soutien, leur aide et les facilités qu'il m'ont accordé pour acquérir de précieuses données.

Enfin, Je tiens à remercier très vivement ma chère épouse pour son soutien « psychologique » quotidien indéfectible, sa compréhension et sa disponibilité, sa patience, ses qualités humaines et son amour durant toutes ces années de préparation de ma thèse, ainsi que son aide et son apport scientifique, ses grandes compétences à l'utilisation de l'outil informatique, et son implication dans ce travail par ses conseils, ses expériences et les échanges scientifiques, ses relectures attentives et ses remarques pertinentes tout au long de la durée de réalisation de cette thèse.

Notre famille a grandi en même temps que mon projet scientifique, la première servant de socle solide à l'épanouissement du second.

Un grand merci pour tous ceux qui je n'ai pas cité et qui m'ont aidé de loin ou de près à réaliser ce travail.

الملخص

تم تطوير طرق مختلفة لتقييم حساسية المياه الجوفية للمصادر التلوث، يستخدم الكثير منها العوامل الرئيسية التي تتحكم في الضعف الامطار والتربة والمنطقة غير المشبعة والمنطقة المشبعة. الضعف المتأصل في المياه تأخذ المياه الجوفية إلى الملوثات في الاعتبار الخصائص الجيولوجية والهيدرولوجية للمنطقة. والهدف الرئيسي من هذا العمل هو تحديد العوامل الرئيسية التي تتطوي على حساسية المياه الجوفية للتلوث في المناطق القاحلة او شبه قاحلة بناءً على أربعة عوامل مسؤولة عن هشاشة النظم الهيدروجيولوجية في هذه المناطق: طبيعة الجيولوجية، وعمق منسوب المياه الجوفية، وظروف التسلسل، والأمطار الفعالة و وضع نموذج للتأثر بالمياه الجوفية عن طريق مضاعفة تصنيفات هذه العوامل

الأطلس الصحراوي هو الجزء الجزائري من مجموعة جبلية شاسعة تمتد على مدى 2000 كم تقريباً من منطقة أكادير (المغرب) إلى تونس. الطرف الغربي للكتلة المركزية جبل عموريشغله خزان كبير متعدد الطبقات (الحجر الرملي والحجر الجيري والطين والرمل والرواسب) ؛ توليف الدراسات الجيولوجية السابقة والدراسة المقارنة يُظهر عمودان حجريان (البيض المزامن وخريطة جيري فيل) ما يلي السلسلة التي تتجاوز 1500 متر هي سلسلة من تشكيلات الحجر الرملي مع طبقات الطين و حجر جيري جوراسي وتحت طباشيري على ارتفاع وبشكل رئيسي طباشيري وثالث طيني رملي في المنخفضات

يتلقى الأطلس الصحراوي مياه أمطار أكثر بكثير مما يتلقاه في السهول العالية وعلى الحدود الصحراوية ؛ بلغ متوسط هطول الأمطار في السنوات العشر الماضية حوالي 323.28 مم على محطة البيض (1310 م). عام 2009 هو العام وسنة 2009 هي السنة المتوسطة لممثل الأمين العام العقد الماضي مع هطول أمطار 326.89 ملم، وهو أساس تقديرنا للضعف. حاولنا تقدير هطول الأمطار السنوي الفعال بالمعادلة ميزانية عمومية كلاسيكية تثبت أنها ناقصة. معرفة الإمكانات المائية الكبيرة والخط المتزامن ؛ والسؤال المطروح: كيف تتغذى طبقة المياه الجوفية هذه ؟ ما دفعنا إلى التقدير الحسابات

(RFU): هطول الأمطار اليومي الفعال مع مراعاة طبيعة التربة

يُظهر تحديد طبقات المياه الجوفية في منطقة دراستنا شبه الاستمرارية التكوينية الهيدروجيولوجية الرأسية والجانبية لخط البيض المزامن. الحجارة الرملية القارية وتشكل المناطق البيئية والطباشيرية موردا هاما جدا للمياه الجوفية

تسلط العلاقة بين شبكة الأعطال والشبكة الهيدروغرافية الضوء على مجالات الخسارة التي تعزز التسلسل السريع والمركز لمياه الأمطار إلى التربة، بنسبة 25 في المائة من الطول التراكمي الأودية تتزامن مع أعطال في منطقة البيض تشكل مناطق فقدان ، من ناحية أخرى، بين شبكة الأعطال والتدفقات تحت الأرض يبين الدور الذي تلعبه هذه الأخيرة

ظهور العديد من المصادر وتغذية السهول العالية بسبب للأعطال المجمع لمرونة الأطلسية الشمالية تظهر التحليلات الإحصائية للبيانات الهيدروكيميائية لخط البيض أن الطابع الججري الموجود في بعض التشكيلات هو تهديد حقيقي للتلوث الطبيعي و من التلوث بالتالي تدهورا نوعيا لهذا المورد

استُغلت الأدوات الأساسية لرسم خرائط «نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد» لتحقيق ذلك الخرائط التخطيطية والتشغيلية للتأثر بتلوث المياه الجوفية البيض وواد ديفا وتبين الخريطة التخطيطية (في 1/200 000) التوزيع المكاني التالي؛ 56٪ من المنطقة تتميز بدرجة عالية من الضعف تتداخل مع غالبية المناطق التي تتعرض فيها للتآكل تضاريس الحجر الرملي على قمم الجبال حيث النفاذية المختلطة عالية، مناطق الخسارة تربة متكررة وغير متطورة وعمق منسوب المياه الضحلة على الرغم من التضاريس (منخفضة RFU) المنخفضات الرملية الطينية بقية الخريطة التي تمثل 44٪ من المساحة الإجمالية معتدلة معرضة للخطر، يتزامن بشكل أساسي مع ارتفاع منخفضات الاتحاد المالي الإقليمي حيث هطول الأمطار الفعال صغيرة وعمق منسوب المياه الجوفية كبير كلاهما:

تم تطوير الخريطة التشغيلية باستخدام نهجين مختلفين PI و GOD.

عرضت الخرائط أربع فئات من الثغرات: بين المنخفض والمتطرف في الخريطة الأولى، ومنخفضة جدًا إلى عالية في الثانية. في بعض المناطق لدينا قيم الضعف مثير للجدل، مما دفعنا إلى التحقق من صحة هذه الخرائط باستخدام مؤشر.. التلوث (نيترات). حددت أداة التحقق المطبقة أن مؤشر الاستثمار متسق مع التوزيع الملوثات المكانية الكلمات المفتاحية: جبل عمور، مزامنة البيض، هشاشة، التلوث، نظام المعلومات الجغرافية، الاستشعار عن بعد

RESUME

Diverses méthodes ont été développées pour évaluer la sensibilité des eaux souterraines à des sources de pollution, beaucoup d'entre elles utilisent les principaux facteurs contrôlant la vulnérabilité: la recharge, le sol, la zone non saturée et la zone saturée. La vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines à des contaminants prend en considération les caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques d'une zone. L'objectif principal du présent travail est de déterminer les principaux facteurs impliquant la sensibilité des eaux souterraines à la pollution dans les zones arides et semi-arides.

En se basant sur quatre facteurs responsables à la fragilité des systèmes hydrogéologiques dans ces zones: lithologie, profondeur de la nappe, conditions d'infiltration et pluie efficace, nous avons élaboré un modèle de vulnérabilité des eaux souterraines établie par multiplication des cotes de ces facteurs du synclinal d'El Bayadh (Atlas saharien central).

L'Atlas saharien est la partie algérienne d'un vaste ensemble montagneux s'allongeant sur près de 2000 Km depuis la région d'Agadir (au Maroc) jusqu'à la Tunisie. L'extrémité Ouest du massif central « Djebel Amour » est occupée par un important réservoir multicouche (grès, calcaires, argiles sableuses et alluvions) ; La synthèse des études géologiques antérieures et l'étude comparative des deux colonnes lithostratigraphiques (du synclinal d'El Bayadh et de la carte de Géryville) montre que la série dépasse les 1500 m est une succession de formations

gréseuses à intercalations argileuses et calcaires du Jurassique et Infra-Crétacé en altitude et principalement argilo-sableuses crétacé et tertiaire dans les dépressions.

L'Atlas saharien reçoit une quantité d'eau de pluie beaucoup plus importante qu'aux Hautes Plaines et à la bordure saharienne ; les précipitations moyennes des dix dernières années sont de l'ordre de 323.28 mm sur la station d'El Bayadh (1310 m). L'année 2009 est l'année moyenne représentative de la dernière décennie avec une pluviométrie de 326.89 mm, elle est la base de notre estimation de la vulnérabilité. Nous avons essayé d'estimer la pluie efficace à l'échelle annuelle par l'équation classique du bilan qui s'avère déficitaire. En connaissant l'important potentiel hydrique du synclinal ; la question se pose : comment s'alimente cet aquifère ? Ce qui nous a poussé à estimer la pluie efficace à l'échelle journalière en prenant en considération la nature du sol (RFU) : les calculs montrent qu'elle est de 131.48 mm pour la carapace calcaire (RFU= 45 mm), 175.48 mm pour les sols du Quaternaire ancien et Tertiaire (RFU=23 mm) et 181.48 mm pour les sols peu évolués des roches-mères (RFU=20 mm). Le débit d'alimentation des aquifères du synclinal d'El Bayadh est estimé, pour l'année moyenne 2009, à $107 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$.

L'identification des aquifères de notre zone d'étude montre une quasi continuité verticale et latérale des formations hydrogéologiques du synclinal d'El Bayadh. Les grès du Continental Intercalaire et de l'Infra-Crétacé constituent une ressource hydrique souterraine très importante.

La relation entre le réseau de faille et le réseau hydrographique met en évidence les zones de perte qui favorisent l'infiltration rapide et concentrée des eaux de pluies dans le sol, 25% de la longueur cumulée des oueds coïncident avec les failles dans la région d'El Bayadh constituant des zones de perte d'une part, d'autre part entre le réseau de faille et les écoulements souterrains montre le rôle que joue ce dernier à l'émergence de nombreuses sources et à l'alimentation des Hautes plaines principalement à la faveur des failles conjuguées de la flexure Nord atlasique.

Les analyses statistiques des données hydrochimiques du synclinal d'El Bayadh montrent que le caractère gypseux présent dans quelques formations est une véritable menace de pollution naturelle et de contamination donc une dégradation qualitative de cette ressource.

Des outils primordiaux à la cartographie « SIG et de la télédétection » ont été exploités pour la réalisation des cartes schématisées et opérationnelles de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du synclinal d'El Bayadh et du bassin versant d'oued Deffa :

La carte schématique (à 1/200 000) montre la répartition spatiale suivante ; 56% de l'aire de la zone d'étude est caractérisée par une forte vulnérabilité qui se calque avec la majorité des zones où affleurent les terrains gréseux des sommets des djebels où la perméabilité mixte est haute, les zones de perte fréquentes, le sol peu développé (faible RFU) et la profondeur de la nappe faible malgré les terrains argilo-sableux des dépressions. Le reste de la carte représentant 44% de la zone totale est modérément vulnérable, coïncide principalement avec les dépressions de forte RFU où les précipitations efficaces sont faibles et la profondeur de la nappe est grande.

La carte opérationnelle a été élaborée en utilisant deux approches différentes : GOD et PI. Les deux cartes ont présenté quatre classes de vulnérabilité : entre Faible et Extrême dans la première carte, et Très faible à Élevée dans la seconde. Dans certaines zones, nous avons des valeurs de vulnérabilité controversées, ce qui nous a amené à valider ces cartes en utilisant l'indicateur de pollution (NO_3^-). L'outil de validation appliqué a permis de déterminer que l'indice PI est cohérent avec la répartition spatiale du polluant.

ABSTRACT

Diverse methods were developed to estimate the sensibility of groundwater to pollution's sources, many of them use the main factors checking the vulnerability: the recharge, the soil, the vadose zone and the saturated zone. The intrinsic vulnerability of groundwater to contaminants takes account the geological, hydrological and hydrogeological zone's characteristics. The main objective of the present work is to determine the main factors implying the sensibility of groundwater to the pollution in the arid and semi-arid zones.

Based on four factors responsible of the fragility of the hydrogeological systems in these zones: lithologie, depth of the water table, conditions of infiltration and effective rain, we developed a model of vulnerability of groundwater established by multiplication of the rations of these factors of the syncline of El Bayadh (central Saharan Atlas).

Saharan Atlas is the Algerian part is a vast mountainous set lengthening on about 2000 km from Agadir (in Morocco) to Tunisia. The West extremity of the Massif Central "Djebel Amour" is occupied by an important multilayer reservoir (stones, limestones, sandy clays and alluviums); the synthesis of the previous geologic studies and the comparative study of both columns lithostratigraphiques (of the El Bayadh's syncline and the Geryville's map) shows

that the series does exceed 1500 m is a succession of sandstones formations with clayey and limestones horizons of Jurassic and Infra-cretaceous at higher elevation and mainly clay-sandy cretaceous and tertiary in the depressions.

Saharan Atlas receives a quantity of rainfall much more important than Hautes-Plaines and Saharan border; the average rainfalls of the last ten years are of the order of 323.28 mm on El Bayadh's station (on 1310 m). Year 2009 is the representative average year of the last decade with a rainfall of 323.28 mm, it is the base of our estimation of the vulnerability. We estimated the effective rainfall in the annual scale by the classic water balance equation; It represents that 1.56 % of the annual precipitation, but knowing the important hydric potential of the syncline; this question can be posed: how recharged this aquifer? A fact that pushed us to estimate the effective rainfall in the daily scale take into account the nature of the soil (AWC): the calculations show that it is 131.48 mm for the calcareous carapace (AWC = 45 mm), 175.48 mm for ancient Quaternary and Tertiary soil (AWC=23 mm) and 181.48 mm for slightly developed of source rocks (AWC=20 mm). The groundwater recharge of the El Bayadh's syncline is estimated, for average year 2009, at $107 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$.

The identification of the aquifers of study zone shows the vertical and lateral quasi-continuity of the hydrogeological formations of El Bayadh's syncline. Sandstone formations of Continental Intercalary and of the infra-Cretaceous is a very important groundwater resource.

The relation between the fault's network and the river system highlights the zones of loss which favour the fast and concentrated infiltration of rainfall in the soil, 25 % of the river's length accumulated coincides with the faults in the region of El Bayadh constituting zones of loss on one hand, and on the other between the fault's network and the groundwater flows show the role which plays the latter in emergency of many sources and the underflow of the Hautes-Plaines mainly in favour of the faults combined of the North Atlas flexure.

The statistical analyses of the hydrochemical data of the syncline of El Bayadh shows that the present gypsum character in some formations is a real threat of natural pollution and the contamination so a qualitative degradation of this resource.

Key tools for mapping "GIS and remote sensing" were used to produce maps (schematic and operational) of vulnerability of groundwater to pollution from the El Bayadh Synclinal and Deffa Wadi watershed:

Schematic map (1/200 000) shows the following spatial distribution: 56 % of the area of the study zone is characterized by a high vulnerability which superpose with the majority of the zones where sandstones formations outcrop in highest mountains where the mixed permeability is high, the zones of loss frequent, the undeveloped soil (AWC) and the shallow depth of the water table despite the clay-sandy formations in the depressions. The rest of the map representing 44 % of the total zone is moderately vulnerable, coincides mainly with the depressions of strong AWC where the effective precipitation are weak and the important depth of the water table.

The operational map was developed using two different approaches: GOD and PI. Both of maps displayed four classes of vulnerability: between Low and Extreme in the first map, and Very low to High vulnerability in the second one. In the some areas, we have controversial values of vulnerability; this leads us to validate these maps using pollution indicator (NO_3^-). The validation tools applied allowed to discriminate that the PI results are consistent with the spatial patterns of pollutants.

SOMMAIRE

Remerciements	
Résumé	
INTRODUCTION GENERALE	4
PARTIE I	6
CHAPITRE 1 : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE, CLIMATIQUE, GEOLOGIQUE ET STRUCTURAL	7
I- CONTEXTE GEOGRAPHIQUE	8
II- CONTEXTE CLIMATIQUE	10
II-1. Aspect climatologique de la région	11
II-2. Données disponibles et la représentation des paramètres climatiques	11
II-2. 1. Pluviométrie	12
a. Données annuelles	13
b. Données mensuelles	13
II-2. 2. Température	14
II-2. 3. Estimation de la pluie efficace à l'échelle annuelle	15
II-2. 3.1. Evapotranspiration potentielle et réelle	15
II-2. 3.2. Ruissellement	15
II-2. 3.3. Bilan hydrologique	16
II-2. 4. Estimation de la pluie efficace à l'échelle journalière	18
III- CONTEXTE GEOLOGIQUE	23
III-1. Historique	23
III-2. Série stratigraphique	25
III-2.1. Trias diapyr	25
III-2.2. Jurassique	26
III-2.2.1. Formation de Teniet El Klakh	26
III-2.2.2. Formation de Djara	26
III-2.2.3. Formation de Teniet Ettmar	27
III-2.2.4. Formation de Aïssa	27
III -2.3. Crétacé :	28
III -2.3.1. Formation marno-calcaire du Valanginien	28
III -2.3.2. Formation argilo-gréso-calcaire de l'Hauterivien	29
III -2.3.3. Formation de Tiout	30
III-2.3.4. Formation marno-calcaire dolomitique d'El Rhelida et d'El M'daouer	31
III -2.3.5. Formation calcaréo-dolomitique de Rhoundjaïa	32
III-2.4. Tertiaire	32
III-2.5. Quaternaire	33
III-2.5.1. Alluvions anciennes	33
III-2.5.2. Alluvions actuelles et récentes	33
IV- CONTEXTE STRUCTURAL	36
IV-1. Anticlinaux	38
IV-2. Synclinaux du Barrémo-Apto-Albien	40
IV-3. Synclinaux perchés du Cénomano-Turonien	40
CHAPITRE 2 : CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET HYDROCHIMIQUE	42
I- CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	42
I-1. Identification verticale des aquifères	42
I-2.1. Aquifères à perméabilité très faible	43
I-2.1.1. Formation de Teniet El Klakh	43

I-2.1.2. Formation de Teniet Ettmar	43
I-2.1.3. Marno-calcaires du Valanginien	43
I-2.1.4. Formation argilo-gréso-calcaire de l’Hauterivien	43
I-2.2. Aquifères à perméabilité faible :	44
I-2.2.1. Formation de Djara	44
I-2.2.2. Remplissage du Tertiaire	44
I-2.2.3. Alluvions Quaternaire	44
I-2.3. Aquifères à perméabilité moyenne	45
I-2.3.1. Formation d’Aïssa	45
I-2.3.2. Formation argilo-gréso-calcaire de l’ Hauterivien	45
I-2.3.3. Formation de Tiout	45
I-2. Identification latérale des aquifères	47
I-3. Identification hydrodynamique des aquifères	48
I-3-1. Caractéristiques hydrogéologiques des aquifères de la région d’El Bayadh	48
I-3-2. Carte hydrogéologique du synclinal d’El Bayadh	49
I-4. Relation entre le réseau de faille et le réseau hydrographique dans la région d’El Bayadh	55
I-5. Relation entre le réseau de faille et les écoulements souterrains dans le synclinal d’El Bayadh	55
II- CONTEXTE HYDROCHIMIQUE ET ORIGINE DE LA MINERALISATION	60
II-1. Analyse statistique	60
II-2. Résultats	60
PARTIE II	
	62
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE SIG, TELEDETECTION ET LA VULNERABILITE	64
I- SYSTEME D’INFORMATION GEOGRAPHIQUE	64
I-1. Définitions	64
I-2. Organisation de l’information dans le SIG	65
I-3. Apport du SIG aux études sur la ressource en eaux souterraine dans les zones arides	66
II- TELEDETECTION	66
II-1. Généralités et matériels	66
II-1-1. Définitions	66
II-1-2. Principe de la télédétection	67
II-2. Application en géosciences	68
III- VULNERABILITE DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES	69
II-1. Méthodes d’estimation de la vulnérabilité	70
II-2. Estimation de la vulnérabilité dans les zones arides	71
CHAPITRE 2 : APPORT DU SIG ET DE LA TELEDETECTION POUR LA REALISATION DES CARTES DE VULNERABILITE A LA POLLUTION	73
I- EVALUATION DES RISQUES DE POLLUTION ANTHROPIQUES DANS LA REGION D’EL BAYADH	73
II-ELABORATION DE LA CARTE SCHEMATIQUE DE VULNERABILITE DANS LES ZONES ARIDES	76
II-1. Elaboration du modèle pour déterminer l’indice de vulnérabilité	76
II-1.1. Lithologie	77
II-1.2. Conditions d’infiltration	80
II-1.3. Profondeur de la nappe	81

II-1.4. Pluie efficace	82
II-2. Outils et moyens	83
II-2.1. Géoréférencement et la digitalisation	83
II-2.2. Géotraitement et interpolation	87
II-2.3. Modélisation	89
II-3. Application au synclinal d'El Bayadh	90
II-3-1. Carte «Lithologie »	91
II-3-2. Carte « Conditions d'Infiltrations »	91
II-3-3. Carte « Profondeur de la nappe »	93
II-3-4. Carte « Pluie Efficace »	94
II-4. Carte schématique de la vulnérabilité du synclinal d'El Bayadh	95
II-5. Analyse de sensibilité	98
III-ELABORATION DE LA CARTE OPERATIONNELLE DE LA VULNERABILITE DANS LES ZONES ARIDES ET SEMI-ARIDES	101
III-1. Méthode et outils	102
III-1.1. Etude morphologique du bassin	102
III-1.2. Etapes et outils de traitements	107
III-1-2-1. Données et méthodes utilisées pour le traitement par télédétection	107
III-1-2-2. Données et méthodes utilisées pour la réalisation des cartes de vulnérabilité	110
III-1-2-3. Moyen de validation	120
III-2. Résultats et discussions	120
III-2-1. Traitement par la télédétection	120
III-2-1-1. Indice de végétation par différence normalisé (NDVI)	120
III-2-1-2. Composition coloré RVB	122
III-2-1-3. Filtres directionnels	122
III-2-1-4. Arbre de Décision	125
III-2-2. SIG et indices de vulnérabilités	127
III-2-2.1. Carte GOD	127
III-2-2.2. Carte PI	130
III-2-3. Validation des cartes de vulnérabilité	139
CONCLUSION GENERALE	141
ANNEXES	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Bibliographie	

INTRODUCTION GENERALE

Il faut aller en hauteur pour accéder à la Wilaya d'El Bayadh. Cette terre des premiers hommes culmine à 1376 mètres au-dessus du niveau de la mer. La région d'El Bayadh, comme en témoignent les traces des hommes et des animaux préhistoriques, a été peuplée depuis le temps où cette porte du grand Sahara était une forêt dense et luxuriante, bercée par des fleuves qui laissent intactes les traces de leur passage à travers des canyons et des vallées, et dont la beauté demeure éternelle.

El Bayadh (de *abiadh* qui veut dire blanc en arabe) tireraient son nom d'une matière blanche, extraite d'un lit d'oued, avec laquelle les autochtones lavaient surtout leurs burnous mais également la laine des moutons.

El Bayadh renverrait, également, à la couleur de la neige, dont les fortes précipitations caractérisaient la région jadis.

En 1852, El Bayadh a été baptisée *Geryville*, du nom du général français qui gouverna la région à partir de 1845.

Le nom de *Gerryville*, ainsi que l'histoire de l'occupation, ne fut qu'une très longue chronologie, plus que millénaire, d'El Bayadh.

Nous nous intéresserons dans le présent travail à l'extrémité Ouest du massif de Djebel Amour ; le synclinal d'El Bayadh, qui occupe la partie nord-ouest de la carte géologique de Géryville et la partie sud de celle de Chott Echergui (Cornet 1950).

Il s'agit d'une zone qui a connu ces dernières années un développement considérable qui a eu un impact négatif sur la qualité de la ressource en eau souterraine.

L'objectif principal de notre travail est d'estimer la vulnérabilité des ressources en eau souterraines du synclinal d'El Bayadh à la pollution en utilisant le Système d'Information Géographique et de la télédétection ; deux étapes vont être abordées :

- la description climatique et géologique, identification hydrogéologique et la caractérisation qualitative régionale de la ressource hydrique souterraine d'El Bayadh ;

- l'étude des paramètres qui influents sur la vulnérabilité des eaux souterraines dans les zones semi-arides et arides à petite et grande échelle.

Pour bien répondre à cette problématique, notre thèse sera subdivisée en deux parties :

La première partie consiste à identifier le contexte hydroclimatique, représenter le contexte régional géologique et structural en premier chapitre et, hydrogéologique et hydrochimique dans le second.

La deuxième partie est consacrée à la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines du synclinal d'El Bayadh à la pollution. Son premier chapitre est une représentation des généralités sur les notions du SIG, de la télédétection et de la vulnérabilité. Dans le second nous avons mis en place une méthode pour estimer la vulnérabilité à petite échelle « carte schématique » du synclinal d'El Bayadh, et à grande échelle « carte opérationnelle » du bassin versant d'oued Deffa. Cette partie nous a apporté des connaissances sur les approches utilisées pour l'estimation de la vulnérabilité, spécialement dans les zones semi-arides et arides.

PARTIE I

CHAPITRE 1 : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE, CLIMATIQUE, GEOLOGIQUE ET STRUCTURAL

I- CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

II- CONTEXTE CLIMATIQUE

II-1. Aspect climatologique de la région

II-2. Données disponibles et la représentation des paramètres climatiques

III- CONTEXTE GEOLOGIQUE

III-1. Historique

III-2. Série stratigraphique

IV- CONTEXTE STRUCTURAL

IV-1. Anticlinaux

IV-2. Synclinaux du Barrémo-Apto-Albien

IV-3. Synclinaux perchés du Cénomano-Turonien

CHAPITRE 2 : CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET HYDROCHIMIQUE

I- CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

I-1. Identification verticale des aquifères

I-2. Identification latérale des aquifères

I-3. Identification hydrodynamique des aquifères

I-4. Relation entre le réseau de faille et le réseau hydrographique dans la région d'El Bayadh

I-5. Relation entre le réseau de faille et les écoulements souterrains dans le synclinal d'El Bayadh

II- CONTEXTE HYDROCHIMIQUE ET ORIGINE DE LA MINERALISATION

II-1. Analyse statistique

II-2. Résultats

CHAPITRE 1 : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE, CLIMATIQUE, GEOLOGIQUE ET STRUCTURAL

L'Atlas saharien est la partie algérienne d'un vaste ensemble montagneux s'allongeant sur près de 2000 Km depuis la région d'Agadir (au Maroc) jusqu'à la Tunisie. Cet Atlas est composé de chaînons allongés orientés généralement Sud-Ouest–Nord-Est ou Ouest-Sud-Ouest – Est-Nord-Est se succédant en relais sur une largeur de l'ordre de 100 à 200 Km. C'est un domaine bien individualisé qui se distingue tant par son relief et sa structure que par le climat qu'il supporte et par une lithologie marquée par la prédominance de formation marno-gréseuse.

Au Nord, l'Atlas saharien se rattache au domaine des hauts plateaux et des hautes plaines dont il n'est séparé que par la ligne de fractures qui correspond à l'accident nord atlasique.

Au Sud, la flexure qui le sépare de la plate-forme saharienne apparaît comme une entité structurale majeure où se relaient divers types d'accidents.

D'Ouest en Est, l'Atlas saharien peut être subdivisé en trois régions; Monts des Ksour (Atlas Saharien Occidentale), massif du Djebel Amour (Atlas Saharien Centrale), Monts des Ouled Naïls (Atlas Saharien Orientale), plus à l'Ouest, il se poursuit par le Haut Atlas marocain tandis qu'à l'Est on peut reconnaître les formations de l'Atlas tunisien (fig. 1).

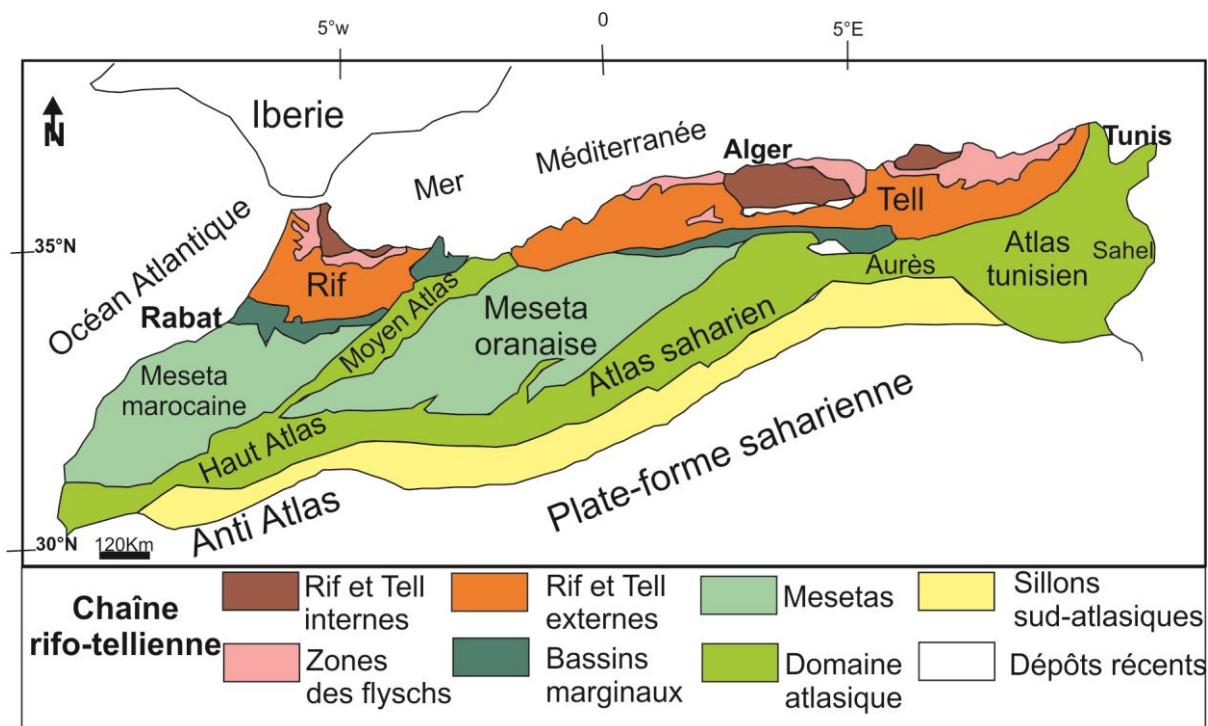


Figure 1 : Schéma géologique du Maghreb (Elmi 1978)

I-CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

El Bayadh est une commune de la wilaya d'El Bayadh, dont elle est le chef-lieu, située à 370 km au Sud-Est d'Oran, à 520 km au Sud-Ouest d'Alger et à 500 km au Nord-Est de Béchar (fig. 2).



Figure 2 : Situation géographique du secteur d'étude

Relief

Le synclinal d'El Bayadh est limité au Nord par les djebels Mekter (1428 m) et Zouireg (1509 m), au Nord-Est par le Djebel Ksel (2008 m), à l'Est par les djebels El Oustani (1921 m), Boudega (1872 m), au Sud-Est par le Djebel El Orif (1587m), au Sud-Ouest par le Djebel Golita (1429m) et à l'Ouest par le Djebel El Biod (1453 m) (fig. 3).

Végétation

La végétation sur le territoire d'El Bayadh se marque par des grandes occupations de sol suivantes (tableau 1) ;

- **Les espaces forestiers et de reboisement s'étalant sur les Djebels** : Pin d'Alep, Genévrier, Romarin.
- **Les espaces steppiques** :

Alfa (*Stipa Tenacissima*) et l'Armoise (*Echih*) sont remplacés progressivement vers le Sud par le Remt (holoxylen) et le Drin dominant surtout les glacis et les piémonts.

Les végétations halophiles colonisant les sols à proximité des Chotts.

Les végétations psamophyle : poussant sur les cordons dunaires (*Sparte, armoise champêtre*).

L'Armoise occupant généralement les dépressions et les dayates et les oueds (*remplacées généralement par des cultures*) ;

- Les cultures extensives céréalières du Nord ;
- Les cultures intensives des jardins des Ksours ;
- Les cultures itinérantes sur épandages de crue et fonds de dayates.

Tableau 1 : Répartition générale des terres dans la région d'El Bayadh

	Surface en Ha
Terres agricoles utiles	72 299
Pacages et parcours	5 694 048
Zones alfatières	240 251
Foret et reboisement	122 111
Autres	1 403 920

Réseau hydrographique

Les oueds qui drainent ces plaines (les larges dépressions allongées qui séparent les chaînons correspondant en général au synclinaux à fond plat) sont toujours peu important ; ils bifurquent vers le Nord ou vers le Sud à chaque ensellement des plis qu'ils franchissent en cluse, et vont se perdre, soit dans le bassin fermé du Chott, soit dans le Sahara (Cornet 1952).

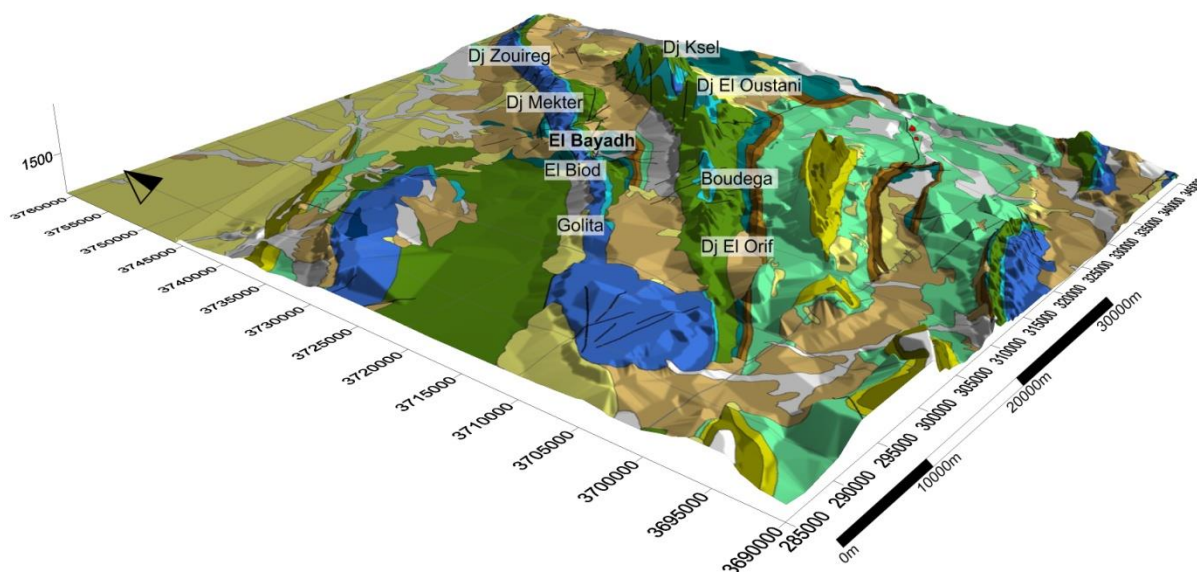


Figure 3 : Présentation en 3D du synclinal d'El Bayadh

La zone d'étude d'une superficie de 620 Km² comprend un bassin versant d'une surface de 552 Km² comprenant trois sous bassins ;

- Le sous bassin de l'oued El Hadjel avec un écoulement vers le Nord-Est se relie à l'oued Khochkhana dont l'écoulement est vers le Nord.
- Le sous bassin de l'oued Deffa avec un écoulement principal vers le Sud-Ouest passant par la ville d'El Bayadh se relie à l'oued El Beiod dont l'écoulement est vers le Nord.
- Un troisième sous bassin avec un écoulement vers le Sud-Sud-Ouest.

II- CONTEXTE CLIMATIQUE

L'Atlas saharien a un climat qui va du semi-aride à aride, les plus hautes températures sont enregistrées sur le versant sud, dans la zone saharienne, les plus basses dans les massifs montagneux du Djebel amour (Djebel Ksel 2008 m).

L'Atlas saharien reçoit une quantité d'eau de pluie beaucoup plus importante qu'aux hautes plaines et à la bordure saharienne ; les précipitations moyennes des dix dernières années sont de l'ordre de 328.77 mm sur la station d'El Bayadh (1310 m). D'une manière générale malgré les faibles précipitations que reçoit l'Atlas, tous les écoulements liés au ruissellement participent à l'alimentation des Dayas et des nappes localisées sur la bordure saharienne. On notera que l'altitude a un rôle prépondérant (Stamboul 2005).

II-1. Aspect climatologique de la région

Des études climatiques ont été élaborées ; à l'échelle régionale sur la base d'une vingtaine de stations pluviométriques du Djebel Amour (Stamboul 2005), et à l'échelle du bassin versant de l'Oued Deffa sur une base de donnée de deux stations (Stitten et El Bayadh) de la période de 1972 à 2002 pour la première et 1972 à 2018 pour la seconde (HYBACO 2013).

La zone d'étude qui est occupée dans sa partie nord par le bassin versant de l'oued Deffa, est soumise à un climat semi-aride à aride avec des influences sahariennes et montagnardes : l'altitude y entraîne un abaissement de température et une augmentation de la pluviosité. Toutes les méthodes de calcul du déficit d'écoulement et de l'évapotranspiration réelle annuelles (Coutagne, Wundt, Turc, Thornthwaite et Verdeil) montrent que la capacité évaporatoire de l'atmosphère est très importante dans la station d'El Bayadh (entre 96% à 100% des précipitations annuelles (Stamboul 2005).

II-2. Données disponibles et la représentation des paramètres climatiques

Quatre stations pluviométriques sont disponibles dans la région d'étude, le tableau 2, représente les coordonnées UTM et les périodes de données.

Tableau 2 : Stations météorologiques de la région d'El Bayadh avec coordonnées et les périodes de données

Station	X (UTM)	Y (UTM)	Z (m)	Période de mesure
El Bayadh	316843,91	3728482,66	1310	1972-2018
Stitten	336475,93	3736824,91	1410	1972-2002
Ghassoul	332197,53	3694591,99	1165	1982-2002
Sidi Ahmed Bel Abbes	360660,9	3707448,79	1200	1982-2002

II-2. 1. Pluviométrie

Les pluviométries moyennes mensuelles des stations d'El Bayadh et Stitten sont représentées dans la figure 4. Elles montrent qu'il y a deux périodes pluvieuses, l'une durant les mois de mars, avril et mai, l'autre durant les mois de septembre, octobre et novembre, séparé par les deux mois les plus secs de l'année : juin et juillet. En revanche les stations de Ghassoul et Sidi Ahmed Bel Abbas ne représentent qu'une seule période pluvieuse, du mois de septembre au mois de novembre (fig. 5). Ce qui peut être expliqué par la diminution de l'altitude de la région montagneuse à la plate-forme saharienne (Stamboul 2005).

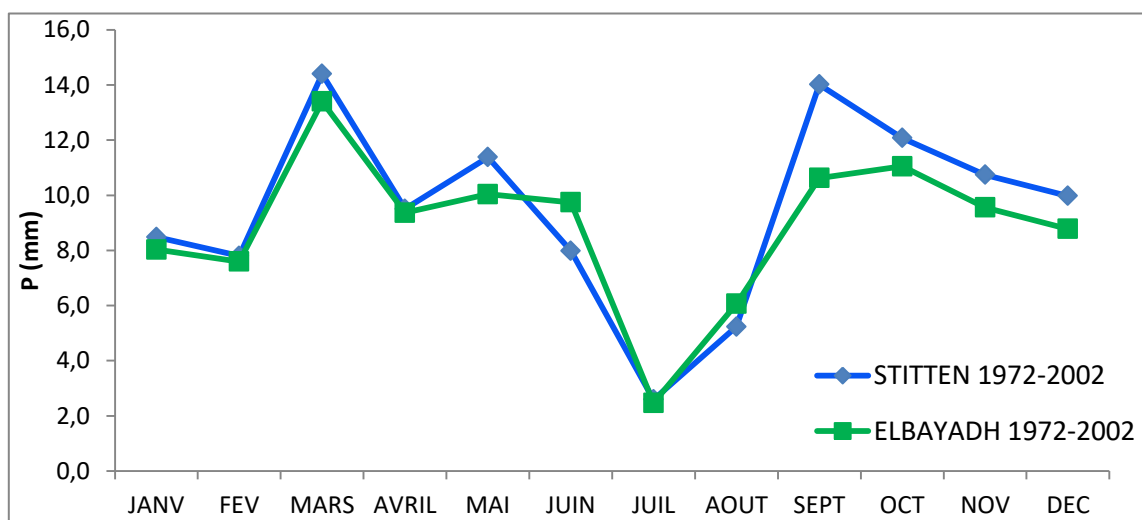
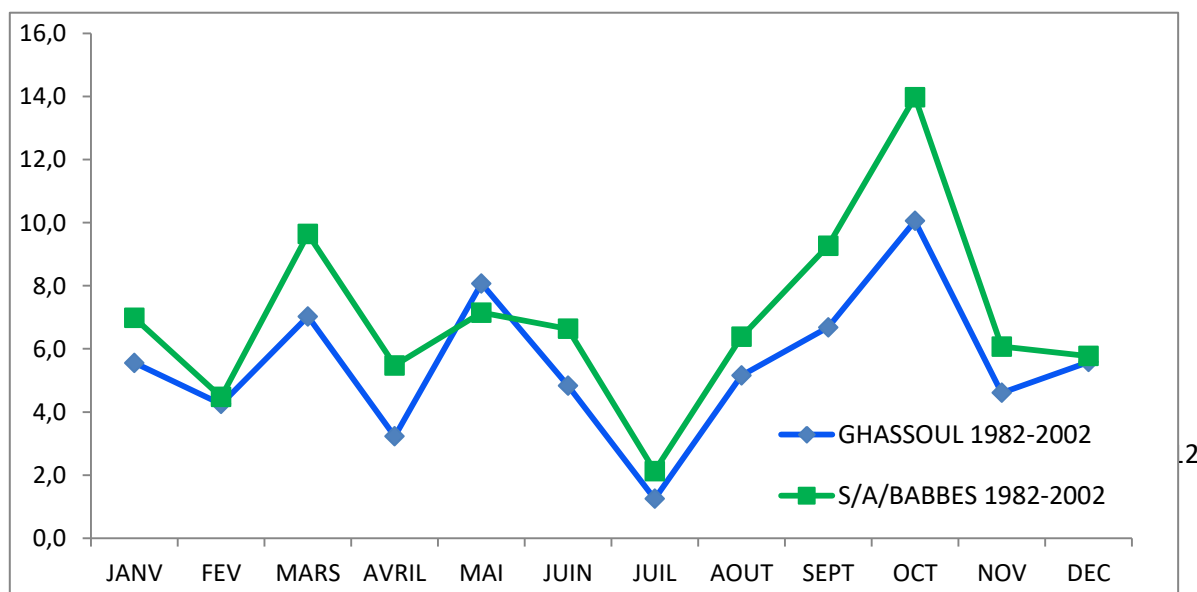


Figure 4 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles (mm) des stations de Stitten et d'El Bayadh

Figure 5 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles (mm) des stations de Ghassoul et de Sidi Ahmed Bel Abbas

a. Données annuelles dans la station d'El Bayadh : Les précipitations moyennes annuelles enregistrées à la station d'El Bayadh pour la période 1972-2018 ont été calculées à



partir des données de l'ANRH et le site tutiempo.net. La variation annuelle des précipitations (fig. 6), montre que la dernière décennie est représentée par une augmentation remarquable de la pluviométrie d'une moyenne de 328.77 mm, presque le double de la moyenne mesurée durant toute la période (165.2 mm). Le minimum est enregistré durant l'année 2004 (137 mm), le maximum est enregistré durant l'année 2011 (546 mm). L'année 2009 est l'année moyenne représentative de cette décennie avec une pluviométrie de 326.89 mm, elle sera la base de notre estimation de la vulnérabilité.

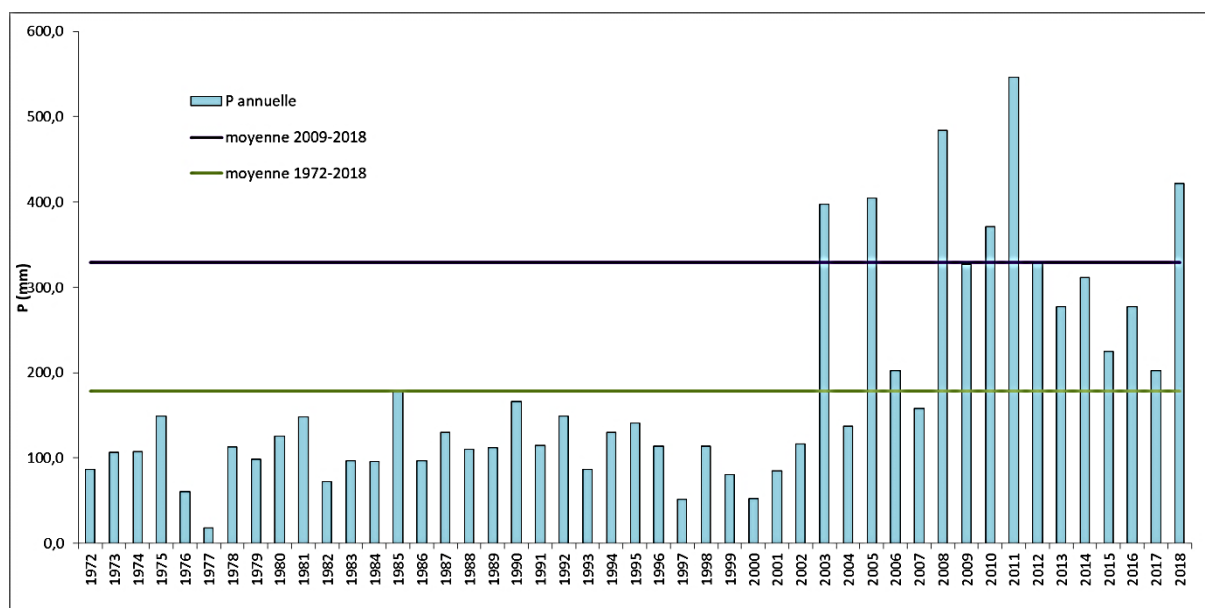


Figure 6: Précipitations annuelles (mm) à la station d'El Bayadh 1972-2018

b. Données mensuelles : L'histogramme des précipitations moyennes mensuelles de la station d'El Bayadh de la période 2009-2018 montre une irrégularité durant l'année, avec deux périodes pluvieuses : les mois de septembre, octobre et novembre d'une part, et les mois de mars, avril et mai d'autre part. Les précipitations semblent être importantes mais en réalité elles représentent un caractère torrentiel pernicieux à l'origine des crues de la région (HYBACO 2013) (fig. 7).

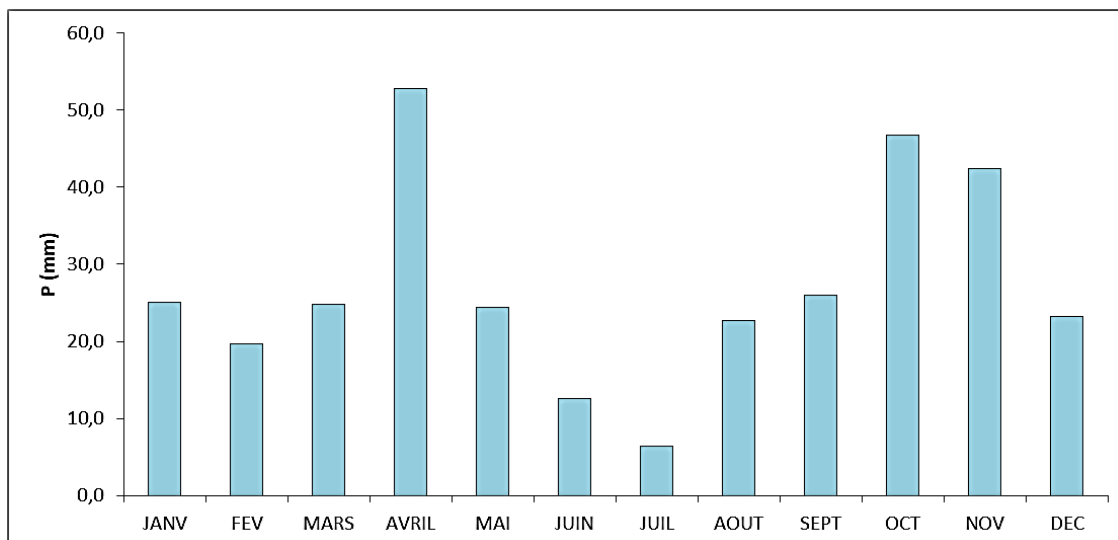


Figure 7 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles à la station d'El Bayadh de la période 2009-2018

D'après la présentation des précipitations annuelles de la période 1972-2018, et vu que la moyenne pluviométrique des dix dernières années, représente presque le double de la moyenne de toute la période (1972-2018), ce qui nous a ramené à étudier seulement la distribution des températures moyennes mensuelles de la période 2009-2018 pour l'estimation du bilan et de la pluie efficace dans la zone d'étude.

II-2. 2. Température

La figure 8 représente la distribution des températures moyennes mensuelles de la période 2009-2018 de la station d'El Bayadh. Elle montre une importante différence de 23.7°C , entre le mois le plus froid (mois de janvier 5.07°C) et le mois le plus chaud (juillet 28.54°C), en comparant avec la moyenne annuelle qui est de 15.

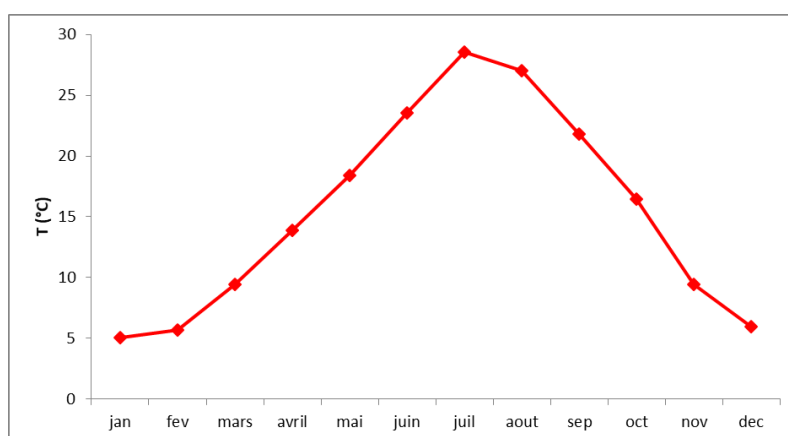


Figure 8 : Températures moyennes mensuelles de la station d'El Bayadh (2009-2018)

II-2. 3. Estimation de la pluie efficace à l'échelle annuelle

II-2. 3.1. Evapotranspiration potentielle et réelle

Thornthwaite établit une corrélation entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration mensuelle. Cet auteur, définit d'abord un indice thermique mensuel i .

L'évapotranspiration potentielle (ETP) mensuelle est donnée par :

$$ETP = 16 (10T/I)^a f(\lambda)$$

Avec :

T : est la température moyenne mensuelle du mois considéré en °C,

i : indice thermique mensuel $i = (T/5)^{1.514}$,

I : indice thermique annuel $I = \sum i$

ETP en millimètres.

a : coefficient en fonction de I , $a = 6.75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1.79 \cdot 10^{-2} I + 0.49239$.

$f(\lambda)$: Coefficient de correction, fonction de la latitude et du mois.

Les résultats sont mentionnés dans le tableau 3.

Tableau 3 : ETP moyenne mensuelle de l'année 2009 de la station d'El Bayadh

	janv.	fév.	mar s	avri l	mai	juin	juil	aout	Sept.	oct.	nov.	déc.	ETP annuelle
ETP (mm)	6.1	10.2	29.8	29.4	93.5	141.3	184.4	157.7	79.1	60.3	29.8	20.6	842.10

II-2. 3.2. Ruissellement

L'estimation des apports moyens annuels a été réalisée sur le bassin versant de l'oued Deffa, le principal cours d'eau de la zone d'étude. Ne disposant pas de station hydrométrique au niveau de l'oued Deffa, le calcul du ruissellement annuel a été calculé selon l'équation de Tixeront-Berkaloff (1951) :

$$R = P^3 / 3 ETP^2$$

$$R = 16.41 \text{ mm}$$

Avec :

R : ruissellement en mm

P : précipitation moyenne annuelle en mm

ETP : évapotranspiration potentielle moyenne annuelle calculée par la méthode de Thornthwaite en mm

II-2. 3.3. Bilan hydrologique :

Le bilan hydrique vise à déterminer la répartition des précipitations reçues par un bassin versant entre les termes suivants :

E : l'évapotranspiration (potentielle ou réelle)

R : le ruissellement

PE : la lame d'eau infiltrée

ΔRU : la variation de la réserve

$$P = E + R + PE + \Delta RU$$

Nous avons utilisé la méthode de Thornthwaite (Thornthwaite 1955 *in* Mounier 1965) pour calculer le bilan hydrique de l'année 2009 (année représentative de la dernière décennie). Cette méthode calcule l'ETR à l'échelle mensuelle en prenant en considération la réserve utile en eau du sol *RU*, et la variation de cette réserve ΔRU ; l'auteur admettait que pendant la période de déficit pluviométrique marquée par des $P < ETP$, une partie du stock (*RU*) était utilisée chaque mois pour combler entièrement la différence entre les *P* et *ETP*. Pendant les mois pluvieux, les excédents de précipitations alimentent les réserves en eau du sol et/ou le ruissellement lorsque la capacité de stockage est atteinte. Thornthwaite admet que le stock peut varier suivant les conditions de sol, et l'importance du système racinaire du végétal. Dès lors, en retenant plusieurs combinaisons de ces données, il est proposé, plusieurs valeurs (75 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm...) pour fixer *a priori* les réserves maximales susceptibles d'être emmagasinées (Mounier 1965).

Dans notre cas d'étude nous avons utilisé une réserve maximale $RU=100$ mm, largement choisi pour les études régionales et locales où il est difficile de la mesurer (Regagba 2012, Maddi *et al* 2018). Durant les mois déficitaires ($P < ETP$), nous avons lu les valeurs de la *RU* à partir des tables élaborées par Thornthwaite et Mather (1957) qui permettent de déterminer les valeurs de *RU* en fonction de $\Sigma P - ETP$ lorsque $P < ETP$ (annexe n°1).

Le tableau 4 porte le bilan hydrique de la station d'El Bayadh pour les précipitations de l'année 2009 ; la figure 9 illustre son résultat. Elle nous permet de faire les observations suivantes :

- L'évapotranspiration potentielle est beaucoup plus importante que la précipitation, et cela se prolonge durant huit mois de l'année qui représentent une longue période sèche;
- Malgré la variabilité des précipitations mensuelles, la réserve utile est épuisée qu'au mois d'aout ;
- Le bilan est déficitaire vu que l'évapotranspiration réelle annuelle est supérieure à la précipitation annuelle ;
- Le pas mensuel pour le calcul du bilan afin d'estimer la lame d'eau infiltrée durant l'année 2009 ne donne aucun résultat satisfaisant, ce que nous mène à l'estimer à une échelle journalière.

Tableau 4 : Bilan de l'eau à El Bayadh (2009) d'après Thornthwaite : *RU réserves d'eau utilisables du sol, ΔRU réserves d'eau utilisées pendant le mois. ETR= ETP, lorsque P>ETP et à P + ΔRU dans le cas contraire. ETP-ETR donne la déficience de l'évaporation.*

	jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	juill.	aout	sep.	oct.	nov.	déc.
P	43,69	24,14	75,18	29,46	8,38	7,11	6,35	15,23	81,79	2,03	16,25	17,28
ETP	6,09	10,15	29,80	29,40	93,47	141,35	184,35	157,72	79,12	60,28	29,80	20,57
P-ETP	37,60	13,99	45,38	0,06	85,09	134,24	178,00	142,49	2,67	58,25	13,55	3,29
Σ P-ETP lorsque P<ETP					85,09	219,33	397,34	539,82		58,25	71,79	75,08
RU	100	100	100	100	42	10	2	0	100	55	48	46
Δ RU					58	32	8	2		45	7	2
ETR=P+ΔRU					66,38	39,11	14,35	17,23		47,03	23,25	19,28
ETP-ETR					27,09	102,24	170,00	140,49		13,25	6,55	1,29

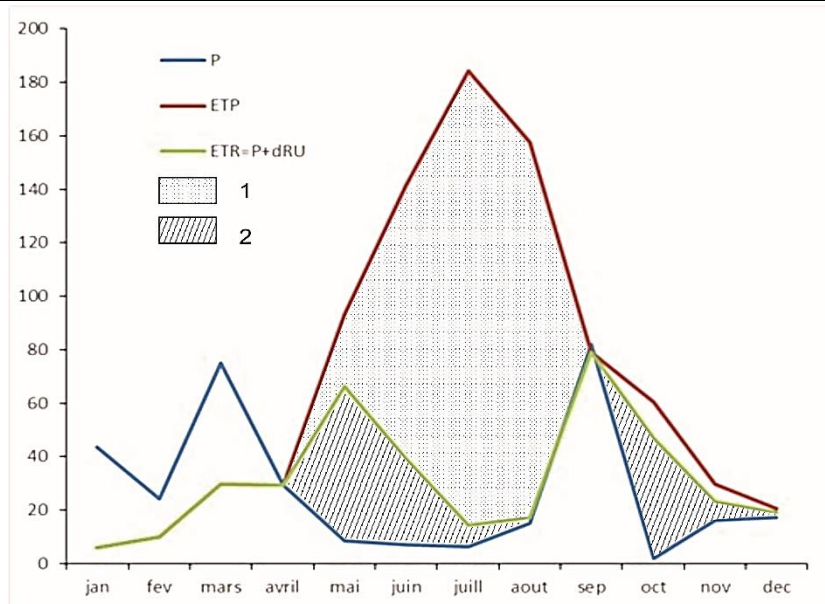


Figure 9 : Graphique de bilan de l'eau à El Bayadh (2009)

P = précipitations, ETP = évapo- transpiration potentielle, ETR = évapotranspiration réelle, 1 = déficience de précipitation, 2 = réserves d'eau puisées dans le sol.

II-2. 4. Estimation de la pluie efficace à l'échelle journalière

La fréquence et la durée des mesures sont des points très importants. Du fait des variations climatiques, une réflexion sur une durée de dix ans est indispensable pour travailler sur une année hydrologique représentative. Plus la fréquence des mesures est élevée, plus la précision sera importante (Gilli *et al* 2004).

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est calculée par l'expression de Turc (Gilli *et al* 2004) :

$$ETP = 0.013 n (t/(t+15)) (Rg+50) [1+(50-hr)/70]$$

ETP (mm)

n: durée en jours de la période de calcul (1 jour, 10, 30...)

t : température moyenne de la période (°C)

hr : humidité de l'air

Rg : rayonnement solaire globale (cal.cm⁻².j⁻¹), mesuré au pyranomètre. Si l'on ne dispose que d'un héliographe, on peut l'estimer avec Rga : rayonnement extraterrestre (cal.cm⁻².j⁻¹) donné par les tables d'Angot (annexe n°2).

L'évapotranspiration potentielle calculée à l'échelle journalière, par l'équation de Turc en utilisant les données météorologiques (température moyenne et humidité de l'air) de l'année 2009, mesurées à la station d'El Bayadh est de 165.26 mm par an (annexe n°3).

Afin d'estimer l'évapotranspiration réelle et la pluie efficace à l'échelle journalière de l'année 2009, une série de calculs a été effectuée par l'intermédiaire de feuilles de calculs qui tiennent compte de la balance entre les apports des précipitations (P), la réserve en eau utile (RFU) et les pertes dues à l'évapotranspiration potentielle (ETP) ; durant la période humide, les sols sont progressivement humidifiés, une partie de cette eau est retenu par les forces de capillarité

(R). Quand le sol est saturé ($R=RFU$) l'eau s'infiltrer vers la nappe, mais l'évapotranspiration s'oppose à ce processus et restitue une partie de cette eau vers l'atmosphère (ETP) ; lorsque les précipitations P et la RFU sont supérieur à ETP, $ETP= ETR$ et le surplus de la RFU alimente la nappe (Kili *et al* 2008) (voir annexe n°4).

L'organigramme de la figure 10 est utilisé pour déterminer l'évapotranspiration journalière réelle (ETR) et les précipitations efficaces (PE).

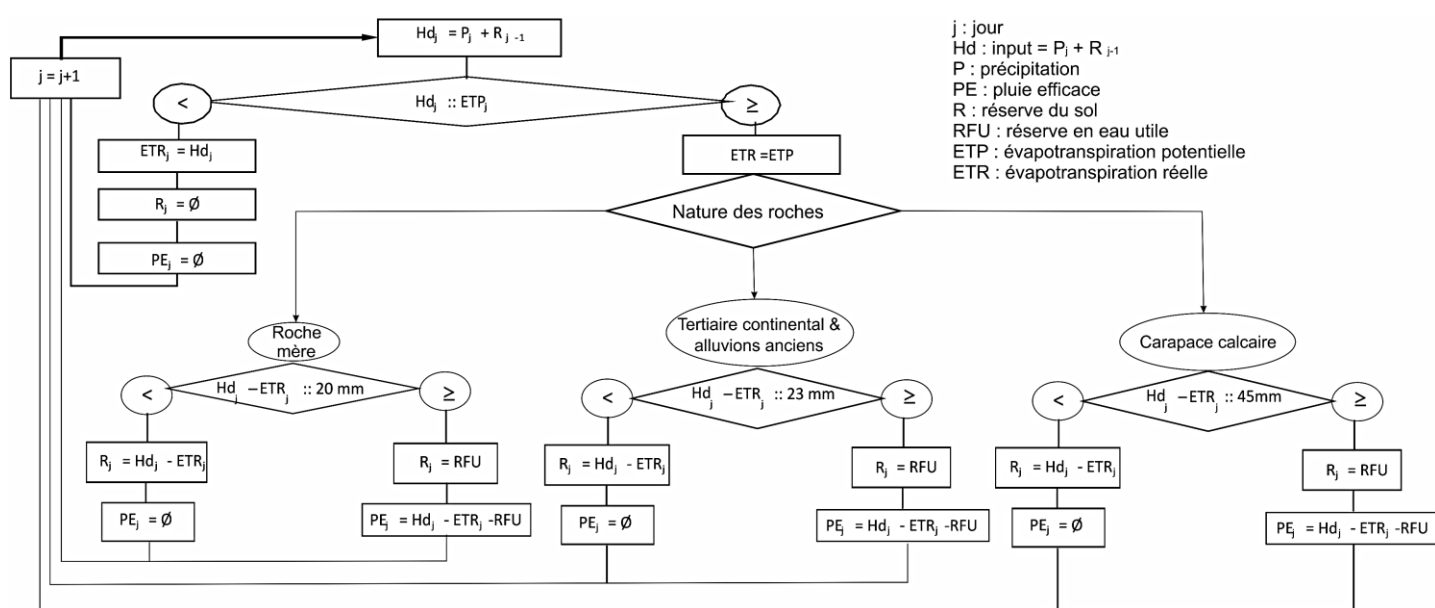


Figure 10 : Organigramme de calcul de l'ETR et PE (Yousfi *et al* 2013) adapté à la zone d'étude

Plusieurs méthodes sont utilisées pour calculer ou estimer la réserve en eau facilement utilisable (équations de Saxton *in* Rawls, *et al* 1982, Vilain 1989, José Miguel Reichert 2009...), mais elles nécessitent des analyses du sol (proportion de chaque éléments : argile, sable, matière organique...).

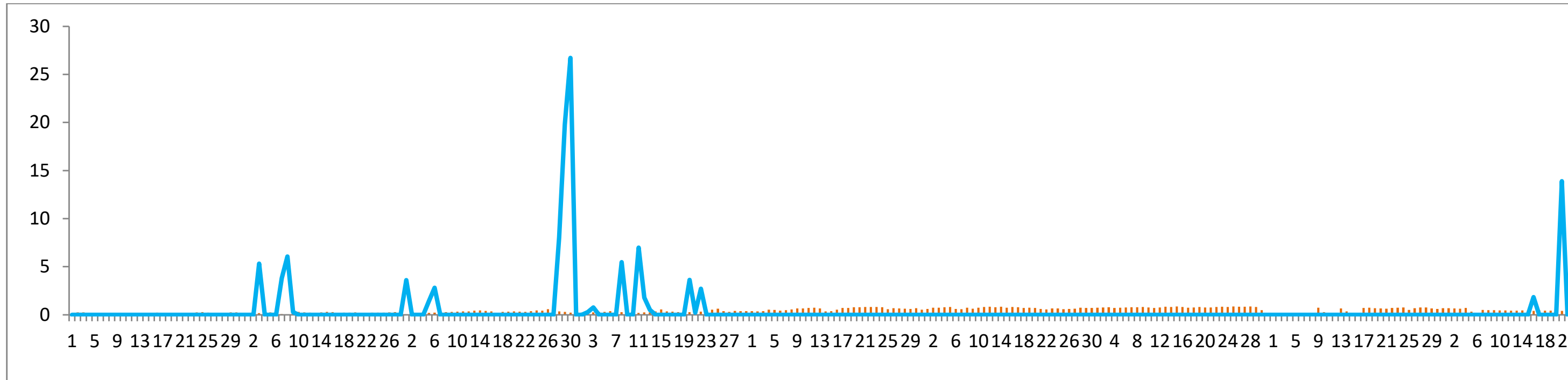
Pour notre zone d'étude, nous avons utilisé l'estimation de Rieul Ruelle (2003) (tableau 5).

Les conditions pédologiques (nature, texture et épaisseur du sol) du synclinal d'El Bayadh sont en étroite relation avec les unités géomorphologiques ; l'étude détaillée du sol dans la wilaya d'El Bayadh réalisée par Regagba (2012) et la caractérisation des aspects morphologiques des steppes algériennes réalisée par Poujet (1980), nous ont permis d'identifier les conditions pédologiques les de notre zone d'étude (tableau 5).

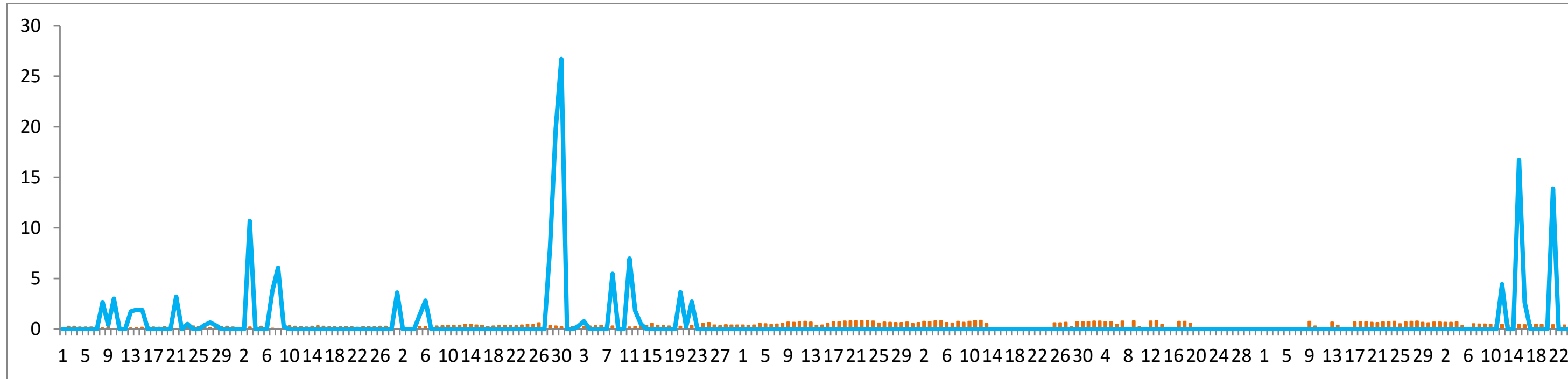
L'ETR et PE, calculées à partir des données précitées en tenant compte des trois types de sol (RFU= 20, 23 et 45) sont représentés dans la figure 11 à l'échelle journalière et dans la figure 14 à l'échelle annuelle; les valeurs de l'ETR restent insignifiantes pour les trois cas, en revanche nous constatons que la lame d'eau infiltrée est importante pour un RFU faible que pour un RFU plus important.

Tableau 5 : Valeurs indicatives de la RFU pour trois types de sols (Rieul et Ruelle 2003) et la description du sol dans le synclinal d'El Bayadh.

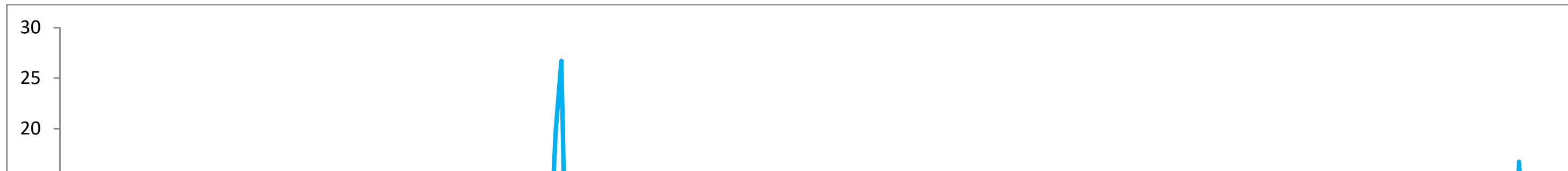
Conditions pédologiques			RFU (mm)	Texture du sol dans la région d'étude	RFU utilisée (mm)	L'auteur
Sol	Profondeur (cm)	RU (mm)				
Léger (sableux) RU 0,5 mm/cm)	<60	<30	2/3 RU <20	Sol peu développé (sur les roches mères jurassiques et crétacées)	20	Regagba 2012
	60-90	30-45	1/2 RU 15-23	Quaternaire ancien & Tertiaire	23	Regagba 2012
Moyen (sablo-limoneux, limono-argileux) (RU 1mm/cm)	<60	<60	2/3 RU <40			
	60-90	60-90	1/2 RU 30-45	Carapace calcaire (épaisseur moyenne 80 cm)	45	Pouget 1980
	>90	>90	1/3 RU >30			
Lourd (limono-argileux, argileux) (RU 1,5 mm/cm)	<60	<90	2/3RU <60			
	60-90	90-120	1/2 RU 45-60			
	>90	>120	1/3 RU >60			



a



b



Nous retenons de cette partie que :

- L'année 2009 est l'année moyenne représentative de la dernière décennie avec une pluviométrie de 326.89 mm, elle sera la base de notre estimation de la vulnérabilité ;
- La pluie efficace est en relation étroite avec la nature du sol dans le synclinal d'El Bayadh, elle est de 131.48 mm pour la carapace calcaire (RFU= 45 mm), 175.48 mm pour les sols du Quaternaire ancien et Tertiaire (RFU=23 mm) et 181.48 mm pour les sols peu évolués des roches mères (RFU=20 mm) (fig. 12);
- Le débit d'alimentation des aquifères du synclinal d'El Bayadh est estimé, pour l'année moyenne 2009, à $107 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$;

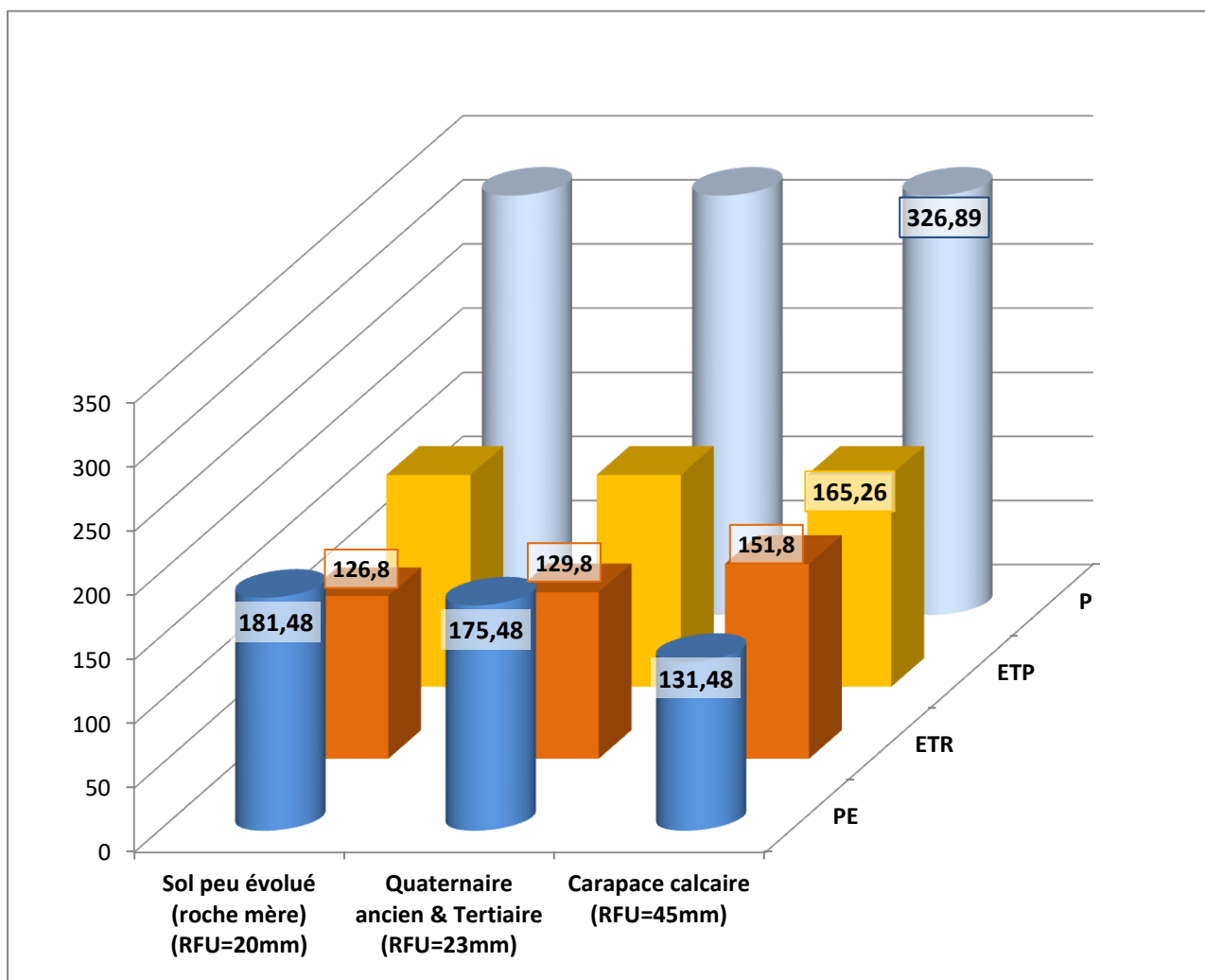


Figure 12 : Histogramme des P, ETP, ETR et PE annuelles de l'année 2009 (mesurées et calculées à l'échelle journalière)

III-CONTEXTE GEOLOGIQUE

L'extrémité occidentale de l'Atlas saharien central « Djebel Amour » est géologiquement cartographiée par Cornet en 1950, où la carte géologique de Géryville avec la partie sud de celle de Chott Chergui à 1/200 000 font les deux documents de base de notre étude géologique et structurale (fig. 13).

III-1. Historique

Les premiers travaux géologiques concernant le Djebel Amour et plus généralement l'Atlas Saharien remontent à la fin du 19^{ème} siècle; ils contribuaient dans le cadre de la réalisation de la carte Géologique de l'Algérie.

Colonel de Colomb et Mares (1857), **Laville** (1858), **Pouyanne** (1874), ont reconnus des formations crétacées dans la région d'El Bayadh ainsi que des argiles et des sels dans le Djebel Melah par **Laville**, **Tissot** (1881), **Perron** (1883), **Brossart** (1886), **Ritter** (1902) ont esquissé les premières cartes. Ritter décrit en détail les diverses formations du Djebel Amour (*in* Stamboul 2005).

Flamand (1911) et **Laffitte** (1913) ont révisés par la suite les séries géologiques de l'Atlas Saharien (*in* Stamboul 2005).

Les travaux de recherche de Flamand ont abouti en 1911 à une thèse présentée à l'université de Lyon qui traita une partie du Sahara, l'Atlas Saharien, les Hautes Plaines et les régions frontalières Algéro-marocaines. Sa thèse a servi de base pour toutes les recherches récentes. La tectonique, la géomorphologie, la stratigraphie, la paléontologie, la sédimentologie et la pétrographie ont été abordées et ont apporté des connaissances fondamentales sur l'Atlas Saharien Occidental. Il réalisa aussi des cartes géologiques aux 1/200 000, 1/400 000 et 1/800000.

Flandrin (1948), définit la stratigraphie du nummulitique et sa répartition en Algérie.

Durand Delga (1949) établis la carte géologique du Djebel Amour au 1/200 000.

Cornet (1949), a distingué l'accident Nord atlasique dans la région d'EL Bayadh et a donné une synthèse stratigraphique et une analyse tectonique en portant des modifications aux données de Flamand.

Le service de la carte géologique de l'Algérie (1950), publie les cartes géologiques de Géryville (feuille n°66) et Chott-Chergui (feuille n°55).

Cornet, Flandrin et la **S.N. Repalors** du 19^{ème} Congrès International d'Alger (1952) présentent une première synthèse stratigraphique de cette région bien qu'une partie de la série ait été justement reconnue comme appartenant au jurassique supérieur, une indétermination demeura cependant pour ce qui concerne les « unités infracrétaées ».

Cornet (1952), présente une monographie sur la géologie de l'Atlas Saharien depuis El Bayadh jusqu'à Fendi, en signalant les principaux affleurements triasiques, jurassiques et crétaées avec des coupes géologiques illustratives.

Bassoullet (1973), présente sa thèse dans un travail fondamental sur la stratigraphie du Mésozoïque des monts des Ksour. Il les subdivise en quatre grands ensembles litho-stratigraphique en liaison avec l'évolution sédimentaire du bassin ; Les argiles versicolores gypseuses et salines accompagnés de basaltes (Trias), une série épaisse de carbonates surmontée par des marnes (Lias-Bajocien moyen), un ensemble détritique argilo-gréseux à passées carbonatées (Bajocien supérieur-Jurassique supérieur), enfin les argiles à bancs dolomitiques, puis à gypses surmontées par des calcaires (Vracono-Cénomano-Turonien). Il retrace l'histoire des monts des Ksour au cours du secondaire.

Pitaud (1973) étudie le synclinal d'El Bayadh et donne la description litho-stratigraphique et la synthèse stratigraphique de l'Atlas saharien central. En 1974 ce dernier présente une étude hydrogéologique de la région « synthèse des connaissances actuelles » il distingue un Kimméridgien inférieur, moyen et supérieur sans donner un argument bio-stratigraphique (*in*. Stamboul 2005).

Douïhasni (1976) adopte le même plan du cadre stratigraphique de Bassoullet (1973) et utilise les différentes formations définies par ce dernier, qui ne diffèrent que de quelques subdivisions supplémentaires nouvelles, mais donne une importante analyse structurale sur les Monts des Ksour.

Abed et Harket (1982) donnent de nombreux détails concernant la litho-stratigraphie et la sédimentologie du jurassique moyen et supérieur du Djebel Mimouna (Djebel Amour).

Mahboubi (1983), donne dans son étude sur la géologie et la paléontologie du Crétacé post-Albien et du tertiaire de la bordure méridionale du Djebel Amour, des précisions stratigraphiques sur l'Albien supérieur, le Turonien inférieur et le Tertiaire ancien.

Elmi (1978-1982-1986), souligne les différences de l'évolution géodynamique entre les domaines ; Atlasique (monts des Ksour), Préatlasique (Nador de Tiaret) et tlemcenien (Monts du Ghar Roubane). Il établit une polarité du Sud vers le Nord avec une couverture plus

précoce du sillon atlasique. Il remarque qu'à la limite Bajocien-Bathonien, les changements dynamiques sont importants et brutaux ; il en déduit que l'évolution du sillon atlasique est alors bloquée.

Regagba (2006) établit une étude sédimentologique et stratigraphique de la série du Jurassique moyen et supérieur de la région d'El Bayadh.

Boucherdoud et Bouferma (2008) réalisent une étude géologique de l'Infra-crétacé et Valanginien-Hauterivien de la région d'El Bayadh.

Nedjma (2010) étudie la lithostratigraphie et sédimentologie de la série crétacée du synclinal de Kbeur El Marhsel.

III-2. Série stratigraphique

Nous nous appuyerons dans cette partie sur les travaux géologiques antérieures effectués dans la région d'El Bayadh (Cornet 1950-1952 ; Bassoulet 1973 ; Stamboul 2005 ; Regagba 2006 ; Boucherdoud et Bouferma 2008 et Nedjma 2010), et nous adopterons la carte géologique de Cornet 1952 comme support géologique de base le long de notre étude et nous mentionnerons à chaque début de la description lithologique des formations les appellations attribuées par Bassoulet (1973), et à la fin les âges donnés récemment par Mahboubi (1983) et/ou Regagba (2006) et ceux par Cornet; la série sédimentaire de la région d'El Bayadh de bas en haut est comme suit (fig. 13 et 14):

Abstraction faite de quelques pointements de Trias diapyr et des atterrissements continentaux Tertiaire et Quaternaires, les terrains qui affleurent vont du Callovien inférieur au Turonien. Les principaux traits de la morphologie sont constitués des anticlinaux formés par des séries gréseux-argileuses et carbonatées du Jurassique et de la base du Crétacé et des synclinaux perchés cénomano-turonien. Les reliefs moins accentués et les dépressions correspondent aux affleurements crétacés inférieurs marins ou continentaux.

III-2.1. Trias diapyr :

Constitué par des argiles rouges gypsifères et salifères (halite), violettes ou multicolores, surgissant brusquement au sein de formations plus récentes, à la suite de phénomènes liés au diapyrisme, accompagné de venues éruptives constituées par des roches vertes à structures ophitiques constituées de plagioclases séricitisés avec des plages de quartz xénomorphe et de la chlorite (dans leur ensemble, il s'agirait de basaltes ou microdiorites à structure

ophiolitique). Ces formations apparaissent généralement en contact anormale avec des niveaux d'âges variés.

Sur la feuille d'El Bayadh ce Trias affleure à Djebel Rhiar, à l'est de Daïet El Aouedi et au nord de Kef Chahba. Cet ensemble d'affleurement est disposé aligner sur une droite ajustée de direction Sud-ouest Nord-est (parallèle à la flexure Sud Atlasique) comme a été remarqué dans la majorité des cas dans l'Atlas saharien, attribué généralement au Keuper, étage supérieur du Trias.

III-2.2. Jurassique :

La série la plus complète affleure dans la localité d'El Ouidiane (Djebel Mimouna, Est du Synclinal d'El Bayadh).

III-2.2.1. Formation de Teniet El Klakh :

Occupant le cœur des anticlinaux ; Représentée par des argiles verdâtres silteuses (à aspect schisteux) à intercalations de lentilles centimétriques à métriques de grès fins, bien classés et de quelques niveaux de calcaires gréseux ou micritiques, renfermant une assez abondante faunes de brachiopodes et d'ammonites. C'est un affleurement limité, d'une épaisseur de 123 m (Kheng El H'ssane au Sud-Est d'El Ghassoul et à l'Ouest de Djebel Azreg).

Au Nord-Ouest de l'agglomération de la ville d'El Bayadh sous le grand pont situé à 2 km de l'Ouest de la ville et sur la route qui mène vers Saida, cette formation compte une épaisseur de 30 m.

Cette formation est attribuée probablement au Bathonien inférieur et Callovien inférieur par Regagba (2006), attribuée au Callovien inférieur par Cornet (1952).

III-2.2.2. Formation de Djara :

Occupant les dépressions, c'est une puissante série gréseuse avec 1081 m d'épaisseur à Djebel Selim dans le secteur d'El Ghassoul. Il s'agit de grès moyens, bien lités, en bancs de 1 à 2 m, se débitant en blocs parallélépipédiques de teinte sombre avec, fréquemment, des lits psammitiques durs, vert-foncé. Des bancs de calcaire jaune et de dolomie gris-bleuâtre, cristalline, à patine rousse, permettent de la distinguer des autres séries gréseuses, les bancs calcaires contiennent des bivalves en mauvais état de conservation, la série se termine parfois par un niveau à plantes. Mais il existe souvent, vers le haut, plusieurs centaines de mètres de grès rose en gros bancs, sans intercalation calcaréo-dolomitique qui ne se différencient en rien de la série gréseuse infra-crétacée.

A El Bayadh, cette série gréseuse de 800 à 1000 m de puissance est coiffée par le banc calcaire du Kimméridgien (Cornet 1952). Au Nord-Ouest de la ville d'El Bayadh, constituée d'une alternance de grès moyens, blanchâtres à stratifications obliques bois flottants et d'argiles verdâtres et rougeâtres à intercalations de dolomies gréseuses bioclastiques avec une épaisseur de 340 m (Regagba 2006).

Regagba (2006) l'attribue au Fini-Batonien inférieur à Callovo-Oxfordien, Cornet (1952) attribue au Lusitanien.

III-2.2.3. Formation de Teniet Ettmar :

Constituée essentiellement par des calcaires bleu-foncé de puissance très variable. Au Nord-Ouest d'El Bayadh où il est particulièrement développé, sa puissance là dépasse la cinquantaine de mètre, cette puissance est encore plus forte au Sud-Est de la feuille d'El Bayadh, mais elle est bien inférieure et se réduit jusqu'à disparition complète vers l'Ouest (Cornet 1952).

Cette formation se distingue par sa géomorphologie en combe à dominance de faciès carbonatés, organogènes sombres, à (brachiopodes, gastéropodes, lamellibranches, oursins, et polypiers solitaires branchus), dessinés entre deux massifs gréseux, les alternances de la « formation de Djara » à la base et les massifs argilo-gréseux de la « formation d'Aïssa », au sommet.

Au Nord-Ouest d'El Bayadh, cette formation est constituée par une alternance d'argiles verdâtres et de calcaires organogènes sombres qui renferment une abondante faune (brachiopodes, gastéropodes, et polypiers) son épaisseur est de 50 m

La limite supérieur est marquée par la disparition des faciès récifaux et l'apparition d'un banc gréseux raviné à sa base, attribuée à l'Oxfordien supérieur – Kimméridgien inférieur par Regagaba (2006) et au Kimméridgien par Cornet (1952).

III-2.2.4. Formation de Aïssa :

Représentée par 500 à 600 m de grès à ripple-marks, alternant avec des argiles rougeâtres, ses grès peuvent être distingués de ceux du Barrémo-Apto-Albien ; ils sont plus durs, plus régulièrement stratifiés et fortement patinés de noir et constituent les reliefs les plus énergiques de la région d'El Bayadh qui dominent le synclinal d'El Bayadh, au niveau de Djebel El Beiod avant de disparaître sous des formations plus récentes (Cornet 1952).

A l'Ouest de la ville d'El Bayadh, sur le flanc nord-est du synclinal cette formation est constituée de trois membres représentée par des bancs gréseux (10 à 30 m) massifs, chenalisés de couleur beige présentant localement des stratifications obliques et entrecoupées

(275 m) avec au-dessus une alternance de bancs gréseux et d'argiles dans le membre supérieur de la formation, l'ensemble constitue une épaisseur de 350 m.

Au Nord de la ville sur le versant sud du Djebel Mekter, constituée d'une alternance de grès chenalisés et de fines passées argileuses rouges ou vertes dans le membre inférieur (280 m), de petites assises gréseuses dans le membre médian (39 m), et une alternance de grès et d'argiles rouges d'ordre métrique, ces faciès sont chenalisés avec stratifications obliques et entrecroisés, une épaisseur total de 370 m (Boucherdoud et Bouferma 2008).

La limite inférieure est marquée par la disparition des calcaires récifaux et matérialisée par un banc gréseux à base ravinée reposant sur l'ensemble précédent. La limite supérieure est marquée par le niveau repère de grès et d'argiles lie-de-vin, cette formation est attribuée à l'Infra-crétacé par Cornet (1952), et au Jurassique supérieur par Regagba (2006), Boucherdoud et Bouferma (2008).

III -2.3. Crétacé :

III -2.3.1. Formation marno-calcaire du Valanginien :

Cette formation est constituée par une alternance marno-calcaire, bien développée au Nord d'El Bayadh et comprend de bas en haut :

- 200 m de marnes gris bleuâtres avec deux dalles lumachéliques à petites huîtres et de mauvais bivalves.
- 200 m d'argiles versicolores à gypse.
- 150 m de calcaires gris ou scoriacés vacuolaires offrant parfois des géodes à aspect de cargneules.

Vers le Nord-Est d'El Bayadh les niveaux calcaires se développent et la puissance de la formation augmente, vers le Sud-Est les bancs calcaires disparaissent au profit des argiles et des intercalations gréseuses ou grésio-argileuses, tandis que la puissance totale de l'ensemble diminue de moitié (Cornet 1952).

Les deux premiers ensembles au centre du synclinal d'El Bayadh ont une épaisseur de 100 à 200 m. Plus au Sud au niveau de Djebel Slim, leurs épaisseurs est 250 m, ils sont constitués de marnes vertes à jaunes très gypseuses, vers le milieu les argiles sont rougeâtres alternant avec des grès qui deviennent plus fréquents vers le sommet, le membre supérieur constitué de calcaires massifs, les variations d'épaisseur vers l'Ouest (sur la carte d'El Bayadh) sont notable, les formations les plus fines sont situées au Djebel Rhiar, plus au Nord au Djebel El Beiod la série s'enrichit essentiellement constituée de marnes (Stamboul 2005).

A l'Ouest de la ville d'El Bayadh, sur le flanc nord-est du synclinal (versant sud du Djebel El Beiod) et au Nord de la ville d'El Bayadh sur le versant Sud du Djebel Mekter, cette formation est décrite par Boucherdoud et Bouferma (2008) comme suit;

- **Membre inférieur** : Constituée par une alternance marno-calcaire où la puissance des marnes est la plus importante et interrompue par deux dalles de calcaires lumachéliques surmontés par une alternance argilo-gréseuse de 5 m d'épaisseur, ce membre du Valanginien a une épaisseur qui varie de 80 m à l'Ouest de la ville d'El Bayadh à 114 m au Nord de la ville d'El Bayadh.
- **Membre supérieur** : Formé essentiellement par des marnes versicolores séparées par des bancs de calcaires de dissolutions de teinte jaunâtre (cargneules) et par des passées blanchâtres de gypses laminaires, son épaisseur ne dépassant pas 90 m à l'Ouest d'El Bayadh et 100 m au Nord de la ville d'El Bayadh.

La limite inférieure de cette formation est matérialisée par l'apparition du premier banc de grès de couleur rouge-marron de base fortement ravinée. La limite supérieure est placée au toit des derniers faciès marneux verts à passées Gypseux (Cornet 1952).

III -2.3.2. Formation argilo-gréso-calcaire de l'Hauterivien:

Cornet (1952) a opté pour une subdivision en deux membre, un membre inférieur gréseux et un membre supérieur calcaire qu'il décrit comme suit ;

Un Hauterivien gréseux correspond à une assise gréseuse de 150 m d'épaisseur très constante au-dessous des argiles et calcaires de l'Hauterivien ; son faciès est identique à celui de la série continentale barrémo-apto-albienne qu'elle rejoint vers le sud lorsque les calcaires hauteriviens disparaissent.

Un Hauterivien calcaire qui dans le coin nord-est de la feuille d'El Bayadh est très développé ; Il comprend 50 à 200 m d'argiles à gypse surmontées de 70 à 80 m de calcaires jaunes et gris à lumachelles avec térébratules. Les argiles à gypse se terminent en biseau vers le Sud-Ouest. Les calcaires jaunes diminuent sensiblement de puissance vers l'Ouest (Cornet 1952).

A l'Ouest de la ville d'El Bayadh sur le flanc nord-est du synclinal (versant sud du Djebel El Beiod) et au Nord de la ville d'El Bayadh sur le versant sud du Djebel Mekter, la formation subdivisée en deux membres est décrite par Boucherdoud et Bouferma (2008) comme suit :

- **Membre inférieur** : est formé par des grès chenalisés (5 à 10 m) de couleur claire, plus au moins tendres à litages obliques et horizontales. Les bancs gréseux massifs

deviennent par endroit stratifiés, séparés par des niveaux argileux rougeâtres (1 à 2 m) ils contiennent des bois silicifiés mal conservés où s'intercalent de minces lits de gypses vers la fin du membre, l'épaisseur de ce membre est très variable 120 m à l'Ouest de la ville d'El Bayadh et 40 m au Nord de la ville d'El Bayadh.

• **Membre supérieur** : débutant par une dalle de calcaire lumachélique renfermant des moules de bivalves de différentes tailles, représenté dans l'ensemble par une alternance de marnes verdâtres (2 à 3 m) et des bancs calcaires fossilifères grise ou jaunâtre ce membre a révélé une épaisseur assez constante de 40 m à l'Ouest de la ville d'El Bayadh et 35 m au Nord de la ville d'El Bayadh.

La limite inférieure est matérialisée par un banc gréseux dont la base est ravinée. La limite supérieure est placée au sommet des marnes vertes et matérialisée par un changement radical de faciès des marnes aux grès.

III -2.3.3. Formation de Tiout:

Cet étage marque une importante phase régressive dans le cycle sédimentaire, se présente en effet avec des faciès continentaux dans tout l'Atlas Saharien. C'est une puissante série continentale de 800 à 1000 m de grès tendres à dragées de quartz, à stratifications entrecroisées et à bois silicifiés, ce faciès est assez constant et se distingue des autres séries gréseuses, par son aspect morphologique. Ce sont des grès de couleur ocre rouge en petits ou gros bancs admettant de fines inter stratifications d'argiles et des intercalations de petits niveaux de calcaires dolomitiques gris vers le sommet, alternant avec des argiles rouges à fines passées gréseuses à stratifications entrecroisées.

La roche est généralement friable avec un ciment calcaire qui peut dans certain cas faire défaut. Les dragées correspondent ici à du quartz roulé dont le diamètre varie de quelques millimètres à deux ou trois centimètres.

Occupant surtout les dépressions et les synclinaux à fond plat, cette formation correspond à des plaines d'où émergent à peine les dos arrondis des blocs gréseux, localement durcis ; lorsque des pentes l'affectent, il forme une suite de falaises, aux crêtes atténuées, aux sommets émoussés, contrastant avec les lignes anguleuses des massifs gréseux jurassiques (Cornet 1952).

la limite inférieure du Barrémien débute au toit des derniers faciès carbonatés observés au sommet du Néocomien (Hauterivien calcaire), elle se compose d'un niveau de condensation à la base, très riche en Brachiopodes, oursins,....., puis d'une alternance de quelques bancs de calcaires oolithiques et enfin de marnes vertes, puis sans zone de transition, les grès à dragées forment un épandage de chenaux à surface de base érosive qui s'étend sur la formation

précédente de la « zone des alternances ». Cette limite est purement lithologique bien qu'arbitraire au point de vue stratigraphique elle marque un changement très net dans le cycle sédimentaire qui a valu à la formation l'appellation de grès à dragées.

La limite inférieure de l'Aptien est délicate à définir et difficile à observer bien qu'elle couvre parfois de très grandes surfaces d'affleurements. Ces difficultés sont l'œuvre de la lente régression de la mer responsable du changement progressif du faciès. Il est reconnaissable en raison de la présence d'une corniche de 15 à 50 m, il est constitué de calcaires en bancs massifs parfois dolomitiques renfermant très souvent des passages marno-calcaires.

L'Albien par sa composition lithologique (faciès continental) constitue dans sa morphologie un élément constant. Il forme en généralement l'auréole de base de la majeure partie des synclinaux et plus rarement le cœur des anticlinaux. Au centre du synclinal d'El Bayadh affleure le Barrémien, un ensemble gréseux à dragées avec des bancs argileux en bordure du remplissage sédimentaire (Stamboul 2005).

Cornet (1952), ainsi que Bassoulet (1973), attribuent cet ensemble au Barremien-Aptien-Albien, Mahboubi, (1983) les décrit en tant qu'un ensemble gréso-argileux attribué à l'Albien. La puissance de cette formation d'après Geo-Water 2003 et déduction à partir des coupes établies par Cornet (1952) est de 70 m.

III-2.3.4. Formation marno-calcaire dolomitique d'El Rhelida et d'El M'daouer :

Cornet le décrit comme un ensemble de 150 à 200 m d'argiles gypsifères, marnes et calcaires marneux, jaune ou roses, en petits bancs bien réglés. Vers le Nord et l'Ouest, les argiles à gypses disparaissent et la puissance de la formation diminue. Les calcaires marneux contiennent fréquemment des silex blonds en lames allongées. A la base, des bancs de grès s'intercalent dans les argiles rendant parfois difficiles la séparation d'avec la formation continentale sous-jacente, vers le sommet, une limite lithologique assez nette entre les marno-calcaires et les calcaires massifs de la falaise dite « turonienne » massifs a permis de tracer partout une séparation entre le Cénomaniens et le Turonien.

La limite inférieure correspond à une disparition des dépôts silico-clastiques et une apparition des sédiments carbonatés représentés par des bancs dolomitiques d'ordre centimétrique à métrique. La limite entre ces deux formations est marquée par l'apparition du premier banc de gypse (Bassoulet 1973).

Sur la carte d'Elbayadh, Cornet a attribué cet ensemble au Cénomaniens inférieur, en revanche la formation **d'El Rhelida est** attribuée à l'Albien supérieur par Bassoulet (1973) et au Vraconien par Mahboubi (1983).

La formation d'El M'daouer est attribuée au Vraconien à Cénomaniens inférieurs par Bassoulet (1973) et au Cénomaniens inférieurs par Mahboubi (1983).

III -2.3.5. Formation calcaréo-dolomitique de Rhoundjaïa :

Elle correspond aux puissants bancs calcaires sublithographiques organogènes et parfois dolomitiques pouvant dépasser 150 m d'épaisseur, coiffant le plus souvent les synclinaux perchés (Kebeur el Marhsel, Es seguia, Djebel Rhoundjaïa,.....) ou constituant des reliefs monoclinaux (Ech Chebak, Djebel Messied). Ce calcaire dur est patiné en jaune roussâtre, à cassure blanchâtre et à grain fin, il renferme des oursins, des gastéropodes, et des ammonites en mauvais état de conservation.

Cette unité lithologique repose en concordance sur la formation précédente d'El M'daouer, elle est nettement visible dans la topographie et elle s'étend tout au long du sommet du synclinal de Kebeur El Marhsel en prenant la forme d'une puissante muraille calcaire dont elle est nommée la « Haute muraille crétacé » par Flamand (1911) ;

D'après Cornet (1952), l'ensemble de toute cette formation apparaît sous forme d'une corniche calcaire appelée « Falaise turonienne ». Cette dernière comporte deux barres calcaires séparées par un niveau moyen marneux. Attribuée au Cénomaniens supérieurs-Turonien par ce même auteur et au Cénomaniens supérieurs-Turonien inférieurs par Mahboubi (1983).

III -2.4. Tertiaire :

Les formations récentes sont le plus souvent conservées dans les cuvettes synclinales alors qu'elles ont été enlevées par l'érosion au niveau des anticlinaux. Dans cette partie de l'Atlas (central) on note l'absence de dépôt marin. Les terrains tertiaires affleurent le plus souvent sur la bordure méridionale de la chaîne atlasique et se présentent sous forme de séries rouges concordantes ou discordantes (suivant leurs positions stratigraphiques) sur les terrains mésozoïques.

Le Tertiaire continental est représenté sous ses deux aspects :

- Des poudingues ou cailloutis cimenté grossier à la base et au contact des massifs jurassiques et crétacés, sur toute l'épaisseur, ce sont des poudingues plus ou moins cimentés et des cailloutis mal roulés et calibrés, Ces formations de base présentent parfois un pendage

notable qui peut être le plus souvent originel mais qui témoigne parfois de mouvements tectoniques contemporains du remplissage tertiaire.

- Des couches rouges argilo-sableuses constituant la plus grosse épaisseur des atterrissements tertiaires et formée d'un sable argileux rouge, parfois aggloméré en grès tendre parfois très friable, en témoins sur le flanc de certains massifs ou remplissant les grandes dépressions. Les couches rouges tertiaires sont partout recouvertes au sommet, d'une carapace calcaire formée souvent d'un calcaire lacustre superposée.

Carapace calcaire : d'âge tertiaire en dalle recouvre les dépôts continentaux tertiaires, le plus souvent de structure hétérogène ; calcaire à concrétions, calcaire gréseux, poudingue, conglomérat ou brèche. La carapace correspond à une fossilisation de la surface topographique des alluvions continentales tertiaires aussitôt après leur dépôt (Cornet 1952).

III-2.5. Quaternaire :

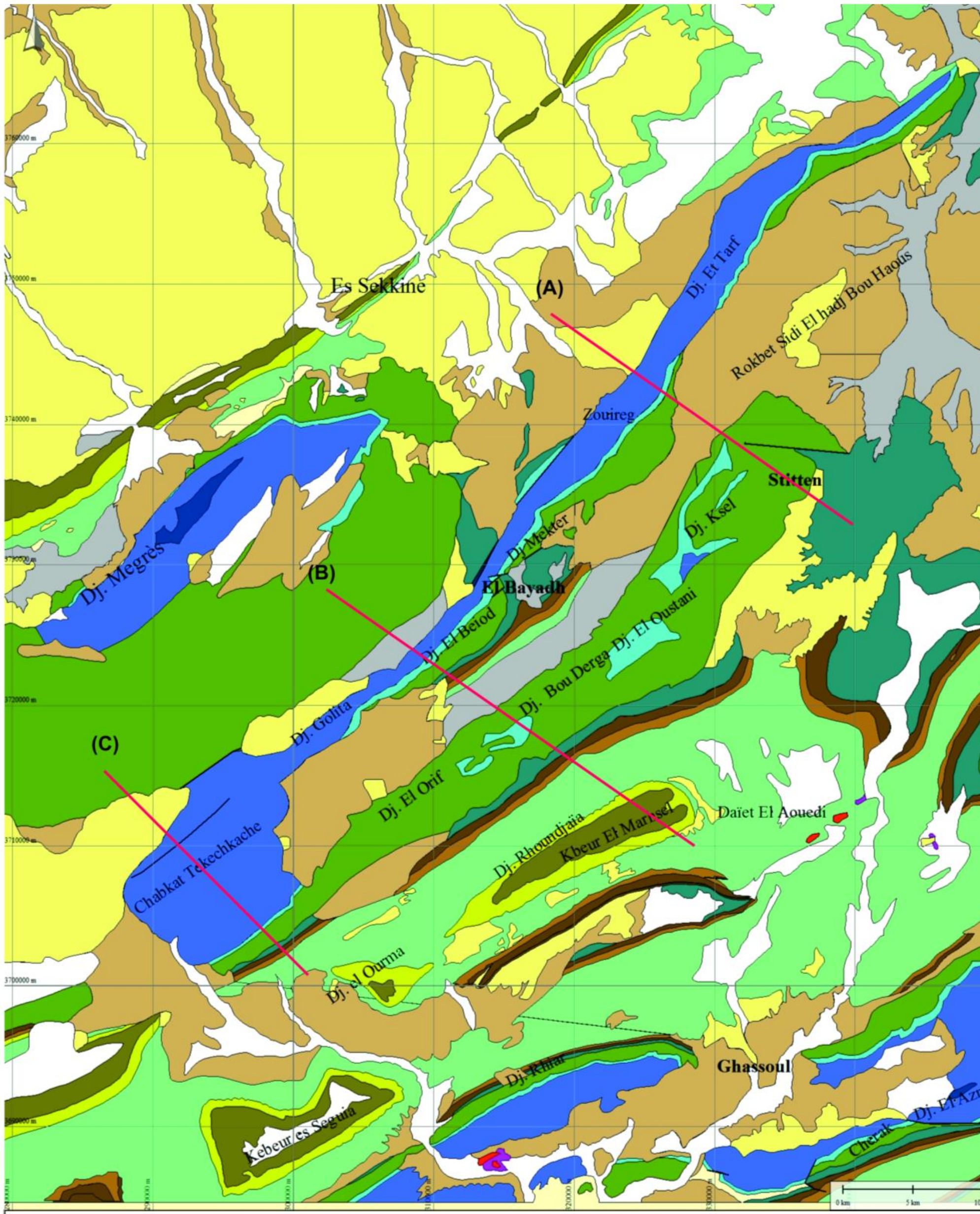
Il résulte de l'accumulation dans des zones topographiquement basses du matériel sédimentaire arraché à la chaîne par les actions érosives. Les alluvions ainsi formées sont constituées par des sédiments généralement fins. Ce sont des limons de couleur ocre souvent très chargés en matériel gréseux. Les niveaux grossiers à graviers ou galets y sont rares et lorsqu'ils existent sont bien localisés à la périphérie des formations conglomératiques du tertiaire continental. Suivant leur limite d'accumulation, les alluvions ont des épaisseurs variables sans oublier que le réseau hydrographique actuel les entaille profondément.













III-2.5.1. Alluvions anciennes :

Elles sont visible dans les dépressions à proximité des thalwegs et constituant le remplissage de certaines grandes dépressions (plaine d'El Bayadh), difficiles à distinguer des dépôts tertiaires continentaux lorsque la carapace calcaire n'en permet pas la séparation. Leurs teinte est pourtant, en général, d'un brun plus sombre que les couches rouges tertiaires et leurs éléments plus grossiers.

III-2.5.2. Alluvions actuelles et récentes :

Constituent les dépôts récents qui tapissent les fonds des vallées d'oueds et ceux plus anciens qui constituent les basses et moyennes terrasses, ainsi que les fonds de dayas, les terrasses sont constituées d'alluvions grossières bruns-rougeâtre (matrice sableuse) avec cailloutis ou rares poudingues non calibrés et mal roulés. Les dayas, au contraire, d'alluvions argilo-sableuses fines, grises ou blanches, en général peu épaisses. De rares formations dunaires sont à signaler ; elles sont, le plus souvent, fixées par la végétation.



	Alluvions actuelles et récentes		Cénomaniens (Fr. Rhelida et El M'daouer)		Valanginien
	Alluvions anciennes		Grès Barremien-Aptien-Albien (Fr. Tiout)		Grès infra-crétacée (Fr. Albi)
	Carapace calcaire		Hauterivien sup. calcaire Hauterivien inf. gréseux		Kimmeridgien (Fr. Teniet el
	Tertiaire continental				Lisitanien et Callovo-Oxfordien
	Turonien (Fr. Rhoundjaïa)				

A. Cornet 1952 notice explicative Géryville		Subdivisions J.P.Bassoulet, 1973		
Alluvions A, q				
Tertiaire cnt. Tc				
Turonien C6	150 m		Fr. Khoundjaya	Membre sup. calcaire -dolomitique- Turonien inf. Membre inf. calcaire et calcaire marneux-Cénomanién sup.
Cénomanién C5-4	150 à 200 m		Fr. M'daouer Fr. El-Rhelida	Alternance de marnes, gypses et calcaire-Cénomanién inf. Alternance de calcaires dolomitiques, de grès et d'argiles-Vraconien
Albien- Aptien- Barremien C3-1	800 à 1000 m		Fr. Tiout	Ensemble grés-argileux Albien
Hautérien calcaire C1-II et Argilo- gypseux à la base	80 m 50 à 200 m		Fr. Tiloula	
Hautérien gréseux CIII	150 m			
Valanginien marno-calcaire C IV	550 m			
Série gréseuse infra-crétacée Cv	500 à 600 m		Fr. d 'Aïssa	Fr. d 'Aïssa Jurassique sup.
Kimmeridgien J6	100 à 200 m		Fr. Teniet Ettmar	Fr. Teniet Ettmar Oxfordien sup.- Kimmeridgien inf.
Lusitanien J5-2	1000 m		Fr. de Djara	Fr. de Djara fini Bathonien inf. à Callovo-Oxfordien
			Fr. de Tifkert	Fr. de Tifkert Bathonien inf. élevé
Callovien inf. J1	123m		Fr. Tenniet El-Klakh	Fr. Tenniet El-Klakh Bathonien inf. Callovien inf.

a

Subdivisions
M. Mahboubi, 1983

Subdivisions
A. Regagha, 2006

b

Figure 14 : Colonne lithostratigraphique ;

a : de la feuille d'El Bayadh ;

b : du synclinal d'El Bayadh

Formations	Description	Eps.	Figurés lithostrati- graphique
	Alluvions A, q Tertiaire cnt. Tc		
Fr. Tiout	grès	70 m	
Fr. de l'Hautérien	marno- calcaire	35 à 40m	
	grès	40 à 120 m	
Fr. du Valanginien	marno- calcaire	90 à 100m	
	marno- calcaire	80 à 114m	
Fr. d 'Aïssa	Série gréseuse	350 à 600 m	
Fr. Teniet Ettmar	argile et calcaire	50 à 150m	
Fr. de Djara	Alternance de grès et d'argiles à intercalations dolomitiques	340 m à 1000 m	
Fr. Tenniet El-Klakh	argl. silt. chnx. grès	30m	

100m
50
0

IV- CONTEXTE STRUCTURAL

L'Atlas saharien est une chaîne intra-cratonique plissée, d'orientation NE-SO, il est affecté par au moins cinq transversales qui sont d'Ouest en Est ; la transversale de la Tafna, la transversale de Ain Séfra, la transversale de Tiaret-el Bayadh, la transversale de Teniet El Had et la transversale Aurès-Hodna. La partie occidentale est située entre deux domaines stables (fig. 15);

▪ Au Nord, le domaine des hautes plaines oranaises culminant à 1200 m d'altitude. L'accident nord-atlasique correspondant à leur limite (l'Atlas saharien occidental et les Hautes plaines oranaises), d'orientation Sud Ouest-Nord Est, est un accident complexe, le plus souvent décrochant de rejet pouvant atteindre 1200 à 1500 m, d'origine profonde qui vient s'éteindre au niveau d'Aflou (Durand Delga 1949), qui a fonctionné probablement depuis le Trias pour séparer une gouttière atlasique et pré-atlasique (Cornet 1947). L'interruption de cet accident est liée à la discontinuité d'un socle affecté par des cassures au Nord de la chaîne atlasique (Laffite 1939 in Kacemi 2005). Cet accident se perd sous les dépôts récents, avec un passage soupçonné au niveau du Chott-Chergui (Caratini 1970).

▪ Au sud, le domaine saharien (ou plate-forme saharienne) culminant à 800 m d'altitude. L'accident sud-atlasique correspondant à un accident complexe appelé aussi (Flexure Saharienne, Laffite, 1939) ; marqué par une série d'accidents en coulisse qui se présentent en forme de failles, de plis-failles ou de flexures qui se relaient du Sud Ouest au Nord Est allant d'Agadir au Maroc jusqu'à Gabès en Tunisie, atteignant parfois un rejet supérieur à 2000 m, et résultant l'abaissement général du Sahara par rapport à sa bordure atlasique, les différentes failles constituant la flexure Sud Atlasique semblent s'établir de façon quasi-systématique sur le flanc Sud des anticlinaux.

Cornet 1952, écrit que dans la chaîne de l'Atlas, les mouvements tectoniques ont plissé les formations mésozoïques avec beaucoup plus d'énergie. Des anticlinaux brutaux, à flancs verticaux, séparés par de vastes synclinaux, témoignent d'une énergique compression latérale ; des failles à fort rejet, parallèles aux plis, et de petits décrochements obliques ou perpendiculaires aux axes principaux, évoquent une tectonique cassante due en partie à la qualité des matériaux mis en œuvre, mais aussi, pour une large part à de probables jeux du socle.

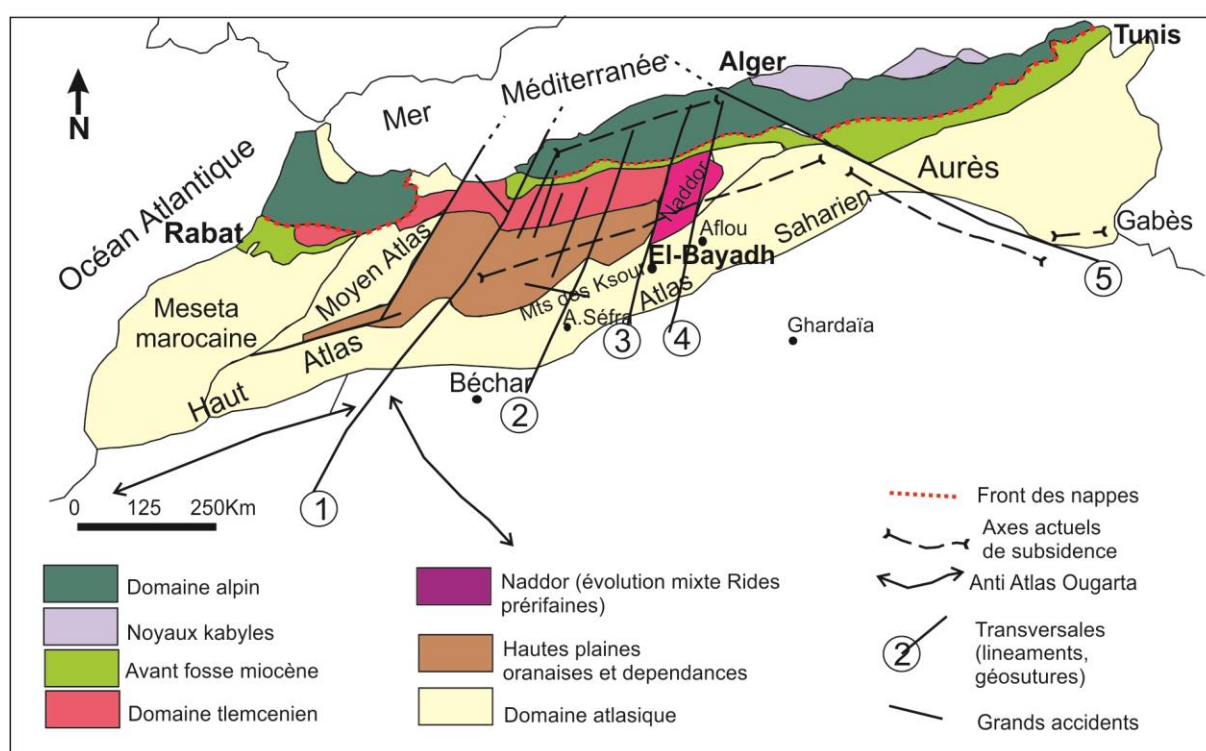


Figure 15 : Grands traits structuraux du Maghreb (Elmi 1978),

1: Transversale de la Tafna, 2: Transversale d’Ain Séfra, 3: Transversale de Tialet-El Bayadh,
 4 : Transversale de Teniet El Had, 5 : Transversale Aurès Hodna.

Une étude détaillée a montré que la tectonique de la région d’El Bayadh était un peu plus complexe qu’il n’avait été dit auparavant. Les anticlinaux amygdaloïdes se relayant en « chenilles processionnaires » d’une direction générale nord est-sud ouest (Flamand 1911), séparés par de larges aires synclinoriales, décrits plus à l’Est ne sont pas aussi simples de forme dans le périmètre de la feuille d’El Bayadh. Des failles et des décrochements, parfois très importants troublent la régularité des plis atlasiques classiquement décrits. Les failles les plus importantes sont parallèles à l’axe général de plissement sud ouest-nord est. Un accident borde le pied nord-ouest de la chaîne Tikechkach-Zouireg et se prolonge au Nord Est sur la feuille du Chott Ech Chergui et au-delà.

A l’aval des gorges d’El Bayadh il met au contact le calcaire vallangien et les calcaires et grès du callovien inférieur (formation de Teniet El Klakh), ce qui donne à la faille un rejet d’au moins 1200 à 1500 m.

Des décrochements de direction plus aberrante hachent les bancs, en particulier dans la région d’El Bayadh et dans le Sud Est de la feuille.

M. Douihasni 1976, décrit qu’aux environs d’El Bayadh, l’accident Nord Atlasique passe sur le flanc Nord-Ouest des structures d’El Bayadh, soit du Sud vers le Nord (Chebket

Tekechkach, Djebel El Béiod, Djebel Mekter et Djebel Tarf). Des observations aux environs des gorges d'El Bayadh ont permis de montrer que les formations des grès inférieurs du lusitanien « Formation de Djara ») et des argiles silteuses callovien inférieurs « formation de Teniet El Klakh » chevauchent sur les marno-calcaires inférieurs du Kimméridgien « Formation de Teniet Et-Tmar » de la plaine d'Es Sekkine. Le rejet dans ce cas, tel que l'a déjà signalé Cornet 1952 (ci-dessus), est d'environ 1200 à 1500 m. Le long de cette accident, au Nord duquel surgissent des plissements analogues aux plis Atlasiques (Djebel Megrès), des structures décamétriques à hectométriques se disposent en échelon, obliques par rapport aux failles, laissant croire à un jeu simultané en failles inverses et en décrochements.

M. Durant Delga fait remarquer qu'au-delà du Djebel Tarf d'El Bayadh, l'accident Nord Atlasique diminue d'importance pour s'éteindre au méridien d'Aflou. La discontinuité de cet accident est liée (Laffitte 1939) à la discontinuité d'un socle affecté par des cassures au Nord de la chaîne Atlasique.

Les coupes A, B et C extraient, réduites et coloriées à partir des coupes IV, V et VI de la monographie régionales sur l'Atlas Saharien Sud-Oranais par Cornet (1952) rendent compte de la forme transversales des principales unités tectoniques de l'Atlas (fig. 15) ;

IV-1. Anticlinaux

Les anticlinaux sont étroits et allongés. Ils se terminent souvent à chaque extrémité par de remarquables périanticlinaux donnant lieu, lorsque l'érosion s'y prête, à l'édification de voûtes en abside du plus bel effet. Une érosion plus poussée donne une série d'hémicycles concentriques, correspondant aux bancs les plus durs des formations intéressées.

En coupes transversales (fig. 16) les anticlinaux apparaissent avec des flancs verticaux et, le plus souvent une voûte plane, parfois même incurvée en un léger synclinal. Le raccord entre les flancs et la voûte se fait par un pli en genou très brutal à 90°. Ce pli, favorisant le démantèlement des parties dures intéressées, l'effet de l'érosion provoque souvent une mise à nu des couches les plus anciennes, selon deux bandes parallèles à l'axe du pli (Djebel Ksel,.....). Glangeaud dans le Jura et Castany en Tunisie ont attirés l'attention sur l'existence de ce genre d'anticlinaux dits coffrés. Beaucoup d'anticlinaux sont faillés, alors que les synclinaux ne le sont pas (fig. 17).

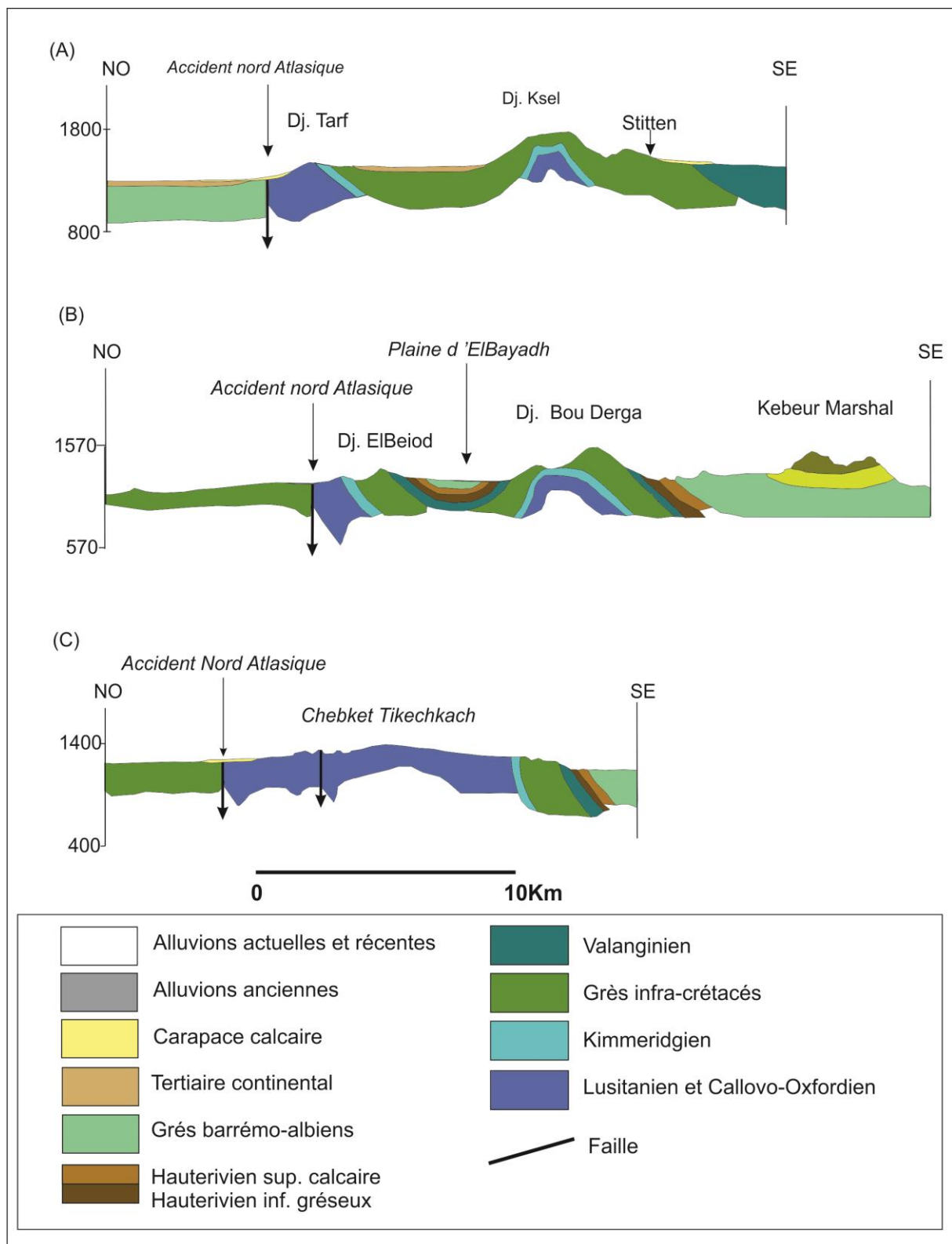


Figure 16 : Coupes géologiques du synclinal d'El Bayadh (Cornet 1952)

IV-2. Synclinaux du Barrémo-Apto-Albien

Les synclinaux sont plus larges mais souvent plus longs aussi que les anticlinaux. Alors que ceux-ci sont limités par des terminaisons périclinales et se relaient, les synclinaux forment souvent de longues gouttières plus ou moins sinueuses courant sans interruption entre plusieurs séries d'anticlinaux.

En coupes transversales (fig. 16) les synclinaux sont évasés, avec un fond horizontal ou sub-horizontal très étalé. Le relèvement des bords, qui suit évidemment celui des flancs des anticlinaux encaissants est progressif mais devient très vite extrêmement énergétique.

IV-3. Synclinaux perchés du Cénomano-Turonien

Dans les synclinaux, les grès barrémo-apt-albiens reposant avec des pendages faibles ont donné des plaines allongées, au milieu desquelles se détache souvent un témoin cénomano-turonien en relief. La forme allongée du témoin, l'incurvation de sa face supérieure masquée par le pli synclinal (parfois exagéré par suite d'un léger affaissement des argiles gypsifères) donnent à ces synclinaux perchés (coiffés de la dalle turonienne) un aspect très particulier que les autochtones expriment en les comparant à un tombeau, bien visible dans le Kebeur es seguia et le Djebel Rhoundjaïa-Marshel.

Conclusion :

Nous concluons de par la synthèse des études géologiques antérieures et l'étude comparative des deux colonnes litho-stratigraphiques (du synclinal d'El Bayadh et de la carte de Géryville) (fig. 14) que la série litho-stratigraphique du synclinal d'El Bayadh, du Callovien au Quaternaire dépasse à peine les 1200 m représentant le quart de celle de la colonne régionale (4153m); c'est une succession de formations gréseuses à intercalations argileuses et calcaires du Jurassique et Infra-Crétacé en altitude avec la présence des gypses au niveau du Vallanginien et de l'Hauterivien au cœur du synclinal et principalement argilo-sableuses crétacé et tertiaire dans les dépressions.

Cette faible épaisseur est le résultat des forces compressives NO-SE et SE-NO, ce qui lui confère actuellement une allure étroite et allongé étant à la limite sud de la flexure nord atlasique il reçoit la plus grande intensité des mouvements compressifs.

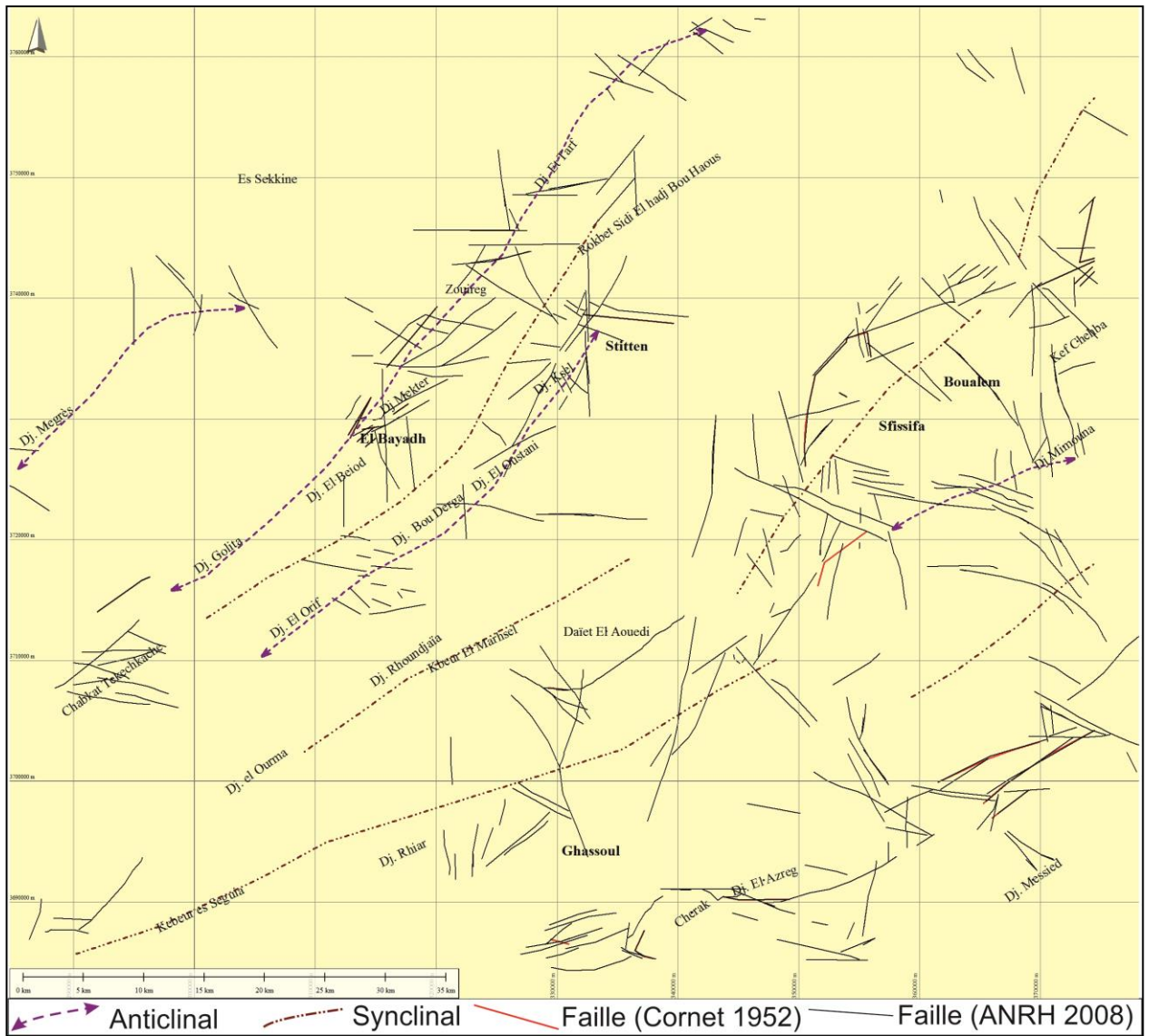


Figure 17 : Carte structurale de la région d'El Bayadh

CHAPITRE 2 : CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET HYDROCHIMIQUE**I- CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE**

La zone d'étude dont fait partie le synclinal d'El Bayadh est d'une superficie de 620 Km² exploitée par plus de 600 forages et puits, un synclinal étroit et allongé de direction sud-ouest nord-est. Il est limité au Nord-Ouest par la flexure nord atlasique, au Sud-Est par les chainons de Djebel El Ourif, Djebel Bou Derga, Djebel El Oustani et Djebel Ksel, au Nord-est par Rokbet Sidi El Hadj Bou Haous et au Sud-est par Chabket Tikechkache.

I-1. Identification verticale des aquifères

La série sédimentaire puissante de 1655 m en moyenne au centre du synclinal, l'épaisseur du tertiaire et du quaternaire n'y est pas incluse, est formée d'une succession de formations lithologiques ; de la formation de Teniet El Klakh à la formation de Tiout.

La localisation en profondeur des aquifères est déterminée par la succession verticale en alternance ;

- des aquifères à perméabilités très faibles avec une porosité mixte et une porosité de fissures au niveau des bancs calcaires,
- des aquifères à perméabilité faibles avec une porosité mixte et une porosité d'interstices, et
- des aquifères à perméabilité moyenne avec une porosité mixte.

A défaut d'un nombre suffisant de logs litho-stratigraphiques des forages et de leurs paramètres hydrodynamiques au sein du synclinal ; nous reconstituons les épaisseurs de la colonne hydrogéologique en se basant sur les coupes de Cornet (1952) et les études géologiques réalisées au niveau du synclinal d'El Bayadh : Cornet (1952), Regagba (2006) et Boucherdoud et Bouferma (2008) et les types de perméabilité et de porosité à partir de la carte hydrogéologique interprétative de l'ANRH (2008), et de la description de la série litho-stratigraphique au sein du synclinal assez distincte de la description lithologique régionale de l'ANRH (fig. 18).

Nous distinguons, dans le synclinal d'El Bayadh les conséquences hydrogéologiques suivantes (fig. 19):

I-2.1. Aquifères à perméabilité très faible :**I-2.1.1. Formation de Teniet El Klakh :**

Représentée par des argiles verdâtres silteuses (à aspect schisteux) à intercalations de lentilles centimétriques à métriques de grès fins, bien classés et de quelques niveaux de calcaires gréseux ou micritiques dont la porosité est mixte, c'est un affleurement très localisé son épaisseur est de **30 m** au niveau du synclinal d'El Bayadh.

I-2.1.2. Formation de Teniet Ettmar :

Représenté par une alternance d'argiles verdâtres et de calcaires organogènes sombre qui présentent une porosité de fissure, l'ensemble a une épaisseur de **50 m** au Nord-Ouest de la ville d'El Bayadh (Regagba 2006).

I-2.1.3. Marno-calcaires du Valanginien :

A l'Ouest de la ville d'El Bayadh, sur le flanc nord-est du synclinal (versant Sud du Djebel El Beiod) et au Nord de la ville d'El Bayadh sur le versant Sud du Djebel Mekter cette formation est décrite par Boucherdoud et Bouferma (2008) comme suit;

- **Membre inférieur :** Cette formation est constituée par une alternance marno-calcaire où la puissance des marnes est la plus importante et interrompue par deux dalles de calcaire lumachéliques surmontés par une alternance argilo-gréseuse de 5 m d'épaisseur, ce membre du Valanginien a une épaisseur qui varie de **80 m** et **114 m** à l'Ouest et au Nord de la ville d'El Bayadh.
- **Membre supérieur :** formé essentiellement par des marnes versicolores séparées par des bancs de calcaires de dissolutions (cagneules) et par des passées blanchâtres de gypses laminaires, son épaisseur ne dépassant pas **90 m** à l'Ouest de la ville d'El Bayadh et à **100 m** au Nord de la ville d'El Bayadh.

Les niveaux calcaires de cet ensemble présentent une porosité de fissure.

I-2.1.4. Formation argilo-gréso-calcaire de l'Hauterivien:

A l'Ouest d'El Bayadh sur le flanc nord-est du synclinal (versant Sud du Djebel El Beiod) et au Nord de la ville d'El Bayadh sur le versant Sud du Djebel Mekter, ce membre supérieur de la formation de l'hauterivien est décrit par Boucherdoud et Bouferma (2008) comme suit :

Membre supérieur : débutant par une dalle de calcaire lumachélique renfermant des moules de bivalves de différentes tailles, représenté dans l'ensemble par une alternance

de marnes verdâtres (2 à 3 m) et des bancs calcaires fossilifères grise ou jaunâtre, ce membre a révélé une épaisseur assez constante de 40 m à l'Ouest d'El Bayadh et 35 m au Nord de la ville d'El Bayadh.

Avec une porosité de fissure au niveau des bancs calcaires.

I-2.2. Aquifères à perméabilité faible :

I-2.2.1. Formation de Djara :

Constituée d'une alternance de grès moyens, blanchâtres et d'argiles verdâtres et rougeâtres à intercalations de dolomies gréseuses bioclastiques d'une épaisseur à El Bayadh de 800 à 1000 m et de 340 m au Nord-Ouest de la ville d'El Bayadh.

Dans l'ensemble à dominance gréseuse présentant une porosité mixte.

I-2.2.2. Remplissage du Tertiaire :

Est de nature argilo-sableuse aggloméré en grès tendre parfois très friable. A la base et au contact du Jurassique et Crétacé et sur toute l'épaisseur ce sont des poudingues plus au moins cimentés et des cailloutis mal roulés et calibrés. Vers le haut, des concrétions annoncent fréquemment la carapace calcaire superposée.

Présentant dans l'ensemble une porosité mixte des niveaux argilo-sableux aggloméré de grès tendre et constituant la plus importante épaisseur par rapport à la carapace calcaire d'épaisseur négligeable et aux poudingues de base, de porosité de fissure qui localement peut être assez consistant et faire profiter les petits agriculteurs d'une ressource hydrique souterraine très limitée comme pour tous les niveaux calcaires de l'ensemble des formations du synclinal d'El Bayadh..

I-2.2.3. Alluvions Quaternaire :

Ce sont des limons souvent très chargés en matériel gréseux, les niveaux grossiers à graviers ou galets y sont rares, les alluvions ont des épaisseurs variables, le réseau hydrographique actuel les entaille profondément ;

Les alluvions anciennes constituent le remplissage de la dépression de la plaine d'El Bayadh. Les alluvions récentes tapissent les fonds des vallées d'oueds et ceux plus anciens qui constituent les basses et moyennes terrasses qui sont constituées d'alluvions grossières bruns-rougeâtre (matrice sableuse) avec cailloutis ou rares poudingues non calibrés et mal roulés.

Dans l'ensemble ce quaternaire présente une porosité d'interstice.

I-2.3. Aquifères à perméabilité moyenne :

I-2.3.1. Formation d'Aïssa:

Des grès massifs, durs plus régulièrement stratifiés et fortement patinés de noir et constituent les reliefs les plus énergiques de la région d'El Bayadh qui dominent le synclinal d'El Bayadh, au niveau de Djebel El Beiod, d'une épaisseur de 500 à 600 m (Cornet 1952).

A l'Ouest de la ville d'El Bayadh sur le flanc nord-est du synclinal, et au Nord de la ville sur le versant sud du Djebel Mekter, constituée dans l'ensemble et pour la plus importante épaisseur par des grès massifs, et une alternance de grès chenalisés et de fines passées argileuses, avec une épaisseur de 350 à 370 m (Boucherdoud et Bouferma 2008).

Dans l'ensemble ces grès présentent une porosité d'interstice.

I-2.3.2. Formation argilo-gréso-calcaire de l' Hauterivien:

A l'Ouest de la ville d'El Bayadh sur le flanc nord-est du synclinal (versant sud du Djebel El Beiod) et au Nord de la ville d'El Bayadh sur le versant sud du Djebel Mekter, ce membre inférieur est décrit par Boucherdoud et Bouferma (2008) comme suit :

- **Membre inférieur** : est formé par des grès chenalisés (5 à 10 m) de couleur claire, plus au moins tendres à litages obliques et horizontales. Les bancs gréseux massifs deviennent par endroit stratifiés, séparés par des niveaux argileux rougeâtres (1 à 2 m) où s'intercalent de minces lits de gypses vers la fin du membre, l'épaisseur de ce membre est très variable 120 m à l'Ouest de la ville d'El Bayadh et 40 m au Nord de la ville d'El Bayadh.

Dans l'ensemble ce membre présente une porosité mixte.

I-2.3.3. Formation de Tiout :

C'est une série continentale de grès tendres à dragées de quartz admettant de fines interstratifications d'argiles et des intercalations de petits niveaux de calcaires dolomitiques vers le sommet, alternant avec des argiles à fines passées gréseuses. Erodée au centre du synclinal d'El Bayadh, cette formation ne dépasse pas les 70 m (coupe Cornet 1952). A dominance gréseuse la formation a une porosité mixte.

Les bancs calcaires qui s'intercalent dans les formations marno-calcaires ou argilo-calcaires constituent des niveaux à porosités de fissures offrant une ressource hydrique souterraine très limitée et discontinue pour les agriculteurs propriétaires des petites parcelles de terrains.

Formations	Description	Eps.	Figurés lithostratigraphique	Porosité et perméabilité des formations du synclinal d'El Bayadh
	Alluvions A, q Tertiaire cnt. Tc			Por. d'interstices/P. faible
Fr. Tiout	grès	70 m		Por. mixte/ P. moyenne
Fr. Tiloula	marno- calcaire	35 à 40m		Por. fissures nvx calcaires/ P. très faible
	grès	40 à 120 m		Por. mixte/ P. moyenne
	marno- calcaire Marnes versicolores, bancs de calcaires jaunâtre et passages de gypses laminaires	90 à 100m		Por. fissures nvx calcaires/ P. très faible
	marno- calcaire alternance marno-calcaire interrompue par deux dalles de calcaires lumachéliques, surmontés par une alternance argilo-gréseuse	80 à 114m		
Fr. d 'Aïssa	Série gréseuse grès massifs, alternant avec des bancs gréseux et argiles	350 à 600 m		Por. mixte/ P. moyenne
Fr. Teniet Ettmar	argile et calcaire	50 à 150m		Por. fissures nvx calcaires/ P. très faible
Fr. de Djara	Alternance de grès et d'argiles à intercalations	340 m à 1000 m		Por. mixte/ P. Faible

I-2. Identification latérale des aquifères

L'élaboration de la carte schématique des aquifères (fig. 19) est basée sur la description de perméabilités identifiées verticalement ci-dessus, les aquifères à perméabilités faibles couvrent la plus grande surface de la zone d'étude.

Cette carte contribuera au chapitre suivant à l'octroi des côtes des affleurements géologiques et à la réalisation des cartes de vulnérabilités

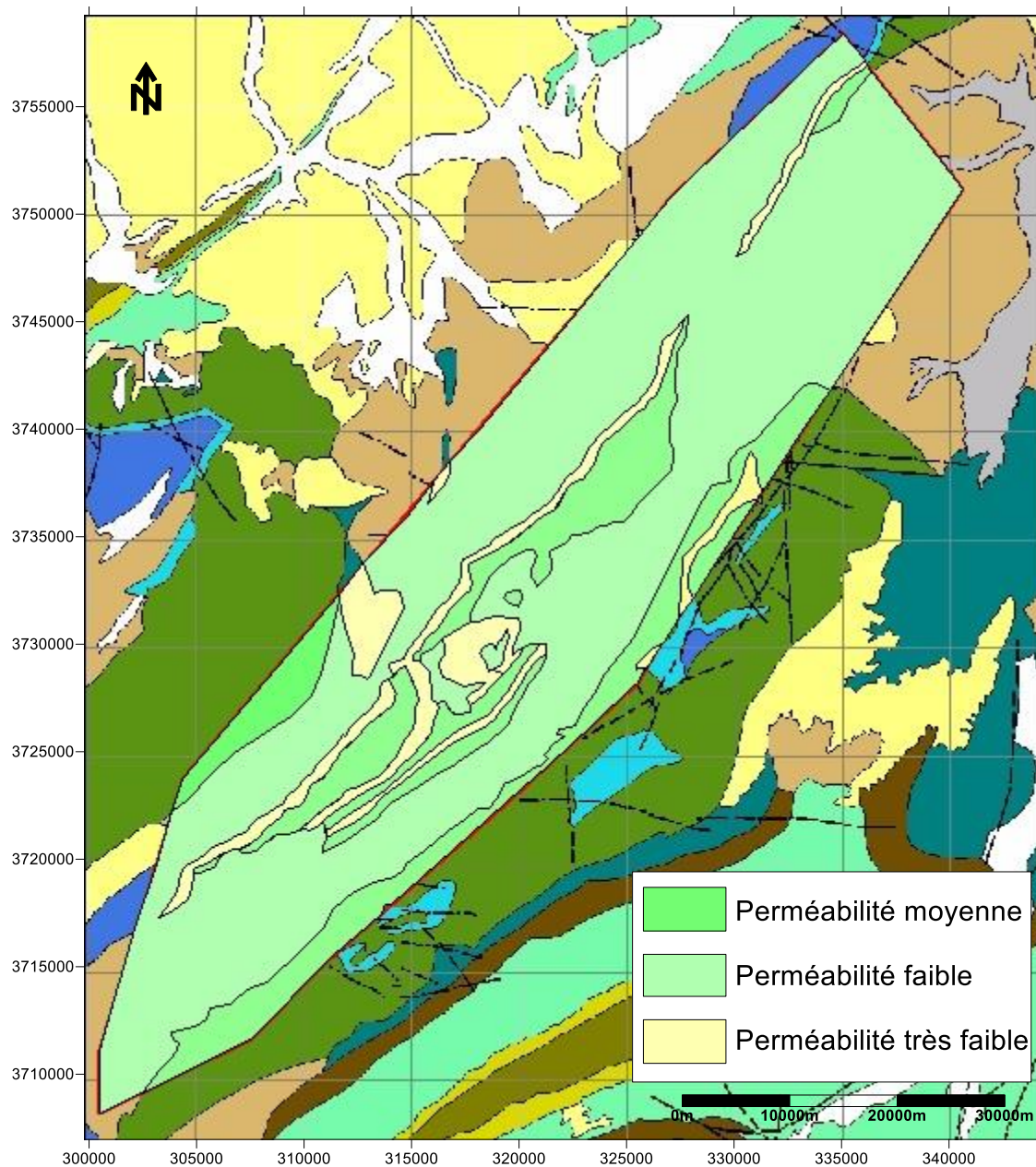


Figure 19 : Carte schématique des aquifères du synclinal d'El Bayadh

I-3. Identification hydrodynamique des aquifères

I-3-1. Caractéristiques hydrogéologiques des aquifères de la région d'El Bayadh :

Des essais de pompage ont été réalisés, dans la région d'El Bayadh, sur 10 forages qui captent des différentes formations (tableau 6).

Tableau 6 : Paramètres hydrodynamiques des principaux aquifères de la région d'El Bayadh

Nom du forage	X UTM	Y UTM	Formations exploitées	Profondeur (m)	T (m ² /s)	Equations utilisées	Q _{exp} (l/s)	Source
Rehab	328128	3761259	Barrémo-Apto-Albien	150	5 10 ⁻³	Jacob	28	Géowater 2012
Krekda	308789	3693768	Barrémo-Apto-Albien	325	3,8 10 ⁻²	Jacob	52	Géowater 2012
Thenia02	335965	3715132	Barrémo-Apto-Albien	300	0,19 10 ⁻³ à 0,39 10 ⁻²	Deglee Logan	23	Géowater 2008
El Bayadh 3	323064,23	3734365,57	Infra-crétacé	350	-	-	12	Rapport BulgarGéomin 1984
Ain Mekther	322561,90	3733666,89	Infra-crétacé/ Lusitanien?	600	-	-	15	Rapport BulgarGéomin 1984
Bendjerad	307904	3733249	Infra-crétacé	210	1,5 10 ⁻³	Jacob	21	Géowater 2012
Zouireg01	291914,47	3737473,51	Hauterivien gréseux?	200	1,8 10 ⁻⁴	Logan	8	Géowater 2009
El Hayette	321036.05	3725418.71	Lusitanien	200	5,6 10 ⁻²	Jacob	-	Azzaz 1992
Draa Lahmar	315180.16	3722885.64	Lusitanien	300	8,2 10 ⁻³	Jacob	-	Azzaz 1992
Ténia El Bayadh	321486.20	3725417.34	Quaternaire	200	1,3 10 ⁻³	Jacob	-	Azzaz 1992

L'analyse de ces valeurs de transmissivités, dont la fiabilité reste à vérifier, ne nous permet pas de classer les différents aquifères par ordre d'importance confirmant les perméabilités de la colonne hydrogéologique, du moins les meilleurs débits d'exploitations sont ceux des forages qui captent la formation de Tiout (Continental Intercalaire) et la formation d'Aïssa :

- L'aquifère de la formation de Tiout représente la ressource hydrique la plus importante de la région, avec une transmissivité qui varie entre 0,19 10⁻³ et 3,8 10⁻² et un débit d'exploitation jusqu'à 52 l/s.
- L'aquifère de la formation de Aïssa avec des transmissivités qui varient entre 8,2 10⁻³ et 5,6 10⁻², et représente un débit d'exploitation moyen (12 à 15 l/s) dans le synclinal d'El Bayadh.

- La formation de Djara a généralement une transmissivité qui varie entre $8.2 \cdot 10^{-3}$ et $5.6 \cdot 10^{-2}$ (m^2/s) avec des débits d'exploitations inconnus.
- Les grès de l'Hauterivien ont une faible transmissivité ($1,8 \cdot 10^{-4} m^2/s$) et un faible débit d'exploitation (8 l/s).

Localement il est difficile de se prononcer sur la productivité d'un aquifère en se basant sur l'étude comparative avec un minimum de données sur la transmissivité quel que soit la méthode adoptée d'interprétation de la courbe du pompage d'essai de longue durée sachant que les forages exécutés traversent rarement l'épaisseur totale de l'aquifère capté, et son faciès peut changer d'un endroit à un autre ; exemple des grès de la formation de Djara captés par le forage El Hayette, qui sont connues dans leur globalité constituant un aquifère à perméabilité faible procédant une ressource locale et très limitée, peuvent dans la région d'El Bayadh et par endroit être très productifs avec de bonnes valeurs de transmissivité due au faciès gréseux qui prend de l'importance par rapport aux argiles; la variation de la transmissivité d'un aquifère est due à l'hétérogénéité verticale et latérale de la structure de ce dernier.

I-3-2. Carte hydrogéologique du synclinal d'El Bayadh

La carte piézométrique du synclinal d'El Bayadh sur le fond géologique, est établie à la base des données fournies par le bureau d'étude Géo-water en 2003 de 628 points d'eau (forage et puits, voir annexe n°5) ; la carte hydrogéologique (fig. 20) montre l'existence de trois unités hydrogéologiques:

1. Unité 1 coïncide avec le bassin versant du synclinal, elle est limitée ;

Au Sud-Est par un anticlinal (Dj. Ourif, Dj. Merdoufa, Dj. Oustani et Dj. Ksel), constitués essentiellement par la formation de Aïssa qui représente une limite d'alimentation directe du remplissage tertiaire et quaternaire qui se calque à l'axe de l'anticlinal et indirecte donnant un ensemble d'émergences ; Ain Annba, Ain Sfaïa, Ain Lemhadjer, Ain Sidi Ahmed, Ain Oum Redjam qui dans la majorité des cas émergent à la faveur de l'hétérogénéité lithologique de la formation de Aïssa et celle de Teniet Ettmar de perméabilité différentes.

Au Nord-Ouest et au Sud-Ouest par deux lignes de partage des eaux.

A la limite nord-est de cette unité existe un ensemble de sources ; Ain Laredj, Ain Lirhene, Ain Djellouli Cheikh représentant les exutoires principaux de cette unité.

Au niveau de la ville d'El Bayadh émergent quelques sources ; Ain Lirhen, Ouinet Ellouh, Ain Mouilah, Ain Ouled Yahia, les exutoires de la partie sud-ouest de cette unité émergent dans la grande majorité des cas à la faveur du contact anormale par failles de la formation des marno-calcaire du Valanginien et de la formation sous-jacente plus perméable (formation de Aïssa), exemple d'Ain Defla.

Une dépression piézométrique s'individualise au centre de l'unité par effet de pompage d'un nombre important de puits et de forages.

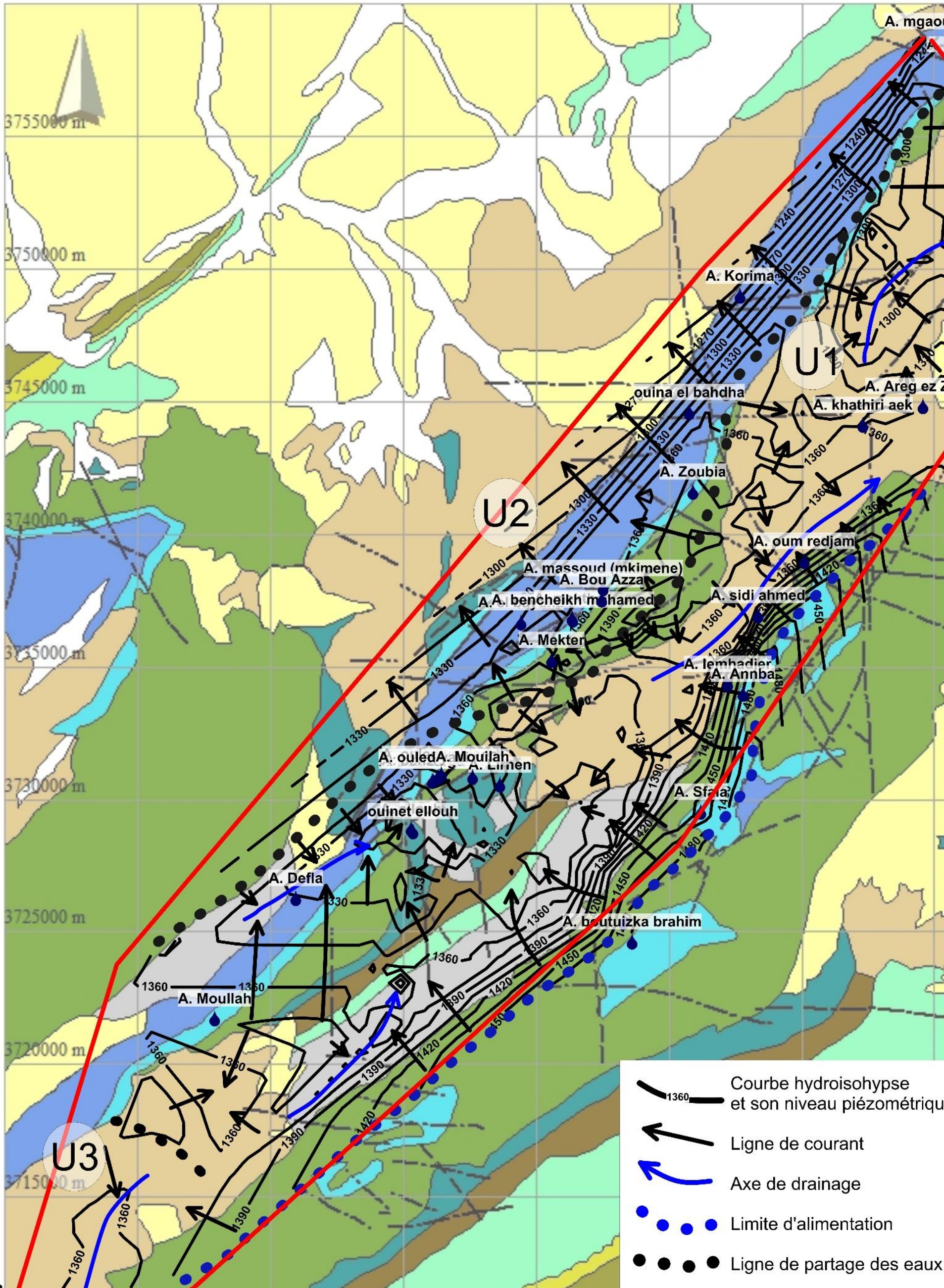
Le resserrement des isohyètes le long de la limite d'alimentation est due au changement de perméabilité entre les grès de la formation de Aïssa et la formation des marno-calcaires du Valanginien recouvertes par le Tertiaire et le Quaternaire.






L'axe principal de l'écoulement a une direction sud-ouest nord-est et coïncide avec l'axe du synclinal.

2. Unité 2 occupe le flanc nord-ouest de l'anticlinal (Zouireg, Dj Mekter, Dj Golita). Elle est limitée au Sud-Est par la ligne de partage des eaux qui se calque avec l'axe de l'anticlinal et se fond vers le Nord-Ouest avec la flexure nord atlasique ; un ensemble de sources ; Ain Mekter, Ain Ben Cheikh Mahamed, Ain Bou Azza, Ain Massoud, Ain Zoubia, Ouina El Bahdha, Ain Korima et Ain Defla ; émergent dans la plus part du temps à la faveur d'hétérogénéité lithologique entre la formation de Aïssa et celle de Teniet Ettmar de perméabilité différentes et rarement à la faveur du contact anormal par la flexure entre la formation de Djara et la formation de Aïssa.

Le sens général et la direction moyenne de l'écoulement dans cette unité se fait du Sud-Est vers le Nord-Ouest, alimentant les formations du Chott Chergui.

3. Unité 3 occupe la partie sud-ouest de la zone d'étude, elle est limitée au nord-est par une ligne de partage des eaux. L'axe principal de l'écoulement se fait du Nord-Est vers le Sud-Ouest où les sources (Ain Oum Zelfane, Ouinet Kaddour), représentent les exutoires principaux de cette unité.



-  Courbe hydroisohypse et son niveau piézométrique
-  Ligne de courant
-  Axe de drainage
-  Limite d'alimentation
-  Ligne de partage des eaux

Nous avons réalisés six coupes hydrogéologiques le long du synclinal (figures 21, 22, 23, 24, 25 et 26), dans le but de configurer deux contextes représentatifs d'émergence :

a- Les sources qui émergent à cause d'un changement de perméabilité des formations et sont généralement sur les piémonts des Djebels :

- Ain Annba et Ain Bou Azza

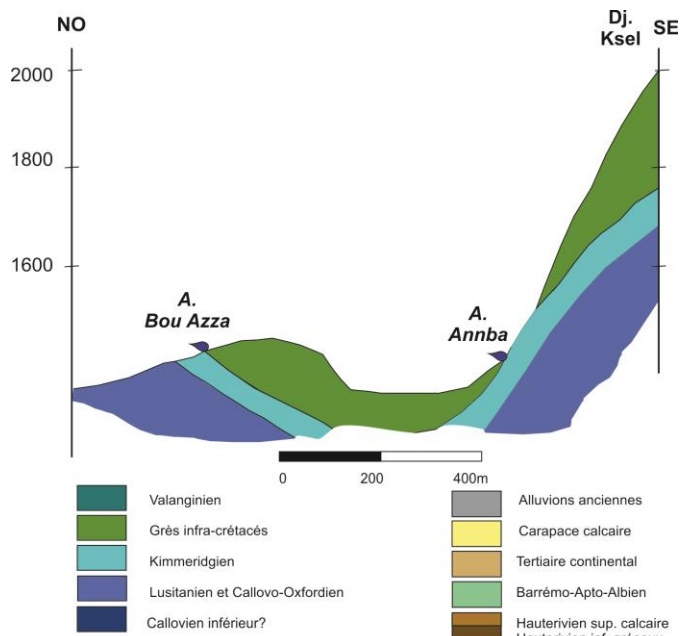


Figure 21 : Contexte d'émergence des sources Annba et Bou Azza

- Ain Sfaïa et Ain Mekter :

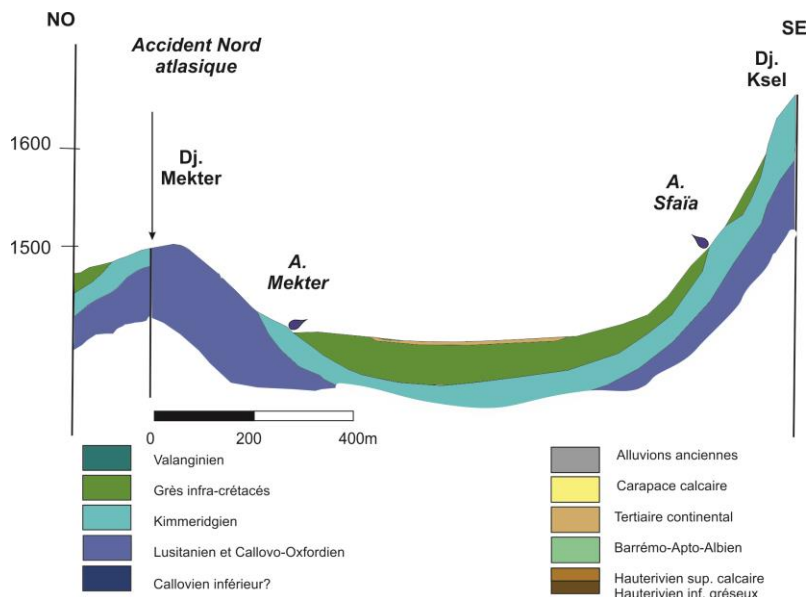


Figure 22 : Contexte d'émergence des sources Ain Sfaïa et Ain Mekter

- Ain Moullah :

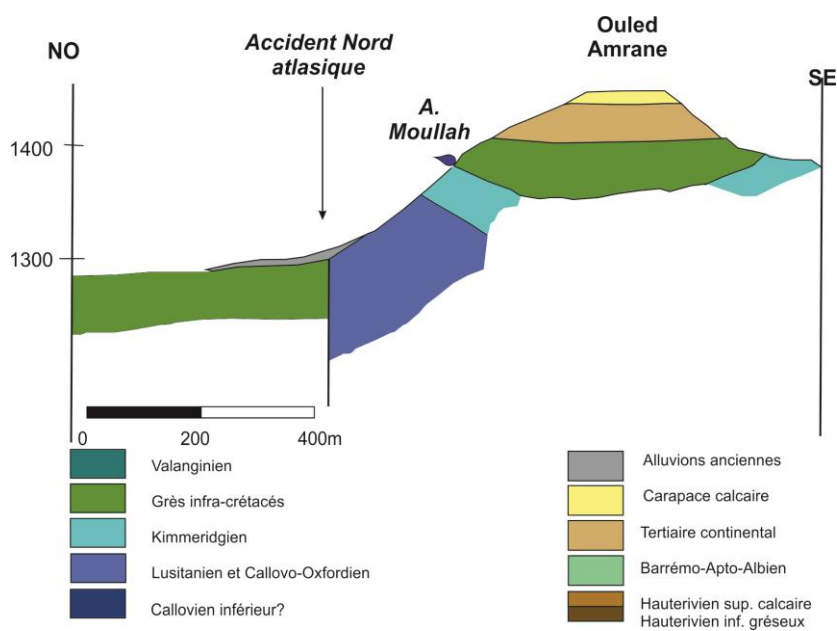


Figure 23 : Contexte d'émergence d'Ain Moullah

b- Les sources qui émergent à la faveur des failles ;

- Ain Laredj

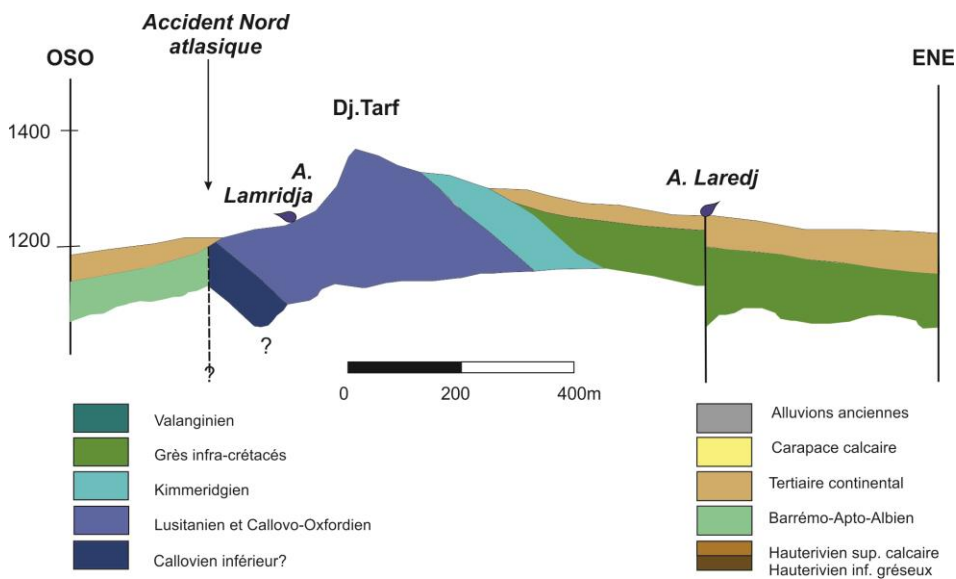


Figure 24 : Contexte d'émergence d'Ain Laredj

- Ain Mouilah

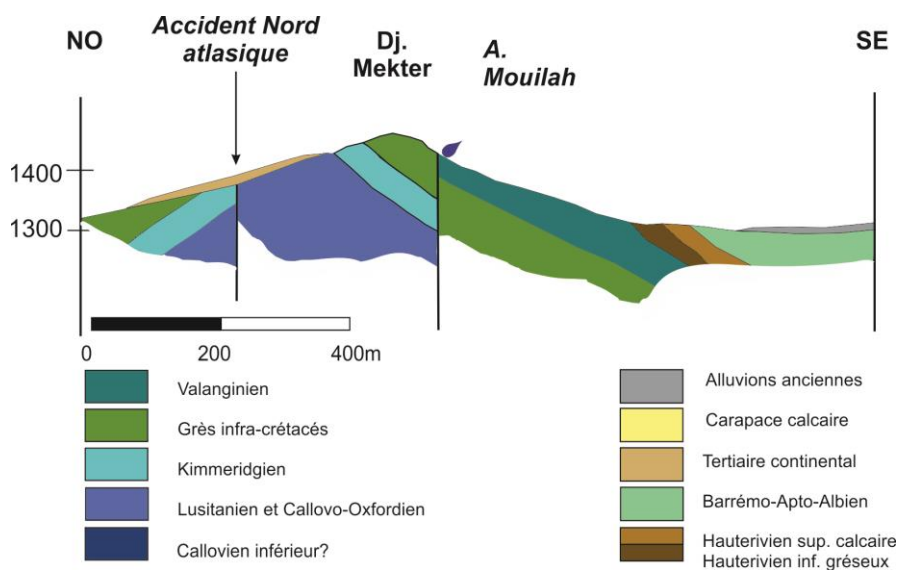


Figure 25 : Contexte d'émergence d'Ain Mouilah

- Ain Defla

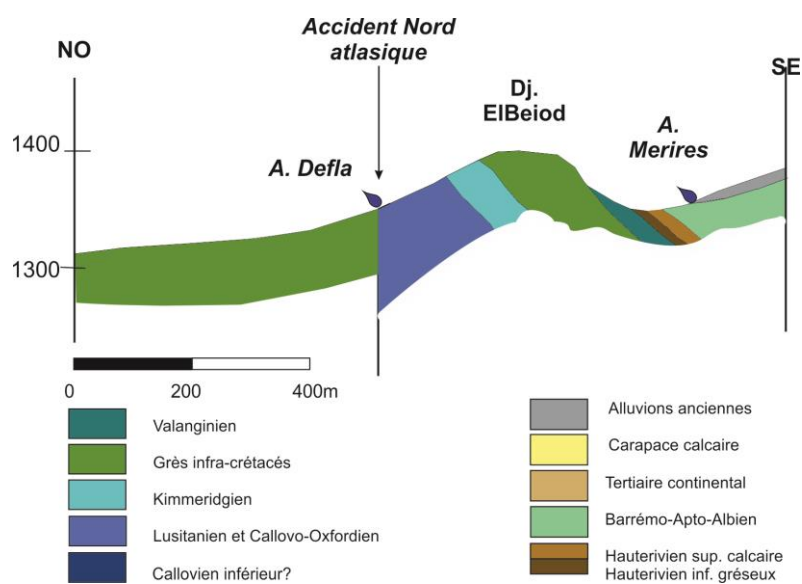


Figure 26 : Contexte d'émergence d'Ain Defla

I-4. Relation entre le réseau de faille et le réseau hydrographique dans la région d'El Bayadh

Les périodes pluvieuses connues dans les régions arides se produisent généralement brèves et brutales avec des ruissèlements intensifs consécutifs, la rareté de l'eau a pour corollaire la médiocrité des couvertures végétales et pédologiques.

Sur les versants en pente tombant sur des espaces peu protégés par la couverture végétale et des sols squelettiques, engendrent le plus souvent des écoulements torrentiels plutôt dévastateurs sur le plan érosif (érosion mécanique) optimisant l'alimentation des aquifères par infiltration concentrée et rapide dans les fractures plus ou moins ouvertes des grès et des calcaires durs et massifs et diffuse sur le reste de la surface en pente.

Des crues et des inondations le long des oueds dans les dépressions à fond plats à leurs tours peu protégé par une couverture végétale, optimisant à leurs tours l'alimentation des aquifères par infiltration concentrée et plus ou moins lente selon la consistance du sol et selon la coïncidence de l'oued avec la faille lorsqu'elle n'est pas obstruée, possible rapide lorsque le sol est inexistant et la fracture ouverte et par infiltration diffuse sur le reste de la surface plate; le paramètre temps de ruissèlement sur une pente ou sur un plan horizontal a un effet prépondérant dans l'infiltration;

Un débit maximal estimé pour une crue centennale d'oued Deffa (partie nord du synclinal d'El Bayadh) pour un projet d'aménagement de ce dernier est de 450 m³/s (HYBACO 2013).

Le but de la visualisation de la relation entre le réseau hydrographique et le réseau de faille est de mettre en évidence les zones de perte qui favorisent l'infiltration concentré rapide ou lente des eaux de pluies dans le sol lorsque les oueds et thalwegs coïncident avec les failles et donc un fort potentiel polluant; sur une longueur cumulée de faille de la région d'El Bayadh de 1465.68 km, nous avons une longueur de 365.85 km qui coïncide avec les oueds ce qui représente 25% de la longueur cumulée, et qui constituerait des zones de perte (fig. 27).

I-5. Relation entre le réseau de faille et les écoulements souterrains dans le synclinal d'El Bayadh

Les principales anomalies structurales du réservoir se traduisant dans la morphologie de la surface piézométrique, sont les variations de la section, la surface du substratum et les accidents tectoniques (Castany 1982 in El Fellah Idrissi *et al* 2016).

A défaut d'une analyse de la fracturation, nous retenons les grandes lignes de notre synthèse du cadre structural ; que les failles les plus importantes et à fort rejet, sont parallèles à l'axe général de plissement sud ouest-nord est, et de petits décrochements obliques ou

perpendiculaires aux axes principaux, de direction plus aberrante hachent les bancs, en particulier dans la région d'El Bayadh (Cornet 1952).

La superposition de la carte piézométrique avec le réseau de faille (fig. 28) montre que l'allure des isopièzes de l'ensemble de la surface cartographiée est compatible avec la structure de celui-ci. Ces isopièzes sont parallèles aux failles conjuguées de la faille Nord Atlasique de direction sud ouest-nord est et aux axes des anticlinaux bordant le synclinal ; les écoulements de la nappe leurs sont perpendiculaires, et presque parallèles aux décrochements matérialisant ainsi des écoulements vers l'axe principal du synclinal pour individualiser les quatre axes de drainages de la première unité hydrogéologique.

Les lignes isopièzes sur le flanc nord-ouest qui borde le pied nord-ouest de la chaîne Tikechkach-Zouireg (unité 2) sont parallèles à l'accident Nord Atlasique et perpendiculaires aux décrochements qui favorisent probablement les écoulements des eaux souterraines vers Chott Chergui.

L'étude comparative des écoulements souterrains et le réseau de faille montre le rôle que joue ce dernier à l'alimentation des Hautes plaines principalement à la faveur des failles conjuguées de la flexure Nord atlasique, le même système de transfert des eaux des formations aquifères de l'Atlas saharien vers la plate-forme saharienne au biais de la flexure sud atlasique a été noté par Mansour (2007).

En plus du réseau des failles décrochantes favorisant les écoulements vers l'axe principal du synclinal d'une part et les écoulements vers Chott Echergui d'autre part ; les deux axes de drainages de l'unité 1 de la carte hydrogéologique coïncident avec deux failles au centre qui est en réalité que l'interruption d'une faille majeure se superposant avec l'axe du synclinal d'El Bayadh.

Nous pouvons conclure que la circulation des eaux souterraines dans le synclinal d'El Bayadh est en étroite relation avec le réseau de faille.

L'identification des aquifères de notre zone d'étude nous a permis de conclure qu'il y a une quasi continuité verticale et latérale des formations hydrogéologiques du synclinal d'El Bayadh ; dont nous avons pu interpoler les niveaux piézométriques et la représentation d'une carte hydrogéologique.

Malgré le nombre trop insuffisant de pompage d'essai sur les forages qui ne nous a pas permis vraiment de classer définitivement les aquifères par ordre d'importance, mais par comparaison au classement effectué par l'ANRH, descriptions lithologiques des formations au sein du synclinal et avec d'autres études antérieurs sur l'Atlas saharien occidental (Mansour

2007, Rahmani 2008, Yousfi 2014) et central (Stamboul 2005), nous avons pu conclure que par ordre d'importance les grès de la formation de Aïssa d'âge jurassique supérieur, ceux de l'Hautérivien et ceux de Tiout d'âge Albien (Continental Intercalaire) constituent une ressource hydrique souterraine assez importante, sans exclure localement des transmissivité intéressantes dans les grès de la formation de Djara due à la variation latérale lithologique de cette dernière, nous concluons aussi que les bancs calcaires qui s'intercalent dans les formations marno-calcaires ou argilo-calcaires constituent des niveaux à porosités de fissures offrant une ressource hydrique souterraine très limitée et discontinue pour les agriculteurs propriétaires des petites parcelles de terrains.

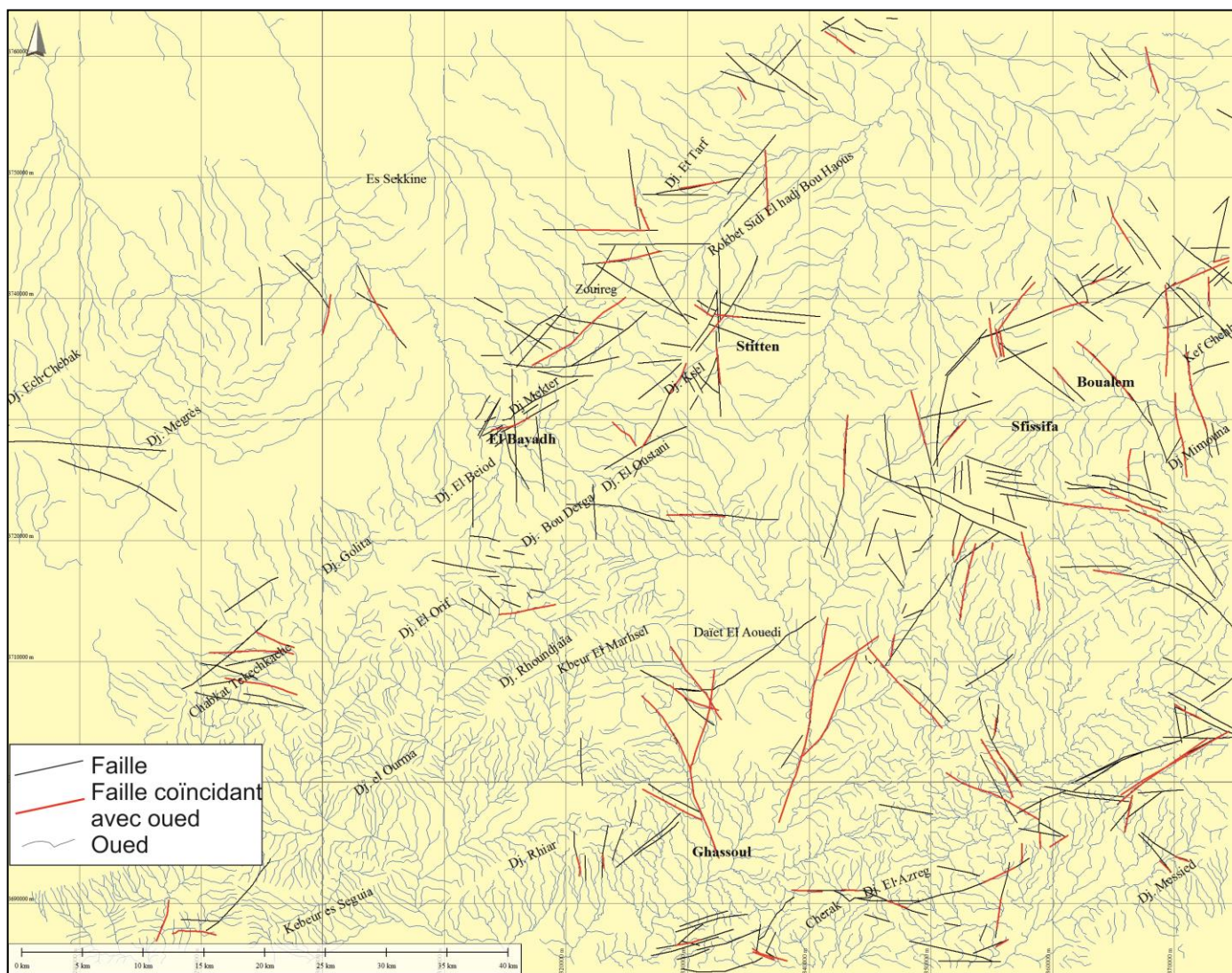


Figure 27 : Relation entre le réseau hydrographique et le réseau de faille (Cornet 1952, ANRH 2008)

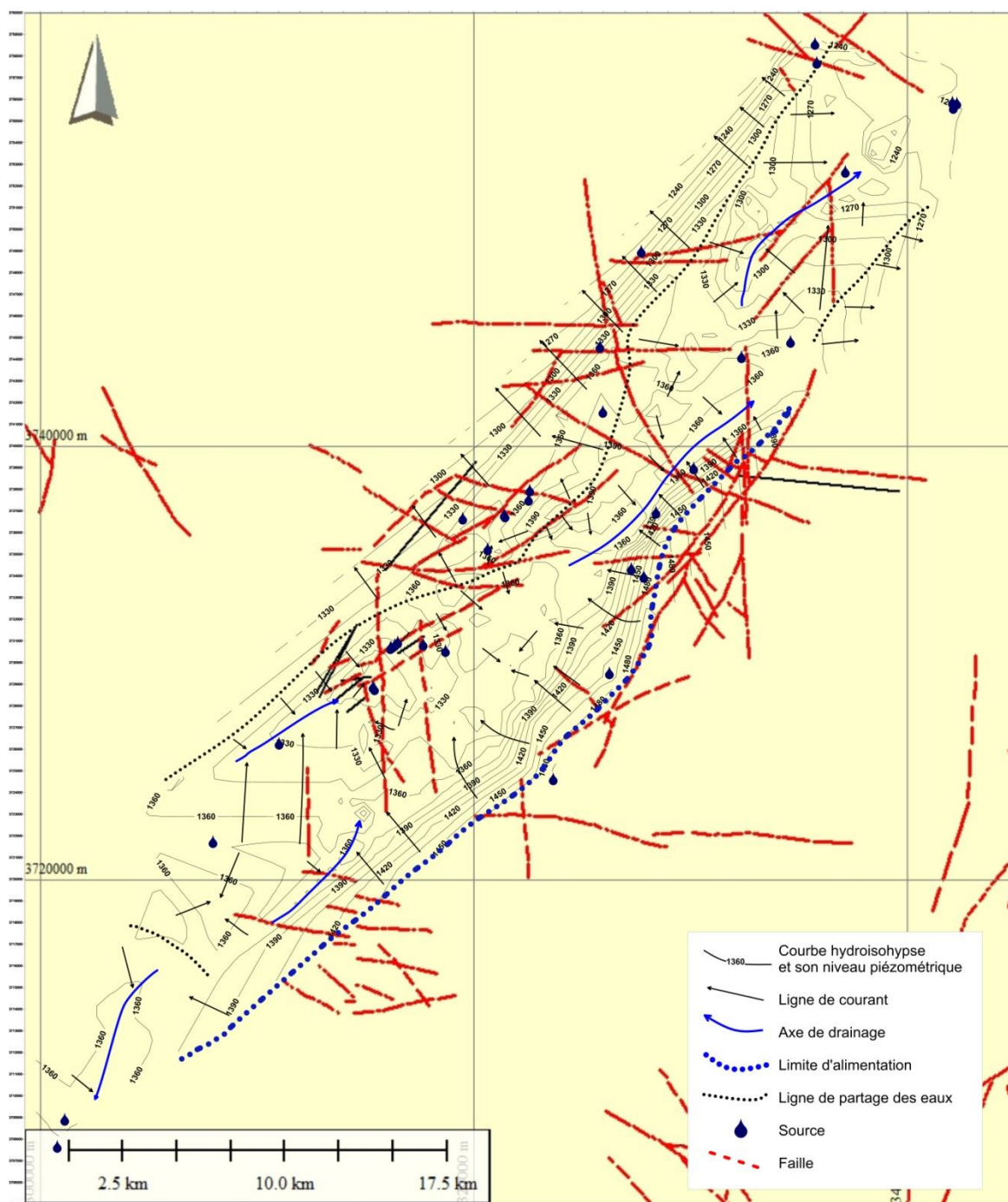


Figure 28 : Carte de relation entre l'écoulement souterrain et le réseau de failles

II- CONTEXTE HYDROCHIMIQUE ET ORIGINE DE LA MINERALISATION

Les évaporites très présentes dans les formations de la région d'El Bayadh, constituent un risque permanent de contamination et de dégradation qualitative des eaux souterraines. Afin de limiter les zones vulnérables du synclinal d'El Bayadh à cette source naturelle de contamination nous tenterons de déterminer l'origine de cette minéralisation. En revanche les études sur la qualité des eaux souterraines de la région d'El Bayadh sont rares car la grande majorité des forages et des puits sont destinés à une utilisation privée (agricole ou domestique). Une étude hydrochimique a englobé les puits, les forages et les sources captant les différents aquifères repartis sur toute la wilaya d'El Bayadh, la campagne de prélèvement s'est déroulée du 29 Juin au 14 Juillet 2008. Au total 114 points d'eau a fait l'objet de prélèvement et d'analyse au niveau du laboratoire AFAK CONTROL.

Parmi les 47 points de la région d'El Bayadh, seulement 26 représentent une analyse avec une balance ionique bonne et acceptable (voir annexe n°6). Nous nous sommes basés sur cette dernière pour représenter le contexte hydrochimique régional.

La représentation de la minéralisation de la région d'El Bayadh, basée sur les analyses physico-chimiques montre une variation de ce paramètre entre 250 et 4500 mg/l (fig. 29). L'objectif de cette étude est de visualiser la répartition spatiale et verticale de la minéralisation des eaux des différentes formations hydrogéologique afin de comprendre l'origine et les facteurs influant sur la composition hydrochimique des eaux souterraine de la région.

II-1. Analyse statistique

L'analyse en Composante Principale (ACP) peut être considérée comme une méthode de projection qui permet de visualiser (projeter) les observations depuis l'espace à p dimensions des p variables vers un espace à k dimensions ($k < p$) tel qu'un maximum d'information soit conservée. Parmi les applications de cette méthode, on citera plus particulièrement la visualisation et l'étude des corrélations entre les variables ainsi que la visualisation des observations dans un espace à deux ou trois dimensions (Mudry 1987).

II-2. Résultats

L'étude statistique a été réalisée sur une base de données formée par 26 individus (points d'eau) et 8 variables physico-chimiques : Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$, Cl^{2-} , SO_4^{2-} , HCO_3^{2-} , NO_3^{-} et SiO_2^{2-} .

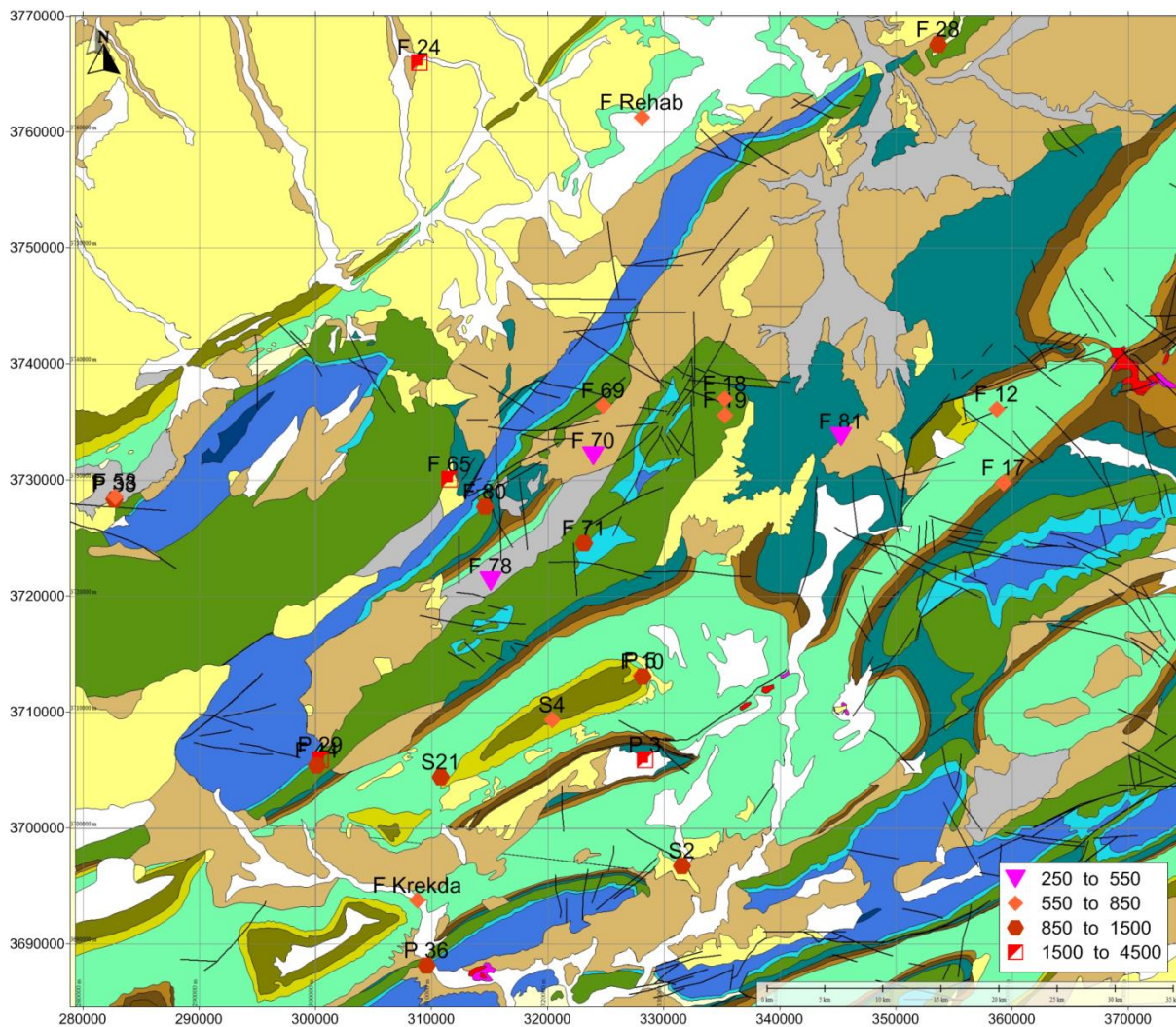


Figure 29 : Carte de la variation de la minéralisation de la région d'El Bayadh

L'analyse en composante principale (ACP) montre l'existence de deux axes principaux :

- L'axe I représente une eau chargée en magnésium, sulfate, chlorure, sodium et calcium, regroupe une eau contaminée par les argiles gypsifères et salifères.
- L'axe II représenté par les pics des bicarbonates du côté positif, regroupe une eau d'origine jurassique, et des pics de silice provenant sans doute des formations gréseuses très présentes dans la région (fig. 30).

En référence à la géologie de la région, l'analyse spatiale des points d'eau (fig. 29) et la représentation verticale de la minéralisation moyenne des eaux souterraines en fonction des formations captées (fig. 31) montrent que les diapirs triasiques et les formations cénomaniennes et valanginiennes sont à l'origine de la contamination.

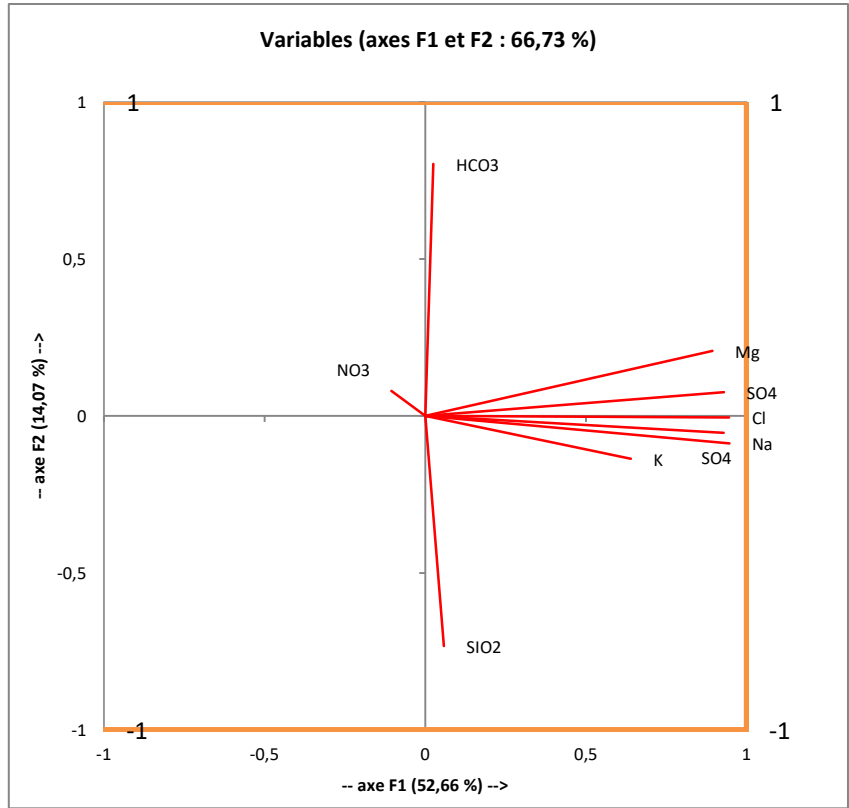


Figure 30 : Analyse en composantes principales (plan factoriel IxII) espaces des variables

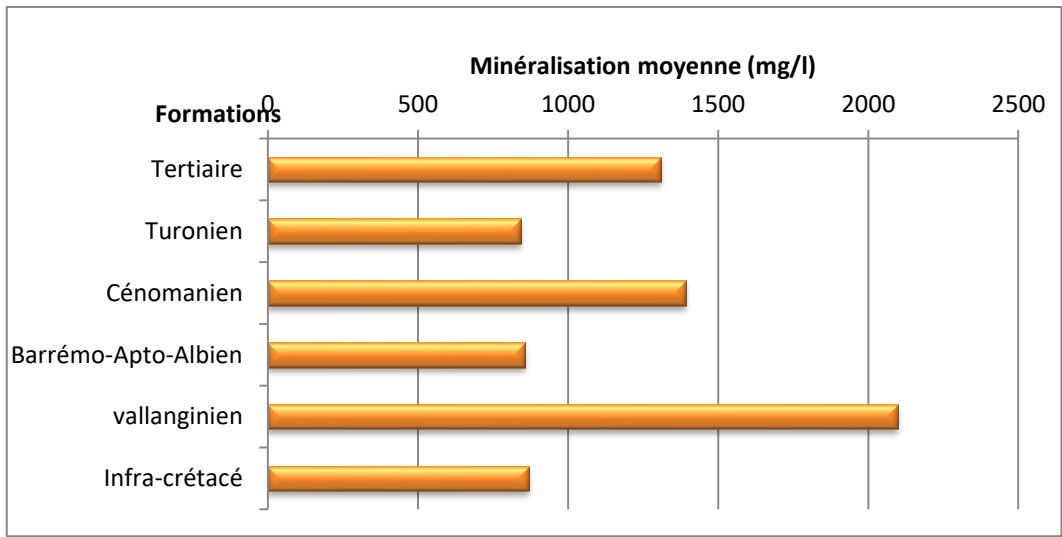


Figure 31 : Variation verticale de la minéralisation moyenne des eaux en fonction des formations

La géologie de la région d’El Bayadh représente un potentiel hydrique très important et un réservoir naturel colossale facilement exploitable mais elle présente par ailleurs de par du caractère gypseux présent dans quelques formations, une véritable menace de pollution naturelle et de contamination donc une dégradation qualitative de cette ressource.

PARTIE II

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE SIG, TELEDETECTION ET LA VULNERABILITE

I- SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

I-1. Définitions

I-2. Organisation de l'information dans le SIG

I-3. Apport du SIG aux études sur la ressource en eaux souterraine dans les zones arides

II- TELEDETECTION

II-1. Généralités et matériels

II-2. Application en géosciences

III- VULNERABILITE DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES

III-1. Méthodes d'estimation de la vulnérabilité

III-2. Estimation de la vulnérabilité dans les zones arides

CHAPITRE 2 : APPORT DU SIG ET DE LA TELEDETECTION POUR LA REALISATION DES CARTES DE VULNERABILITE A LA POLLUTION

I- EVALUATION DES RISQUES DE POLLUTION ANTHROPIQUES DANS LA REGION D'EL BAYADH

II-ELABORATION DE LA CARTE SCHEMATIQUE DE VULNERABILITE (1/200000)

II-1. Elaboration du modèle pour déterminer l'indice de vulnérabilité

II-2. Outils et moyens

II-3. Application au synclinal d'El Bayadh

II-4. Carte schématique de la vulnérabilité du synclinal d'El Bayadh

II-5. Analyse de sensibilité

III-ELABORATION DE LA CARTE OPERATIONNELLE DE LA VULNERABILITE DANS LES ZONES ARIDES ET SEMI-ARIDES (1/50 000)

III-1. Méthode et outils

III-2. Résultats et discussions

III-3. Validation des cartes de vulnérabilité

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE SIG, TELEDETECTION ET LA VULNERABILITE

Dans ce chapitre nous donnerons une description générale d'un des principaux outils de la cartographie dans le domaine de la pollution des eaux souterraines. Nous commençons par les systèmes d'information géographique, la télédétection, puis nous passons aux principes et les méthodes de la cartographie des aléas et de la vulnérabilité des ressources souterraines.

I. SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

I-1. Définitions

Les systèmes d'information géographique (SIG ou GIS en anglais) jouent un rôle important dans tous les domaines en relation avec une information géographique où la prise de décision doit être rapide et efficace : économie, santé publique, administration, sciences naturelles... L'émergence des systèmes d'information géographique résulte de la convergence entre deux évolutions : d'une part, la nécessité de disposer d'outils permettant de manipuler les aspects géographiques des données en vue de leur exploitation pour l'aide à la décision ; d'autre part, les progrès techniques, notamment en terme d'acquisition (relevés GPS, photographie satellitaire), de stockage, de transmission, de capacité de calcul et de visualisation, qui permettent de mettre en valeur la dimension géographique ou spatiale des données (Faurot 2010).

Selon l'International Standards Organization, « un SIG est un système de communication permettant de communiquer et de traiter l'information ».

Pour le FICCDC (Comité fédéral de coordination inter-agences pour la cartographie numérique-États-Unis), il s'agit d'un « système informatique de matériels, de logiciels et de processus conçus pour permettre **la collecte, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage** de données à référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion ».

Michel Didier 1990 donne la définition suivante : « Ensemble de données repérées dans l'espace structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision ».

D'une manière générale, un système est un SIG s'il offre des fonctionnalités recouvrant l'ensemble des cinq principes fondamentaux, connus sous la dénomination des « 5A » (Denègre et Salgé 2004) ; il doit permettre l'**Acquisition** des données et leur **Archivage**. Il

doit en outre permettre leur manipulation à des fins d'**Analyse spatiale**, ainsi que leur **Affichage**. La cohérence du tout est assurée par une modélisation du réel, l'**Abstraction** (consiste à élaborer les modèles de données et de traitement adaptés au problème posé) (Faurot 2010).

I-2.Organisation de l'information dans le SIG

Les données sont organisées sous formes de *couches*, qui remplissent le rôle des calques de la cartographie papier. Chaque couche rassemble des informations appartenant à une même thématique (glossaire des SIG 2013) (réseau hydrographique, topographie, points d'eau, affleurement géologiques,...etc.).

Il est primordial de distinguer deux formats d'image utilisés dans le SIG : *Raster* et *Vecteur* :

a-Images rasters : Sous cette forme, l'image (carte scannée, photo aérienne, ou image satellitaire) est représentée par une matrice à deux dimensions où chaque élément de cette matrice appelé « pixel » contient un ensemble d'informations : couleur, taille et position.

b-Images vectorielles : Dans ce cas, les images sont représentées par une description : la réalité « information géographique » est représentée par des éléments géométriques ou des objets graphiques (polygones, lignes ou points), auxquels sont attachés des données attributaires ou descriptives (nom, type, surface, largeur, valeur mesurée, etc.) structurées sous forme de table de données.

Ces deux modes sont utilisés conjointement dans un même projet, les données étant converties d'un format à l'autre selon les besoins (C.I.U.L. s. d.).

Les Systèmes d'Informations Géographiques, représentent la meilleure méthode pour résoudre les principaux problèmes dans l'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution ; en effet, ils facilitent la superposition de différentes couches à information géographique par ses cinq fonctionnalités « 5A » : originale (**Acquisition** : Fonctions de numérisation et d'importation de données), vectorielle (**Archivage** : Transfert de données de l'espace de travail en cours d'utilisation) vers l'espace d'archivage (stock), interpolée ou géo traitée (**Analyse spatiale** et **Affichage** : Analyse des données (méthodes quantitatives et statistiques) et analyse spatiale (opérateurs topologiques) et Visualiser l'information géographique (cartes, tables, documents textes ...)) afin d'élaborer le modèle final de vulnérabilité (**Abstraction** : Concevoir un modèle qui organise les données par composants

géométriques et par attributs descriptifs ainsi qu'à établir des relations entre les objets) (AGRO-PASTORALISME (s. d.)).

1-3. Apport du SIG aux études sur la ressource en eaux souterraine dans les zones arides

La gestion durable de la ressource en eaux est un sujet d'actualité qui préoccupe non seulement les gouvernements des pays pauvres mais aussi des grandes forces mondiales.

Le SIG est un outil qui facilite aux acteurs de trouver des solutions aux multiples problèmes liés à cette ressource ; gestion des risques environnementaux, augmentation de l'accessibilité à l'eau potable, suivi de la qualité de l'eau...etc. Nous pouvons citer un exemple représentatif, celui de la cartographie hydrogéologique des Monts des Ksour (Mansour 2007 et Mansour *et al* 2008) où l'utilisation du SIG a permis la mise en place de base de données hydrogéologique pour réaliser une cartographie de synthèse détaillée et une représentation graphique claire permettant de faciliter la compréhension du comportement hydrodynamique à l'échelle régionale.

II- TELEDETECTION

II-1. Généralités et matériels

II-1-1. Définitions :

Télédétection se définit comme étant l'ensemble constitué du matériel, des logiciels, des données et des ressources humaines mis en œuvre dans le processus de découverte à distance d'éléments (végétations, formations géologiques, failles...). Le mot « remote sensing » fait son apparition dans les années soixante lorsque des capteurs nouveaux viennent compléter la traditionnelle photographie aérienne. Le terme de télédétection se définissait comme suit : « Ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distances, sans contact matériel avec ceux-ci » (Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, 1988).

Ces dernières années la télédétection a vu son champ de compétence s'élargir progressivement avec des applications dans le domaine de la cartographie géologique, de la

prospection minière, mais aussi dans la surveillance des cultures et du couvert végétal. Une importante flotte de satellites d'observation de la Terre est actuellement en orbite et se charge à fournir en permanence des images pour des applications militaires et civiles.

Les techniques de la télédétection aérospatiale, qui a pour objectif d'étudier la surface de la Terre à partir des satellites utilise les propriétés du rayonnement électromagnétique émis, réfléchi ou diffusé par les corps ou surfaces que l'on étudie. Elle peut être défini comme suit « la télédétection est l'ensemble des processus qui consiste à capter et enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi. Mais plus encore, à traiter et à analyser l'information qu'il représente, afin d'ensuite faire usage de cette information ». (Centre Canadien de Télédétection).

II-1-2. Principe de la télédétection

La télédétection est le résultat de l'interaction entre trois principaux éléments qui sont : la source d'énergie, la cible et le vecteur. A cet effet l'œil humain est un excellent dispositif de télédétection car jouant le rôle de vecteur qui estime la quantité et la nature de l'énergie de la lumière visible réfléchi, produite par une source externe (soleil, projecteur). Il conduit également l'information à propos de l'environnement (cible). Le principe de la télédétection est analogue à ce celui de la vision humaine (fig. 32) :

- La cible : représente la portion de la surface terrestre qui fait l'objet de l'observation par le satellite, et dont la taille varie de quelques mètres à plusieurs milliers de kilomètres carrés ;
- La source d'énergie : représente l'élément émetteur du flux de photons (lumière / onde électromagnétique). Généralement il s'agit du soleil ou de l'énergie solaire stockée puis réémise par la cible sous forme de chaleur. On parle dans ce cas de télédétection passive car le satellite ne fait que capter le rayonnement solaire réfléchi par la cible ; alors que dans le cas de la télédétection active c'est le satellite lui-même qui devient source d'énergie en émettant une onde vers la cible pour ensuite mesurer l'écho, c'est le cas de la technologie RADAR.
- Le vecteur ou encore plateforme de télédétection qui mesure l'énergie réfléchi par la cible, un émetteur renvoie l'image sur Terre vers des systèmes de collection et d'analyse des données. Un avion ou un satellite peuvent être des vecteurs et ils dominent la cible de quelques centaines de mètre à 36000 Km.

La figure 32 illustre les différentes étapes qui couvrent le processus de la télédétection et qui relie ses trois éléments clés :

- Rayonnement provenant d'une source d'énergie (1) ou d'illumination de la cible.
- Ce dernier interagit avec l'atmosphère au cours de son trajet mais aussi entre la source et la cible.
- Lorsque le rayonnement atteint la cible (2), ce dernier interagit avec la surface de la cible. Les caractéristiques du rayonnement (fréquence du spectre électromagnétique) ainsi que les propriétés de la cible confèrent à celle-ci une signature spectrale (une espèce d'empreinte digitale).
- La cible, en fonction de sa nature et celle du rayonnement, émet une énergie, cette dernière est captée à distance par le capteur embarqué à bord d'un satellite ou un avion (3) pour ensuite être enregistrée sous format numérique.
- L'information sera par la suite transmise numériquement à une station de réception. De là, l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).
- L'image est par la suite analysée (4) et interprétée (5) pour en extraire l'information voulu sur la cible.

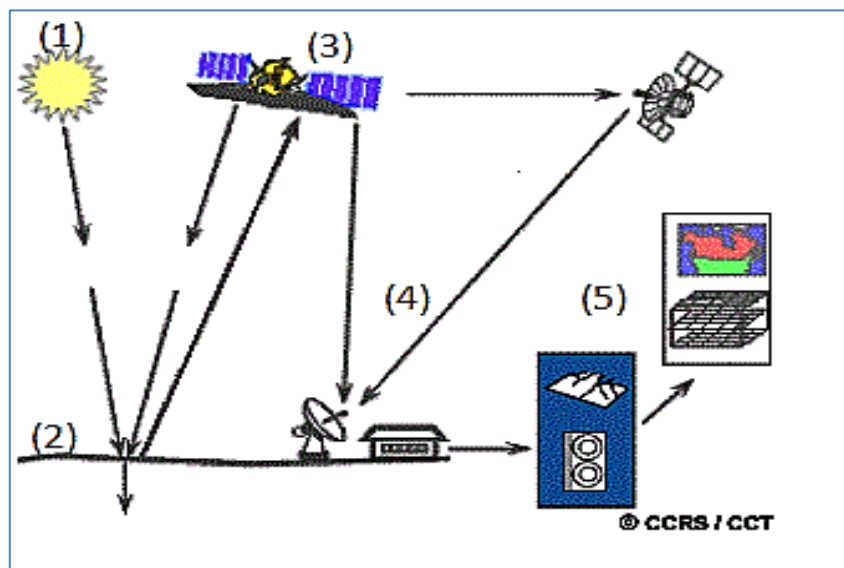


Figure 32: Principales étapes de la télédétection (Centre Canadien de Télédétection)

II-2. Application en géosciences

La télédétection s'applique à toutes les disciplines qui nécessitent d'appréhender la répartition spatiale d'un phénomène, soit pour déterminer un état à un instant donné, soit pour suivre une évolution plus au moins rapide d'un phénomène (Foin 1985).

Le domaine de l'application de la télédétection reste encore l'étude atmosphérique (météorologie et climatologie) dont le principal but y est d'assurer le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la couverture nuageuse, les mesures de température, de vapeur d'eau et de précipitations.

La télédétection est également utilisée en océanographie et ressources marines avec notamment la possibilité d'analyser la couleur de l'océan, de faire des études sur la dynamique et les caractéristiques de ce dernier (températures et altitude de surface, vagues et vents, turbidité des côtes...). En glaciologie, la télédétection permet la surveillance des icebergs et glaciers.

Sur la terre ferme, la télédétection dispose d'un important champ d'application. Ces applications vont de l'agriculture (rendements des cultures, réponses de la végétation à certaines contraintes environnementales, ..), foresterie (Cartographie forestière, estimation de certaines caractéristiques dendrométriques des peuplements forestiers, défoliation et état sanitaire, ...) et hydrologie (spatialisation de l'intensité des pluies, couverture végétale, ...), à l'urbanisme et l'aménagement (cartographie de l'occupation du sol, ...) , cartographie régulière et thématique, Géologie (reconnaissance de la nature pétrographique des surfaces dépourvues de couverture végétale, suivre la dérive des continents, les anomalies thermiques liées aux zones tectoniques..), prospection minière, géomorphologie et structurale (identification des réseaux de failles et donc la détermination des orientations préférentielles de rupture) et risques naturels (dresser des "cartes des risques" pour certaines régions menacées par les cyclones, séismes, volcans, mouvements de terrains, sécheresse,..).

En géologie et géomorphologie, la télédétection est une discipline de cartographie en plein développement. Ainsi, la cartographie géologique, qui cherche à identifier et décrire les différents types de roche dans une région donnée puis à la mise en carte des données géologiques recueillies sur le terrain, est passée de son aspect classique basé uniquement sur des missions de terrain et les photos aériennes, ce qui s'avère être un travail long et complexe ; à un nouvel aspect (images optimisées par l'application de tous les traitements numériques, fondée sur leur sélection en mode interactif, la numérisation..) facilitant la confection de telles cartes et la mise à jour des données cartographiques.

III. VULNERABILITE DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES

La vulnérabilité d'un aquifère est la possibilité qu'a un contaminant de percoler et de diffuser depuis la surface jusqu'au réservoir d'eau dans des conditions naturelles. Deux termes de vulnérabilité s'identifient :

- **Vulnérabilité intrinsèque** : ce terme est utilisé pour représenter les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques naturelles qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la contamination par les activités humaines.
- **Vulnérabilité spécifique** : ce terme est utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un contaminant particulier ou à un groupe de contaminants. Elle prend en compte les propriétés des contaminants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque (Muet *et al* 2011).

II-1. Méthodes d'estimation de la vulnérabilité

Trois approches d'estimation de la vulnérabilité sont adoptées par les scientifiques (NRC, 1993) : subjective, physique et statistique. La méthode la plus populaire est la méthode subjective basée sur l'évaluation subjective, la superposition et l'indice (cotes) des facteurs hydrogéologiques individuels. Les méthodes physiques sont basées sur la simulation des processus physiques. La troisième approche est la méthode statistique (Focazio *et al* 2002, Højberg *et al* 2006, Sorichetta 2010) pour tenter de prévoir la concentration des contaminants ou la probabilité de contamination basant sur la corrélation entre les propriétés de l'aquifère et les sources de contamination (FOOTPRINT 2006-2009) (Filippini *et al* 2013). Le tableau n°7 en annexe représente les différentes méthodes subjectives, leurs auteurs, leurs principes et leurs données de bases.

Point de vue échelle de la cartographie de la vulnérabilité, on peut répertorier quatre classes selon le système établi par Vrba et Zaporozec (1994) :

- Les cartes générales d'une échelle de 1/500 000 et plus qui sont des cartes synthétiques dont les détails sont perdus. Ce sont des atlas servant pour la gestion du territoire à l'échelle de protection nationale ou internationale.
- Les cartes schématiques d'échelle 1/100 000 à 1/500 000 qui sont des cartes d'estimation des problèmes de contamination diffuses dont les détails sont aussi perdus. Ce sont des cartes servant à la gestion et à l'aménagement du territoire à

l'échelle de protection régionale. L'estimation à l'échelle régionale peut se faire avec une quantité réduite d'information.

- Les cartes opérationnelles d'échelle 1/25 000 à 1/100 000 qui sont des cartes d'aide à la détermination de programmes de protection des eaux souterraines. Ce sont des cartes analytiques qui peuvent servir à l'évaluation de la vulnérabilité spécifique au parcours d'un contaminant. Cette cartographie nécessite des informations détaillées.
- Les cartes spécifiques d'échelle 1/25 000 ou moins qui sont des cartes d'aide à la mise en place de programmes de protection des eaux souterraines, des puits ou des sources. Ce sont des cartes de vulnérabilité spécifiques à un site.

Dans le présent travail, nous nous intéressons plus aux cartes de types schématiques à l'échelle de 1/200 000 et opérationnelles à l'échelle de 1/50 000 dans lesquelles rentrent les méthodes de vulnérabilité intrinsèques.

II-2. Estimation de la vulnérabilité dans les zones arides

Les zones sèches occupent 41,2% de la superficie de la terre (UNDD 2005), dont 7% arides et 20% semi-aride (CNULD 2011). Ces zones sont de plus en plus peuplées, à cause des exploitations minières, pétrolières et agricoles. Les ressources en eau de surface rares, font des eaux souterraines la principale source d'eau potable, pour l'exploitation industrielle et agricole. Par conséquent, les établissements humains peuvent se regrouper autour de ces sources, qui présentent une réelle menace ; la surexploitation et la pollution sont considérées comme une détérioration irréversible (Foster et Chilton 2003), de sorte que la protection est cruciale.

Les facteurs physiques et hydrogéologiques dans les zones arides et semi-arides ; couverture rarement végétative, la porosité et la faible épaisseur du sol, les inondations torrentielles, perméabilité d'interstice et de fissures,...rendent individuellement ou tous ensemble les aquifères sensibles à la pollution. L'évaluation de la vulnérabilité peut être la première étape vers la protection et le développement durable de cette ressource. Heureusement, beaucoup de méthodes sont développées pour évaluer les risques et la vulnérabilité à la pollution, non seulement pour les ressources en eau souterraine, mais aussi pour le contexte large des systèmes socio-environnementaux touchés par les changements environnementaux mondiaux (Eakin et Luers 2006). Dans les zones arides et semi-arides, les méthodes utilisées pour la cartographie de la vulnérabilité sont limitées en nombre (tableau 7) et peuvent avoir besoin d'une quantité considérable de paramètres, généralement discontinus dans le temps et dans

l'espace. Dans le présent travail, nous essayerons de mettre en évidence les paramètres de risques (sol peu développé, inondation torrentielle, porosité, perméabilité...) et d'intégrer différents facteurs (lithologie, zones de pertes, profondeur de la nappe, recharge...) qui décrivent le système hydrogéologique dans ces zones, en utilisant un système d'information géographique.

Tableau 7: Exemples de méthodes de vulnérabilité utilisés dans la zone semi-aride et aride

Méthodes utilisées	Pays et région
DRASTIC (Aller <i>et al</i> 1987)	Algérie, Tunisie, États-Unis, le Yémen, la Jordanie, la Turquie
SINTACS (Civita et De Maio 2000)	Algérie
GOD (Foster 1987)	Algérie
PPiIK (Tayebi <i>et al</i> 2010)	Maroc
TCR (Amharref <i>et al</i> 2001)	Maroc
PI (Goldscheider <i>et al</i> 2000)	Jordanie, Palestine
GLA (Hölting 1995)	Jordanie
DRAV-modèle (Jinlong Zhou <i>et al</i> 2009)	Chine

**CHAPITRE 2 : APPORT DU SIG ET DE LA TELEDETECTION POUR LA
REALISATION DES CARTES DE VULNERABILITE A LA POLLUTION DU
SYNCLINAL D'EL BAYADH**

**I- EVALUATION DES RISQUES DE POLLUTION ANTHROPIQUES DANS LA
REGION D'EL BAYADH**

Le tableau 8 mentionne les plus importantes sources de pollution dans la région d'El Bayadh.

La principale source d'aléas dans la région d'El Bayadh est les eaux usées domestiques et les décharges publiques, sans négliger les déchets industriels et les rejets organiques (huiles usagées) qui présentent une véritable source des métaux lourds. L'objectif de cette étude de mettre en évidence les aires les plus vulnérables afin d'éviter la toute infrastructure à rejet polluant.

Tableau 8 : Sources de pollution dans la région d'El Bayadh (Géowater 2003, HYBACO 2013)

Polluants	XUTM min	YUTM min	XUTM max	YUTM max
Eaux usées domestiques	315391,15	3728127,97	318996,66	3731434,05
Eaux usées domestiques	309389,82	3722913,70	315561,67	3729002,88
Eaux usées domestiques	310192,19	3721634,65	321549,06	3730069,09
Eaux usées domestiques	309730,68	3722440,16	320606,69	3730305,75
Eaux usées domestiques & décharge publique	300856,72	3707115,29	334054,90	3742955,76
Eaux usées domestiques & décharge publique	294312,94	3708092,15	314922,30	3729980,46
Eaux usées domestiques & décharge publique	304579,98	3721151,38	339826,53	3761161,62
Eaux usées domestiques	299778,94	3712816,54	311170,44	3722535,53
Eaux usées domestiques	310247,68	3719253,17	324687,62	3731480,47
Eaux usées domestiques	315194,96	3727886,68	316795,59	3730413,07
Eaux usées domestiques	316716,55	3729556,37	342178,36	3758884,24
Déchets inertes, assimilés et emballages, Eaux usées, Huiles usagées	323900		3724000	
Déchets inertes, assimilés et emballages, Eaux usées, Huiles usagées	318571,58		3728732,85	

Quelques sources de pollutions recensées durant notre stage de terrain (avec la position de la prise des photos) (fig. 33-37) :



Figure 33 : Fuite d'eau usée à partir du canal au niveau de l'oued Deffa

($X_{UTM}=315\ 635.27$, $Y_{UTM}=3\ 728\ 942.11$ $Z=1355m$)



Figure 34 : Rejet d'eau usée domestique au niveau de l'oued Deffa

($X_{UTM}=315\ 635.27$, $Y_{UTM}=3\ 728\ 942.11$ Z= 1355m)



Figure 35 : Rejet d'eau usée domestique au niveau d'un affluent d'oued Deffa

($X_{UTM}=314\ 426.83$, $Y_{UTM}=3\ 729\ 847.00$)



Figure 36: Ancienne décharge

(X_{UTM}=317 465.72, Y_{UTM}=3 732 719.67, Z=1444m)

Figure 37 : Nouvelle décharge

(X1=316 377.90, Y1=3 740 811.66 ; X2=315 217.20, Y2=3 740 746.44; X3=315 310.62, Y3=3 741 120.71; X4=314 936.62,
Y4=3 741 226.70)

II- ELABORATION DE LA CARTE SCHEMATIQUE DE VULNERABILITE DANS LES ZONES ARIDES ET SEMI-ARIDES

II-1. Elaboration du modèle pour déterminer l'indice de vulnérabilité

Diverses méthodes ont été développées pour évaluer la sensibilité des eaux souterraines à des sources de pollution, beaucoup d'entre elles utilisent les principaux facteurs contrôlant la vulnérabilité: la recharge, le sol, la zone non saturée et la zone saturée (Vrba et Civita 1994). La vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines à des contaminants prend en considération

les caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques d'une zone (Adams B. *et al.* 2003) (fig. 38 a).

L'objectif principal de ce travail est de déterminer les principaux facteurs impliquant la sensibilité des eaux souterraines dans les zones arides et semi-arides. La synthèse d'un grand nombre de méthodes d'estimation de la vulnérabilité intrinsèque nous a permis de mettre en évidence une nouvelle méthode basée sur quatre facteurs responsables à la fragilité des systèmes hydrogéologiques dans les zones arides et semi-arides: lithologie, profondeur de la surface de la nappe d'eau, conditions d'infiltration et pluie efficace (fig. 38 b) et d'élaborer un modèle de vulnérabilité schématique des eaux souterraines établie par multiplication des cotes de ces facteurs ; la figure 39 représente les étapes suivies pour la réalisation du modèle de vulnérabilité en fonction des 5A du SIG :

- Abstraction ; modélisation de l'information, ou encore digitalisation.
- Acquisition ; récupérer l'information et alimenter le système en données.
- Archivage ; stocker les données de façon à les retrouver et les interroger facilement.
- Analyse ; réponses aux requêtes, cœur même du SIG.
- Affichage ; restitution graphique.

II-1.1.Lithologie

La perméabilité est l'un des principaux paramètres de l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines (fig. 38 b). Elle est reliée directement aux caractéristiques lithologiques. Une application comparative de quatre méthodes (COP, DRASTIC, GOD et AVI) confirme que les paramètres relatifs à la lithologie sont les plus appropriés (Vías *et al* 2006).

Les valeurs les plus élevées du facteur lithologie (vulnérabilité forte) correspondent aux zones des affleurements des formations consolidées (calcaires, dolomies, et grès) et des formations non consolidées (alluvions récentes, dunes,...). Des valeurs modérées sont attribuées aux Sédiments de dépression consolidés (grès, argile et conglomérat cimentés). Les formations à faible perméabilité (les alternances argilo-gréseuses, marno-calcaires, argiles et marnes) sont représentées par les valeurs les plus faibles (de vulnérabilité faible), l'étude de synthèse sur les méthodes citées ci-dessus et l'étude Foster et Chilton (2003), nous a permis d'établir le tableau 9 pour le choix des cotes appropriées pour chaque type de roche.

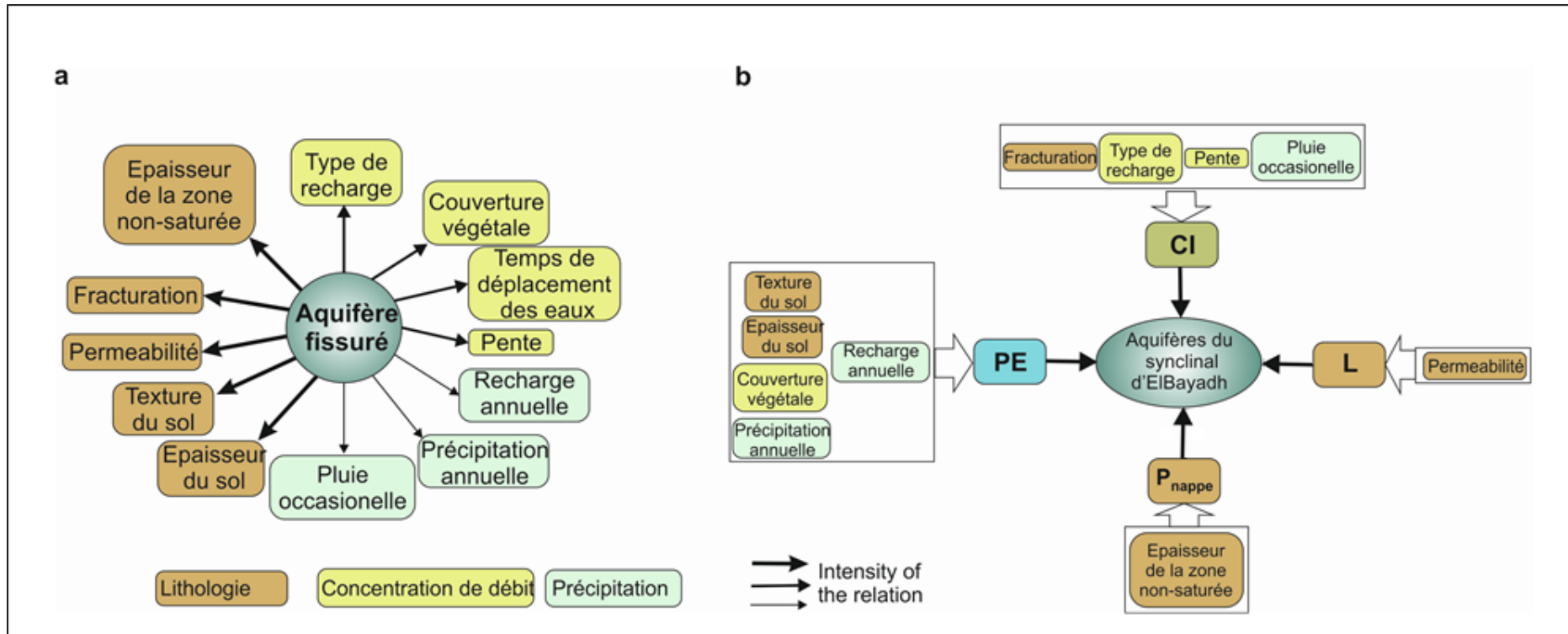


Figure 38 : a : Influence des principaux facteurs et variables sur la vulnérabilité des ressources en eau des aquifères fissurés (Vías *et al* 2006),

b : Facteurs d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines dans les zones arides

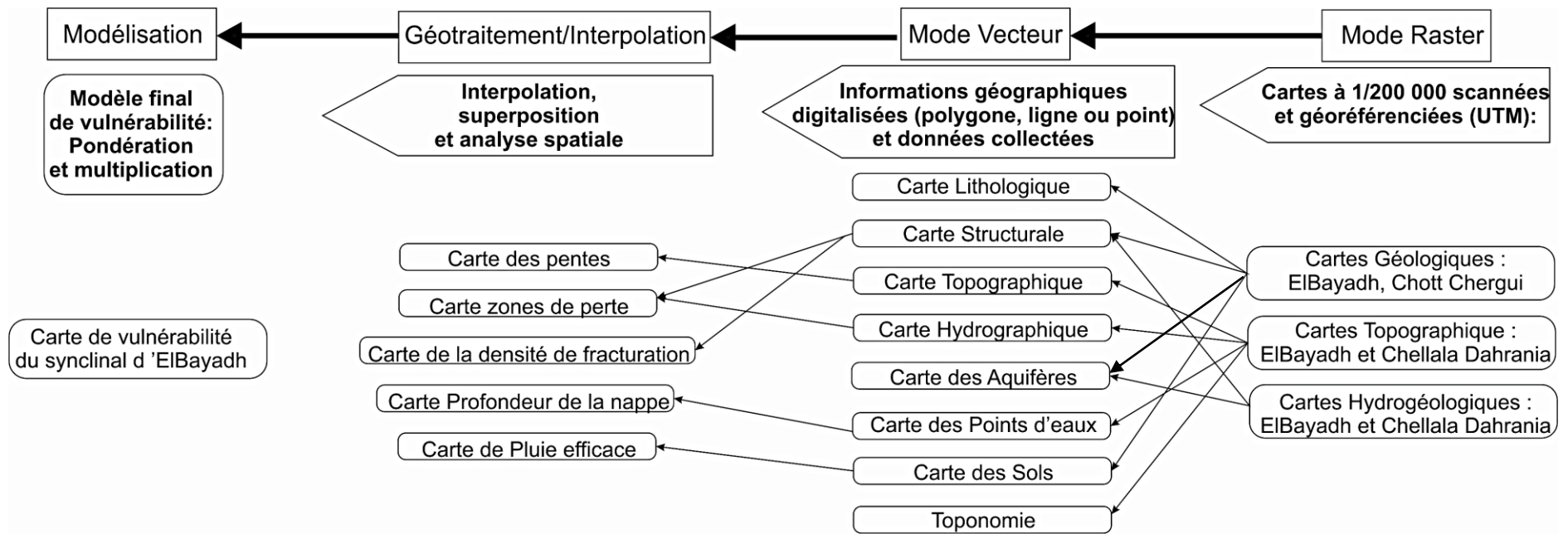


Figure 39 : Représentation des cinq principes fondamentaux (5A) pour élaborer le modèle de vulnérabilité du synclinal d'El Bayadh

Cote Lithologie	Formations géologiques
1	Formations consolidées et fissurées: calcaire ou dolomie
0.9	Formations non-consolidées: alluvionnaires (sable et gravier) et les formations dunaires
0.8	Formations gréseuses avec une perméabilité d'interstices et de fissures
0.6	Sédiments de dépression consolidés (grès, argile et conglomerat cimentés)
0.4	Calcaire marneux et grès avec des intercalations marneuses. Des formations très anisotropes avec une productivité moyenne et irrégulière.
0.2	Formations anisotropes avec une perméabilité d'interstice. Aquifères multicouches: alternances d'argile et de grès; faible productivité.
0.1	Formations marneuses et argileuses avec une très faible perméabilité (limon, argile, et marne)

Tableau 9: Principaux formations géologiques et leurs cotes

II-1.2. Conditions d'infiltration

Le facteur de la recharge dépend de la topographie (pente), la couverture du sol, la fracturation, etc. (Margane 2003). La recharge se fait de deux manières: infiltration diffuse ou concentrée dans la zone de perte, golfe, doline ou vallée sèche (Dörfliger *et al* 2010).

Dans cette partie, les conditions d'infiltration dépendent des paramètres suivants (tableau 10):

- a- Zone de perte:** c'est une zone d'infiltration préférentielle, identifiée dans la zone aride par une perte d'eau par infiltration concentré dans le sol lorsque les oueds coïncident avec le système de fracture ; nous avons donné *la cote I* à ces zones, pour le reste de la zone la somme des deux cotes ; la cote de la densité de fracturation et la cote de la pente (tableau 10).
- b- Densité de fracturation:** dans les zones de fracturation un flux vertical important d'eau souterraine s'opère. Plusieurs méthodes d'évaluation de la vulnérabilité utilisent ce paramètre directement : faille et densité de fracturation (DRASTIC-FM, Denny *et al* 2007; Paprika, Dörfliger et Plangnes 2009 ...) ou indirectement (DRASTIC, Aller *et al* 1987 ; GOD, Foster 1987 ...). Nous utilisons la somme des trois plus courtes distances entre chaque pixel et toutes les failles pour définir la densité de fracturation (fig. 40).
- c- Pente:** La pente topographique est un facteur important dans l'évaluation de la vulnérabilité, car elle détermine la quantité des eaux de ruissellement et la vitesse de déplacement de l'eau (Civita et De Maio 2004, Civita 2009). Les plages de pente varie entre 0 et > 18% (dans la méthode DRASTIC), et 0 à 30% (en mode SINTACS (Civita et

De Maio 2000)); les deux méthodes affectent la cote la plus élevée aux légères pentes (aux zones où l'infiltration peut être importante).

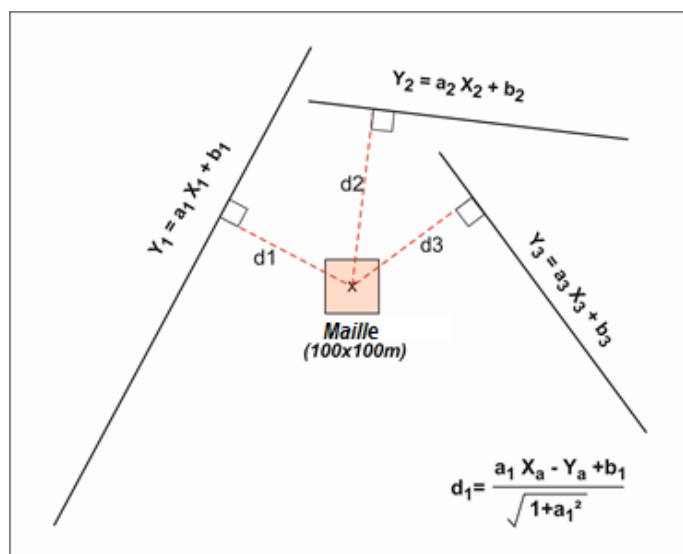


Figure 40: Fonction mathématique utilisée pour déterminer la densité de fracturation

Tableau 10: Cotes des Conditions d'infiltration

Zone de perte				
Oui	Non Cp + C _{DF}			
1	Pente %	Cote	Densité de Fracturation (Σ 3D [failles/ Pixel] (m))	Cote
	0-5	0,45	0-200	0,45
	5-10	0,4	200-400	0,4
	10-15	0,3	400-600	0,3
	15-20	0,2	600-800	0,2
	> 20	0,1	> 800	0,1

II-1.3. Profondeur de la nappe

La profondeur de la nappe, équivaut à l'épaisseur de la zone non saturée, donne une idée de la distance traversé par un vecteur hydraulique ou un contaminant fluide pour atteindre la zone saturée. Six classes identifient ce facteur (tableau 11);

Tableau 11: Cote du facteur de la profondeur de la nappe.

Profondeur de la nappe	Cote
<2m	1
2-5m	0,9
5-15m	0,8
15-30m	0,6
30-45m	0,4
> 45	0,1

II-1.4.Pluie efficace

Dans la méthode COP et selon Daly *et al* (2002) et Vias *et al* (2006) le facteur de précipitation contient la quantité de pluie et les facteurs d'infiltration. Le rôle de l'infiltration efficace dans l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères est très important, car elle déplace le polluant vers la zone saturée et favorise sa dilution (Civita et De Maio 2004).

L'évaluation de la pluie efficace dans une zone aride ou semi-aride par des procédés classiques (calcul par bilan hydrologique : $P=R+I+ETR+\Delta R$) avec des données ponctuelles mensuelles ou annuelles, donnent des valeurs sous-estimées; cependant, l'approche de l'estimation (Yousfi *et al* 2013) utilisée, nous a permis de calculer la pluie efficace sur une échelle journalière. La méthode couple deux approches: l'interpolation spatiale et temporelle des données de précipitations (P), températures (T), et évapotranspiration potentielle (ETP), et les zones de recharge permettant de définir les paramètres d'infiltration: altitude de la zone de recharge (z) et les caractéristiques du sol (Reserve d'eau Facilement Utilisable (RFU) spécialement dans les régions arides ou semi-arides où la faible épaisseur du sol et la faible activité biologique augmentent la vulnérabilité des aquifères (Hirata et Bertolo, 2003) (fig. 41). Sept classes identifient ce facteur (tableau 12) ;

Tableau 12 : Cote de facteur Pluie efficace

Pluie efficace	Cote
>300	1
200-300	0.8
150-200	0.6
100-150	0.4
50-100	0.2
0-50	0.1
0	0

La figure 42 représente toutes les informations spécifiques et résume toutes les étapes suivies pour la réalisation d'un modèle de vulnérabilité dans les zones arides et semi-arides.

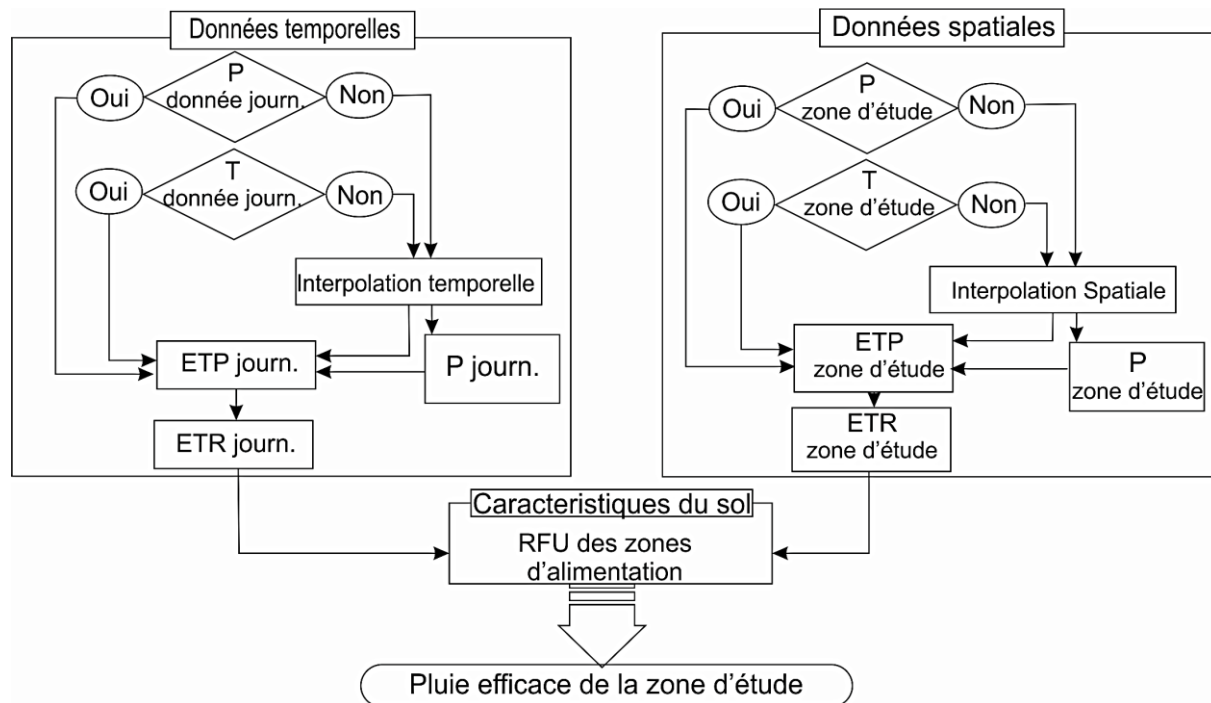


Figure 41: Diagramme de la méthode d'estimation de la pluie efficace journalière

II-2. Outils et moyens

II-2.1. Géoréférencement et la digitalisation

La transformation des données Raster en mode Vecteur a été réalisée à l'aide du Globale Mapper, un outil efficace, simple et représentatif :

Le géoréférencement par ce code, en UTM Zone 31, des cartes géologiques, topographiques et hydrogéologiques nous a permis l'assemblage de ces dernières pour visualiser la zone d'étude et la superposition de toutes les informations géographiques nécessaires pour notre étude que nous avons digitalisé sur différentes couches.

Quelques exemples des couches sont présentés ci-dessous (fig. 43, 44, 45, 46 et 47).

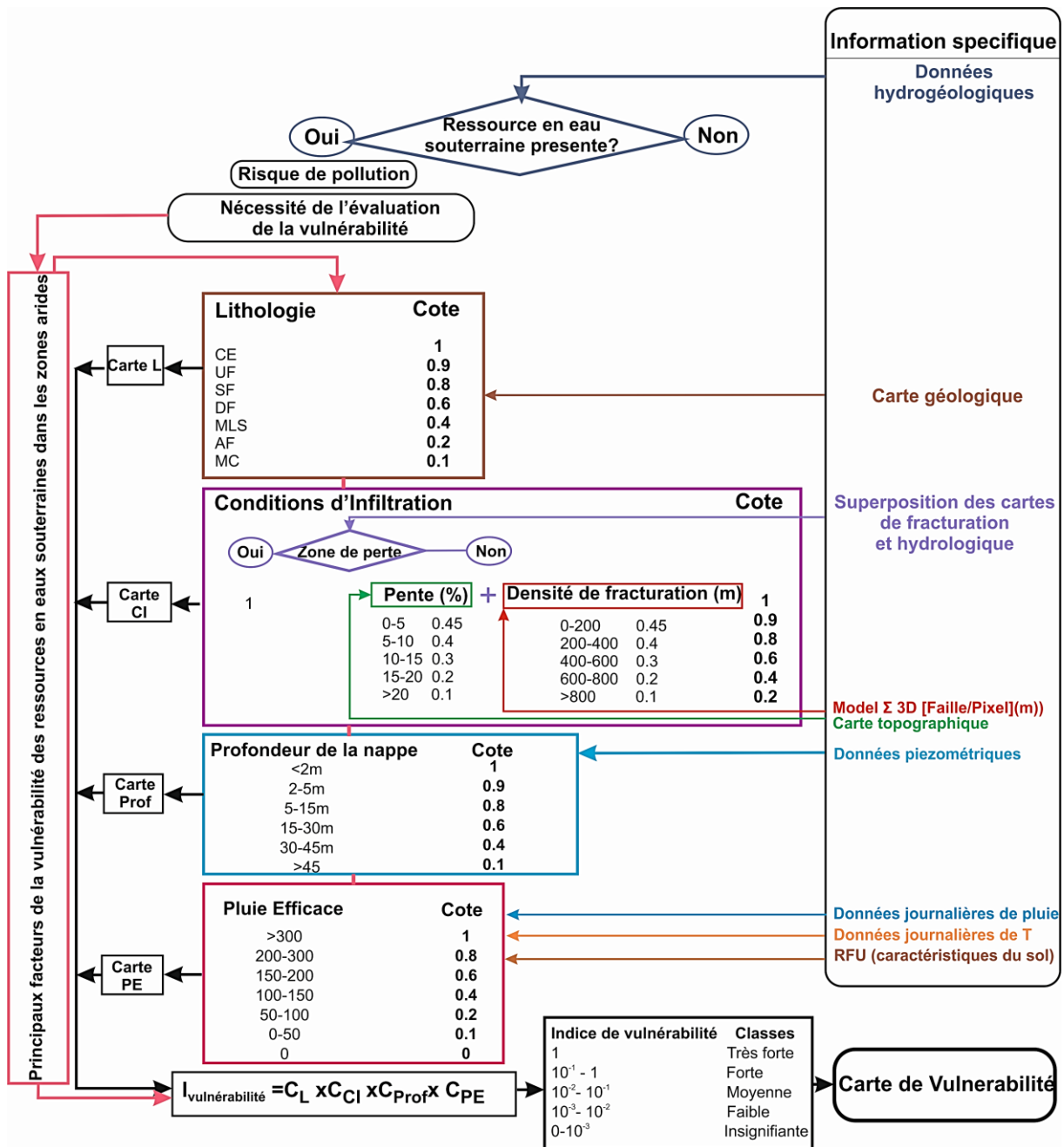


Figure 42 : Modèle utilisé pour déterminer la vulnérabilité de la ressource souterraine dans les zones arides et semi-arides

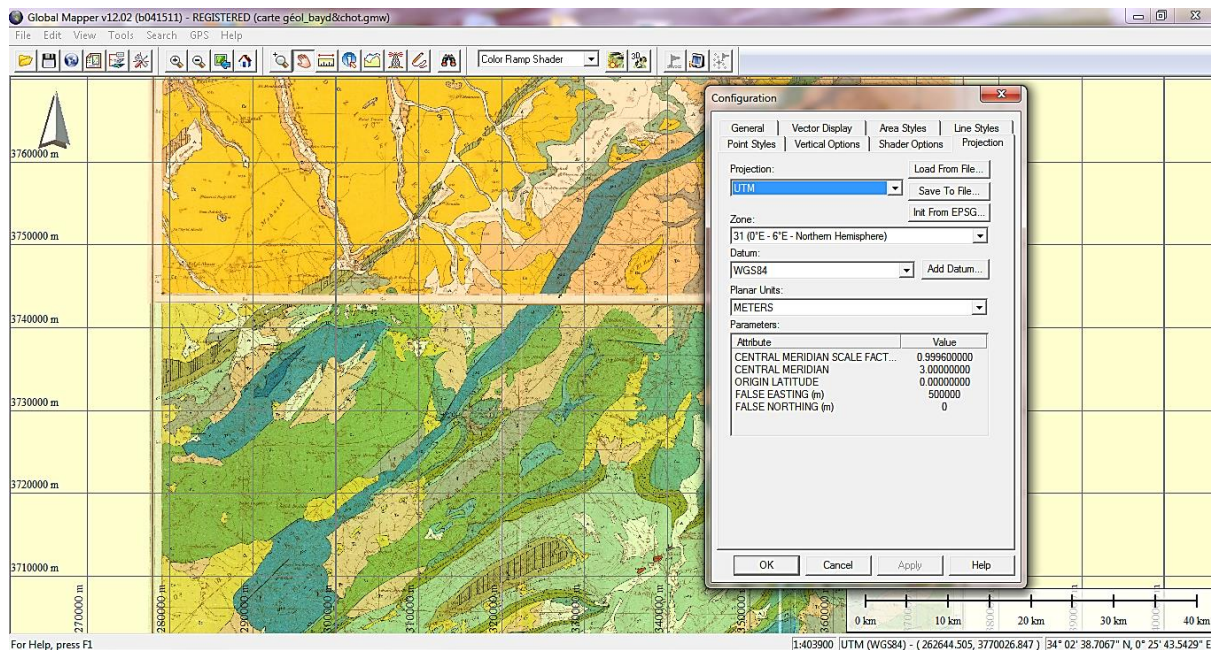


Figure 43 : Présentation des cartes géologiques du Chott Echergui et celle d'El Bayadh après géoréférencement

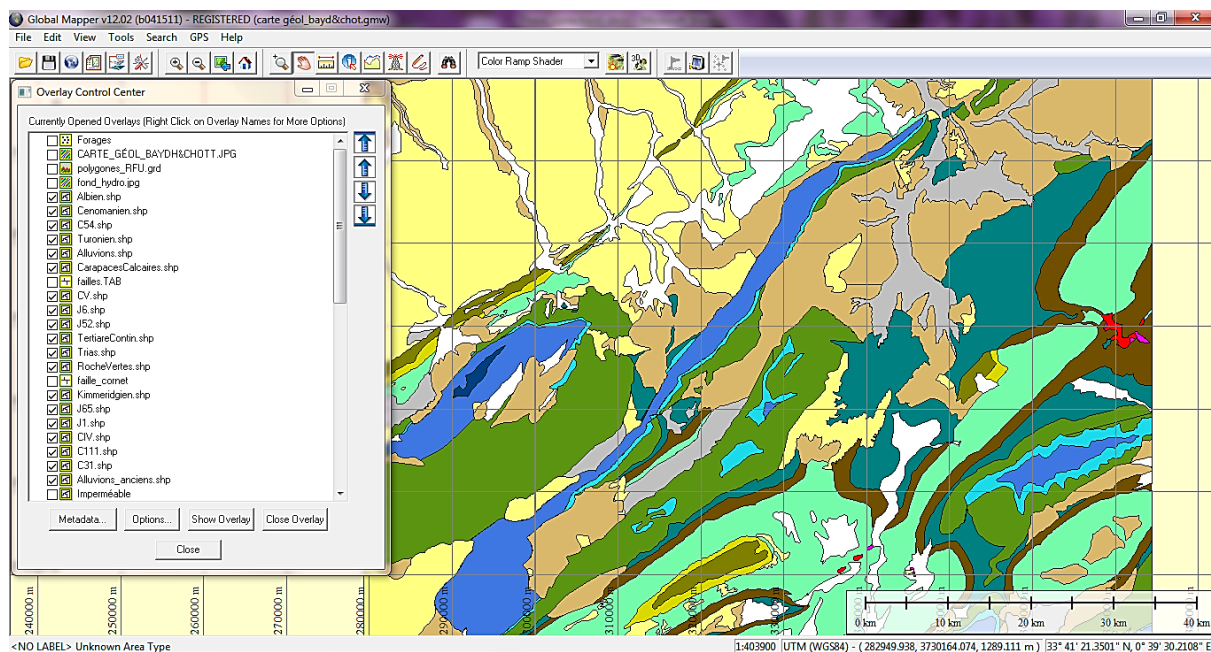


Figure 44 : Géologie digitalisée

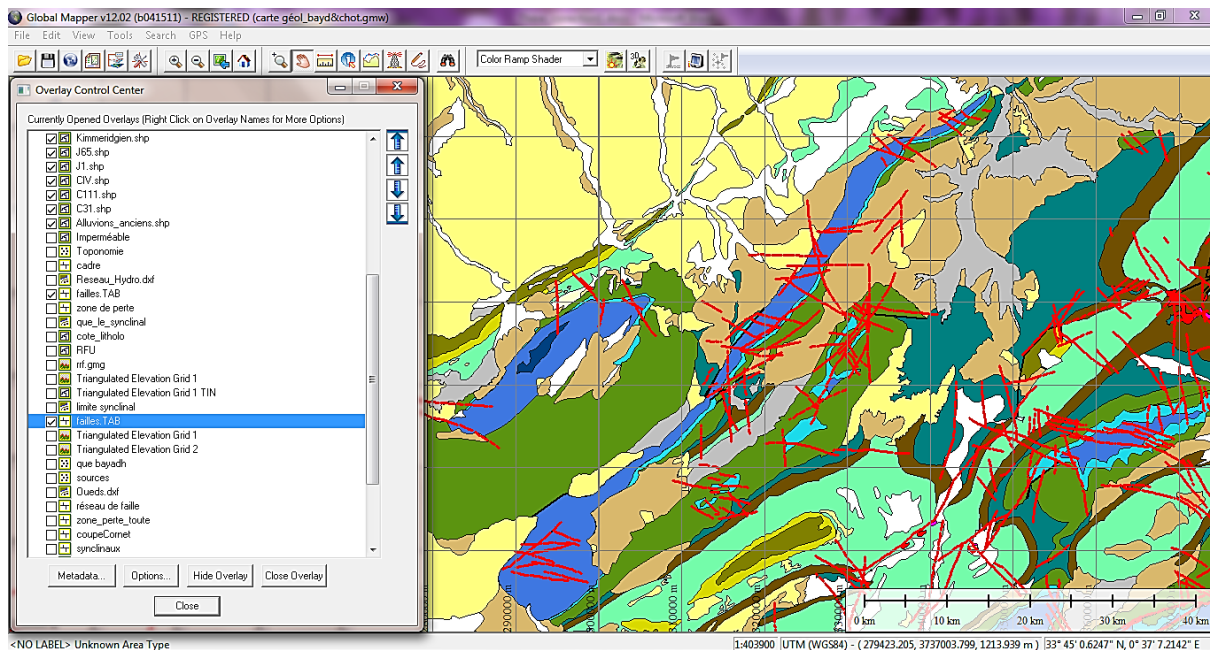


Figure 45 : Réseau de faille digitalisé sur le fond géologique

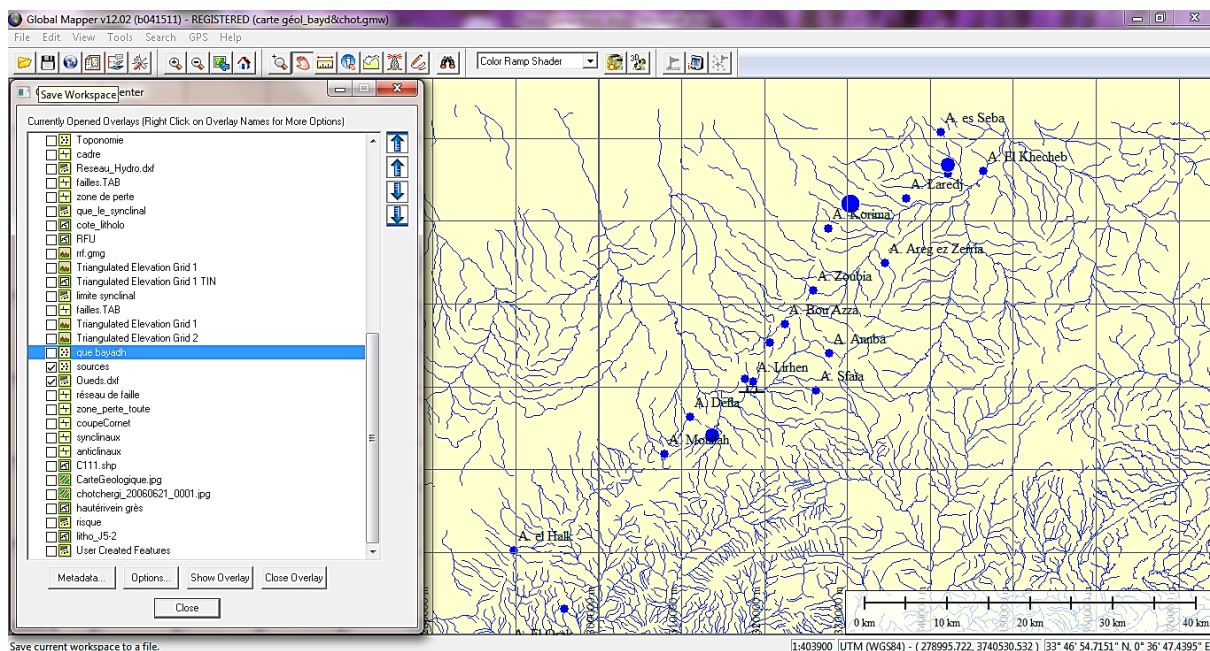


Figure 46 : Réseau hydrographique et les sources de la zone d'étude

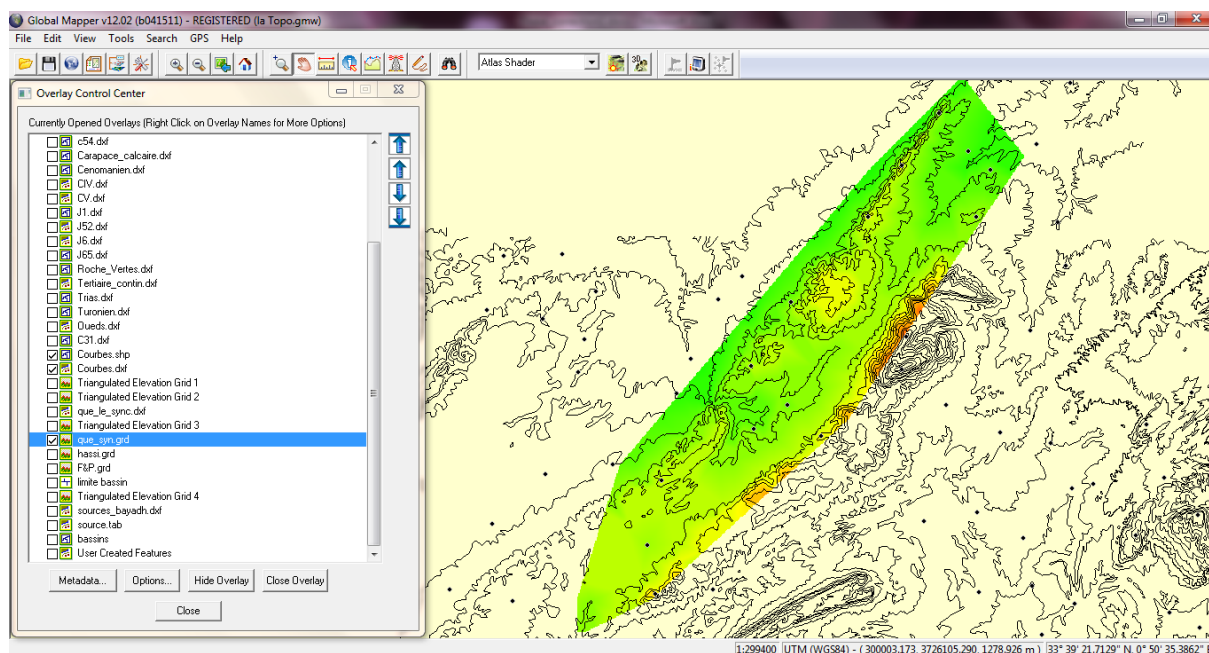


Figure 47 : La topographie digitalisée et la représentation de la zone d'étude

II-2.2. Géotraitement et interpolation

Le traitement des données géographiques a été réalisé à l'aide de trois codes :

a- Un code a été élaboré par Benchaïb A. en trois étapes, pour calculer la densité de fracturation :

- 1) Construction de l'équation de la droite à partir d'un ensemble de points (obtenus à partir des résultats expérimentaux de la digitalisation des failles considérées comme étant des droites définies par (x_1, y_1) , (x_2, y_2)); en utilisant la méthode d'approximations des Moindres Carrés Linéaires.
- 2) Calcul de la distance entre un point dans l'espace (centre de la maille) a une droite (failles déterminées par les droites déjà construites au (1)), en utilisant la formule mathématiques :

$$d = (a_1 x_a - y_a + b_1) / \sqrt{1 + a_1^2}$$

- 3) Ecriture d'un code en C++ qui nous permet de faire tout ce travail défini en (1) et (2), et après avoir obtenus toutes les distances correspondantes on a choisis les 3 plus petites en valeurs et faire leur somme.

Les résultats ont été fournis sous format texte (*.txt) ce qui nous a facilité l'intégration des données dans le Surfer pour calculer la carte des conditions d'infiltration (fig. 48).

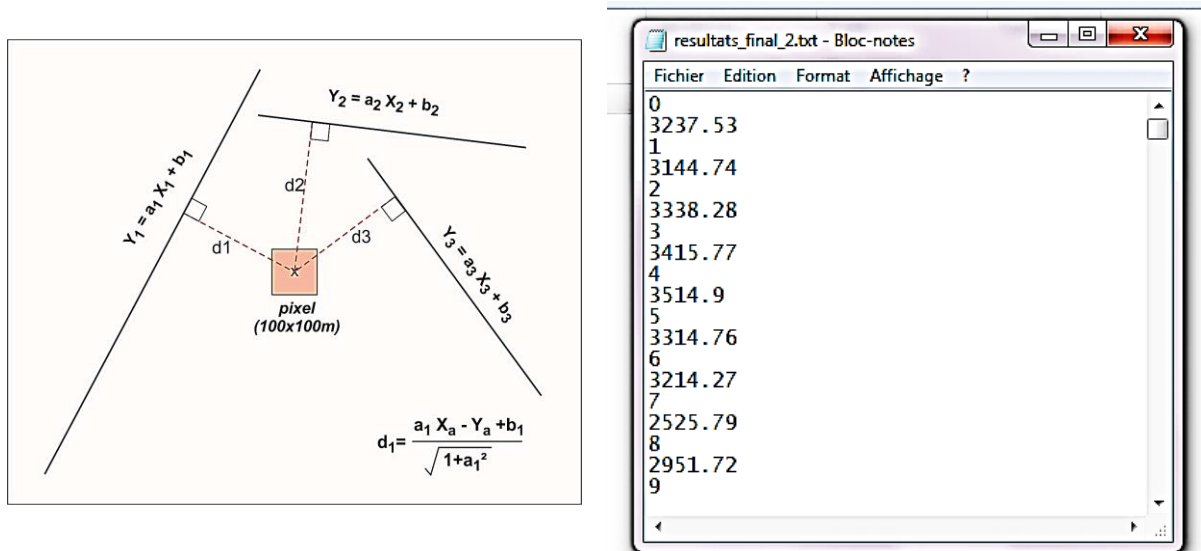


Figure 48 : Equation de calcul et présentation des résultats de la densité de fracturation

b- Le Surfer nous a permis l'interpolation du paramètre « profondeur de la nappe », le calcul du paramètre « pente » à partir des données topographiques digitalisées et structurées (*.dat) et l'élaboration de la carte «conditions d'infiltration » par intégration d'une équation mathématique (fig. 49 et 50).

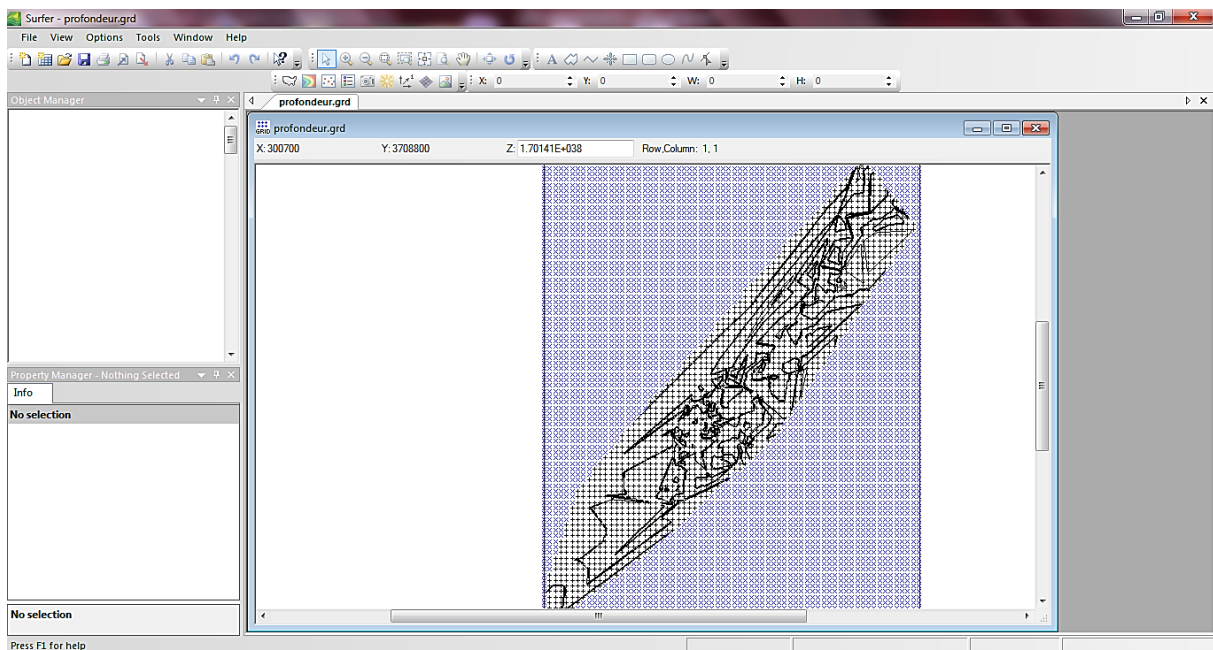


Figure 49 : Calcul de la profondeur de la nappe par le Surfer

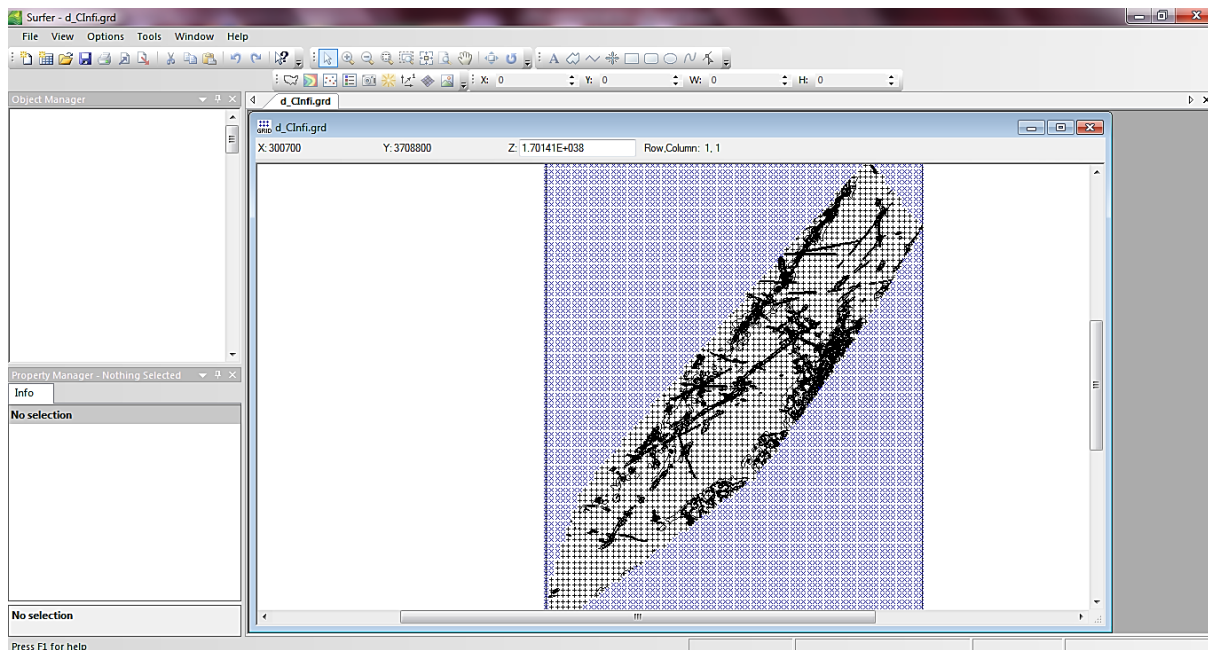


Figure 50 : Carte des conditions d'infiltration calculée par le surfer à partir de la carte des zones de pertes, pentes et densité de fracturations

c- L'attribution des cotes pour chaque polygone des couches « Lithologie » et « Pluie efficace » a été réalisée à l'aide du code QGIS.

II-2.3. Modélisation

Le calcul de l'indice de vulnérabilité a été réalisé par multiplication des cotes des quatre couches à l'aide de l'application « GridMath » du Surfer.

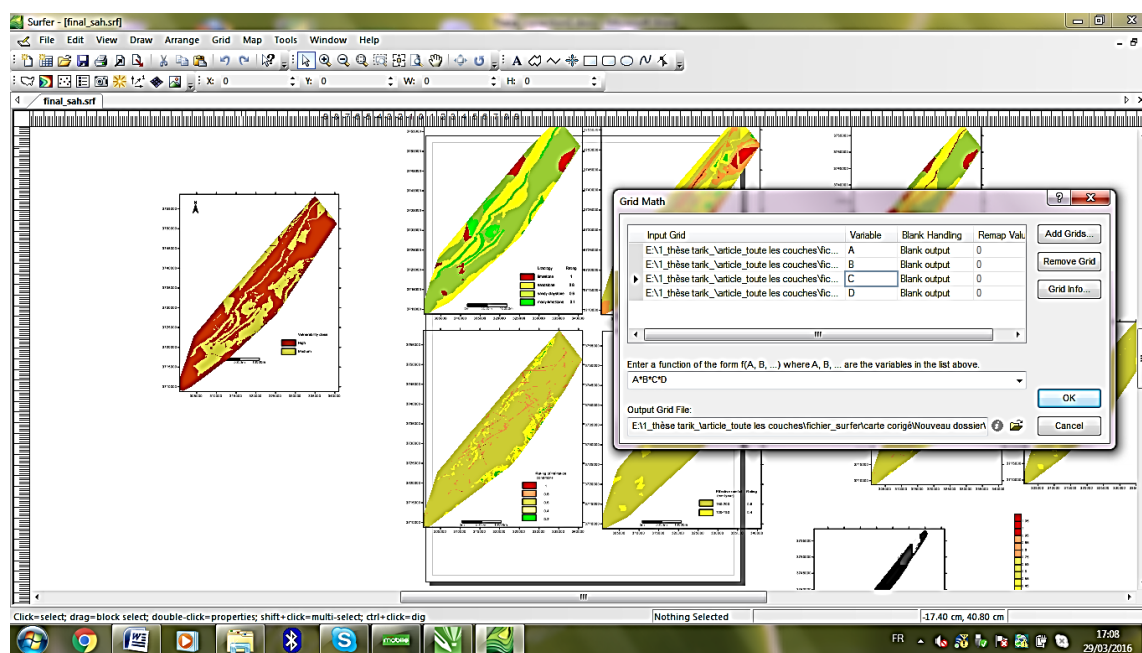


Figure 51 : Présentation de la fenêtre d'application GridMath

II-3. Application au synclinal d'El Bayadh

Le synclinal d'El Bayadh couvre une surface d'environ 620 Km², avec une pluviométrie moyenne de 328.77 mm. Il est constitué principalement en terme d'épaisseur moyenne et en terme de surface par rapport à la surface totale : de grès et d'alternance de grès avec minces lits d'argile (environ 1225 m et 21.88%) et de marno-calcaire (environ 355 m et 12.72% e) du Jurassique et du Crétacé, d'argile sableuse du Tertiaire et des formations alluvionnaires du Quaternaire (65.4%). La plupart des formations dans la zone d'étude sont touchés par des mouvements tectoniques causant des synclinaux, des anticlinaux et des failles. La zone d'étude est dominée par des failles de direction NE-SO et des décrochements généralement perpendiculaires aux anticlinaux et synclinaux (Cornet 1952).

Nous considérons que les formations aquifères du synclinal d'El Bayadh constituent un aquifère multicouche avec une perméabilité variable (interstice et mixte), exploité par plus de 500 points d'eau. La présence de l'activité agricole rend cet aquifère très vulnérable à la pollution et dans cette application, nous essayons de l'évaluer, en tenant compte des facteurs décrits précédemment (partie méthodologie). Les données d'entrée utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité des aquifères ont été obtenues à partir de cartes géologiques, topographiques, études de sol et données climatiques (fig. 42); afin d'exécuter les différentes

cartes: *carte lithologie, carte conditions d'infiltrations, carte profondeur de la nappe et carte pluie efficace* (fig. 52-55).

II-3-1. Carte «Lithologie »

Cette carte représente les différentes cotes des affleurements, en tenant compte fondamentalement de leurs propriétés hydrodynamiques et leurs structures. La réalisation de cette couche se base sur les cartes géologiques d'El Bayadh et Chott Ech Chergui 1/200 000 (Cornet 1952) et les cartes hydrogéologiques d'El Bayadh et Chellala Dahrania 1/200 000 (ANRH 2008); différents degrés de perméabilité des formations ont été déterminé donc différentes cotes leurs a été attribuées (tableau 13, fig. 52).

Tableau 13 : Cote « Lithologie »

Formations	Cote
Alluvions anciennes (de l'argilite de sable)	0,6
Croûte calcaire	1
Tertiaire continental (argile-sableuse)	0,6
Fr. de Tiout Barrémien-Aptien-Albien (grès)	0,8
Hauterivien (marno-calcaire)	0,1
Hauterivien (grès)	0,8
Valanginien (marno-calcaire)	0,1
Fr. de Aïssa Infra-Crétacé (grès)	0,8
Fr. de Teniet Ettemar Kimméridgien (argilo-calcaire)	0,1
Fr. de Djara Lusitanien (alternance de grès et d'argile à intercalation de dolomie)	0,4
Fr. de Teniet Elkelakh Callovien (Bathonien) (marno-calcaire)	0,1

II-3-2. Carte « Conditions d'Infiltrations »

Elle est établie en couplant trois facteurs:

a-zone de perte (Cote = 1: déterminé à la base de la carte du réseau hydrographique (cartes topographique d'El Bayadh et Chellala Dahrania 1/200000, IGN 1966) et celle de la fracturation (Cornet 1952 et ANRH 2008) ;

b-carte des pentes calculée à partir de la cartes topographique d'El Bayadh et Chellala Dahrania 1/200 000, IGN 1966 ;

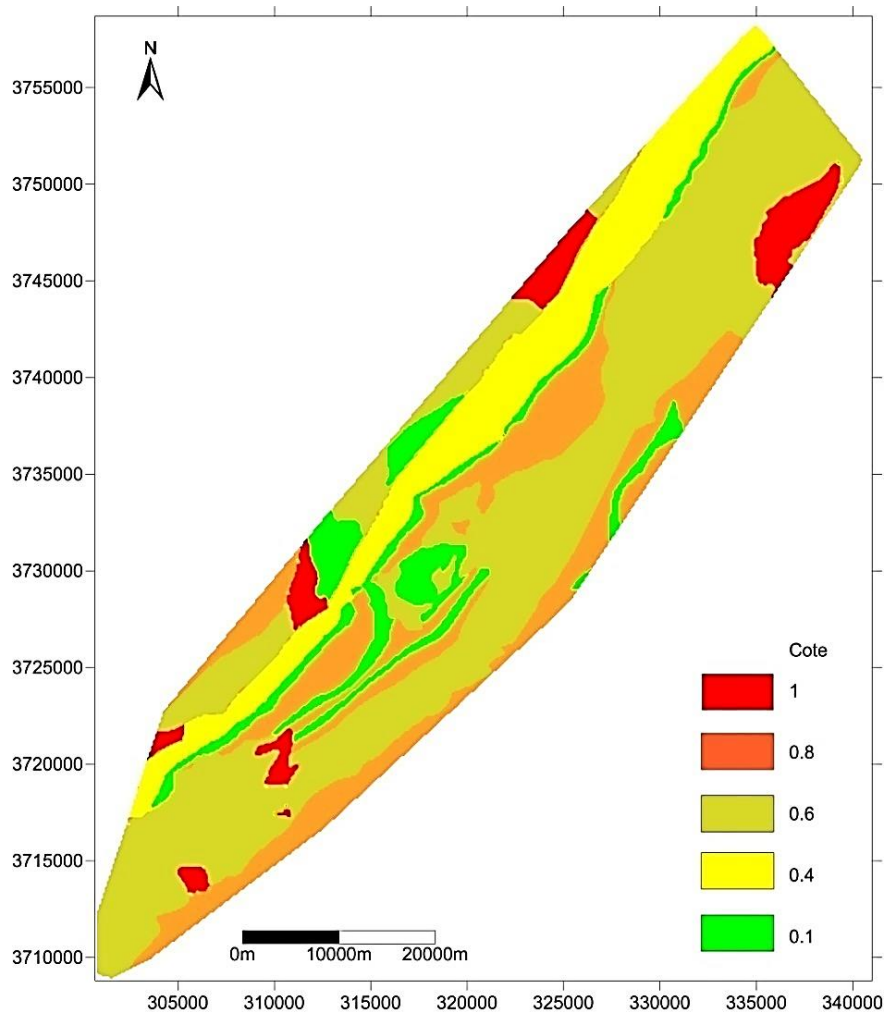


Figure 52 : Carte du facteur « Lithologie »

c-carte de densité de fracturation calculée à partir de la somme des trois plus petites distances entre chaque pixel et toutes les failles en utilisant une méthode mathématique codée par un langage de programmation.

La majorité de la surface du synclinal a une cote moyenne. Les valeurs élevées correspondent aux zones de perte, failles et de leur proximité, et les plus faibles correspondent aux zones de forte pente (fig. 53).

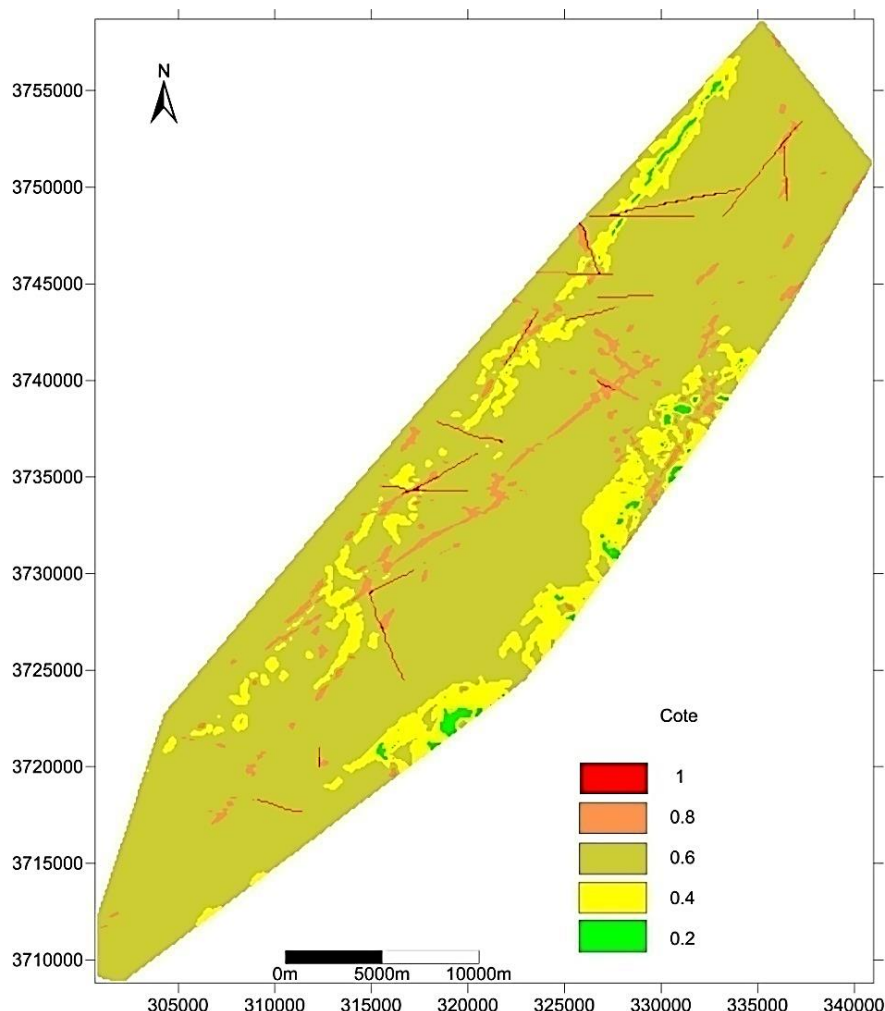


Figure 53 : Carte du facteur « Condition d'infiltration »

II-3-3. Carte « Profondeur de la nappe »

Pour obtenir cette carte, nous avons utilisé une base de données de 520 points d'eau, effectuée par BETGH en 2003. La profondeur de la nappe varie de 0,2 m à 96 m. Les cotes de 0,1 à 0,4 sont attribuées aux mailles où la surface de la nappe est profonde ce qui signifie qu'elle est protégée, pour le reste des cotes (de 0,6 à 1) signifie que la nappe n'est pas protégée (fig. 54).

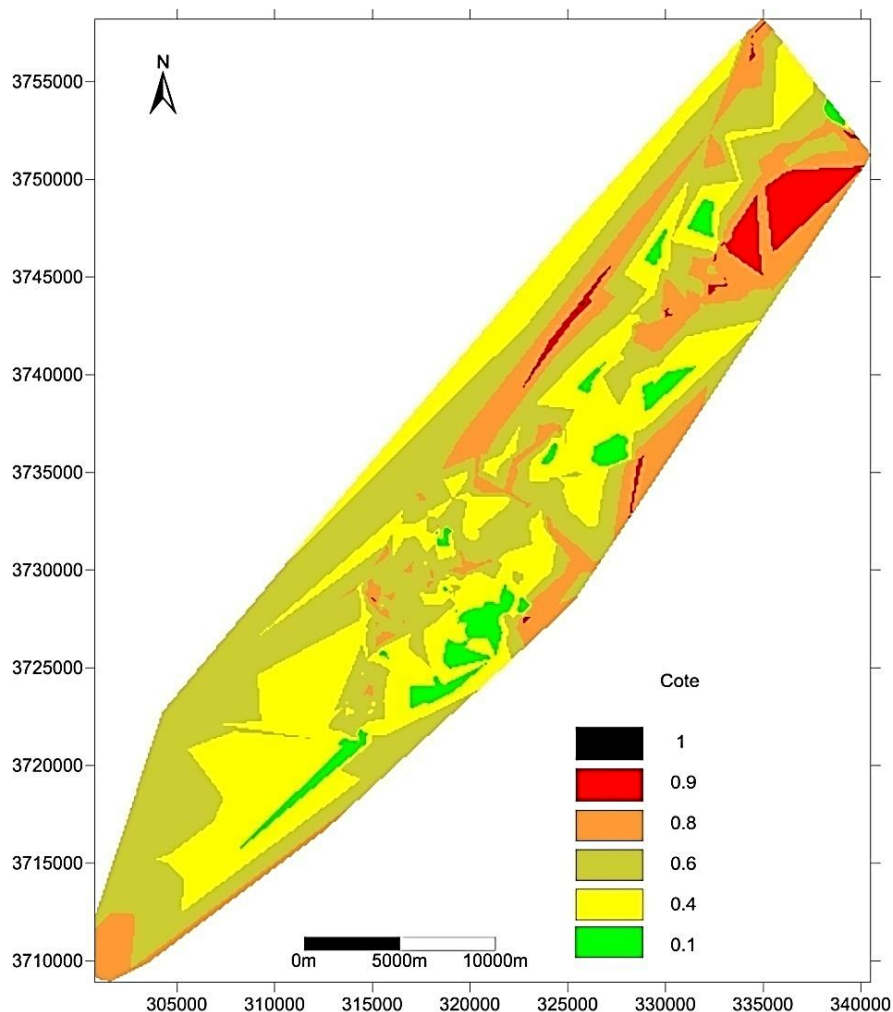


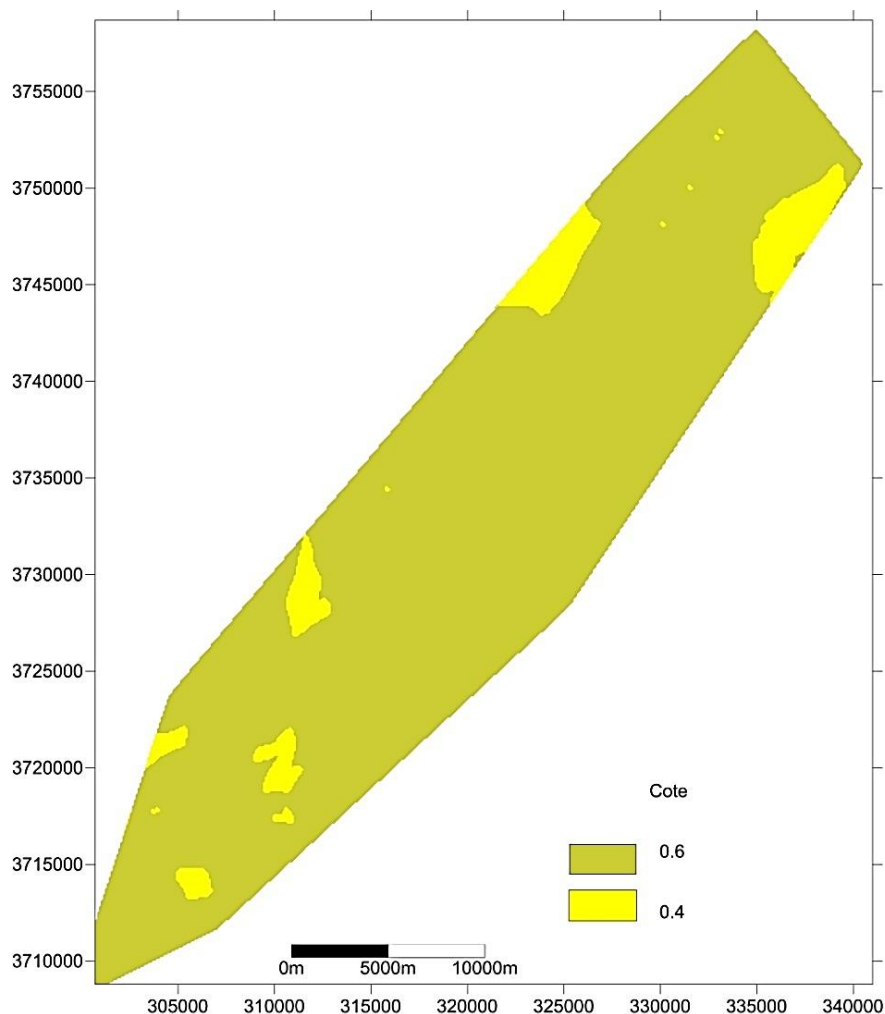
Figure 54: Carte du facteur « Profondeur de la nappe »

II-3-4. Carte « Pluie Efficace »

Dans la zone d'étude les précipitations sont la source unique de recharge des eaux souterraines. La moyenne des précipitations annuelles, mesurées dans la station d'El Bayadh, pendant les dix dernières années est de 328.77 mm. La pluie efficace a été calculée par les données journalières (précipitations, températures et humidité de l'air) de 2009 (année moyenne de 326.89 mm) à partir [<http://en.tutiempo.net/>], en tenant compte des caractéristiques du sol selon Pouget (1980) et Regagba (2012), pour estimer la RFU d'après Rieul et Ruelle (2003).

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est calculée par l'expression de Turc (Gilli *et al* 2004). L'organigramme de la figure 12 est utilisé pour déterminer l'évapotranspiration

journalière réelle (ETR) et les précipitations efficaces (PE). Les valeurs des précipitations efficaces varient de 130 à 181 mm et les cotes varient entre 0,4 et 0,6 (fig. 55).



II-4. Carte schématique de la vulnérabilité du synclinal d'El Bayadh (1/200 000)

La carte finale de vulnérabilité des eaux souterraines du synclinal d'El Bayadh (fig. 56), montre une répartition spatiale de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, elle est basée sur les cartes des différents facteurs; l'indice de vulnérabilité est obtenu par multiplication des différentes cotes des différents facteurs; lithologie, conditions d'infiltration, profondeur de la nappe et pluie efficace.

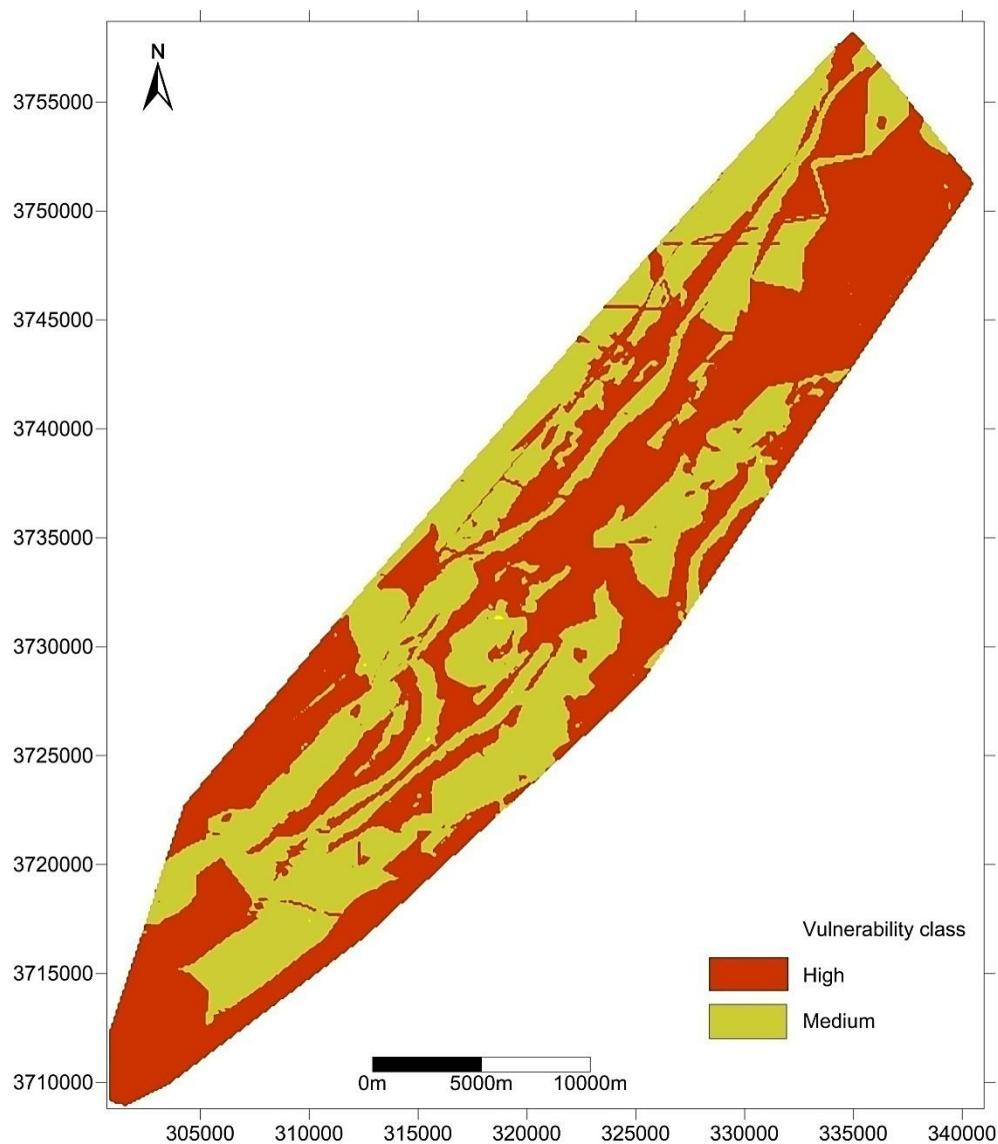


Figure 56: Classes de vulnérabilité de l'aquifère d'El Bayadh obtenus avec la méthodologie proposée

Nous calculons que 56% de l'aire de la zone d'étude est caractérisée par une forte vulnérabilité (fig. 56). Afin de déterminer la relation entre l'indice de vulnérabilité et chaque facteur, nous avons superposé la carte résultante avec les différentes couches (fig. 57) ;

Nous observons que les aires de forte vulnérabilité se calquent avec la majorité des zones où affleurent les terrains gréseux des sommets des djebels où la perméabilité mixte est haute (fig. 58), les zones de perte fréquentes, le sol peu développé (faible RFU) et la profondeur de la nappe faible malgré les terrains argilo-sableux des dépressions.

Le reste de la carte représentant 44% de la zone totale est modérément vulnérable, coïncide principalement avec les dépressions de forte RFU où les précipitations efficaces sont faibles et la profondeur de la nappe est grande.

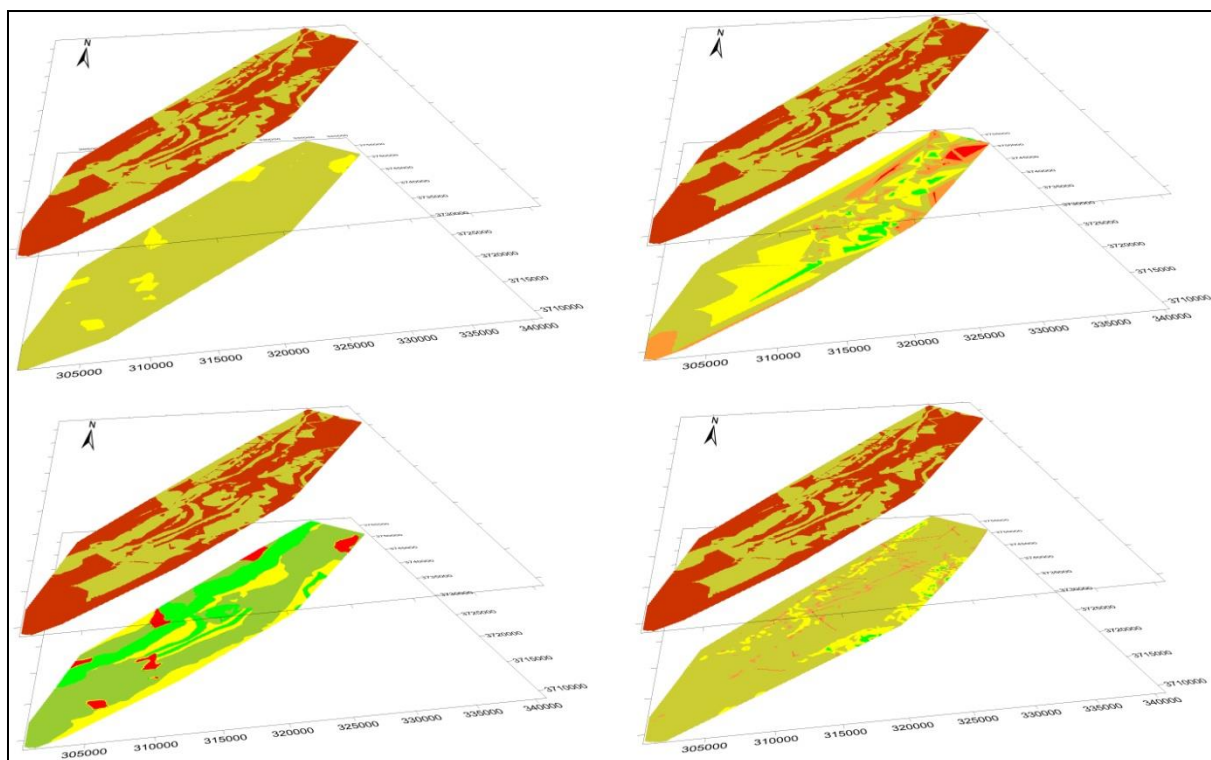


Figure 57 : Superposition de la carte de vulnérabilité et les différents facteurs

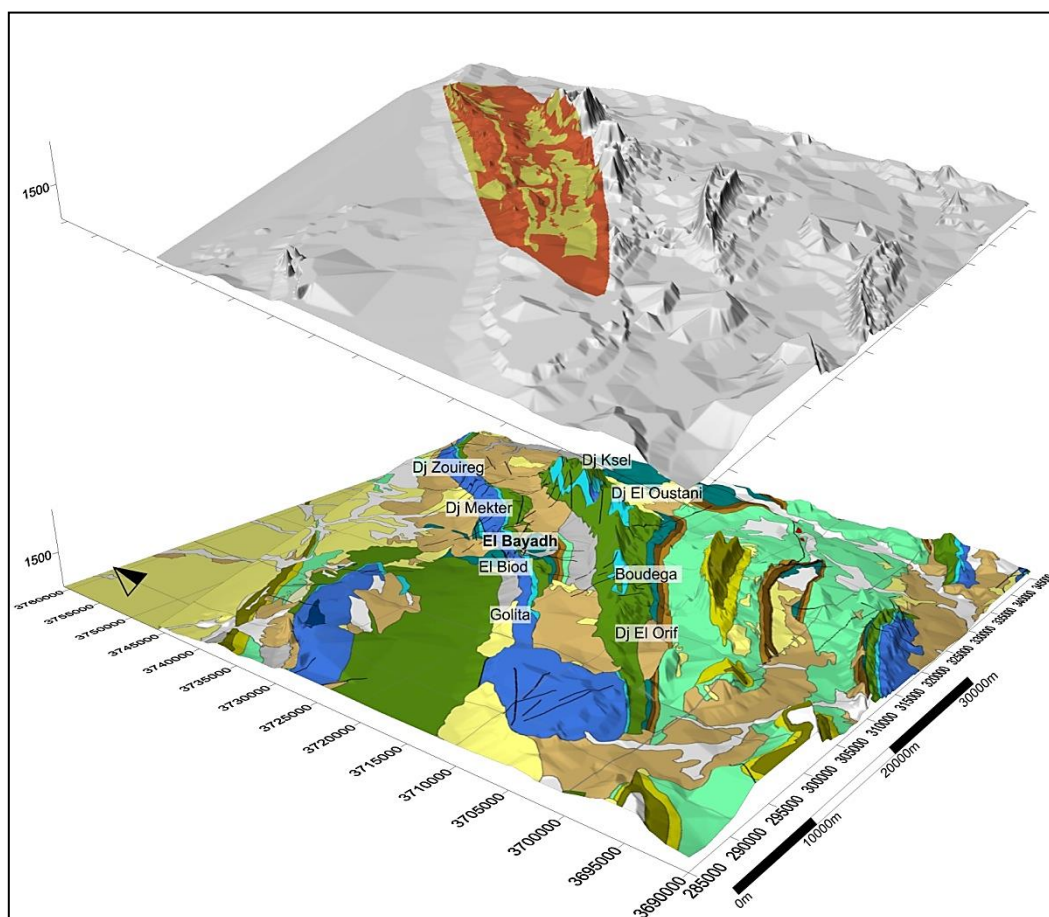


Figure 58 : Superposition de la carte de vulnérabilité et la carte géomorphologique

II-5. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité (SA) est une composante importante de tout projet de modélisation car elle permet d'évaluer la précision du résultat (Baker *et al* 2005, Hasiniaina 2010). Elle vise à trouver la dépendance entre les prévisions du modèle et l'ensemble particulier des valeurs des paramètres utilisés (Ekaka-a-en *et al* 2012). Le moyen d'une mesure de sensibilité est la carte d'élimination : il est possible d'estimer la sensibilité associée par la suppression d'une ou plusieurs cartes (Lodwick *et al* 1990). Cet outil a été utilisé par Gogu et Dassargues (2000) pour l'analyse de sensibilité dans la méthode EPIK. En plus le coefficient de détermination est un excellent outil statistique pour l'interprétation de la relation entre les variables (Kufs 1992). Il a été utilisé par Vias *et al* (2010) pour déterminer le facteur qui a la plus grande influence sur l'indice de vulnérabilité COP. Cette analyse spatiale et statistique des cartes de vulnérabilité est utilisée pour comparer les méthodes PaPRIKA et COP (Marín *et al* 2011).

Ces applications sont un concept numérique important pour valider la carte de vulnérabilité dans notre étude car il sera utilisé pour déterminer les facteurs qui ont un grand impact sur la variation de l'indice de vulnérabilité.

Le tableau 14 présente un résumé statistique des quatre facteurs notés du modèle de vulnérabilité de l'aquifère d'El Bayadh. Un examen de la moyenne des facteurs montre que la plus forte contribution à l'indice de vulnérabilité est faite par la lithologie et la profondeur de la nappe (moyenne = 46,98 et 42,73), les deux autres facteurs ayant une valeur moyenne autour de 30 contribuent modérément à la contamination des eaux souterraines. Le coefficient de variation indique qu'une forte contribution à la variation de l'indice de vulnérabilité est faite par les facteurs Lithologie et Profondeur de la nappe (35 et 30%), une contribution modérée est faite par l'impact de Conditions d'Infiltration (15%), tandis que la plus faible contribution est faite par la Pluie Efficace (7,0%).

Tableau 14 : Résumé statistique des facteurs de vulnérabilité carte type et coefficient de variation.

	Lithologie	Conditions d'Infiltration	Profondeur de la nappe	Pluie efficace
Moyenne	46,98	31,09	42,73	28,31
Min	0,1	0,2	0,1	0,4
Max	1	1	1	0,6
Deviation Standard	0,20	0,08	0,17	0,04
Coefficient de la variation %	35	15	30	7

Le tableau 15 montre que les résultats obtenus avec l'analyse de sensibilité par suppression de carte ; l'indice de vulnérabilité est plus sensible au facteur de Lithologies et Profondeur de la nappe (46,98 et 46,112%). La suppression de la couche Conditions d'infiltration ou de pluie efficace porte aussi considérablement sur la variation de l'indice de vulnérabilité (signifie indice de variation sont respectivement 35,225% et 32,117%).

Tableau 15: Statistiques sur la sensibilité à l'enlèvement d'un facteur

	Lithologie	Conditions d'Infiltration	Profondeur de la nappe	Pluie efficace
Moyenne de l'indice de variation (%)	46,98	35,225	46,112	32,117

Les coefficients de détermination entre chaque facteur et l'indice de vulnérabilité est représentés dans le tableau 16; il est clair que la variable Profondeur de la nappe est la plus corrélées avec l'indice de vulnérabilité ($R^2 = 0,44$). La corrélation entre la Lithologie et l'indice de vulnérabilité est faible (0,13), en revanche la corrélation entre les Conditions d'Infiltrations, la Pluie Efficace et l'indice de vulnérabilité est très faible (0,07 et 0,01) ; cela est en relation avec la faible variation spatiale de ces facteurs.

Tableau 16: Corrélation statistique (coefficient de détermination) parmi les facteurs de vulnérabilité et les index

	Lithologie	Conditions d'Infiltration	Profondeur de la nappe	Pluie efficace
Coefficient de Détermination	0,13	0,07	0,44	0,01

Le but de ce travail était d'identifier les facteurs qui influent sur l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, afin d'améliorer la protection de cette précieuse ressource dans les zones arides et semi-arides. Les différents facteurs ont été choisis en fonction des caractéristiques physiques et hydrogéologiques dominantes dans ces zones. L'indice de vulnérabilité a été calculé par multiplication de quatre cotes: lithologie, conditions d'infiltration, profondeur de la nappe et précipitations efficaces, en tenant compte d'une grande variabilité de chacun de ces facteurs pour englober tout contexte possible (physique et hydrogéologique).

La cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines est une méthodologie qui est devenue impérative afin d'assurer la gestion qualitative des ressources en eau et la protection des captages d'eau potable. Elle apparaît donc nécessaire et incontournable, car elle permet d'identifier facilement les zones sensibles à des pollutions potentielles. Elle permet aussi d'orienter l'aménagement du territoire. En effet, l'usage de notre carte pour la protection efficace des eaux souterraines en tenant compte principalement des deux paramètres lithologie et profondeur de la nappe; peut participer à la planification et la gestion du territoire. L'originalité de ce travail réside dans la réalisation d'une carte de vulnérabilité à la pollution du synclinal d'El Bayadh qui, jusqu'à ce jour, n'avait pas été dressée et cela en utilisant des facteurs qui prennent en considération des caractéristiques des zones arides et semi arides. Cette méthodologie peut être appliquée avec succès même dans les zones où la base de données météorologiques est discontinue. La carte de vulnérabilité obtenue peut être utilisée pour des mesures initiales de protection de la ressource en eau souterraine.

III-ELABORATION DE LA CARTE OPERATIONNELLE DE LA VULNERABILITE DANS LES ZONES ARIDES ET SEMI-ARIDES

La protection des ressources en eau souterraine contre la pollution dans les zones arides est un défi, surtout lorsque les conditions géologiques et hydrogéologiques favorisent l'immigration de polluants. Dans les pays arides et semi-arides avec l'évolution rapide de l'urbanisation et le développement des zones agricoles, l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines devient un outil indispensable pour les décideurs et les responsables, car cela permet d'identifier les zones les plus vulnérables et soutient la gestion durable des ressources en eau (Secund *et al*, 1998; Saidi *et al*, 2011; Qian *et al*, 2012; Thomas et Duraisamy, 2018).

La cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines est l'un des outils les plus appliqués pour analyser la sensibilité des aquifères à la pollution. Cependant, pour cartographier efficacement la vulnérabilité à la pollution, il faut beaucoup d'informations détaillées sur les conditions de surface et du sous-sol. En outre, une information spatialement explicite est nécessaire, d'où l'échelle doit être suffisamment détaillée pour obtenir une cartographie fiable et précise.

Il existe des lacunes pertinentes en cartographie détaillée (lithologie, réseaux de failles et nature et occupation du sol) pour notre zone d'étude. L'une des lacunes les plus fondamentales en matière d'information est l'information lithologique à l'échelle appropriée qui permet d'approfondir l'étude hydrogéologique et de mieux protéger les eaux souterraines.

La télédétection est une approche idéale pour cartographier en détail les caractéristiques du terrain (lithologie, structurale, nature et occupation du sol) et accéder à des données gratuites grâce aux différentes plateformes, telles que le service de surveillance des sols de Copernicus ou la série d'observations de la Terre de l'U.S. Geological Survey Landsat. Il s'agit d'un outil efficace pour la surveillance des terres (Zumsprekel et Prinz, 2000, Zoheir et Emam, 2012, Pournamdary *et al*, 2014, Gabr *et al*, 2015, Eldosouky *et al*, 2017, Bentaher et Raji, 2020). Les données multi-spectrales sont en mesure de fournir des renseignements sur la lithologie ou la composition des roches en fonction de la réflectance spectrale (Ridwan, 2018).

Dans ce cadre, la première étape de ce travail vise à réaliser une carte lithologique à 1/50 000, couvrant l'étendue de la zone d'étude, par le traitement et l'interprétation d'images satellites de Landsat OLI-8, de rectifier les contours des formations lithologiques et d'élaborer la carte de linéament et les cartes du sol. Ces cartes contribueront aux connaissances générales et à la base de données numérique disponibles sur les Djebel Amour afin d'enrichir la communauté scientifique.

La deuxième étape présente les cartes de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution calculée par GOD (Foster *et al*, 2007) et par PI (Goldscheider *et al*, 2000).

Ces deux méthodes utilisées produisent des cartes numériques qui sont, comme les premières approches pour protéger la ressource en eau souterraine dans la zone d'étude qui, discutées et validées, vérifient quelle approche présente la meilleure protection dans ces zones arides.

III-1. Méthode et outils

Le bassin versant d'Oued Deffa se situe au centre du synclinal d'El Bayadh (fig. 59). Pour le délimiter nous avons utilisé le modèle numérique de terrain MNT sous ArcGis, qui nous a permis aussi de définir les paramètres caractérisant ce bassin (surface et périmètre). Le logiciel ArcGis, nous a également permis d'établir les différentes cartes ; le modèle numérique présentant les oueds principaux du réseau hydrographique d'oued Deffa (fig. 60 (a)), la carte hypsométrique du bassin versant (fig. 60 (b)) et la carte des pentes (fig.61). Ceux-là nous ont permis d'étudier ses caractéristiques morphologiques.

III-1.1. Etude morphologique du bassin

L'écoulement et/ou l'infiltration des eaux au sein d'un bassin versant est étroitement lié aux caractéristiques physiques du bassin et des conditions climatiques. Les bassins versants de forme compacte drainent l'eau plus rapidement que ceux de forme plus allongée. Parmi les caractéristiques géométriques les plus importantes qui jouent un rôle pour déterminer et analyser le comportement hydrologique d'un bassin versant sont : la forme, le relief et la surface (Andre Musy et al, 2003). Dans notre étude nous nous intéresserons à la forme et aux indices de pente, l'un des paramètres cruciaux à l'estimation de la vulnérabilité.

Le tableau 17, ci-dessous résume les paramètres de forme du bassin versant de l'oued Deffa; Les détails des calculs, courbes et le rectangle équivalent sont ajoutés en annexe 8.

Indice de compacité de Gravelius

Le bassin versant d'oued Deffa a un indice de compacité de Gravelius de 1.59. Quand cet indice est proche de 1, le bassin versant a une forme quasiment circulaire et s'il est supérieur à 1 le bassin est de forme allongée. L'altitude varie entre 1251 m à l'exutoire et 1949 m en amont, on distingue également que les courbes de niveaux sont trop serrées vers l'amont jusqu'à 1550 m, ce qui favorise un écoulement aux limites du bassin grâce à la pente.

Tableau 17: Caractéristique de forme du Bassin Versant d'oued Deffa

Bassin versant	Superficie (Km ²)	Périmètre (Km)	Indice de Gravelius KG	Rectangle équivalent	
				Longueur (Km)	Largeur (Km)
Oued Deffa	209,69	81,46	1.59	35,07	5.98

La pente moyenne du bassin versant

La pente moyenne est une caractéristique importante qui nous renseigne sur la topographie du bassin. Elle est donnée par la formule suivante :

$$I_{moy} = Dt/L$$

Avec :

Dt : Dénivelée totale du rectangle équivalent (m),

Dt = Hmax-Hmin ; et Hmax= 1949m ; Hmin= 1251m ;

L : Longueur du rectangle équivalent (km) L =35.07 km.

Pour notre bassin, la pente moyenne est égale à 19.9 % indiquant une pente modérée qui favorise l'infiltration.

Indice global de pente Ig

Il est défini comme étant le rapport entre l'altitude comprise entre 5% et 95% de la surface du bassin et la longueur du rectangle équivalent. A partir de la courbe hypsométrique, on prend les altitudes H₅ et H₉₅. Cet indice permet de déterminer le type de relief caractérisant notre bassin, il est décrit par la relation suivante :

$$Ig = \frac{D}{L}$$

Avec :

D : dénivelée H_{5%} - H_{95%}, définie sur la courbe hypsométrique (m). Où H_{5%} correspond à l'altitude représentant 5% de la surface du bassin et H_{95%} correspond l'altitude représentant 95% de la surface du bassin.

L : longueur du rectangle équivalent (m).

Dans notre bassin :

$$H_{5\%} = 1700\text{m et } H_{95\%} = 1300\text{m,}$$

$$D = 1700 - 1300 = 400\text{m}$$

$$L = 35.07 \text{ Km}$$

$$I_g = 11.41$$

Après comparaison de la valeur d' I_g (11.41) avec les valeurs données par d'ORSTOM (in Msatef *et al* 2011), nous constatons que le relief de notre bassin versant est de type modéré.

Altitude moyenne

Elle est décrite à partir de la relation suivante :

$$H_{moy} = \frac{1}{A_t} \sum A_i \left(\frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right)$$

Avec :

A_t : l'aire totale du bassin versant Km^2 209,69 Km^2

A_i : la surface (Km^2) entre deux élévations h_i et h_{i+1} (m)

L'altitude moyenne pour notre bassin versant est de 1432,06 m.

Altitude médiane

L'altitude médiane (H_{med}) correspond à l'altitude incluant 50% de la surface du bassin versant, elle correspond donc au point 50% de la courbe hypsométrique. Dans notre cas l'altitude médiane est de 1400m.

Le tableau 18 représente un récapitulatif des paramètres de notre bassin versant, les résultats indiquent que la région présente un rectangle avec une longueur 6 fois plus important que la largeur. Nous avons un relief modéré, avec une pente qui favorise l'infiltration.

Tableau 18 : Principaux paramètres du bassin versant d'oued Deffa

Surface A (Km^2)	Périmètre P (Km)	K_G	Rectangle équivalent		I _g		Altitude moyenne (m)	Altitude médiane (m)
					H _{5%} (m)	H _{95%} (m)		
			Longueur (Km)	Largeur (Km)	1700	1300		
209,69	81.46	1.59	35.07	5.98	11.41		1432.06	1400

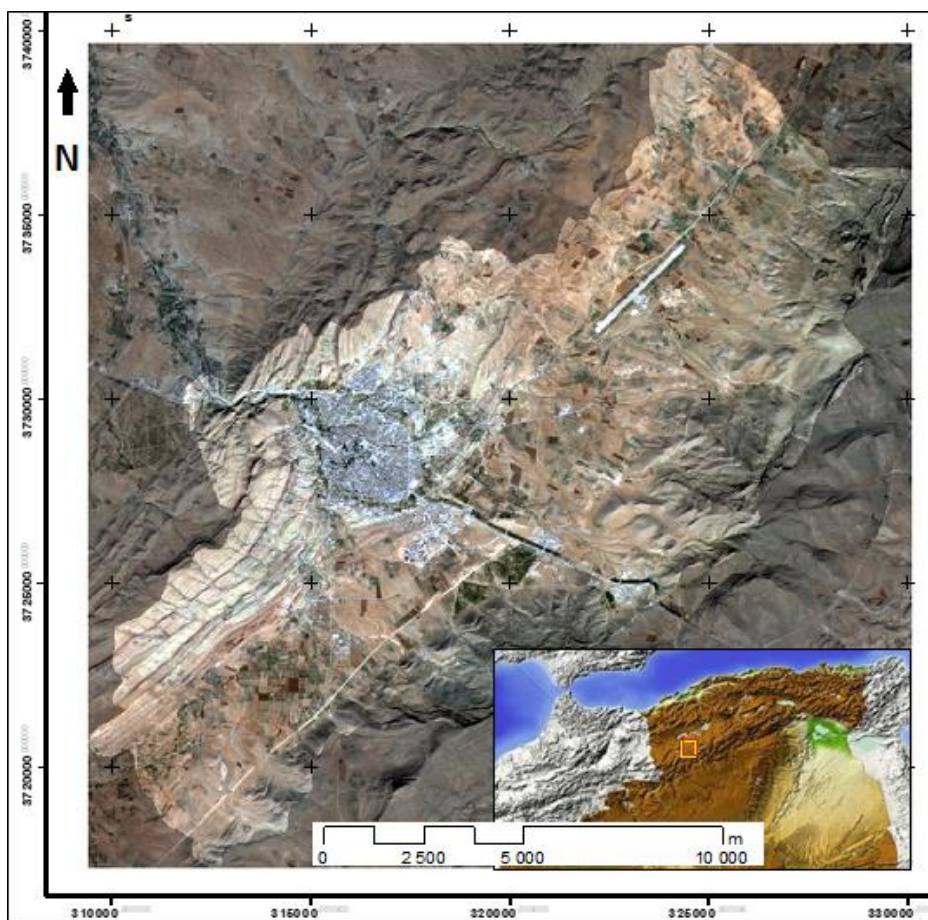


Figure 59 : Situation et délimitation du bassin versant d'Oued Deffa

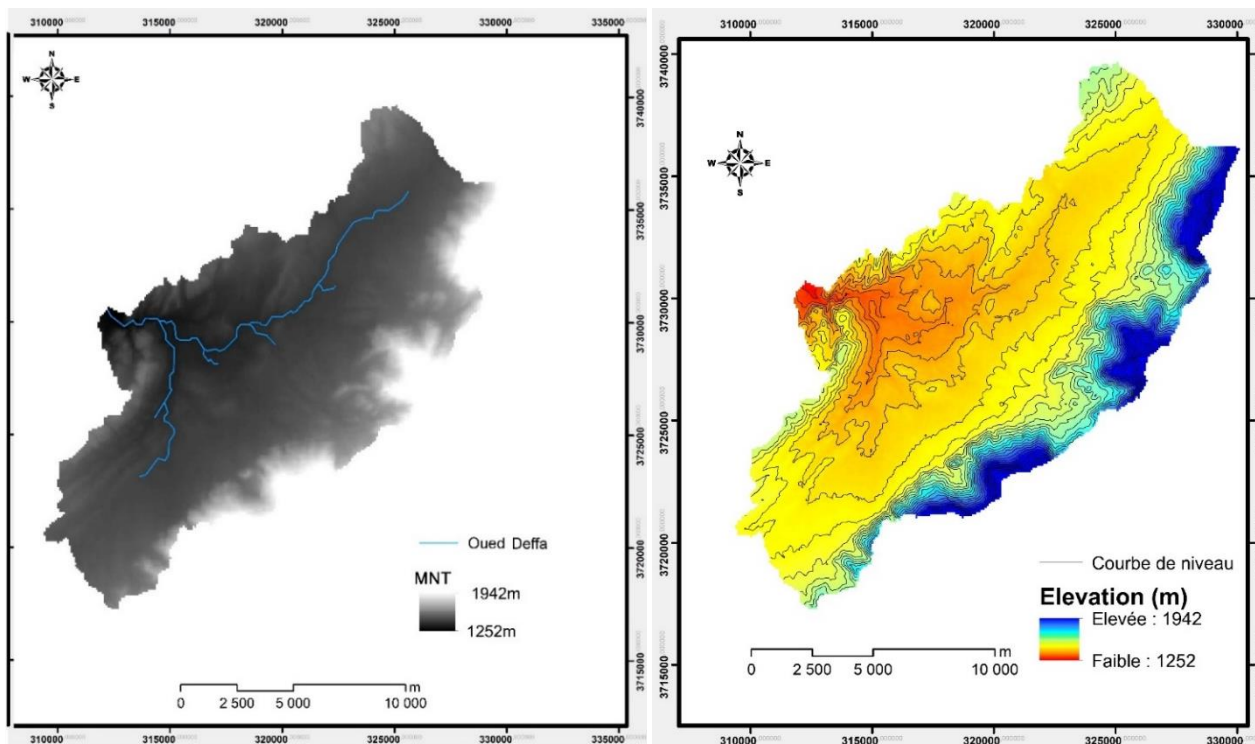


Figure 60 : Modèle numérique présentant les oueds principaux du réseau hydrographique (a) et la carte hypsométrique (b) du Bassin versant d'Oued Deffa

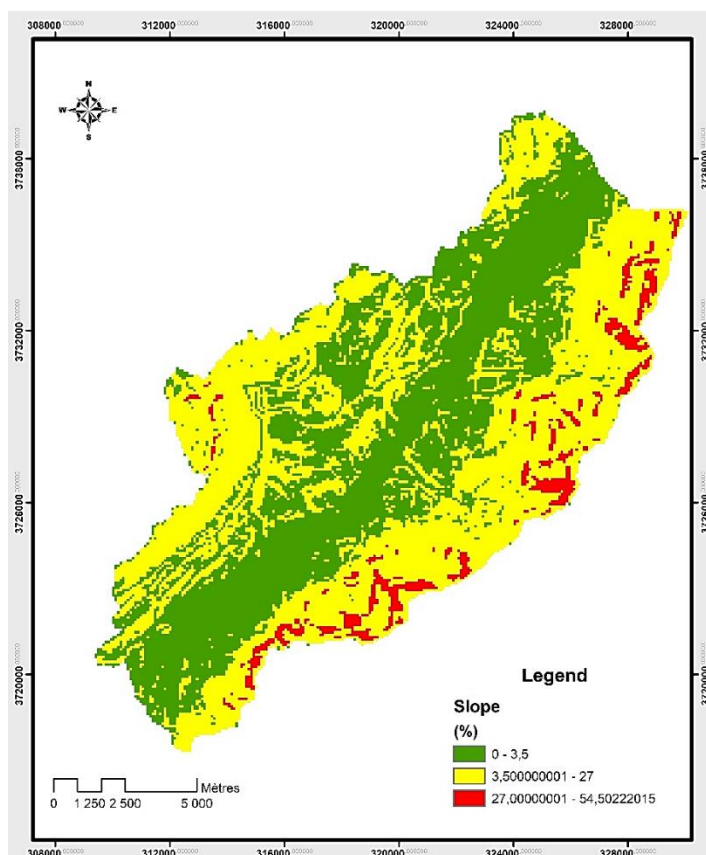


Figure 61 : Carte de la pente du Bassin versant d'Oued Deffa

III-1-2. Etapes et outils de traitements

III-1-2-1. Données et méthodes utilisées pour le traitement par télédétection

Les images satellitaires Landsat 8-OLI du décembre 2018, ont comme coordonnées : ligne 196 et colonne 37 selon le Système de Référence Mondial. Ces images ont été téléchargées du site USGS (Earth Explorer website (USGS, 2019)). Sur onze bandes disponibles, il n'y a que sept qui ont une résolution de 30 m et ont été utilisées pour le prétraitement (calibration radiométrique et correction atmosphérique) et le traitement (combinaison des bandes, ratio et filtre). Des différentes techniques d'assemblages de bandes d'images ont été appliquées : composition coloré RGB, bandes ratio, indices de sol et de végétation et l'Arbre de Décision et cela pour l'élaboration de la carte géostructurale, et celle de la nature et l'occupation du sol. Ce traitement nous a aidés à interpréter les images et à réaliser la carte de vulnérabilité sur SIG (fig. 62) ;

a-Modèle numérique de terrain (MNT) a été téléchargé de l'USGS (2019) pour délimiter le bassin versant d'Oued Deffa ; cette délimitation a été utilisée pour extraire la zone d'étude pour les traitements des images satellitaires et établir les cartes hypsométrique et de pente à l'aide du SIG (Hydrology and DEM Tools).

b-Indice de végétation par différence normalisé (NDVI) : L'aridité de la zone d'étude a rendu la rectification des limites géologiques des formations facile grâce à quasi absence du couvert végétale, confirmé par la carte du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), cet indice de végétation par différence normalisé est un indice de teneur en eau et de l'activité chlorophyllienne de la végétation. C'est le rapport de la différence entre la réflectance dans le proche infrarouge (Near IR) et dans le rouge, sur la somme des deux :

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Rouge}) / (\text{NIR} + \text{Rouge}).$$

Sa valeur varie entre -1 (pas de végétation) et +1 (végétation abondante) (Jensen, 1996, Rouse *et al*, 1974).

c-Composition colorée RVB : La différenciation lithologique des formations géologiques et délimitation des affleurements en sol nu pour l'élaboration de la carte géologique a été réalisée par la création des images en composition colorée ; Combinaison standard des bandes tel que 765 en RVB et aussi combinaison ratio de bandes.

d-Filtres directionnels : les différents filtres directionnels (0°, 45°, 90° et 135°) nous ont aidés à élaborer la carte des linéaments. Les deux cartes produites à 30 m de résolution, ont été combinés avec les informations de la carte géostructurale (1/200000, Cornet, 1950) afin de créer la carte Carte géostructurale à 1/50 000.

e-Arbre de Décision : La lacune de la carte pédologique nous a amené à utiliser les grandes relations entre les propriétés du sol et les variables environnementales (pente, Indice de Rougeur (IR) (Madeira, 1993)) et la nature géologique du terrain pour détecter et cartographier les différents types de sol en utilisant l'Arbre de Décision (AD) (fig. 63) ; considéré comme un outil d'aide à la décision représentant un ensemble de choix sous la forme graphique d'un arbre (Murthy, 1998). Les différents résultats possibles (produits) sont situés aux extrémités des branches (les feuilles de l'arbre), sont atteintes en fonction de décisions (nœuds et conditions) prises à chaque étape. Cette classification prédite est fréquemment utilisée dans la cartographie numérique des sols (Hash, 2008; Moonjun *et al*, 2008; Engle *et al*, 2010). L'algorithme de l'AD a été formulé en se basant sur la Raster Calculating Tools (Si, Ensuite, Alors) : pente, IR et lithologie considérés comme nœud, contrôlée par les conditions utilisées par certains auteurs.

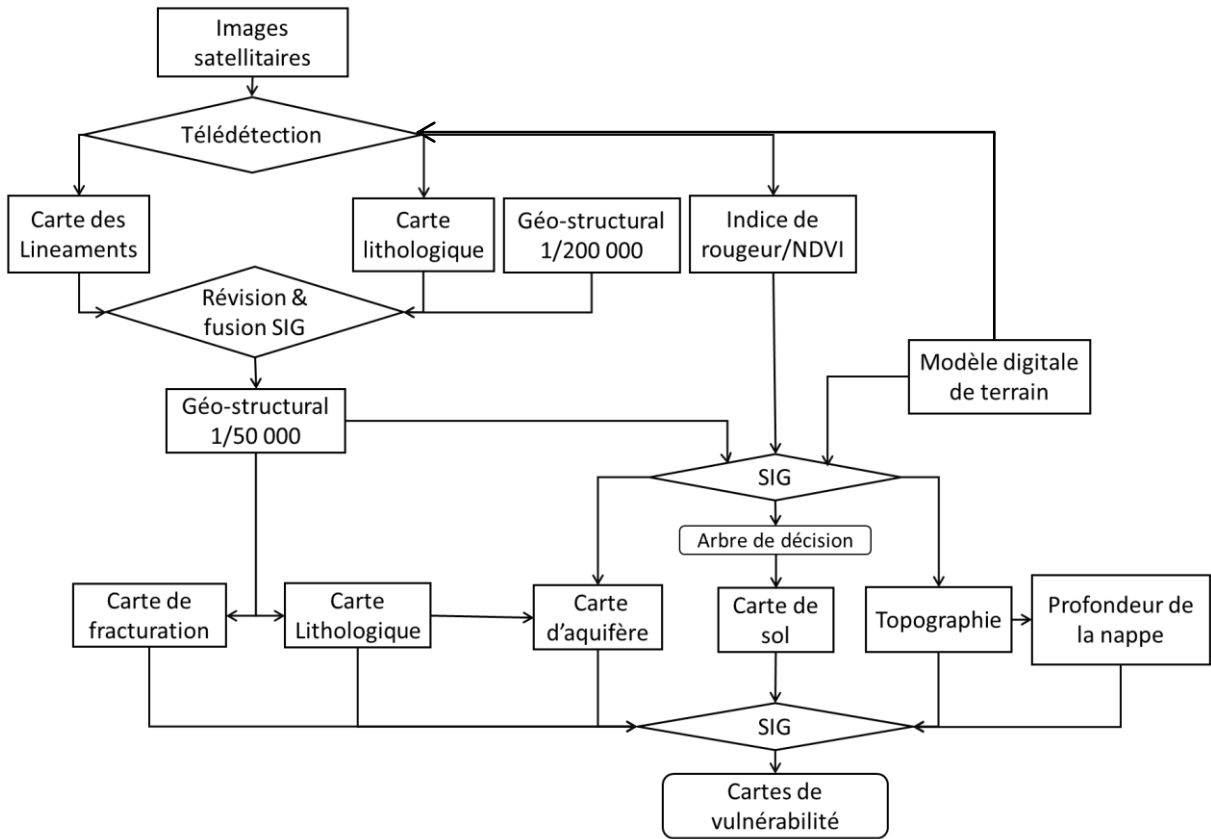


Figure 62 : Différentes étapes de traitement des données

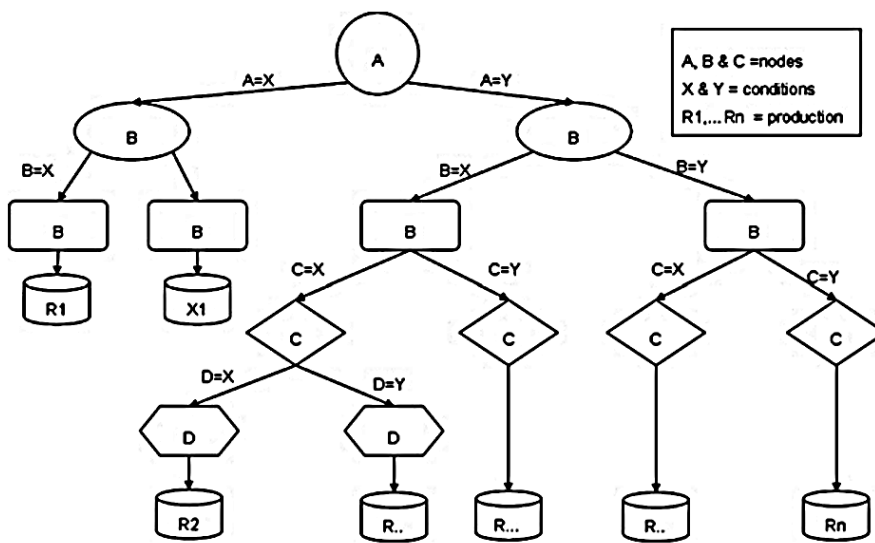


Figure 63: Exemple d'un Arbre de décision (Moonjun et al 2010)

III-1-2-2. Données et méthodes utilisées pour la réalisation des cartes de vulnérabilité

Ensuite, dans le SIG, nous avons créé et mis en forme la base de données comprenant toutes les cartes (carte géostructurale 1/50000, carte de sol, carte topographique) et les données bibliographiques (nature de la zone non saturés, facteur de confinement des nappes souterraines, profondeur des eaux souterraines, précipitations). Celles-ci constituent la base de données pour estimer les cartes de vulnérabilité des eaux souterraines par l'application des deux méthodes GOD et PI.

a-Méthode GOD

La méthode GOD, en raison de sa simplicité de concept et d'application, est la première méthode utilisée dans ce travail. L'indice de vulnérabilité de GOD (Foster, 1987; Foster et Hirata, 1988) caractérise la vulnérabilité à la pollution des aquifères en fonction des paramètres généralement disponibles ou faciles à déterminer (Foster et al, 2007) (fig. 64) :

- Facteur G : Confinement des eaux souterraines dans l'aquifère considéré ;
- Facteur O : Couches sus-jacentes (zone non-saturée ou lits confinés), en termes de caractère lithologique et de degré de consolidation qui déterminent leur capacité d'atténuation des contaminants ;
- Facteur D : La profondeur de la nappe phréatique ou de battement de la nappe dans les aquifères confinés (niveau en charge).

La méthodologie empirique proposée pour l'estimation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères (Foster et Hirata, 1988) comporte un certain nombre d'étapes distinctes :

- Premièrement, l'identification du type de confinement des eaux souterraines, avec l'indexation consécutive de ce paramètre sur l'échelle 0–1 ;
- Deuxièmement, la spécification des strates qui recouvrent la zone saturée de l'aquifère en termes de ;
 - (a) degré de consolidation (et donc probablement présence ou absence de perméabilité due aux fissures),
 - (b) type de lithologie (et donc indirectement la porosité efficace, la perméabilité et la teneur en humidité de la zone non saturée ou rétention spécifique); cela mène à une deuxième classification sur une échelle de 0,4 à 1,0 ;

- Troisièmement, l'estimation de la profondeur de la nappe phréatique (des aquifères non confinés) ou la profondeur du toit (pour les aquifères confinés), avec un classement sur l'échelle de 0,6 à 1,0.

L'indice de vulnérabilité GOD (IG), est déterminé par cotation numérique pour chaque paramètre (Ii) puis leur multiplication. L'équation est la suivante :

$$Iv = IG * IO * ID$$

La génération de la carte de GOD des indices de vulnérabilité des aquifères suit les procédures indiquées dans la figure 65.

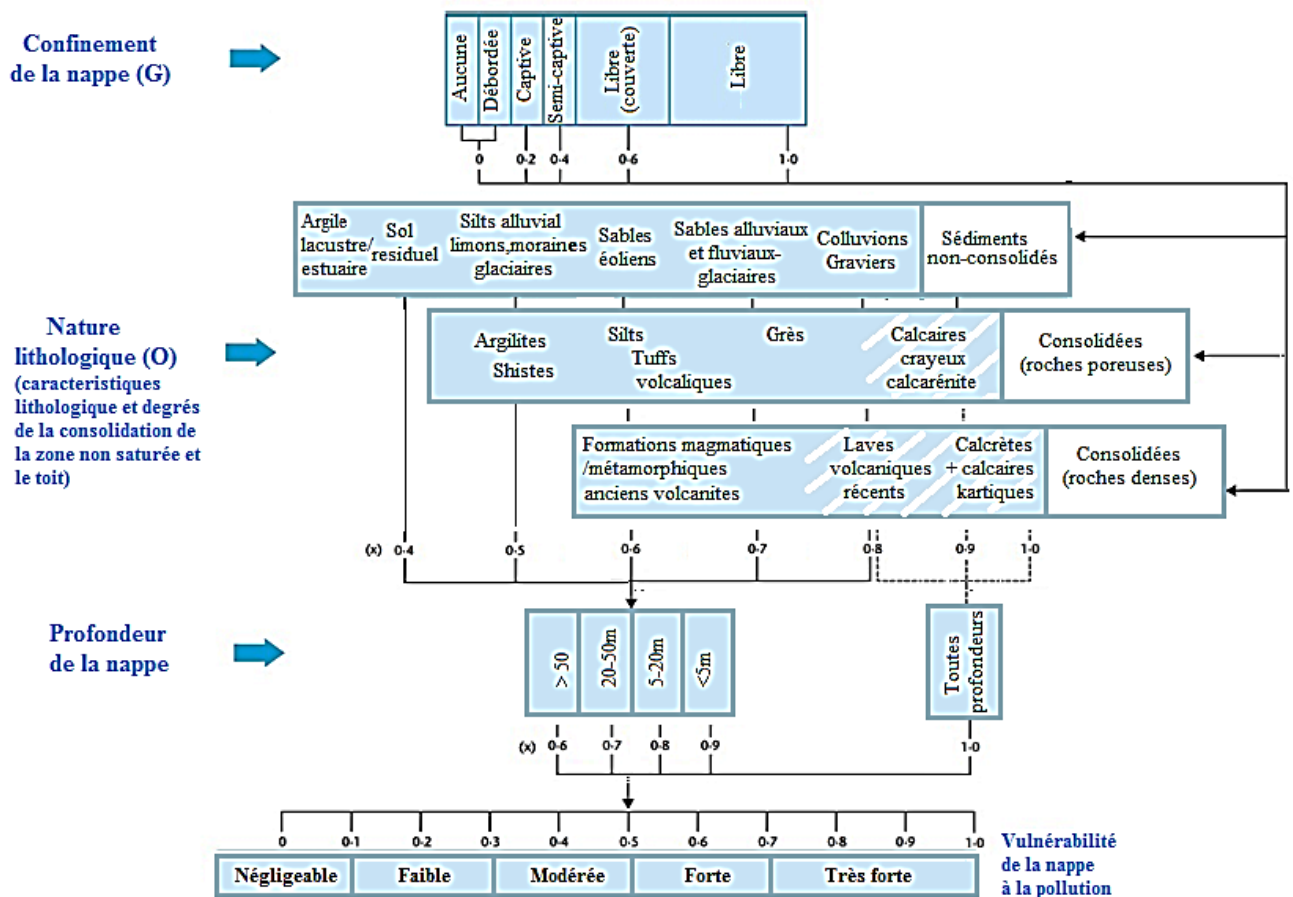


Figure 64 : Modèle GOD pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution d'un aquifère (Foster *et al* 2007)

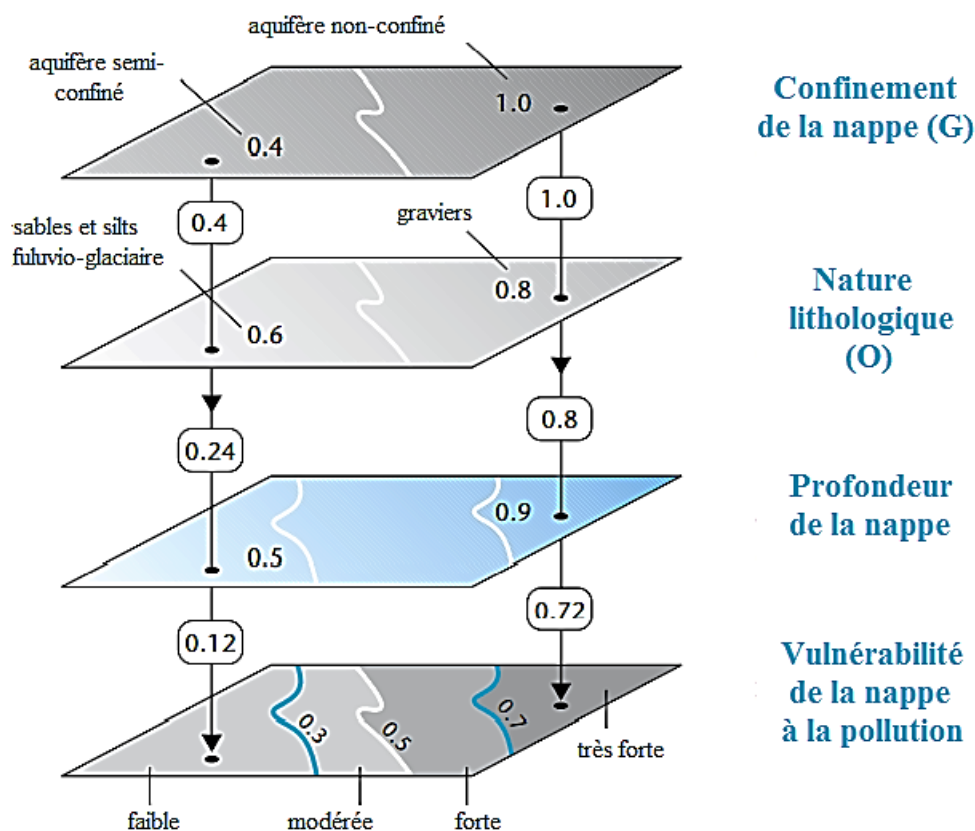


Figure 65 : Génération d'une carte de vulnérabilité à la pollution des aquifères à l'aide du Système GOD (Foster *et al* 2007)

b- Méthode PI

Pour plus de précision, et en raison de la forte fracturation constatée dans la zone d'étude (fig. 66), nous décidons d'évaluer la vulnérabilité par une méthode très simple, comme GOD, et une autre méthode plus complexe, PI qui a inclus le facteur « fracturation » pour évaluer la vulnérabilité. Il est utilisé pour estimer l'indice de vulnérabilité en tenant compte d'un plus grand nombre de paramètres (linéament, infiltration par fracturation, sol...).

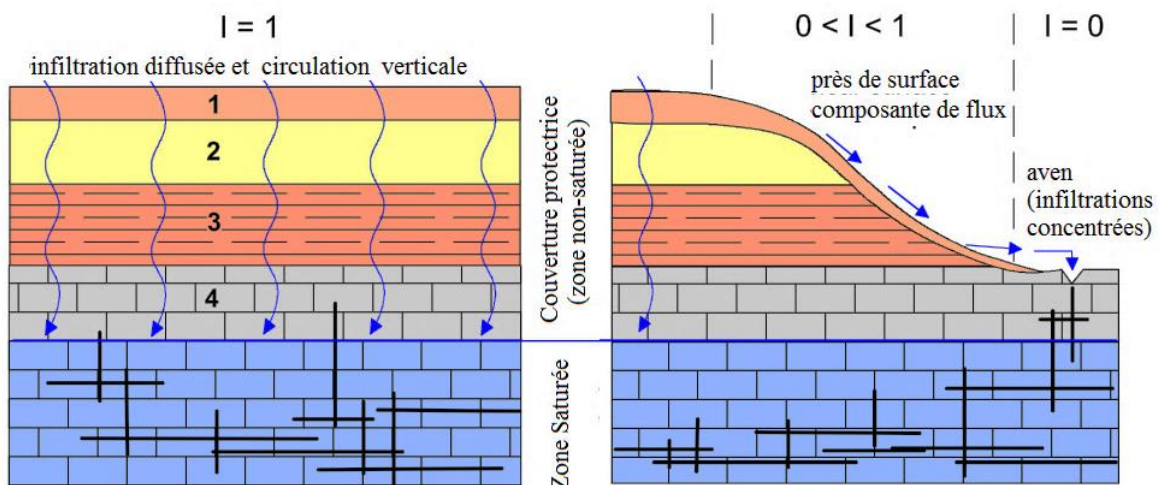
La méthode PI est une approche combinée fondée sur le SIG pour cartographier la vulnérabilité des eaux souterraines pour tous les types d'aquifères, mais en tenant particulièrement compte du karst. Le PI calculé selon une version modifiée de la méthode GLA (Hölting *et al.* 1995), est basé sur un modèle source-voie-cible : la surface du sol est supposée être la source potentielle de contamination, la nappe de l'aquifère supérieur est la cible. Ainsi, la voie comprend tout ce qui est entre la surface du sol et le niveau de la nappe.

La carte de vulnérabilité PI est utilisée pour la protection des ressources, reposant sur deux facteurs : la couverture protectrice (facteur P) et les conditions d'infiltration (facteur I) (Goldscheider, 2003).



Figure 66 : Photos des affleurements montrant la fissuration des roches dans la zone d'étude.
Grès de la formation de Aïssa (a) et de Tiout (b)

La couverture protectrice résulte de l'épaisseur et de la conductivité hydraulique de toutes les couches entre la surface du sol et la nappe phréatique (y compris le sol (terre végétale), le sous-sol et la zone non-saturée (substrat rocheux non karstique et karstique)) (fig. 67).



a. b.
Figure 67 : Illustration de la méthode PI : a. quand l'infiltration est diffusée, b. quand il y a un ruissellement et/ou infiltration concentrée) 1. topsol (terre végétale), 2. subsol, 3. substrat rocheux non-karstique, 4. substrat rocheux karstique non-saturé. En relation avec le facteur I. (Goldscheider *et al*, 2000)

Facteur P

Le facteur P décrit la fonction protectrice de toutes les couches qui pourrait exister entre la surface du sol et le niveau de la nappe :

- Topsol « la terre végétale » : la plus active biologiquement, la couche supérieur du sol ; pédologiquement les horizons A et B,
- le Subsol (sous-sol) : la couche de sédiment non-consolidé qui se trouve entre le sol et la roche mère ; le plus souvent des dépôts quaternaires,
- la couche non-karstique et la zone karstique non saturée.

L'attitude protectrice est évaluée sur la base de :

- la capacité effective au champ du sol (eFC) (fig. 68) : déterminée au laboratoire pour chaque horizon du sol ou bien déduite en utilisant les tables standards (Bodenkunde 1982).
- la distribution granulométrique des particules du sol,
- la lithologie,
- la fissuration et la karstification de la roche (zones saturée et non-saturée),
- l'épaisseur de toutes les couches,
- la moyenne annuelle de la recharge
- et éventuellement la pression d'artésianismes de l'aquifère.

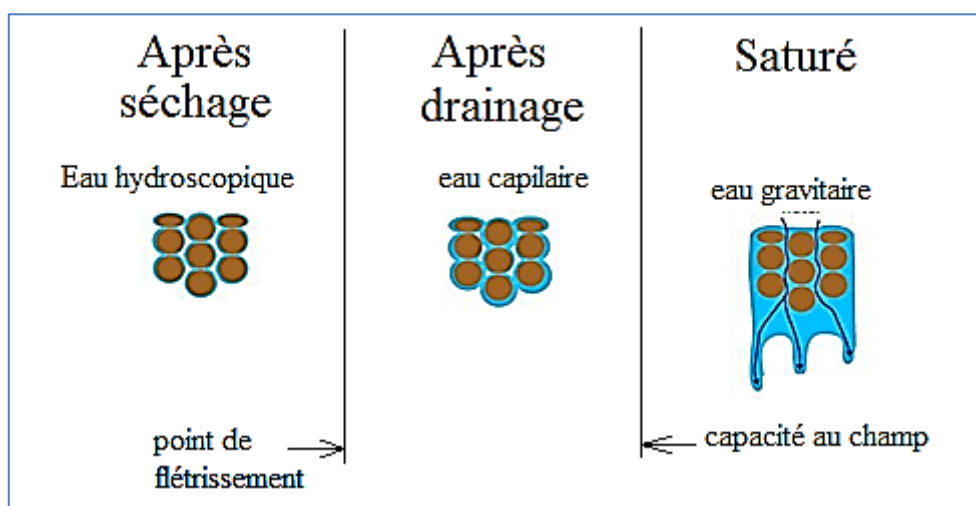


Figure 68 : Etat de l'eau dans le sol

La fourchette totale est divisée en 5 classes, de P=1 pour un degré de protection extrêmement faible à P=5 pour des couches sus-jacentes très épaisses et protectrices. Une échelle logarithmique décennale est appliquée ; donc il faut une cote de protection de 10 fois plus élevée pour que le facteur P ait une classe supérieure. La distribution du facteur P est présentée dans la carte P.

Le schéma de calcul et d'évaluation du facteur P est présenté à la figure 69 :

- **La cote T** : est attribuée à des valeurs (intervalles) de la capacité au champ « eFC » (capacité effective de rétention maximale en eau du sol) à moins d'1m de profondeur du sol (terre végétale).
- **La cote S** est attribuée pour le sous-sol en fonction de sa nature et la distribution de la taille du grain qui le constitue ;
- **La cote R** est attribué en fonction de la quantité de recharge (précipitations efficaces) par année ; la différence entre la précipitation P et l'évapotranspiration potentielle ETP annuelles.
- Le produit du **facteur L** (pour la lithologie) et du **facteur F** (pour le degré de fracturation et de karstification) donne **La cote B** pour le substrat rocheux.
- Les cotes pour le sous-sol (S) et le substrat rocheux (B) sont multipliés par le facteur **M** qui est l'épaisseur respective en mètres.

Les strates de faibles épaisseurs et de faible perméabilité peuvent être négligées si elles ne sont pas latéralement étendues, mais se présentent sous forme de lentilles.

Prise en compte de la pression artésienne dans l'aquifère par une cote supplémentaire de **A** = 1500 points.

Les cotes pour le total de l'efficacité de la couverture protectrice **P_{TS}** est calculée selon la formule de la figure 68, qui est similaire à celle utilisée dans la méthode GLA (Hölting *et al.* 1995).

La classe des cotes possibles pour la fonction de protection totale **P_{TS}** est subdivisée en cinq classes, qui sont les facteurs P finaux dans la méthode PI. Les classes sont beaucoup plus larges que celles de la méthode GLA originelle, ce qui permet une meilleure description de la variation naturelle élevée de la couverture protectrice : $P_{TS} \leq 10$ (exemple des graviers), est considéré comme très faible degré de protection et donc extrêmement vulnérable ($P = 1$),

alors qu'un degré de protection naturelle très élevé et une vulnérabilité très faible (P = 5) sont attribués à $P_{TS} > 10\ 000$ (exemple des argiles).

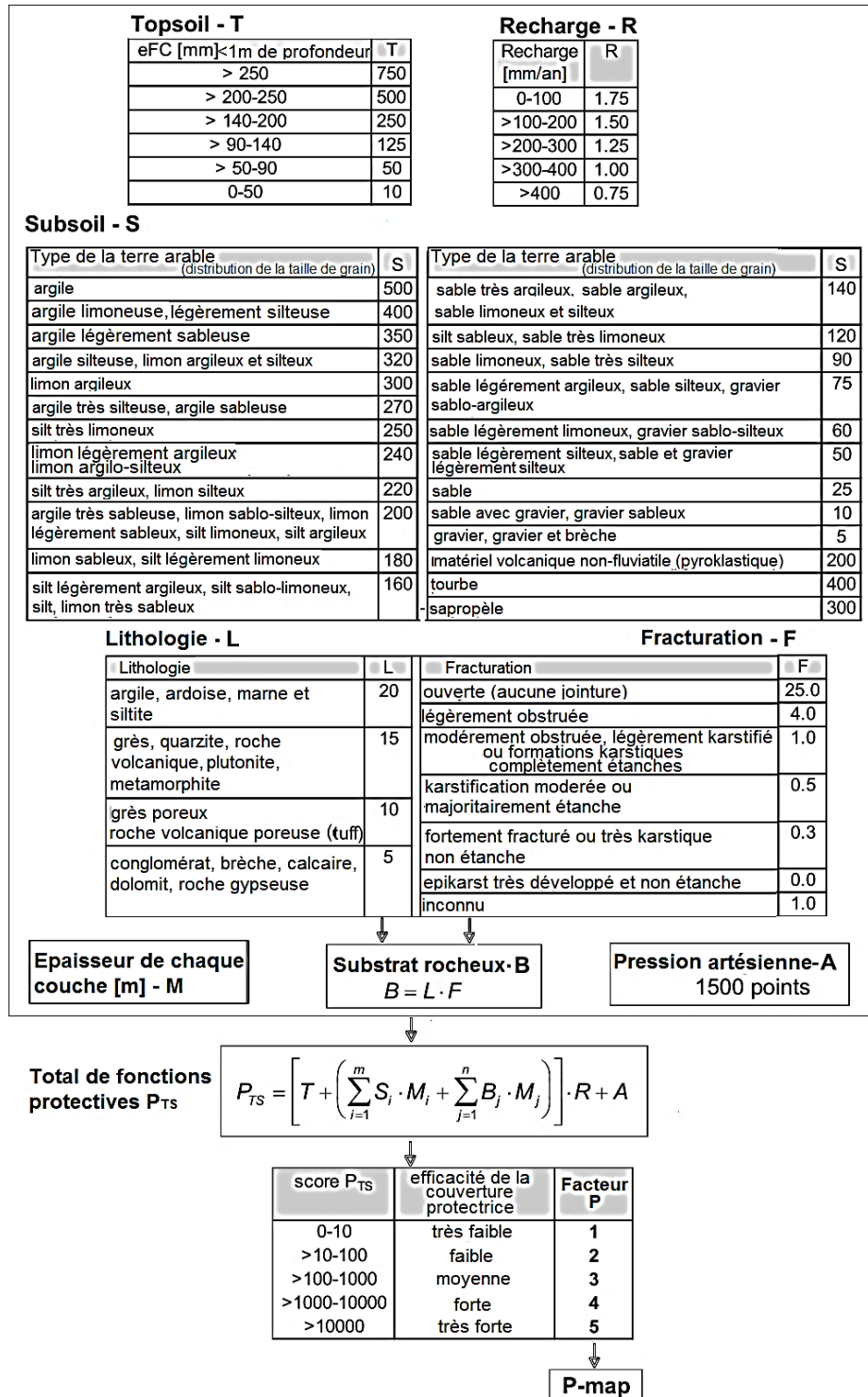


Figure 69 : Etapes et paramètres utilisés pour l'estimation du facteur P (Goldscheider *et al*, 2000)

Facteur I

Le facteur I décrit les conditions d'infiltration et, en particulier, le degré dont la couche protectrice est baypassée suite à un écoulement latéral de surface et souterrain qui pénètre dans l'aquifère karstique, exemple par une perte surtout dans le bassin versant d'un cours d'eau pérenne autrement dit la couverture protectrice protège les eaux souterraines que si les précipitations s'infiltrent d'une façon diffuse sans infiltration concentrée (fig. 70).

Le facteur varie entre 0.0 et 1.0 ; il est égal à **1** dans un sol horizontal et très perméable, où toute la recharge se fait de manière diffuse, c.-à-d. par infiltration (à partir du sol) et percolation (au niveau de la zone non saturée) ce qui indique que la protection n'est pas contournée et qu'elle est efficace à 100 %.

En revanche, le facteur I est égal à **0.0** sur une pente raide faite d'un sol à faible perméabilité qui concentre le ruissellement de surface vers un cours d'eau qui alimente une perte. Dans ce cas, la couverture protectrice est complètement baypassée (contournée).

Toutes les autres surfaces (reste de la surface) s'attribuent des valeurs intermédiaires (0.2, 0.4, 0.6, 0.8) ; le bassin versant d'une perte a une valeur comprise entre **0 et 1** en fonction de l'étendue de sa surface et la distance par rapport à la perte (zones tampons) et des propriétés du sol qui contrôlent les processus d'écoulement prédominant dans ce bassin :

- la végétation,
- la pente et
- la position d'un point donné à l'intérieur ou l'extérieur du bassin versant du cours d'eau.

Par conséquent, le facteur I (la carte I) est obtenu à l'aide de deux composantes (fig. 71) :

- Le facteur I' exprime l'estimation de l'infiltration directe relative à un écoulement de surface latéral et souterrain. Les facteurs déterminants sont les propriétés du sol, la pente et la végétation : La valeur du facteur I' est attribuée en fonction de la perméabilité et de l'épaisseur du sol, la pente et la végétation. Une valeur I' de 0,8 est attribuée aux zones bâties.
- La « carte du bassin versant de la perte » montre les zones d'alimentation des cours d'eau qui coulent et disparaissent vers la perte et des zones tampons de 10 m et 100 m des deux côtés des cours d'eau.

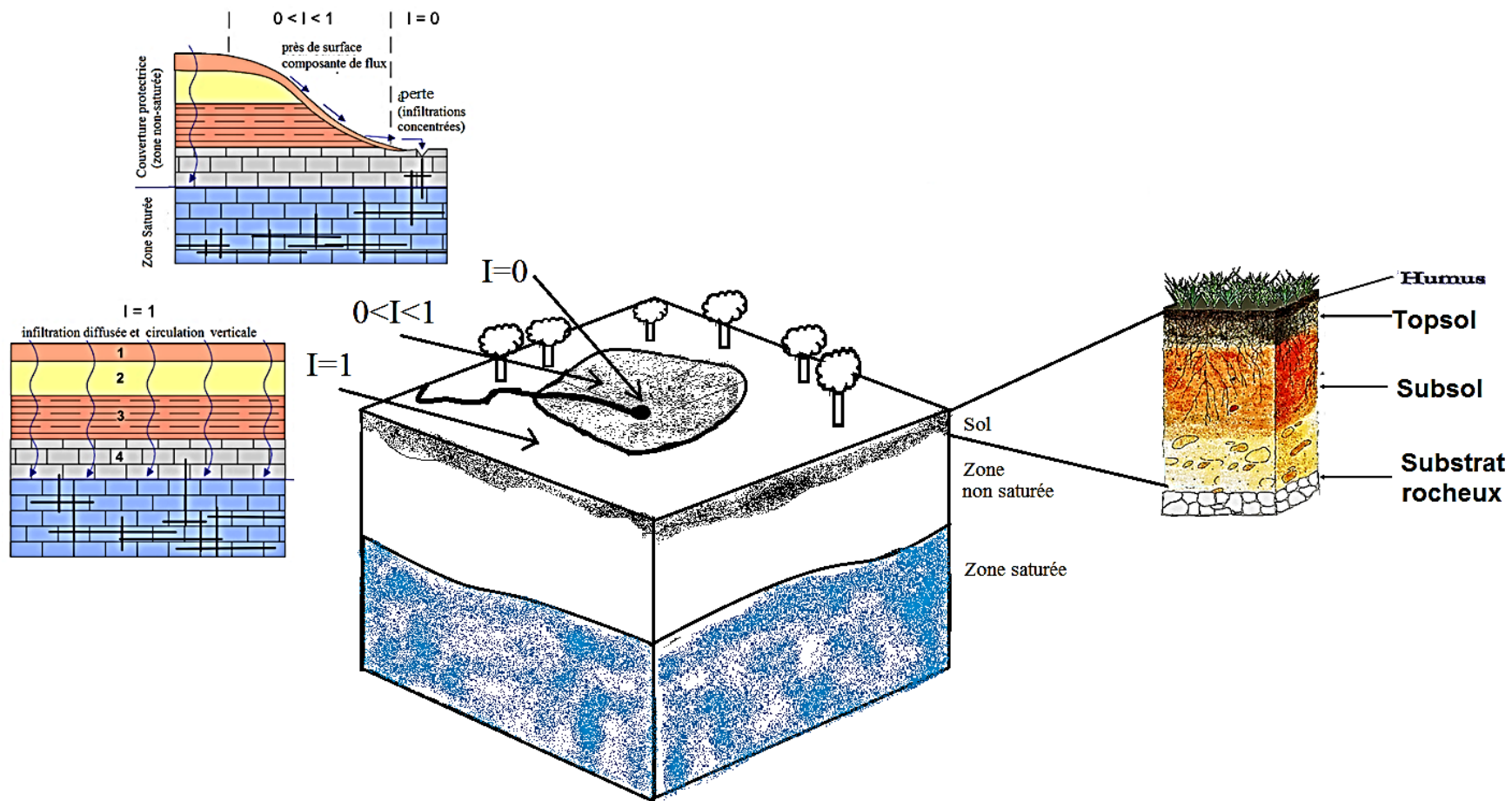


Figure 70 : Schéma des différents paramètres du facteur I

1ère étape: détermination de propriétés du sol

		profondeur de la couche perméable		
		< 30 cm	30-100 cm	> 100 cm
conductivité hydraulique à saturation [m/s]	> 10 ⁻⁴	Type D	Type C	Type A
	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁴		Type B	
	10 ⁻⁶ -10 ⁻⁵	Type E		
	< 10 ⁻⁶	Type F		

2ème étape: Détermination du facteur I'

Occupation du sol: Forêt			
Propriétés du sol	Pente		
	< 3.5 %	3.5 - 27 %	> 27 %
Type A	1.0	1.0	1.0
Type B	1.0	0.8	0.6
Type C	1.0	0.6	0.4
Type D	0.8	0.6	0.4
Type E	1.0	0.6	0.4
Type F	0.8	0.4	0.2

Occupation du sol: champ, prairie, pâturage			
Soil properties	Pente		
	< 3.5 %	3.5 - 27 %	> 27 %
Type A	1.0	1.0	0.8
Type B	1.0	0.6	0.4
Type C	1.0	0.4	0.2
Type D	0.6	0.4	0.2
Type E	0.8	0.4	0.2
Type F	0.6	0.2	0.0

Agglomérations: I' = 0.8

3ème étape: Détermination du facteur I






Carte de flux de surface	facteur I'					
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
perte, flux descendant, tampon 10m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100 m tampon	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
bassin versant d'une rivière permanente	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.0
reste de la surface	0.4	0.6	0.8	1.0	1.0	1.0

↓
I-map

Figure 71 : Etapes et paramètres utilisés pour l'estimation du facteur I (Goldscheider *et al*, 2000)

Le facteur de protection PI est obtenu par multiplication de P et I. Le facteur PI (ou π) varie entre les valeurs 0.0 et 5.0, avec les hautes valeurs coïncide avec les hautes degrés de la protection naturelle et la faible vulnérabilité (tableau 19). Plus de détails sur PI peuvent être trouvés dans (Goldscheider *et al*, 2000).

Tableau 19 : Différentes classes du facteur PI, P et I (Goldscheider *et al*, 2000)

	Carte de vulnérabilité		Carte de P		Carte de I	
	vulnérabilité de l'aquifère supérieur description verbale	facteur π	Efficacité de la couverture protectrice description verbale	facteur P	Degré de contournement description verbale	facteur I
	très forte	0-1	très faible	1	très fort	0-0.2
	forte	>1-2	faible	2	fort	0.4
	modérée	>2-3	modérée	3	modéré	0.6
	faible	>3-4	forte	4	faible	0.8
	très faible	>4-5	très forte	5	très faible	1.0

III-1-2-3. Moyen de validation

La validation des cartes de vulnérabilité des eaux souterraines peut se faire de plusieurs façons (Marin *et al*, 2015). Parmi les méthodes, la comparaison de l'indice de vulnérabilité avec les paramètres de qualité de l'eau est la plus utilisée avec de résultats fiables (Ghazav et Ebrahim, 2015). Pour valider les cartes de vulnérabilité, nous avons utilisé les indicateurs de pollution des eaux souterraines à partir des analyses d'eau : NO_3^- de 56 forages (ADE, Algérienne Des Eaux 2018-2019). Les concentrations des nitrates des eaux souterraines sont comparées aux cartes GOD et PI et utilisé pour l'étude de corrélation.

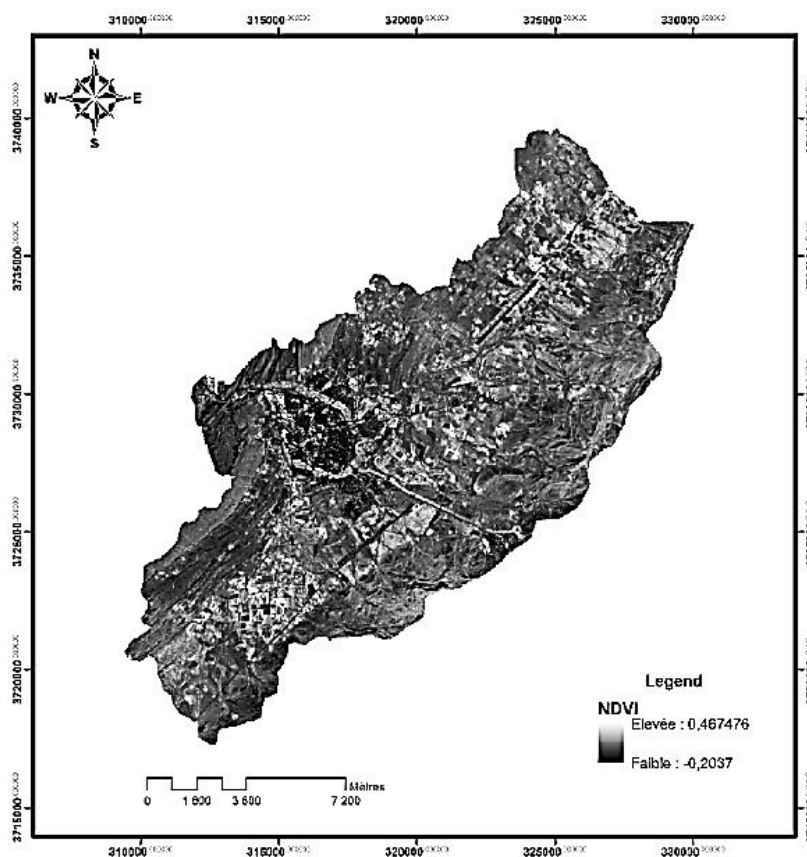
III-2. Résultats et discussions

III-2-1. Traitement par la télédétection

Dans cette étude, nous avons utilisé le traitement par la télédétection pour identifier la lithologie, le réseau de linéament et la nature du sol, dans le bassin versant d'Oued Deffa. Avant d'essayer les différentes classifications, le prétraitement (correction radiométrique et correction atmosphérique) a été effectué pour obtenir des données de réflectance.

III-2-1-1. Indice de végétation par différence normalisé (NDVI)

L'indice de végétation par différence normalisé est considéré dans de nombreuses études (Martiny *et al*, 2006; Guerrero *et al*, 2016, Kazi Tani, 2016; Yadav et Borana, 2019) comme un paramètre significatif de la cartographie de l'occupation des sols dans les zones arides; sur la figure 72(a), NDVI présente une faible valeur, entre -0,2 et 0,45. Dans l'histogramme de NDVI (fig. 72(b)), les valeurs ont une « courbe en cloche » à 0,1, plus de 32 % de la surface d'étude se trouve dans cette première classe (0,1 correspond aux zones d'affleurement de la roche, pas ou faible végétation). Entre 0,1 et 0,3, nous avons 67,7 % d'arbustes caractérisant les steppes arides (Weier et Herring,



2008; Benslimane *et al*, 2008). Seulement 0,1 % de la valeur élevée de NDVI (>0,3-0,45) indique une couverture végétale considérable.

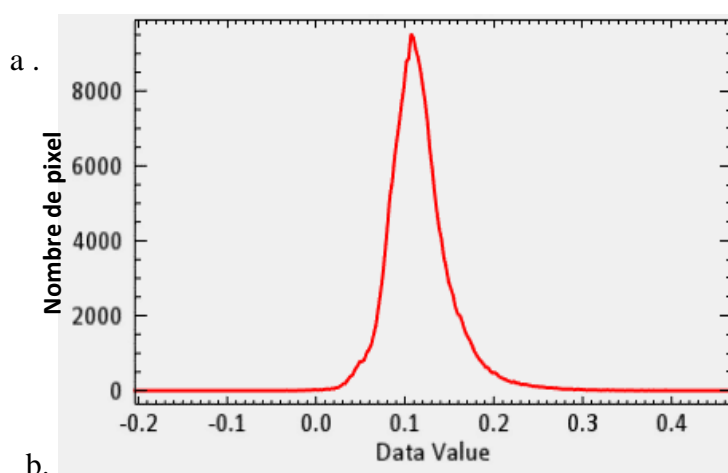


Figure 72 : (a) image de NDVI et (b) son histogramme de la région d'étude

Les faibles valeurs de NDVI indiquent l'absence de couverture végétale dans la zone d'étude, qui permet de mieux interpréter les images satellitaires.

III-2-1-2. Composition coloré RVB

Les importants résultats des analyses par télédétection, sur lesquels nous nous sommes basés en premier lieu pour classer la lithologie sont la composite coloré (765, 753 et 543) (fig. 73) et les ratios assemblés en RVB : (6/7, 6/4, 6/5) (6/7, 4/2, 5/4) et (7/6, 5/6, 2/4) (fig. 74). Les principales caractéristiques qui sont généralement visibles par les traitements de la télédétection sont les affleurements lithologiques ainsi que les failles ou linéaments. Pour cette raison, des images de combinaisons de bandes pour cette zone d'étude ont été créées pour montrer la délimitation des limites d'affleurement pour chaque scène d'image qui a été traitée par la création d'un ensemble d'images (RVB et ratio) :

Les bandes (7, 6 et 5) ont donné une image composite en fausses couleurs avec une image améliorée des affleurements rocheux dans les tons violet clair et vert olive, la végétation apparente en bleu.

Les bandes 7, 5 et 3 donnent la couleur verte à la formation argilo-calcaire et violette au grès.

La dernière combinaison de bandes 5,4 et 3 donne la nuance rouge pour la zone agricole, le rose et le gris pour le grès et les affleurements argileux.

En conséquence, une composite de couleur de rapport de bande a été réalisé en assemblant les rapports : (6/7, 6/4, 4/2), (6/7, 4/2, 5/4) et (7/6, 5/6, 2/4) en RVB, respectivement. Comme il est clair dans ces images, les limites de formation sont plus évidentes que dans les cartes de combinaisons de bandes.

III-2-1-3. Filtres directionnels :

Pour élaborer la carte des linéaments, nous avons utilisé quatre filtres avec des directions : 0, 45°, 90° et 135°. L'assemblage des résultats des filtres (réseau de failles) est illustré à la figure 75a. La rosace des linéaments est présentée à la figure 75b.

Les filtres directionnels utilisés pour cartographier les linéaments du bassin versant d'oued Deffa, confirment et coïncident parfaitement avec les axes des structures géomorphologiques (anticlinaux et synclinaux) et avec la structurale régionale de la zone d'étude ;

La rosace des linéaments montre la fréquence directionnelle des linéaments cartographiés sur la zone d'étude avec deux tendances importantes dans les directions du N40° et du N150°, qui sont également les principales directions des structures régionales dans le Djebel Amour (Stamboul, 2005).

La validation de la lithologie et du réseau de linéament se faisait dans le SIG. La figure 76 présente la carte géostructural du bassin versant d'oued Deffa.

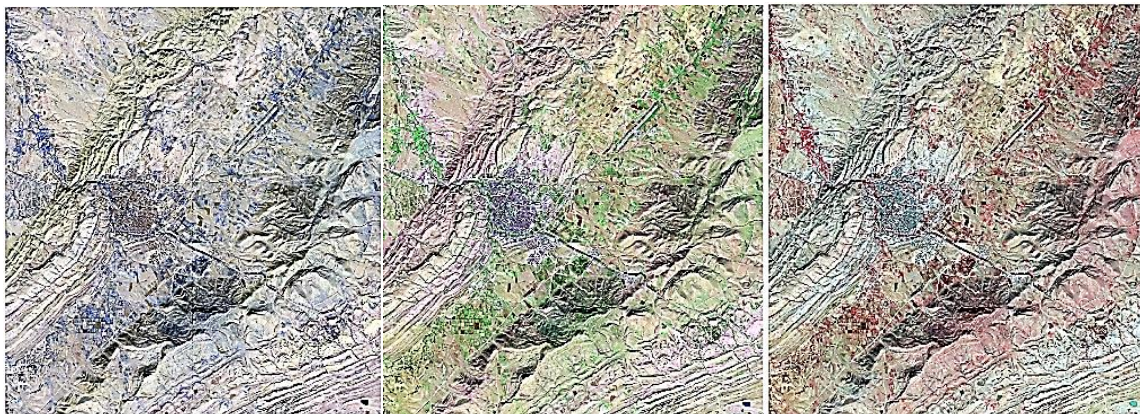


Figure 73 : Composition coloré des images Landsat 8-OLI, RGB=765, 753, 543

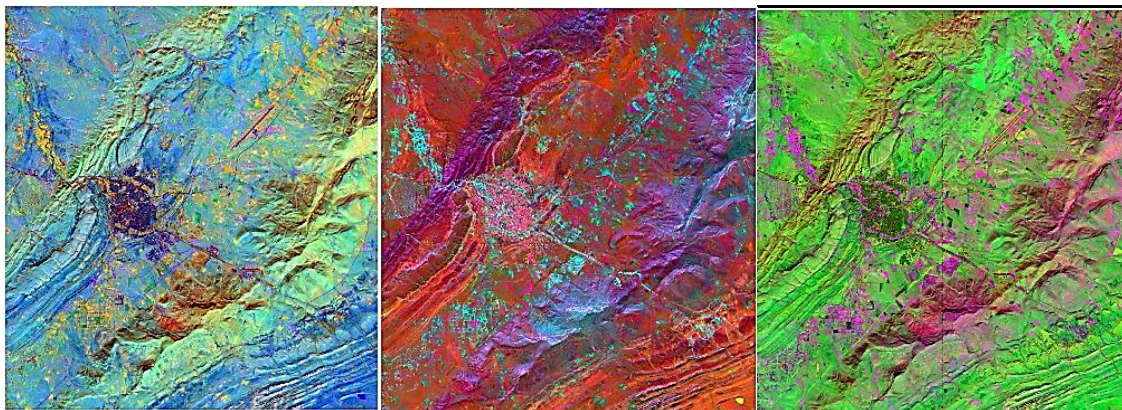


Figure 74 : Assemblage des bands ratios des images Landsat 8-OLI en RGB: (6/7, 6/4, 6/5) (6/7, 4/2, 5/4) et (7/6, 5/6, 2/4)

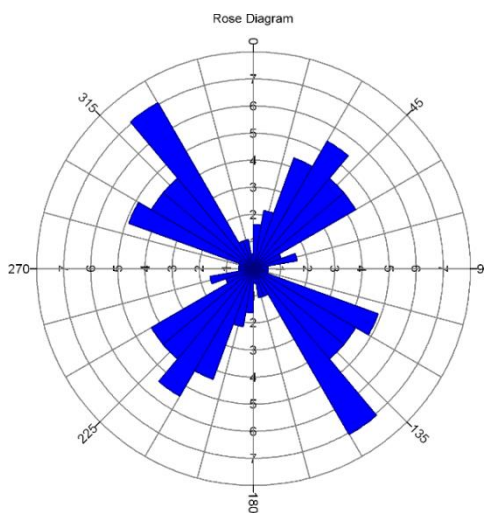
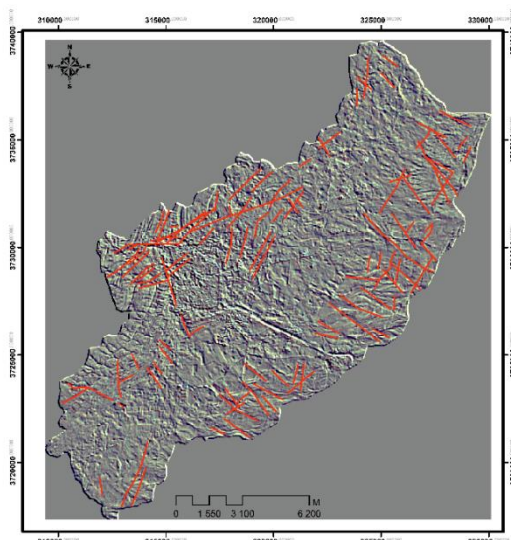


Figure 75 : (a) Réseau de failles par assemblage des résultats des 4 filtres directionnels (le fond est celui du filtre 135°) de l'image Landsat 8 OLI, (b) rosace des résultats des linéaments (sur RockWork)

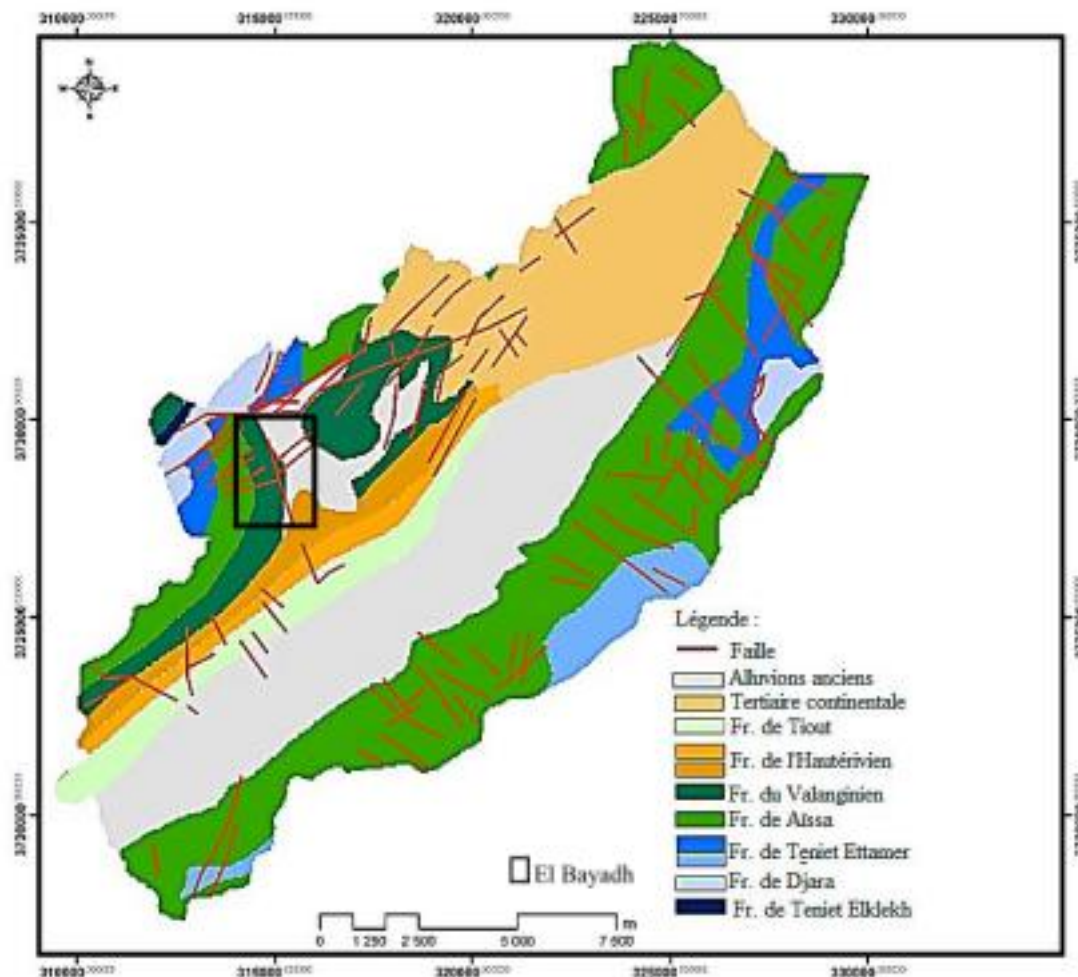


Figure 76 : Carte géo-structurale en rassemblant toutes les données dans le SIG

III-2-1-4. Arbre de Décision :

La seconde catégorie de traitement par la télédétection sur laquelle nous nous sommes basés pour la classification des sols, consiste à calculer l'IR (fig. 77) et l'intégrer dans AD avec les paramètres de pente et de la lithologie (fig. 78). Les résultats donnent quatre classes d'occupation des sols (fig. 79) : Lithosols, sols peu développés (Sol P.D.), Calcisols et Fersialsols.

Pour le traitement pédologique, nous avons utilisé l'IR pour identifier la nature du sol :

- Les valeurs importantes coïncidaient avec la superficie agricole.

- Les faibles valeurs indiquent une absence totale de sol ou, dans notre cas, une zone d'urbanisation.

L'ensemble des paramètres implique le développement du sol dans la zone aride, les auteurs ont fréquemment utilisé la topographie, la lithologie et les indices du sol (indice de couleur, indice de luminosité...) pour prédire la carte du sol (Kazi Tani, 2016; Ben-Dor *et al*, 2006, Zeraatpisheh *et al*, 2018; Gray *et al*, 2016; Escadafal et Pouget, 1987). Dans notre cas, l'AD a été élaboré en utilisant les co-variables environnementales : pente, IR et lithologie. La carte a donné quatre classes de sols de nature différente : Les **lithosols** qui couvrent 42,67 % de la superficie correspondant à une pente supérieure à 5 %, lorsque la pente est inférieure à 5% et l'IR est inférieur à $0,17 \cdot 10^8$, 21 % de la superficie est occupée par des sols peu développés et des sols urbains. Le reste de la surface, selon les conditions de la nature lithologique montrent l'existence de 35% de **Fersialsols** et seulement 0,19% de **Calcisols**.

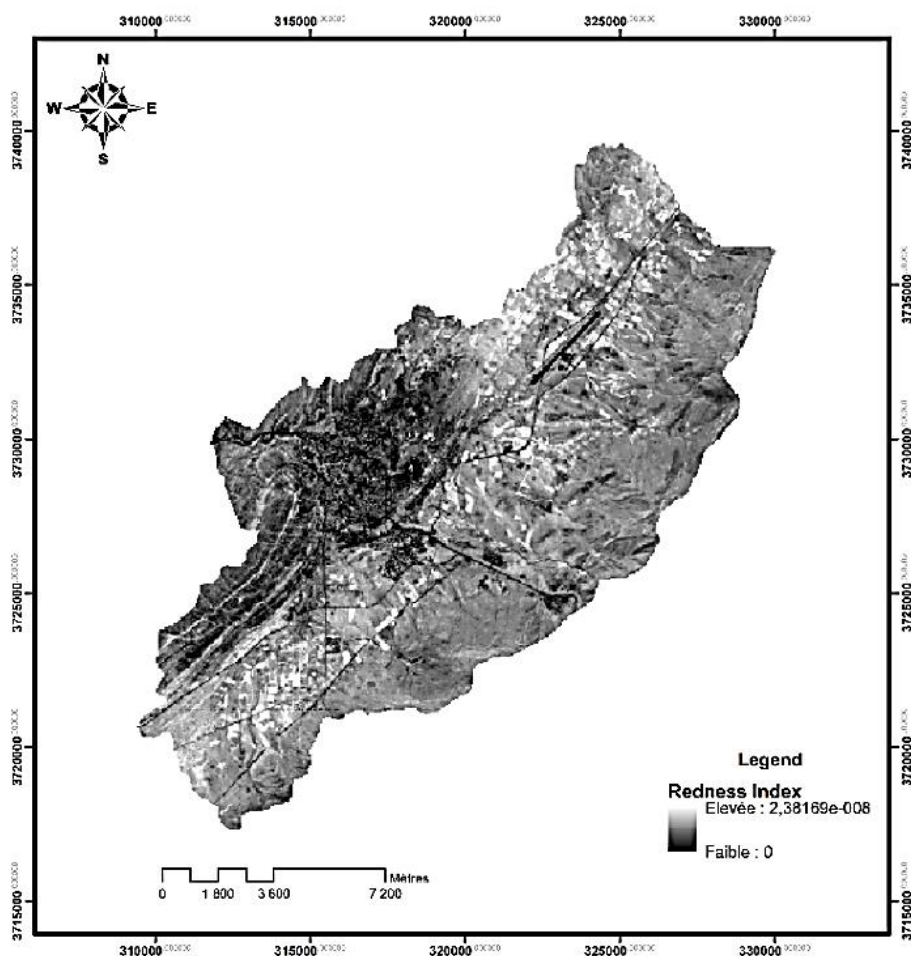


Figure 77 : Image de l'indice de Rougeur de la zone d'étude

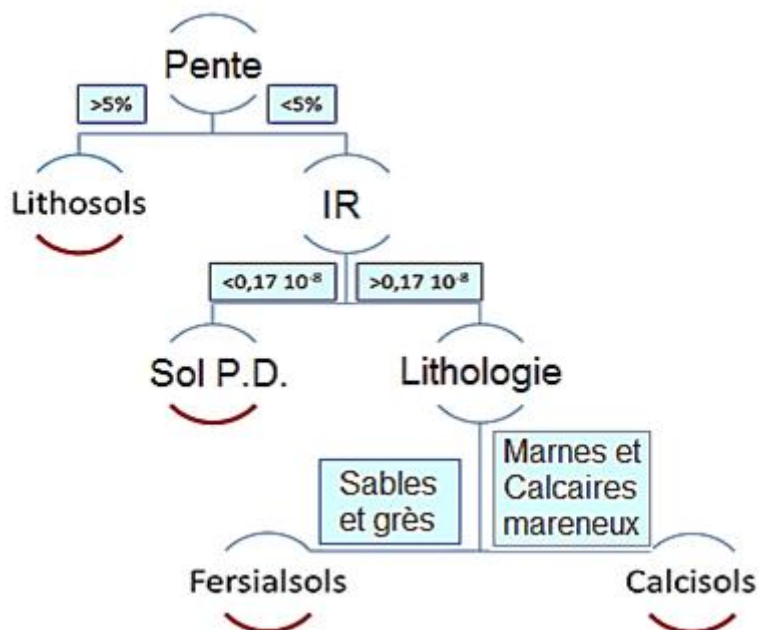


Figure 78 : Quatre classes résultant du traitement de l'AD

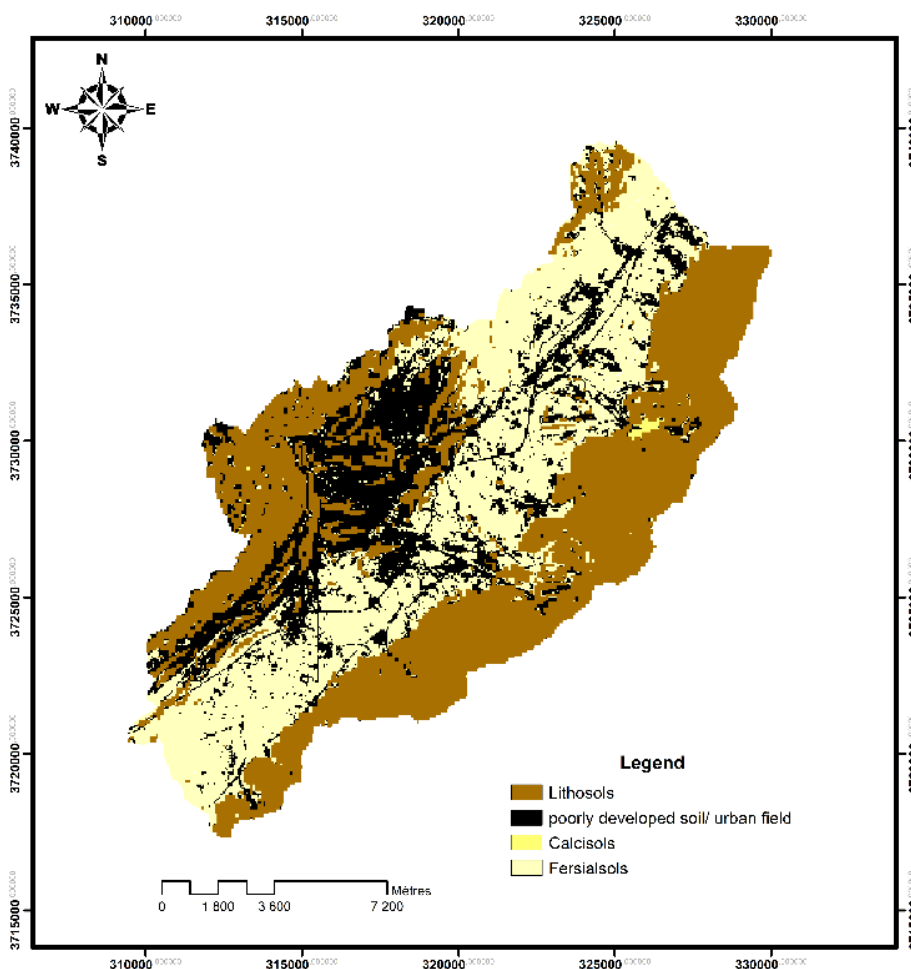


Figure 79 : Carte de l'AD de la zone d'étude

III-2-2. SIG et indices de vulnérabilités

La deuxième étape consiste à créer une base de données SIG pour compiler toutes les données pertinentes qui sont des données d'entrée pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution selon les méthodes GOD et PI (Foster *et al*, 2007; Goldscheider *et al*, 2000). Il s'agit notamment des résultats de traitement par télédétection et des données géologiques et hydrogéologiques.

III-2-2-1. Carte GOD

- **Couche G** : En se basant sur les résultats et nos conclusions hydrogéologiques (voir titre ...), nous avons attribué les côtes : 0 à l'affleurement de la formation de Teniet El Klakh, 0.2 aux formations valanginiennes car elles forment un toit aux formations plus profondes, 0.6 aux formations tertiaires et quaternaires parce qu'ils sont couverts et 1 aux reste des formations. La carte de la figure 80 et le tableau 20 représentent la couche G.

Tableau 20 : Cotes des formations aquifères selon l'indice G

Formation aquifère	Cote
Alluvions anciennes	0.6
Tertiaire continental	0.6
Fr. de Tiout Barrémien-Aptien-Albien	1
Hauterivien	1
Valanginien	0.2
Fr. de Aïssa Infra-Crétacé	1
Fr. de Teniet Ettemar Kimméridgien	1
Fr. de Djara Lusitanien	1
Fr. de Teniet Elklakh Callovien (Bathonien)	0

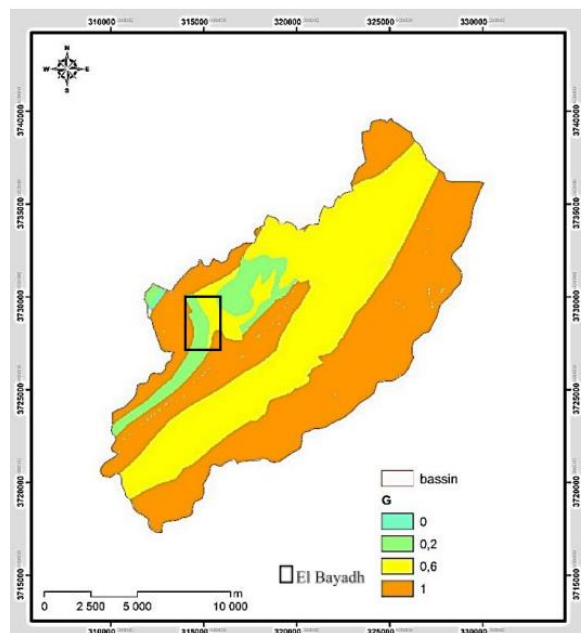
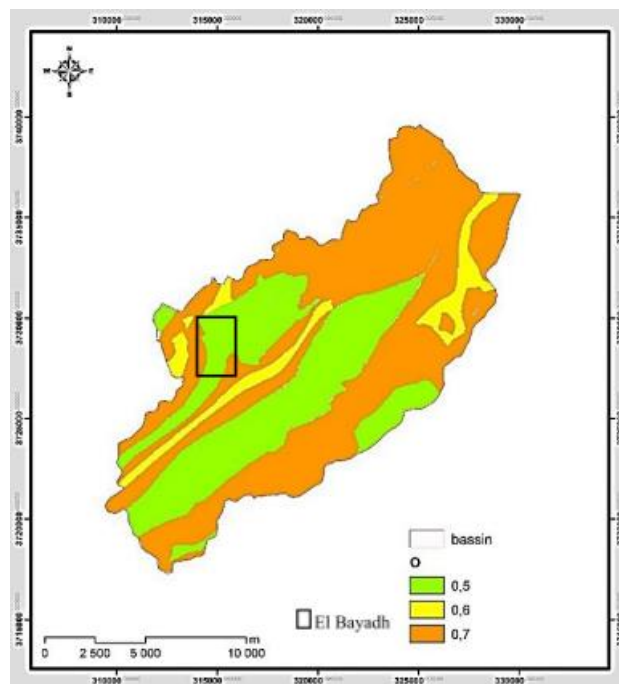


Figure 80 : Types d'aquifères de la couche G selon l'indice GOD

- **Couche O** : Le résultat géostructural de la télédétection, a servi à élaborer la couche O, identifiant le caractère lithologique et le degré de consolidation de la zone non-saturée ou des couches confinées. Le tableau 21 et la figure 81 résumant les cotes de cette couche.

Tableau 21 : Cotes de la nature lithologique de l'indice GOD

Nature lithologique	Cote
Alluvions anciennes (de l'argilite de sable)	0.5
Tertiaire continental (argile-sableuse)	0.6
Fr. de Tiout Barrémien-Aptien-Albien (grès)	0.7
Hauterivien (marno-calcaire)	0.6
Hauterivien (grès)	0.7
Valanginien (marno-calcaire)	0.5
Fr. de Aïssa Infra-Crétacé (grès)	0.7
Fr. de Teniet Ettamar Kimméridgien (argilo-calcaire)	0.5
Fr. de Djarra Lusitanien (alternance de grès et d'argile à intercalation de dolomie)	0.6
Fr. Kelakh Callovien (Bathonien) (marno-calcaire)	0.5



O selon l'indice GOD

Figure 81 : Nature lithologique de la couche

• **Couche D** : L'état piézométrique de 2003 et le modèle numérique de terrain ont servi à cartographier la profondeur de la nappe. Le tableau 22 et la figure 82 présentent les classes de profondeur utilisées.

Tableau 22 : Cotes de la profondeur de la nappe de l'indice GOD

Profondeur de la nappe	Cote
>5 m	0.9
5-20 m	0.8
20-50 m	0.7
>50	0.6

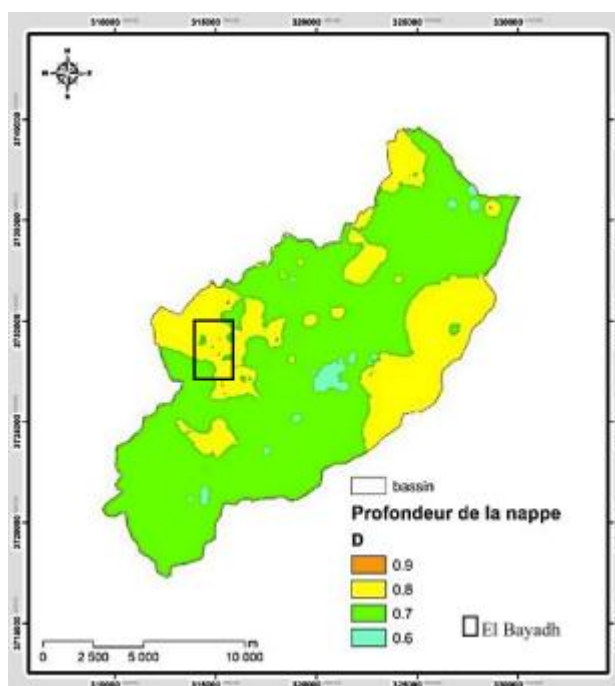


Figure 82: Profondeur de la nappe de la couche D selon de l'indice GOD

Le confinement des nappes (G), la nature lithologique des couches sus-jacentes (O) et la profondeur de la nappe phréatique (D) ont constitué trois couches pour la cartographie de

l'indice GOD (fig. 83). Cette approche nous a donné quatre classes de vulnérabilité, entre négligeable et forte, dont les deux classe faible à modérée occupent la majeure partie de la surface, principalement le centre du bassin dont 38% et 41 % de la surface du bassin versant présentent une vulnérabilité faible à modérée, 13% est de forte vulnérabilité.

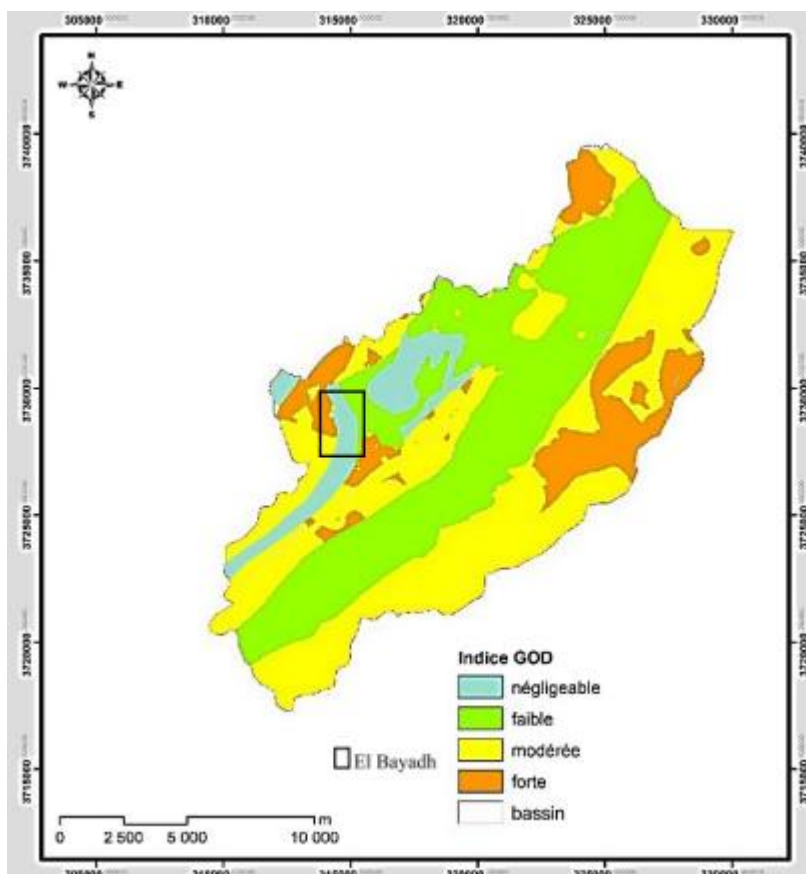


Figure 83 : Carte de vulnérabilité par la méthode GOD

III-2-2-2. Carte PI

En outre, l'utilisation et l'intégration des différentes cartes de traitement par télédétection : lithologie, linéament et la nature du sol, dans la base de données SIG, permet de calculer les indices de protection et d'infiltration. Ces couches ont servi à cartographier la vulnérabilité à l'aide de la méthode PI.

a- Carte du facteur P : Un ensemble de sous-couches (T, S, R, L, F) nous ont permis d'estimer le facteur P passant par le calcul du P_{ts} . Il s'agit d'une description détaillée sur les caractéristiques pédologiques, lithologiques et de la fracturation de la zone non-saturée.

Les couches Topsoil (T) et Subsoil (S), ont été élaborées sur la base des résultats de la télédétection, en relation avec la nature lithologique.

• **Sous couche Topsoil** : En raison du manque d'informations sur certaines propriétés du sol dans la zone d'étude, certaines hypothèses sont faites pour déterminer les valeurs T. Le tableau 23 et la carte (fig. 84) montrent la répartition de ce paramètre.

Type de Topsoil	eFC (estimée)	Cote T
Sablo-argileux-limoneux	0-50	10
Argilo-limoneux-sableux	>50-90	50
Sable limoneux	>90-140	125

Tableau 23 : Cotes de la sous-couche T

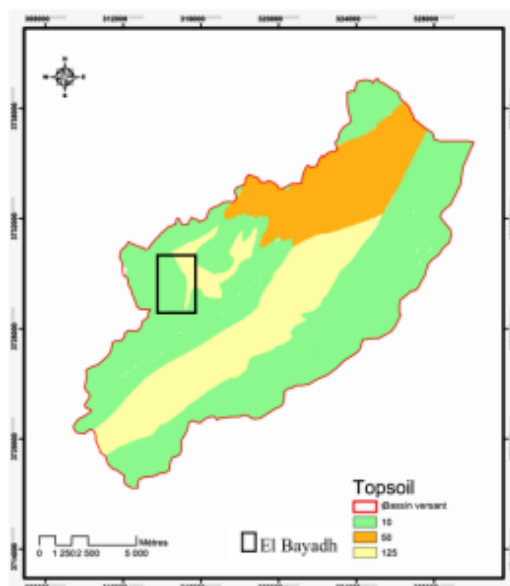


Figure 84 : Sous-couche du Topsoil (T)

• **Sous couche Subsoil** : a été élaborée sur la base des résultats de la télédétection, en relation avec la nature lithologique. Les valeurs utilisées sont représentées dans le tableau et la figure 85.

Type de Subsoil	Cote S
Sable	25
Argile très sableuse	200
Argile très silteuse	270
Limon argileux et silteux	320
Argile légèrement sableuse	350

Tableau 24 : Cotes de la sous-couche S

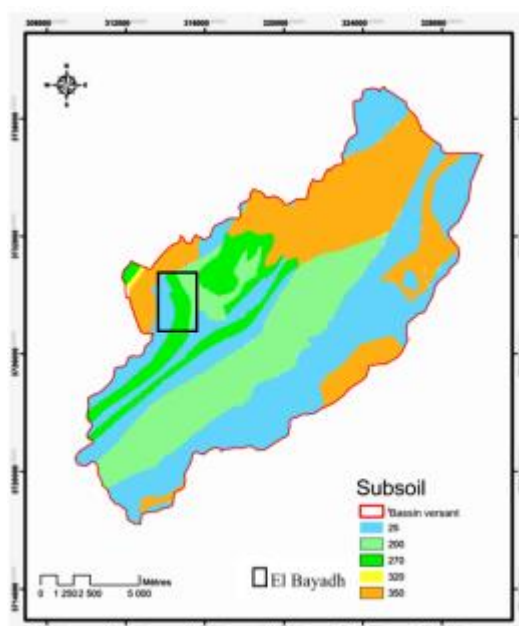


Figure 85 : sous-couche « Subsol » (S)

• **Lithologie** : En se basant sur la description lithologique des formations, nous avons attribué les cotes mentionnées dans le tableau 25 et la figure 86.

Tableau 25 : Cotes de la sous-couche L

Lithologie	Cote L
Tertiaire	10
Fr. de Tiout, Fr. de Aïssa, Hauterivien gréseux, Fr. de Djara, Fr. de Teniet Ettmar	15
Quaternaire, Valanginien, Fr Teniet Elkelakh.	20

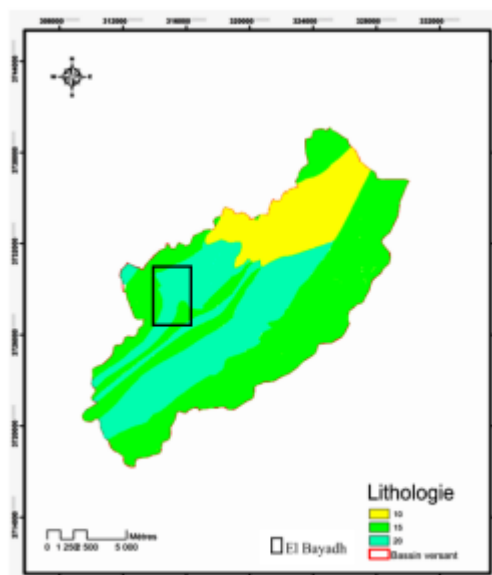


Figure 86 : sous-couche « Lithologie » (L)

• **Fracturation** : Prenant en considération le réseau de failles identifié par le traitement de la télédétection, nous avons choisi celles qui se trouvent sur des formations dures, qui sont « probablement » légèrement obstruée contrairement à celle quaternaires et tertiaires (tableau 26 et figure 87).

Fracturation	Cote F
Légèrement obstruée	4
Inconnu (état de la fracturation)	1

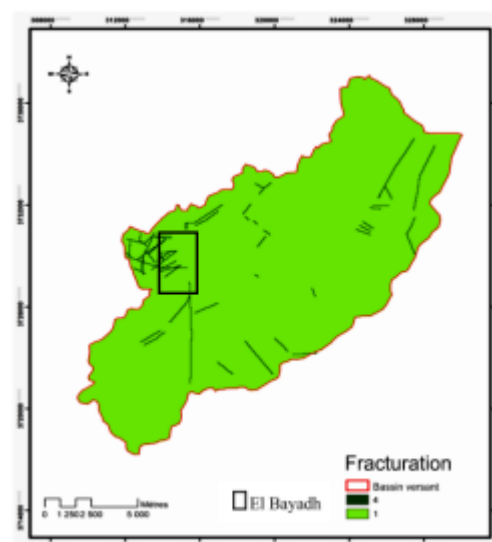


Tableau 26 : Cotes de la sous-couche F

Figure 87: sous-couche « fracturation » (F)

La multiplication des deux informations cartographiques lithologiques et fracturations nous a donné la sous-couche « substrat rocheux » (B) (fig. 88). Nous avons attribué la valeur 1.5 pour la couche recharge (R), selon nos estimation de la PE de l'année 2009 (titre II-2. 4) qui est entre 100 et 200mm/an.

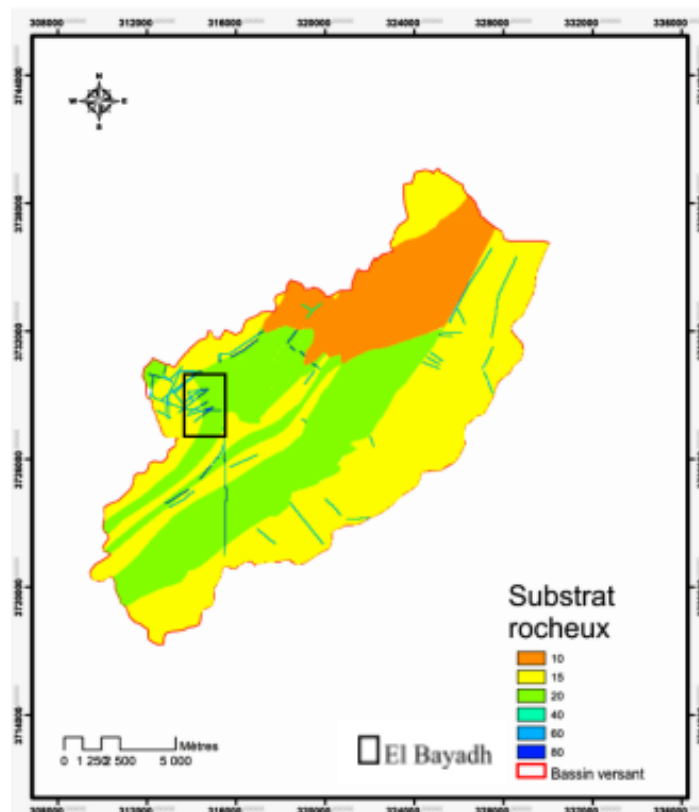


Figure 88 : Sous-couche « substrat rocheux » (B)

L'ensemble de ces couches a été utilisé pour calculer les valeurs du Pts, reclassé par la suite pour élaborer la couche P. La carte montre l'existence de trois classes, principalement les classes modérée et faible (fig. 89).

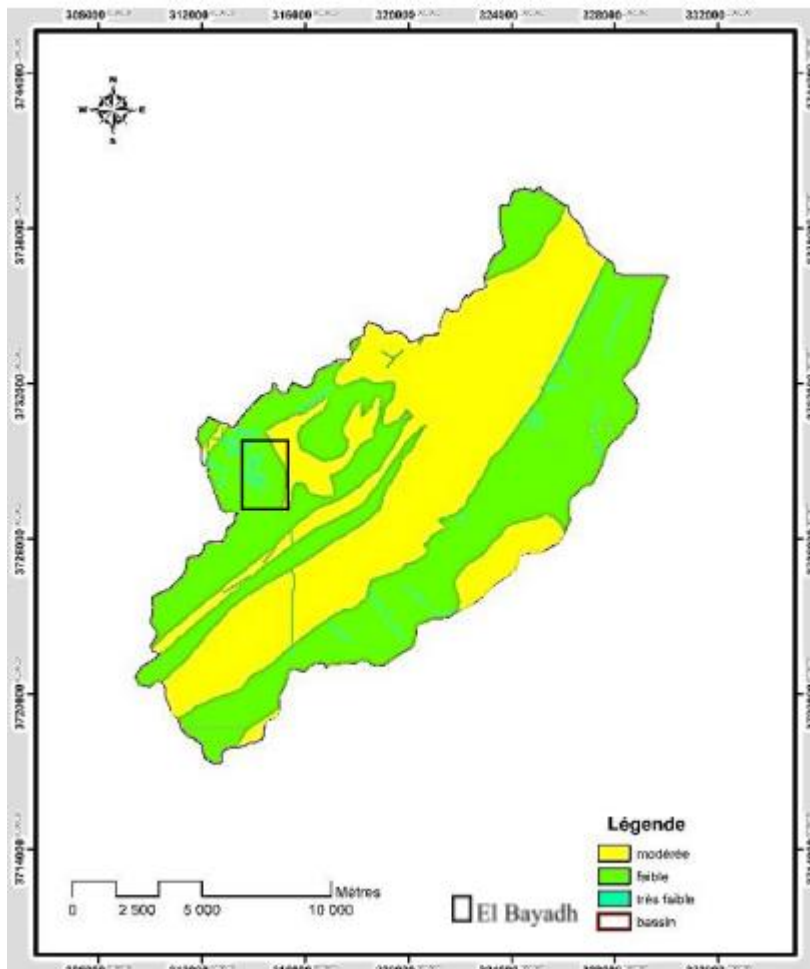


Figure 89 : Couche P selon l'indice PI

b-Carte du facteur I : Concernant les sous couches des conditions de l'infiltration I, ont été cartographier à partir des traitements de la télédétection (occupation du sol) et le modèle numérique du terrain MNT (pour la pente) ;

- **Propriétés du sol :** ont été choisi à la base des hypothèses sur la nature du sol et sa conductivité hydraulique. Les valeurs attribuées sont mentionnées dans le tableau 27 et la figure 90.

Tableau 27 : Cotes de la sous-couche Propriétés du sol

Propriétés du sol		Type de sol
30-100cm	10^{-5} - 10^{-4}	B
<30cm	10^{-5} - 10^{-4}	D
-	10^{-6} - 10^{-5}	E
-	$<10^{-6}$	F

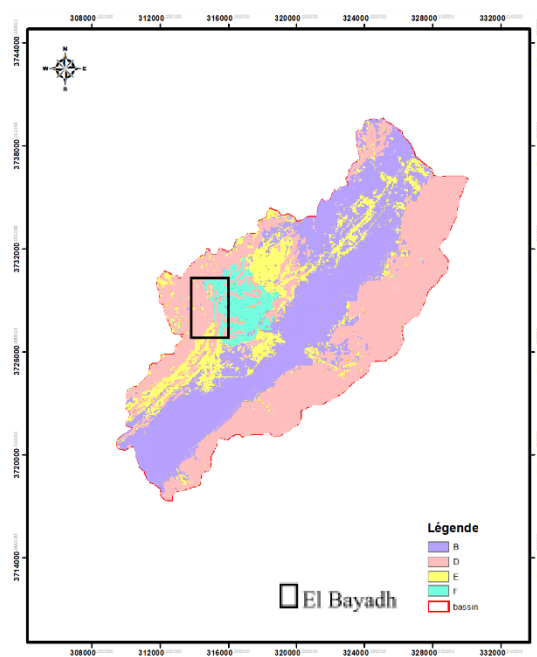


Figure 90 : Sous-couche Propriétés du sol

- **Sous couche I' :** le croisement de type du sol et les trois classes de la pente, a généré la sous couche I' (fig. 91) selon le tableau

Tableau 28 : Valeurs de I' en fonction de la pente et le type de sol

Pente \ Type de sol	<3.5%	3.5-27%	>27%
B	1.0	0.6	0.4
D	0.6	0.4	0.2
E	0.8	0.4	0.2
F	0.6	0.2	0.0

L'estimation du facteur I a été faite sur la base des valeurs de I'. La carte montre quatre degrés de la couverture protectrice : de très faible à forte (fig. 92).

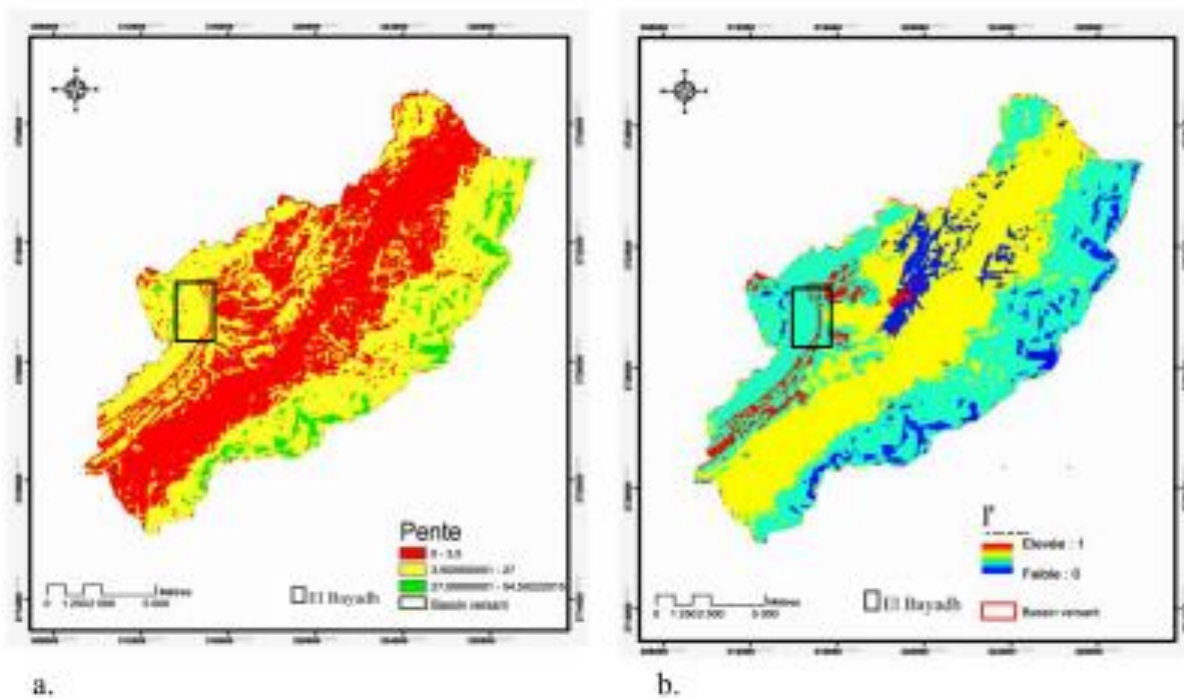


Figure 91 : Classes de la pente utilisés (a) pour créer la couche I' (b)

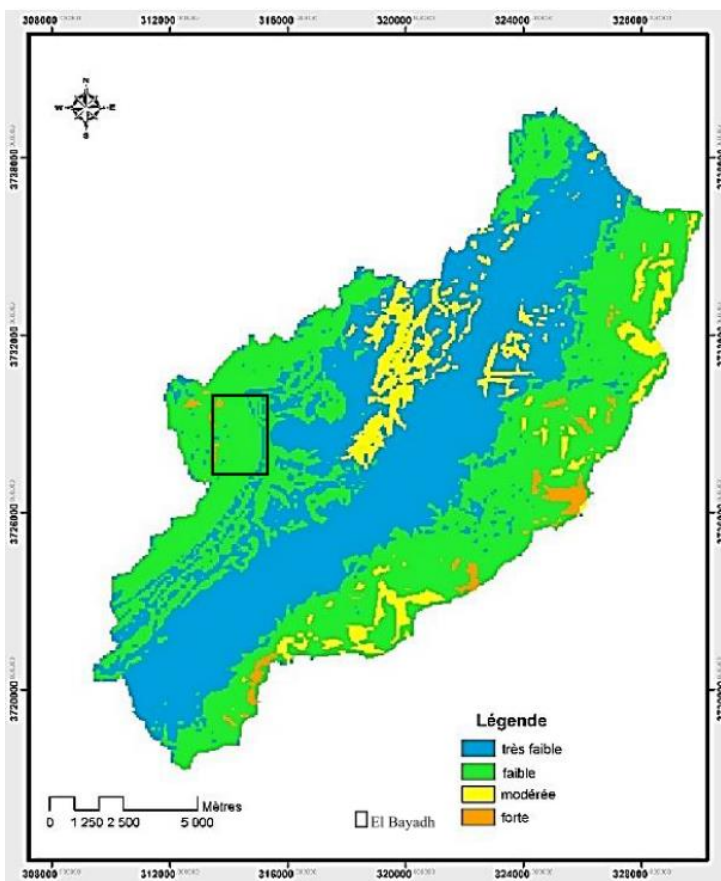


Figure 92 : Couche I selon l'indice PI

c-La carte de vulnérabilité finale, obtenue par la multiplication des indices P et I, est illustrée dans la figure 93. Elle présente quatre classes, de très faible à élevée dont les deux classes faible à modérées présentent 49 et 50 % de la surface du bassin. Il est à noter que la vulnérabilité modérée se produit, principalement au milieu du bassin versant.

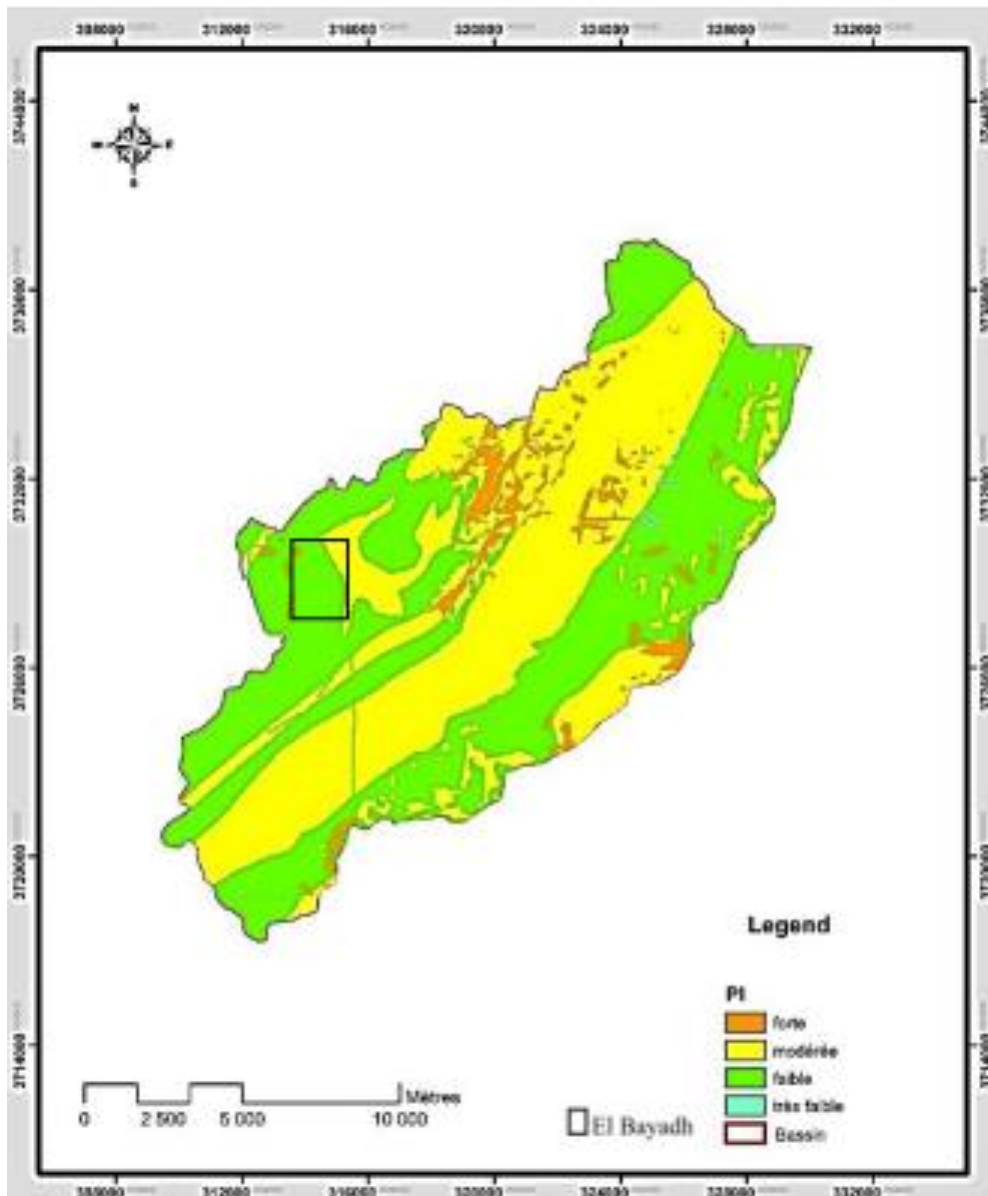


Figure 93 : Carte de vulnérabilité par la méthode PI

Les cartes résultantes montrent un pourcentage de surfaces à vulnérabilité faible et modérée, similaires, mais en analysant la répartition spatiale des classes de vulnérabilité, nous avons identifié des domaines controversés (fig. 94) :

- Limites du bassin versant : alors que ces zones sont fortement vulnérables en GOD, elles sont dans les classes basses, modérées et faibles en PI : Dans ces zones, la nature lithologique et la profondeur de la nappe augmentent l'indice GOD, mais de nombreux détails pris par la méthode PI rendent le facteur P faible.
- Le centre du bassin versant présente un indice GOD négligeable à faible, mais une valeur modérée de l'indice PI : c'est parce que GOD utilise la profondeur de la nappe phréatique pour évaluer la vulnérabilité, alors que PI inclut ce paramètre avec d'autres caractéristiques (propriétés du sol, pente et végétation). Dans la dépression la profondeur élevée de la nappe phréatique, les rendent peu vulnérables dans la carte GOD. Contrairement à la carte PI, la faible topographie favorise l'infiltration d'éventuel polluant, ce qui rend ces zones plus vulnérables.

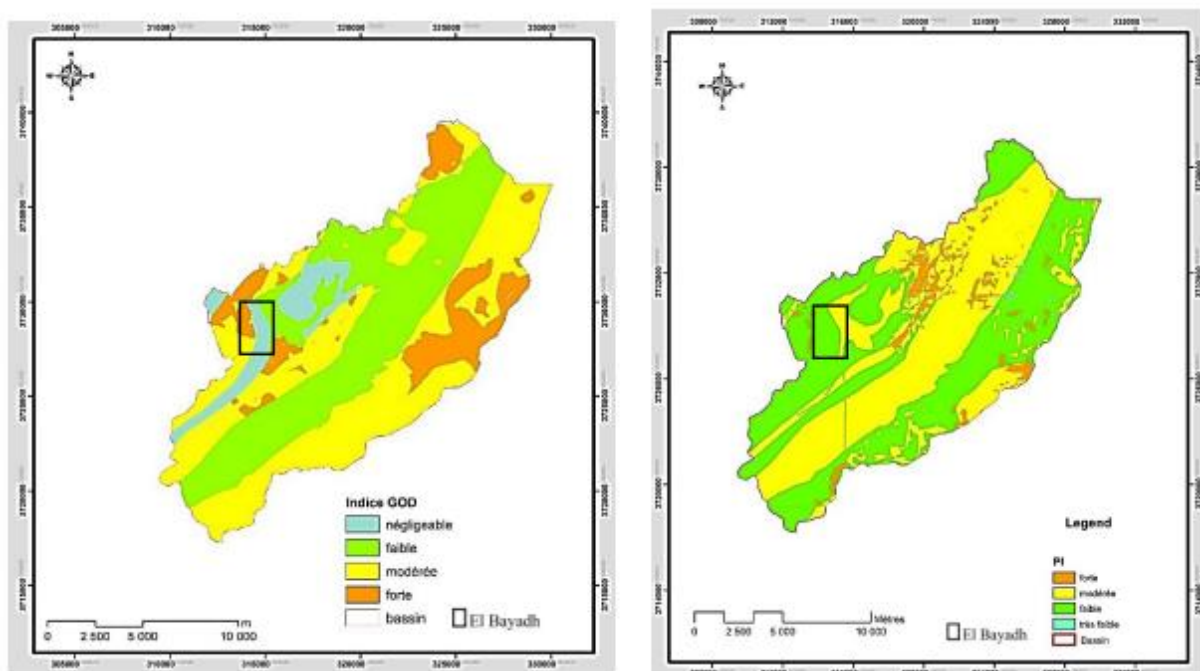


Figure 94 : Cartes de vulnérabilité estimées par les méthodes GOD et PI

III-3. Validation des cartes de vulnérabilité

La concentration naturelle de nitrate dans les eaux souterraines en conditions aérobiques est de quelques milligrammes par litre (OMS, 2011), la zone d'étude présente des concentrations comprises entre 3 et 55 mg/L. Alors que 50 mg/L est considéré comme une concentration très élevée pour l'eau potable.

La carte de distribution spatiale des nitrates (fig. 95) a montré que de fortes concentrations de NO_3^- se trouvent au centre du bassin, coïncidant avec un indice de GOD négligeable à faible, par contre avec un indice PI modéré et élevé.

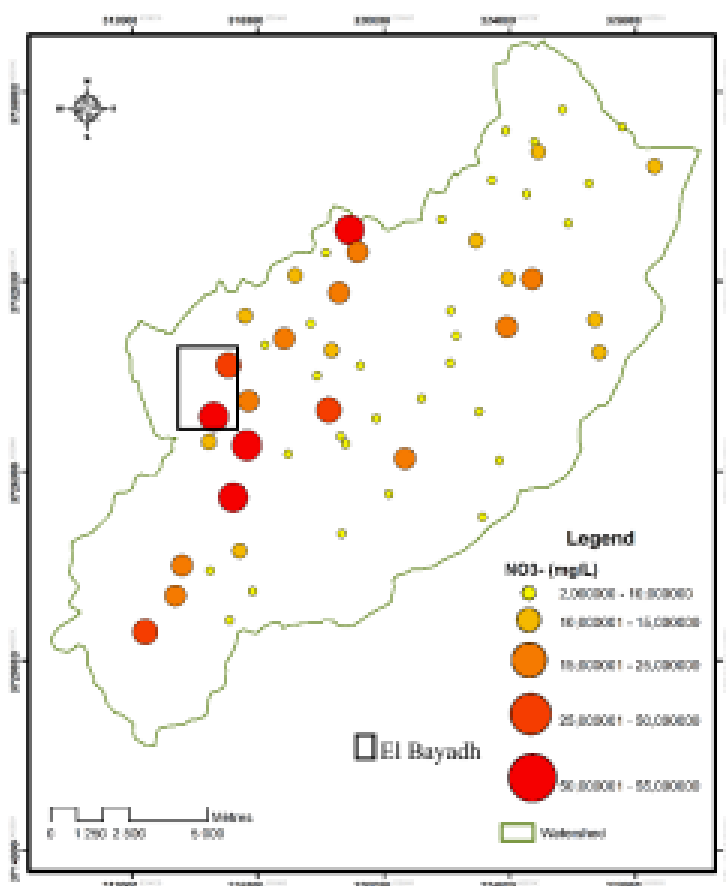
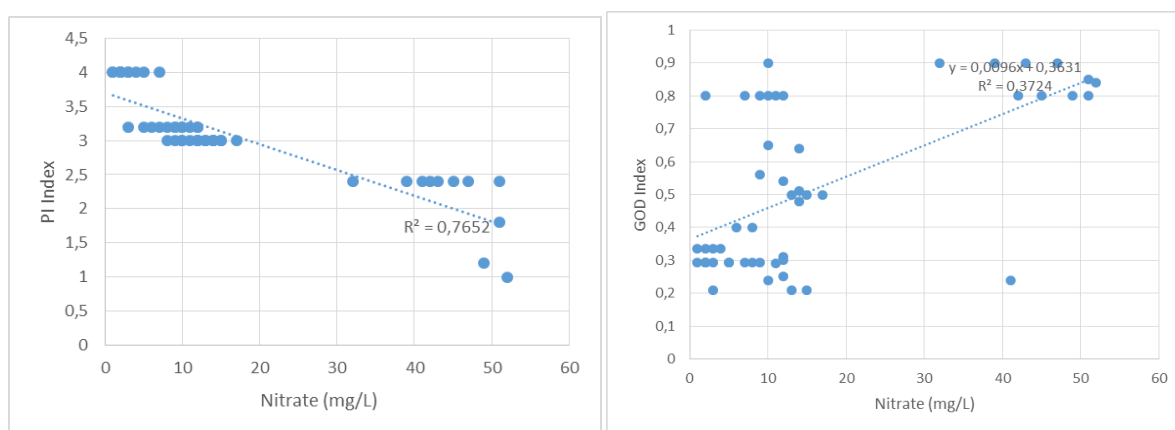


Figure 95 : Répartition spatiale de NO_3^- , utilisé pour la validation des cartes de vulnérabilité

Le coefficient de corrélation est l'un des paramètres utiles pour la validation de la carte de vulnérabilité (Lake *et al*, 2003; Kumar et Krishna, 2018; Mfumu Kihumba *et al*, 2017). Les relations entre les indices de vulnérabilité et la concentration de NO_3^- (fig. 96) montrent que l'indice de PI est en corrélation négative avec la concentration de nitrate. Cela signifie que des valeurs de PI élevées, qui représentent un degré élevé de protection naturelle et une faible vulnérabilité, correspondent à des valeurs inférieures de nitrates. Cependant, l'indice GOD n'a montré aucune corrélation avec les concentrations de NO_3^- .



a.

b.

Figure 96 : Corrélation entre les indices PI et GOD et la concentration des nitrates

CONCLUSION GENERALE

Le long du présent travail, au biais du SIG nous avons essayé d'exploiter les données géologiques, structurales, hydroclimatiques et hydrogéologiques disponibles, pour comprendre le comportement hydrologique et hydrodynamique du synclinal d'El Bayadh puis de mettre en évidence les mécanismes et les facteurs responsables à la vulnérabilité et la dégradation des eaux souterraines du synclinal à petite échelle. L'estimation de la vulnérabilité à grande échelle a nécessité une exploration par télédétection des paramètres de surface et subsurface.

En premier lieu, nous avons analysé et interprété les données hydroclimatiques de quelques stations de la région afin de représenter l'aspect climatique régional puis celles de la station d'El Bayadh, représentative du synclinal, durant la période 1972-2018 ; les régions montagneuses reçoivent plus de précipitation d'où la présence de deux périodes pluvieuses, l'une durant les mois de mars, avril et mai, l'autre durant les mois de septembre, octobre et novembre. La variation interannuelle des précipitations enregistrées à la station d'El Bayadh des quarante dernières années, montre que la dernière décennie est représentée par une augmentation remarquable de la pluviométrie d'une moyenne de 328.77 mm presque le double de la moyenne mesurée durant toute la période (165 mm). Comme une année moyenne représentative de cette décennie, l'année 2009 était la base de nos calculs de la pluie efficace à l'échelle journalière et à nos estimations de la vulnérabilité. Nous avons conclu que la pluie efficace est en relation étroite avec la nature du sol dans le synclinal d'El Bayadh, elle varie entre 131.48 mm pour la carapace calcaire (RFU= 45 mm) et 181.48 mm pour les sols peu évolués des roches mères (RFU=20 mm). L'analyse de la relation entre le réseau hydrographique et le réseau de failles montre que 25 % de la longueur cumulée des failles sont des zones de pertes qui participent à une infiltration concentrée des eaux de pluie.

Le synclinal d'El Bayadh est à l'extrémité ouest de l'Atlas saharien centrale ; sa lithostratigraphie, déjà décrite par plusieurs auteurs (Cornet, Abed et Harket, Mahboubi, Regagba...) montre que la série, du Callovien au Quaternaire dépasse les 1500 m d'épaisseur; c'est une succession de formations gréseuses à intercalations argileuses et calcaires du Jurassique et Infra-crétacé en altitude avec la présence des gypses au niveau du Vallanginien et de l'Hauterivien au cœur du synclinal et principalement argilo-sableuses dans les dépressions. Le synclinal est coincé à la limite nord-ouest d'une zone très plissée et accidentée, au sud de l'accident majeur Nord atlasique ; la présentation des colonnes lithostratigraphiques comparatives : régionale (la carte de 1/200 000 de Géryville) avec plus

de 3000 m d'épaisseur et locale (synclinal d'El Bayadh) avec plus de 1500 m d'épaisseur en moyenne $(\max + \min) / 2$ montre que la consistance des formations dans le synclinal est la moitié de celle des formations de la toute la carte de Géryville, ce qui explique l'impact des forces compressives donc un synclinal étroit et un réseau de faille très important.

La présentation du contexte hydrogéologique du synclinal d'El Bayadh est faite à partir de l'identification latérale et verticale des aquifères ; la perméabilité des formations est principalement mixte (d'interstices et de fissures). La colonne hydrogéologique montre une quasi-continuité (interruption) hydraulique verticale et latérale, cela est dû au 250 m du Valanginien marno-calcaire. Le classement des formations aquifères dans la région d'El Bayadh selon leurs transmissivités révèle que les grès du Barrémo-apto-albien et de l'Infra-crétacé constituent les deux plus importants réservoirs. La piézométrie est établie à la base de 628 points d'eau, forage et puits (Géo-water 2003) ; la carte hydrogéologique nous a permis de distinguer trois unités hydrogéologiques ; la première a un écoulement de direction sud ouest-nord est qui coïncide avec l'axe du synclinal, la deuxième présente une direction moyenne de l'écoulement du Sud-Est vers le Nord-Ouest, participant à l'alimentation les formations du Chott Chergui, la troisième a un écoulement principal de l'écoulement qui se fait du Nord-Est vers le Sud-Ouest. Nous avons réalisé six coupes hydrogéologiques le long du synclinal à travers quelques sources afin de configurer deux contextes représentatifs d'émergence ; par changement de perméabilité aux piémonts participant à l'alimentation indirect des aquifères, et à la faveur de faille drainant ces dernières.

L'étude hydrochimique des eaux souterraines de la région d'El Bayadh a été réalisée pour déterminer l'origine de la minéralisation des eaux plus au moins élevée. L'analyse en composante principale des données a mis en évidence la présence de trois familles d'origine différentes : évaporitique, carbonaté et gréseuse. En référence à la géologie, la dégradation de la qualité des eaux a pour une origine la dissolution des gypses valanginiennes, hautériennes et cénomaniennes ainsi que des halites triasiques.

Une synthèse d'un grand nombre de méthodes d'estimation de la vulnérabilité intrinsèque nous a permis de mettre en évidence une nouvelle méthode basée sur quatre facteurs responsables à la fragilité des systèmes hydrogéologiques dans les zones arides et semi-arides et l'élaboration d'un modèle de vulnérabilité des eaux souterraines établie par multiplication des cotes de ces facteurs : Lithologie, Conditions d'Infiltration, Profondeur de la nappe et Pluie efficace.

L'application de cette méthode pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines du synclinal d'El Bayadh à l'échelle 1/200000, présente une cartographie schématique de la vulnérabilité. Elle a nécessité plusieurs étapes ;

- Collecte et mise en forme des données (forages, puits et sources), des cartes géologiques, topographiques et hydrogéologiques de la région d'El Bayadh, du Chott Echergui et de Chellala Dahrana scannées « mode Raster »,
- Digitalisation de toutes les informations géographiques sous forme de plusieurs couches en mode vecteur (lithologiques, structurales, topographiques, hydrologiques, hydrogéologiques, pédologique...),
- Géotraitement du réseau de faille (modèle mathématique pour cartographier la densité de fracturation), les oueds (zones de pertes) et la RFU (pluie efficace) et l'interpolation des données topographiques (pente) et piézométriques (profondeur de la nappe),
- Modélisation : attribuer des cotes de 0.1 à 1, à chaque maille (de 100 m de côté) de chaque couche (selon la sensibilité de l'aquifères à la pollution) puis calculer l'indice de vulnérabilité et réaliser l'analyse de sensibilité.

Nous avons essayé de réaliser une carte de vulnérabilité opérationnelle, à grande échelle (1/50 000). Pour cela nous avons fait appel à la télédétection, outil efficace pour la cartographie et l'identification pédologique et lithologique. Nous avons limité la zone d'étude au bassin versant d'oued Deffa, à l'aide du MNT. L'ensemble des traitements des bandes multi-spectrales des images Landsat 8-OLI et l'interprétation des combinaisons de bandes, des rapports RVB et des filtres, nous avons élaborée la carte géo-structurale à grande échelle. Pour la nature et l'occupation du sol, les indices ont été calculés (NDVI et IR) et impliqués à l'arbre de décision. Cela nous a aidé à calculer l'indice GOD et l'indice PI. Le résultat de ces cartes indique une vulnérabilité de négligeable à forte dans la région d'étude.

Toutefois, la comparaison avec les concentrations des polluants dans les eaux souterraines a révélé que l'approche de PI convient davantage au bassin d'oued Deffa que GOD, car cette dernière néglige des facteurs importants qui affectent la vulnérabilité dans les zones arides.

La cartographie de la vulnérabilité à la pollution du synclinal d'El Bayadh montre que la plupart de la zone d'étude, est sensible à la pollution cela est due aux faibles caractéristiques de protection de l'aquifère.

Nous recommandons à tous les services de l'aménagement et tous ceux concernés, qu'ils prennent en considération la fragilité de ce terrain qu'est le synclinal d'El Bayadh, très peu étanche, accidenté et riche par ses vastes plaines qui regorgent d'eau, et qui peuvent participer à un développement agricole sans pareil et une autosuffisance totale de la région.

Il est à noter que le déficit des données hydrodynamiques empêche une cartographie pointue de la vulnérabilité à grande échelle. Il est fortement suggéré d'effectuer des essais de pompages au niveau de la plaine du synclinal judicieusement répartie sur des forages qui exploitent des formations complètes afin de collecter une base de données fiables. Il est préconisé de réaliser une cartographie des zones non saturées (campagne piézométrique) et des sols de la plaine du synclinal d'El Bayadh avec une étude détaillée de ses caractéristiques.

Nous recommandons un enrichissement de la base de données hydrochimique afin de mieux gérer le risque de pollution naturel et de mieux cerner les zones de contamination par les gypses en générale et le Trias en particulier. Le suivi spatiotemporel des concentrations des indicateurs de pollution anthropique tels que les nitrates (NO_3), les nitrites (NO_2), l'ammoniaque (NH_4) et les sulfates (SO_4) reste un outil performant à la validation des cartes de vulnérabilités

La géophysique à son tour reste un outil efficace pour la localisation des diapirs triasiques afin de déterminer l'origine géochimique de la minéralisation élevée des eaux des niveaux aquifères.

Les points faibles de notre modèle est la non considération du classement des failles ouvertes et obstruées par les sédiments fins ou par colmatage et recristallisation ce qui nous mènera à concrétiser ou plutôt à recommander cela pour des études de vulnérabilités futur à grandes échelles dans des sous bassins versant « pilotes » à risque ; pour valoriser le pourcentage de nombre de failles actives par zone participant à l'infiltration concentrée ; en pratique à réaliser des stations de jaugeages en amont de l'oued et en aval pour en enregistré la différence du volume d'eau qui s'est infiltré au niveau de l'oued au moment des fortes pluies et des crues au passage entre l'amont et l'aval et adapter des méthodes de vulnérabilités pour quantifier le taux de pollution infiltré ou s'assurer de l'obstruction des chemins empruntés par les eaux au cours des périodes de crues ;

Des modèles à grandes échelles qui prendront les considérations suivantes ;

- Sur les versants en pente au niveau des chaâbets coïncidant avec les failles; infiltrations concentrées ;
- Sur les versants en pente; infiltrations diffuse ;
- Sur les dépressions au niveau des oueds coïncidant avec les failles ouvertes; infiltrations concentrées ;
- Sur les dépressions à font plats au niveau des oueds qui ne coïncident pas avec les failles et le reste de la surface en dehors des oueds; infiltrations diffuses plus ou moins lentes suivant la consistance du sol et la végétation.

Il serait intéressant de valider notre carte avec des applications sur d'autres zones de climat similaires mais avec une base de données plus importante.

Annexe n°1 : Variation de RU en fonction de Σ P-ETP lorsque P<ETP selon Thornthwait (réalisé à partir d'un tableau in Halimi 1980)

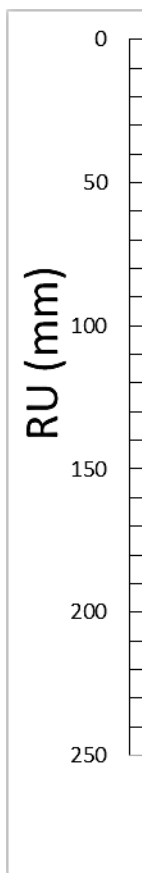


Table 10

Extra Terrestrial Radiation (Ra) expressed in equivalent evaporation in mm/day

I_0 : expressed in $cal.cm^{-2}.j^{-1} : \times 58$

Northern Hemisphere												Lat	Southern Hemisphere											
Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec		Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
3.8	6.1	9.4	12.7	15.8	17.1	16.4	14.1	10.9	7.4	4.5	3.2	50°	17.5	14.7	10.9	7.0	4.2	3.1	3.5	5.5	8.9	12.9	16.5	18.2
4.3	6.6	9.8	13.0	15.9	17.2	16.5	14.3	11.2	7.8	5.0	3.7	48	17.6	14.9	11.2	7.5	4.7	3.5	4.0	6.0	9.3	13.2	16.6	18.2
4.9	7.1	10.2	13.3	16.0	17.2	16.6	14.5	11.5	8.3	5.5	4.3	46	17.7	15.1	11.5	7.9	5.2	4.0	4.4	6.5	9.7	13.4	16.7	18.3
5.3	7.6	10.6	13.7	16.1	17.2	16.6	14.7	11.9	8.7	6.0	4.7	44	17.8	15.3	11.9	8.4	5.7	4.4	4.9	6.9	10.2	13.7	16.7	18.3
5.9	8.1	11.0	14.0	16.2	17.3	16.7	15.0	12.2	9.1	6.5	5.2	42	17.8	15.5	12.2	8.8	6.1	4.9	5.4	7.4	10.6	14.0	16.8	18.3
6.4	8.6	11.4	14.3	16.4	17.3	16.7	15.2	12.5	9.6	7.0	5.7	40	17.9	15.7	12.5	9.2	6.6	5.3	5.9	7.9	11.0	14.2	16.9	18.3
6.9	9.0	11.8	14.5	16.4	17.2	16.7	15.3	12.8	10.0	7.5	6.1	38	17.9	15.8	12.8	9.6	7.1	5.8	6.3	8.3	11.4	14.4	17.0	18.3
7.4	9.4	12.1	14.7	16.4	17.2	16.7	15.4	13.1	10.6	8.0	6.6	36	17.9	16.0	13.2	10.1	7.5	6.3	6.8	8.8	11.7	14.6	17.0	18.2
7.9	9.8	12.4	14.8	16.5	17.1	16.8	15.5	13.4	10.8	8.5	7.2	34	17.8	16.1	13.5	10.5	8.0	6.8	7.2	9.2	12.0	14.9	17.1	18.2
8.3	10.2	12.8	15.0	16.5	17.0	16.8	15.6	13.6	11.2	9.0	7.8	32	17.8	16.2	13.8	10.9	8.5	7.3	7.7	9.6	12.4	15.1	17.2	18.1
8.8	10.7	13.1	15.2	16.5	17.0	16.8	15.7	13.9	11.6	9.5	8.3	30	17.8	16.4	14.0	11.3	8.9	7.8	8.1	10.1	12.7	15.3	17.3	18.1
9.3	11.1	13.4	15.3	16.5	16.8	16.7	15.7	14.1	12.0	9.9	8.8	28	17.7	16.4	14.3	11.6	9.3	8.2	8.6	10.4	13.0	15.4	17.2	17.9
9.8	11.5	13.7	15.3	16.4	16.7	16.6	15.7	14.3	12.3	10.3	9.3	26	17.6	16.4	14.4	12.0	9.7	8.7	9.1	10.9	13.2	15.5	17.2	17.8
10.2	11.9	13.9	15.4	16.4	16.6	16.5	15.8	14.5	12.6	10.7	9.7	24	17.5	16.5	14.6	12.3	10.2	9.1	9.5	11.2	13.4	15.6	17.1	17.7
10.7	12.3	14.2	15.5	16.3	16.4	16.4	15.8	14.6	13.0	11.1	10.2	22	17.4	16.5	14.8	12.6	10.6	9.6	10.0	11.6	13.7	15.7	17.0	17.5
11.2	12.7	14.4	15.6	16.3	16.4	16.3	15.9	14.8	13.3	11.6	10.7	20	17.3	16.5	15.0	13.0	11.0	10.0	10.4	12.0	13.9	15.8	17.0	17.4
11.6	13.0	14.6	15.6	16.1	16.1	16.1	15.8	14.9	13.6	12.0	11.1	18	17.1	16.5	15.1	13.2	11.4	10.4	10.8	12.3	14.1	15.8	16.8	17.1
12.0	13.3	14.7	15.6	16.0	15.9	15.9	15.7	15.0	13.9	12.4	11.6	16	16.9	16.4	15.2	13.5	11.7	10.8	11.2	12.6	14.3	15.8	16.7	16.8
12.4	13.6	14.9	15.7	15.8	15.7	15.7	15.1	14.1	12.8	12.0	11.4	14	16.7	16.4	15.3	13.7	12.1	11.2	11.6	12.9	14.5	15.8	16.5	16.6
12.8	13.9	15.1	15.7	15.7	15.5	15.5	15.6	15.2	14.4	13.3	12.5	12	16.6	16.3	15.4	14.0	12.5	11.6	12.0	13.2	14.7	15.8	16.4	16.5
13.2	14.2	15.3	15.7	15.5	15.3	15.3	15.5	15.3	14.7	13.6	12.9	10	16.4	16.3	15.5	14.2	12.8	12.0	12.4	13.5	14.8	15.9	16.2	16.2
13.6	14.5	15.3	15.6	15.3	15.0	15.1	15.4	15.3	14.8	13.9	13.3	8	16.1	16.1	15.5	14.4	13.1	12.4	12.7	13.7	14.9	15.8	16.0	16.0
13.9	14.8	15.4	15.4	15.1	14.7	14.9	15.2	15.3	15.0	14.2	13.7	6	15.8	16.0	15.6	14.7	13.4	12.8	13.1	14.0	15.0	15.7	15.8	15.7
14.3	15.0	15.5	15.5	14.9	14.4	14.6	15.1	15.3	15.1	14.5	14.1	4	15.5	15.8	15.6	14.9	13.8	13.2	13.4	14.3	15.1	15.6	15.5	15.4
14.7	15.3	15.6	15.3	14.6	14.2	14.3	14.9	15.3	15.3	14.8	14.4	2	15.3	15.7	15.7	15.1	14.1	13.5	13.7	14.5	15.2	15.5	15.3	15.1
15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8	0	15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8

Annexe
n°2 :

Table d'Angot pour l'estimation du Rga.

Annexe n°3 : P et ETP journalières (2009) de la station d'El Bayadh

Jours	P	ETP	Jours	P	ETP	Jours	P	ETP	Jours	P	ETP	Jours	P	ETP	Jours	P	ETP
1-01	0	0,2348	1-03	7,11	0,0507	1-05	0	0,3705	1-07	0	0,73008	1-09	0	0,68347	1-11	0	0,37381
2	0,51	0,2475	2	0	0,095435	2	0,76	0,34684	2	0	0,76152	2	0	0,65009	2	0	0,38025
3	0,51	0,2597	3	0	0,1352	3	0	0,38981	3	0	0,78028	3	0	0,6394	3	0	0,3705
4	5,08	0,1951	4	0	0,170779	4	0	0,52569	4	0,51	0,72283	4	0	0,69731	4	0	0,36849
5	3,05	0,1752	5	2,03	0,2028	5	0	0,49342	5	0	0,72573	5	0	0,66253	5	0	0,35016
6	1,02	0,1896	6	3,05	0,231771	6	0	0,43875	6	0	0,77356	6	0	0,60311	6	0	0,23359
7	8,89	0,0886	7	0	0,258109	7	0	0,4776	7	0,76	0,77695	7	6,1	0,4967	7	5,08	0,30511
8	7,87	0,1001	8	0	0,282157	8	0	0,55229	8	0	0,78402	8	4,06	0,47097	8	0	0,28519
9	0,51	0,1407	9	0	0,3042	9	0	0,66774	9	1,02	0,80224	9	1,02	0,46843	9	2,03	0,21858
10	3,05	0,0514	10	0	0,32448	10	0	0,64843	10	0	0,76049	10	0	0,46376	10	5,08	0,20941
11	0	0,1391	11	0	0,3432	11	0	0,71806	11	0	0,70066	11	6,1	0,45516	11	0	0,25462
12	0	0,0492	12	0	0,360533	12	0	0,73614	12	2,03	0,77111	12	12,95	0,43047	12	0	0,31663
13	2,03	0,0924	13	0	0,432361	13	0	0,66051	13	0	0,82984	13	0	0,4241	13	0	0,35598
14	2,03	0,113	14	0	0,442779	14	0	0,36382	14	0	0,81452	14	0	0,44613	14	0	0,41511
15	2,03	0,1505	15	0	0,392336	15	7,11	0,38333	15	0	0,85719	15	18,03	0,42084	15	0	0,432
16	0	0,2151	16	0	0,362196	16	0	0,52569	16	0	0,81601	16	3,05	0,40225	16	0	0,44571
17	0	0,1781	17	0	0,205827	17	0	0,71098	17	2,03	0,73648	17	0	0,4546	17	0	0,53778
18	0	0,16	18	0	0,293413	18	0	0,6997	18	0	0,7549	18	0	0,44026	18	0	0,45169
19	0	0,2006	19	0	0,326419	19	0	0,77546	19	0	0,80169	19	0	0,42795	19	0	0,35887
20	0	0,1553	20	0	0,348332	20	0	0,79292	20	0	0,76123	20	0	0,37869	20	4,06	0,34341
21	4,06	-0,048	21	0	0,316566	21	0	0,81349	21	0	0,74957	21	16	0,40008	21	0	0,33722
22	0	0,029	22	0	0,304836	22	0	0,81678	22	0	0,80595	22	0	0,37788	22	0	0,33003
23	0,76	0,2395	23	0	0,381257	23	0	0,80556	23	0	0,84171	23	0,51	0,38734	23	0	0,29584
24	0	0,2783	24	0	0,452884	24	0	0,77773	24	0	0,82372	24	0	0,41347	24	0	0,27713
25	0	0,2276	25	0	0,422411	25	0	0,57082	25	0	0,86648	25	0	0,42604	25	0	0,32259
26	1,02	0,1457	26	0	0,590554	26	0	0,68413	26	0	0,85036	26	0	0,44555	26	0	0,29298
27	0,76	0,1094	27	0	0,458072	27	0	0,65157	27	0	0,83565	27	10,92	0,44085	27	0	0,39159
28	0,51	0,1616	28	16	0,342298	28	0	0,63094	28	0	0,8684	28	3,05	0,41141	28	0	0,36771

29	0	0,243	29	20,07	0,292309	29	0,51	0,61333	29	0	0,81418	29	0	0,43047	29	0	0,38369
30	0	0,252	30	26,92	0,216188	30	0	0,6761	30	0	0,81032	30	0	0,45843	30	0	0,21858
31	0	0,1951	31	0	0,204317	31	0	0,53692	31	0	0,7973	1-10	0	0,40891	1-12	6,1	0,1995
1-02	0	0,1488	1-04	0	0,2349	1-06	0	0,61565	1-08	0	0,73689	2	0	0,40649	2	0	0,26386
2	0	0,2425	2	1,02	0,296568	2	0	0,7372	2	0	0,74292	3	0	0,4003	3	0	0,25546
3	11,94	0,1763	3	1,02	0,261434	3	0	0,73082	3	0	0,8538	4	0	0,4345	4	1,02	0,21871
4	0	0,2325	4	0	0,2942	4	0	0,7956	4	0	0,85338	5	0	0,52541	5	0	0,21622
5	0	0,2591	5	0	0,312589	5	0	0,80547	5	0	0,78338	6	0	0,55383	6	0	0,28364
6	0,51	0,2015	6	0	0,367362	6	0	0,61362	6	0	0,76323	7	0	0,53357	7	0	0,2874
7	4,06	0,0707	7	0	0,390307	7	0	0,58328	7	0	0,79137	8	0	0,55784	8	0	0,22959
8	6,1	0,0417	8	7,11	0,273211	8	0	0,73597	8	0	0,76463	9	0	0,5531	9	0	0,1995
9	0,51	0,2437	9	0	0,32152	9	0	0,64224	9	1,02	0,74824	10	0	0,54844	10	0	0,21497
10	0	0,2985	10	0	0,382909	10	0	0,74217	10	0	0,81777	11	0	0,42056	11	0	0,23775
11	0	0,2474	11	7,87	0,196057	11	0	0,81043	11	0	0,79344	12	0	0,41424	12	0	0,23889
12	0	0,2221	12	2,03	0,243537	12	0	0,84346	12	0	0,83817	13	0	0,41365	13	0	0,31305
13	0	0,1885	13	0,76	0,249161	13	0	0,79775	13	0,76	0,66159	14	0	0,46482	14	0	0,20214
14	0	0,2533	14	0	0,355558	14	0	0,8287	14	0,25	0,85961	15	0	0,40301	15	5,08	0,07967
15	0	0,2965	15	0	0,560525	15	0	0,73618	15	0	0,89041	16	0	0,36531	16	0	0,25331
16	0	0,2693	16	0	0,350727	16	0	0,8112	16	0	0,78836	17	0	0,41356	17	0	0,29833
17	0	0,2058	17	0	0,332884	17	0	0,77957	17	4,06	0,7032	18	0	0,36201	18	0	0,31624
18	0	0,2221	18	0	0,277031	18	0	0,71383	18	0	0,72823	19	0	0,40033	19	0	0,28364
19	0	0,2338	19	2,03	0,316995	19	0	0,74254	19	2,03	0,69378	20	0	0,50038	20	2,03	0,18867
20	0	0,2388	20	4,06	0,268036	20	0	0,69884	20	0	0,65627	21	0	0,40526	21	0	0,25331
21	0	0,2044	21	0,51	0,289402	21	0	0,59744	21	0	0,62201	22	2,03	0,38253	22	0	0,33353
22	0	0,1604	22	3,05	0,332884	22	0	0,56875	22	0	0,70051	23	0	0,37624	23	0	0,33125
23	0	0,2286	23	0	0,348806	23	0	0,64973	23	0	0,7258	24	0	0,38322	24	0	0,35292
24	0	0,2299	24	0	0,521445	24	0	0,6638	24	0	0,75666	25	0	0,3939	25	0	0,3779
25	0	0,2195	25	0	0,627761	25	2,03	0,59058	25	0	0,6416	26	0	0,36975	26	1,02	0,35898
26	0	0,2486	26	0	0,382909	26	0	0,59525	26	4,06	0,68894	27	0	0,40342	27	2,03	0,25331

27	0	0,2648	27	0	0,298916	27	0	0,63955	27	3,05	0,74922	28	0	0,3926	28	0	0,41995
28	1,02	0,2338	28	0	0,40014	28	0	0,74429	28	0	0,7607	29	0	0,41487	29	0	0,46109
			29	0	0,381232	29	5,08	0,7181	29	0	0,64735	30	0	0,41309	30	0	0,52001
			30	0	0,388379	30	0	0,7098	30	0	0,59795	31	0	0,41076	31	0	0,35574
									31	0	0,67202						

Annexe n°4 : Exemple de la feuille de calcul de PE pour une RFU=45mm

	janv		RF U	R				fev		RF U	R				mars		RF U	R				avril		RF U	R
	P	ETP	45	0	HD	ETR	PE	P	ETP	45	38,9556404	HD	ETR	PE	P	ETP	45	41,5539941	HD	ETR	PE	P	ETP	45	44,7956828
1	0	0,23478716		0	0	0	0	0	0,14877466		38,8068657	38,9556404	0,14877466	0	7,11	0,0507		45	48,6639941	0,0507	3,6132941	0	0,2349		44,5607828
2	0,51	0,24753221		0,26246779	0,51	0,24753221	0	0	0,24249174		38,564374	38,8068657	0,24249174	0	0	0,09543529		44,9045647	45	0,09543529	0	1,02	0,29656847		45
3	0,51	0,25966507		0,51280272	0,77246779	0,25966507	0	11,94	0,17631753		45	50,504374	0,17631753	5,32805647	0	0,1352		44,7693647	44,9045647	0,1352	0	1,02	0,26143448		45
4	5,08	0,19514444		5,39765828	5,59280272	0,19514444	0	0	0,23249346		44,7675065	45	0,23249346	0	0	0,17077895		44,5985858	44,7693647	0,17077895	0	0	0,29420043		44,7057996
5	3,05	0,17518082		8,27247746	8,44765828	0,17518082	0	0	0,25913333		44,5083732	44,7675065	0,25913333	0	2,03	0,2028		45	46,6285858	0,2028	1,42578576	0	0,31258868		44,3932109
6	1,02	0,18958279		9,10289466	9,29247746	0,18958279	0	0,51	0,20154815		44,8168251	45,0183732	0,20154815	0	3,05	0,23177143		45	48,05	0,23177143	2,81822857	0	0,36736241		44,0258485
7	8,89	0,08855294		17,9043417	17,9928947	0,08855294	0	4,06	0,07067273		45	48,8768251	0,07067273	3,80615233	0	0,25810909		44,7418909	45	0,25810909	0	0	0,39030698		43,6355415
8	7,87	0,10006994		25,6742718	25,7743417	0,10006994	0	6,1	0,04169022		45	51,1	0,04169022	6,05830978	0	0,28215652		44,4597344	44,7418909	0,28215652	0	7,11	0,27321081		45
9	0,51	0,14074878		26,043523	26,1842718	0,14074878	0	0,51	0,24371579		45	45,51	0,24371579	0,26628421	0	0,3042		44,1555344	44,4597344	0,3042	0	0	0,32151978		44,6784802
10	3,05	0,05142671		29,0420963	29,093523	0,05142671	0	0	0,29850883		44,7014912	45	0,29850883	0	0	0,32448		43,8310544	44,1555344	0,32448	0	0	0,38290909		44,2955711
11	0	0,13908587		28,9030104	29,0420963	0,13908587	0	0	0,24735455		44,4541366	44,7014912	0,24735455	0	0	0,3432		43,4878544	43,8310544	0,3432	0	7,87	0,19605729		45
12	0	0,04924206		28,8537684	28,9030104	0,04924206	0	0	0,22211429		44,2320223	44,4541366	0,22211429	0	0	0,36053333		43,1273211	43,4878544	0,36053333	0	2,03	0,24353744		45
13	2,03	0,09243684		30,7913315	30,8837684	0,09243684	0	0	0,18846061		44,0435617	44,2320223	0,18846061	0	0	0,43236124		42,6949598	43,1273211	0,43236124	0	0,76	0,24916056		45
14	2,03	0,11301161		32,7083199	32,8213315	0,11301161	0	0	0,25331011		43,7902516	44,0435617	0,25331011	0	0	0,44277917		42,2521806	42,6949598	0,44277917	0	0	0,35555844		44,6444416
15	2,03	0,15054		34,5877799	34,7383199	0,15054	0	0	0,29653402		43,4937176	43,7902516	0,29653402	0	0	0,39233597		41,8598447	42,2521806	0,39233597	0	0	0,56052539		44,0839162
16	0	0,21505714		34,3727228	34,5877799	0,21505714	0	0	0,26929542		43,2244222	43,4937176	0,26929542	0	0	0,36219631		41,4976484	41,8598447	0,36219631	0	0	0,35072685		43,7331893
17	0	0,17811985		34,1946029	34,3727228	0,17811985	0	0	0,20578235		43,0186398	43,2244222	0,20578235	0	0	0,20582687		41,2918215	41,4976484	0,20582687	0	0	0,33288387		43,4003054
18	0	0,16002283		34,0345801	34,1946029	0,16002283	0	0	0,22211429		42,7965255	43,0186398	0,22211429	0	0	0,29341277		40,9984087	41,2918215	0,29341277	0	0	0,27703087		43,1232746
19	0	0,20059731		33,8339828	34,0345801	0,20059731	0	0	0,23376364		42,5627619	42,7965255	0,23376364	0	0	0,32641912		40,6719896	40,9984087	0,32641912	0	2,03	0,31699459		44,83628
20	0	0,15531905		33,6786637	33,8339828	0,15531905	0	0	0,23878568		42,3239762	42,5627619	0,23878568	0	0	0,34833221		40,3236574	40,6719896	0,34833221	0	4,06	0,26803636		45
21	4,06	0,04804468		37,7867084	37,7386637	0,04804468	0	0	0,20437789		42,1195983	42,3239762	0,20437789	0	0	0,31656585		40,0070916	40,3236574	0,31656585	0	0,51	0,28940219		45
22	0	0,02895		37,7577584	37,7867084	0,02895	0	0	0,16041587		41,9591825	42,1195983	0,16041587	0	0	0,30483626		39,7022553	40,0070916	0,30483626	0	3,05	0,33288387		45
23	0,76	0,23949545		38,278263	38,5177584	0,23949545	0	0	0,22864706		41,7305354	41,9591825	0,22864706	0	0	0,381257		39,3209983	39,7022553	0,381257	0	0	0,34880625		44,6511938
24	0	0,27830924		37,9999537	38,278263	0,27830924	0	0	0,22993521		41,5006002	41,7305354	0,22993521	0	0	0,45288385		38,8681144	39,3209983	0,45288385	0	0	0,52144499		44,1297488
25	0	0,22756047		37,7723932	37,9999537	0,22756047	0	0	0,21945742		41,2811428	41,5006002	0,21945742	0	0	0,42241071		38,4457037	38,8681144	0,42241071	0	0	0,6277611		43,5019877
26	1,02	0,145683		38,64670	38,79239	0,145683	0	0	0,248556		41,03258	41,2811428	0,248556	0	0	0,590553		37,85515	38,4457037	0,590553	0	0	0,382909		43,11907

juin		R F U	R				juil		R F U	R				août		R F U	R				sept		R F U	R				oct		R F U	R				nov		
P	ETP	45	31,17 53726	HD	ETR	PE	P	ETP	45	17,04 35357	HD	ETR	PE	P	ETP	45	0	HD	ETR	PE	P	ETP	45	2,993 81733	HD	ETR	PE	P	ETP	45	44,11 10953	HD	ETR	PE	P	ETP	
0	0,615 6476		30,55 9725	31,17 53726	0,615 6476	0	0	0,730 08464		16,31 3451	17,04 35357	0,730 08464	0	0	0,736 89134		0	0	0	0	0	0	0,683 46593		2,310 35139	2,993 81733	0,683 46593	0	0	0,408 90607		43,70 21893	44,11 10953	0,408 90607	0	0	0,3 805
0	0,737 20126		29,82 25238	30,55 9725	0,737 20126	0	0	0,761 52		15,55 1931	16,31 3451	0,761 52	0	0	0,742 92249		0	0	0	0	0	0	0,650 0867		1,660 2647	2,310 35139	0,650 0867	0	0	0,406 48617		43,29 57031	43,70 21893	0,406 48617	0	0	0,3 2
0	0,730 82215		29,09 17016	29,82 25238	0,730 82215	0	0	0,780 27665		14,77 16544	15,55 1931	0,780 27665	0	0	0,853 80135		0	0	0	0	0	0	0,639 39868		1,020 86602	1,660 2647	0,639 39868	0	0	0,400 29804		42,89 54051	43,29 57031	0,400 29804	0	0	0,3 5
0	0,795 60472		28,29 60969	29,09 17016	0,795 60472	0	0,5 1	0,722 83367		14,55 88207	15,28 16544	0,722 83367	0	0	0,853 38385		0	0	0	0	0	0	0,697 3057		0,323 56032	1,020 86602	0,697 3057	0	0	0,434 50451		42,46 09005	42,89 54051	0,434 50451	0	0	0,3 489
0	0,805 47388		27,49 0623	28,29 60969	0,805 47388	0	0	0,725 73429		13,83 30864	14,55 88207	0,725 73429	0	0	0,783 38		0	0	0	0	0	0	0,662 53		0	0,323 56032	0,323 56032	0	0	0,525 41179		41,93 54888	42,46 09005	0,525 41179	0	0	0,3 158
0	0,613 61793		26,87 70051	27,49 0623	0,613 61793	0	0	0,773 56005		13,05 95264	13,83 30864	0,773 56005	0	0	0,763 23167		0	0	0	0	0	0	0,603 11449		0	0	0	0	0	0,553 82813		41,38 16606	41,93 54888	0,553 82813	0	0	0,2 594
0	0,583 28043		26,29 37246	26,87 70051	0,583 28043	0	0,7 6	0,776 94559		13,04 25808	13,81 95264	0,776 94559	0	0	0,791 37367		0	0	0	0	0	6,1	0,496 70331		5,603 29669	6,1	0,496 70331	0	0	0,533 56785		40,84 80928	41,38 16606	0,533 56785	0	5,0 8	0,3 110
0	0,735 97165		25,55 7753	26,29 37246	0,735 97165	0	0	0,784 01854		12,25 85622	13,04 25808	0,784 01854	0	0	0,764 62824		0	0	0	0	0	4,06	0,470 97143		9,192 32526	9,663 29669	0,470 97143	0	0	0,557 84462		40,29 02482	40,84 80928	0,557 84462	0	0	0,2 18
0	0,642 24286		24,91 55101	25,55 7753	0,642 24286	0	1,0 2	0,802 23619		12,47 6326	13,27 85622	0,802 23619	0	1,0 2	0,748 24371		0,271 75629	1,02	0,748 24371	0	1,02	0,468 43022		9,743 89504	10,21 23253	0,468 43022	0	0	0,553 1018		39,73 71464	40,29 02482	0,553 1018	0	2,0 3	0,2 576	
0	0,742 17488		24,17 33353	24,91 55101	0,742 17488	0	0	0,760 48523		11,71 58408	12,47 6326	0,760 48523	0	0	0,817 77175		0	0,271 75629	0,271 75629	0	0	0,463 76268		9,280 13236	9,743 89504	0,463 76268	0	0	0,548 44082		39,18 87055	39,73 71464	0,548 44082	0	5,0 8	0,2 413	
0	0,810 42857		23,36 29067	24,17 33353	0,810 42857	0	0	0,700 65842		11,01 51824	11,71 58408	0,700 65842	0	0	0,793 436		0	0	0	0	0	6,1	0,455 15522		14,92 49771	15,38 01324	0,455 15522	0	0	0,420 55604		38,76 81495	39,18 87055	0,420 55604	0	0	0,2 624
0	0,843 46069		22,51 9446	23,36 29067	0,843 46069	0	2,0 3	0,771 10771		12,27 40747	13,04 51824	0,771 10771	0	0	0,838 17265		0	0	0	0	0	12,9 5	0,430 47389		27,44 45033	27,87 49771	0,430 47389	0	0	0,414 23937		38,35 39101	38,76 81495	0,414 23937	0	0	0,3 62
0	0,797 7516		21,72 16944	22,51 9446	0,797 7516	0	0	0,829 8417		11,44 4233	12,27 40747	0,829 8417	0	0,7 6	0,661 58819		0,098 41181	0,76	0,661 58819	0	0	0,424 10291		27,02 04003	27,44 45033	0,424 10291	0	0	0,413 65426		37,94 02559	38,35 39101	0,413 65426	0	0	0,3 978	
0	0,828 69946		20,89 29949	21,72 16944	0,828 69946	0	0	0,814 51908		10,62 97139	11,44 4233	0,814 51908	0	0,2 5	0,859 60952		0	0,348 41181	0,348 41181	0	0	0,446 12661		26,57 42737	27,02 04003	0,446 12661	0	0	0,464 81633		37,47 54396	37,94 02559	0,464 81633	0	0	0,4 105	
0	0,736 18286		20,15 68121	20,89 29949	0,736 18286	0	0	0,857 19484		9,772 51906	10,62 97139	0,857 19484	0	0	0,890 41004		0	0	0	0	0	18,0 3	0,420 83948		44,18 34343	44,60 42737	0,420 83948	0	0	0,403 00974		37,07 24298	37,47 54396	0,403 00974	0	0	0,4 001
0	0,811 20482		19,34 56073	20,15 68121	0,811 20482	0	0	0,8160 0849		8,956 51057	9,772 51906	0,816 00849	0	0	0,788 36413		0	0	0	0	0	3,05	0,402 25461		45	47,23 34343	0,402 25461	1,831 17965	0	0,365 30695		36,70 71229	37,07 24298	0,365 30695	0	0	0,4 706
0	0,779 56557		18,56 60417	19,34 56073	0,779 56557	0	2,0 3	0,7364 7968		10,25 00309	10,98 65106	0,736 47968	0	4,0 6	0,703 19803		3,356 80197	4,06	0,703 19803	0	0	0,454 60359		44,54 53964	45	0,454 60359	0	0	0,413 56283		36,29 356	36,70 71229	0,413 56283	0	0	0,5 782	

0	0,595 25056	14,77 52865	15,37 05371	0,595 25056	0	0	0,8503 5532	2,994 42912	3,844 78445	0,850 35532	0	4, 0 6	0,688 94091	3,371 05909	4,06	0,688 94091	0	0	0,445 54763	43,45 97203	43,90 5268	0,445 54763	0	0	0,369 75026	34,74 99269	35,11 96771	0,369 75026	0	0	0,2 979		
0	0,639 55267	14,13 57339	14,77 52865	0,639 55267	0	0	0,8356 472	2,158 78193	2,994 42912	0,835 6472	0	3, 0 5	0,749 21536	5,671 84373	6,421 05909	0,749 21536	0	10 , 9 2	0,440 85116	45	54,37 97203	0,440 85116	8,938 86917	0	0	0,403 41718	34,34 65097	34,74 99269	0,403 41718	0	0	0,3 591	
0	0,744 29275	13,39 14411	14,13 57339	0,744 29275	0	0	0,8684	1,290 38193	2,158 78193	0,868 4	0	0	0,760 70072	4,911 14301	5,671 84373	0,760 70072	0	3, 0 5	0,411 41202	45	48,05	0,411 41202	2,638 58798	0	0	0,392 6	33,95 39097	34,34 65097	0,392 6	0	0	0,3 714	
5, 0 8	0,718 10125	17,75 33399	18,47 14411	0,718 10125	0	0	0,8141 7727	0,476 20466	1,290 38193	0,814 17727	0	0	0,647 35155	4,263 79145	4,911 14301	0,647 35155	0	0	0,430 47389	44,56 95261	45	0,430 47389	0	0	0,414 86653	33,53 90431	33,95 39097	0,414 86653	0	0	0,3 692		
0	0,709 80421	17,04 35357	17,75 33399	0,709 80421	0	0	0,8103 1544	0	0,476 20466	0,476 20466	0	0	0,597 95016	3,665 84129	4,263 79145	0,597 95016	0	0	0,458 43077	44,11 10953	44,56 95261	0,458 43077	0	0	0,413 08642	33,12 59567	33,53 90431	0,413 08642	0	0	0,2 576		
					0	0	0,7973 0042	0	0	0	0	0	0,672 02396	2,993 81733	3,665 84129	0,672 02396	0							0	0	0,410 75876	32,71 5198	33,12 59567	0,410 75876	0			
					0						0						0						27,30 70575							0			
7, 11						6, 35						15, 2 3						81, 79						2, 03						16, 2 5			
	21,24 1837						24,524 9469						23,03 14534						14,30 77487						13,42 58974						10, 423		
				21,241 837						23,393 5357						12,236 1827									13,365 6645					13,425 8974			



n°puits	Z	Prof	NS	N-piézo	n°puits	Z	Prof	NS	N-piézo
85	1309	8,5	5,3	1303,7	129	1396	23,9	23,3	1372,7
86	1292	8,8	8	1284	130	1387	10	8,7	1378,3
87	1266	14	4,1	1261,9	131	1416	24,3	24	1392
88	1266	5,25	3,75	1262,25	132	1430	45	44,3	1385,7
89	1265	11,4	8,65	1256,35	133	1423	40	33	1390
90	1264	14,15	9,9	1254,1	134	1423	50	28,8	1394,2
91	1267	6,2	3,2	1263,8	135	1411	23,7	23,2	1387,8
92	1260	5,1	3,45	1256,55	136	1336	6,9	6	1330
93	1297	5	3	1294	137	1340	7	6,8	1333,2
94	1274	17,6	17,1	1256,9	138	1333	8	7	1326
95	1269	30	28	1241	139	1361	5,1	5	1356
96	1254	9,3	7,2	1246,8	140	1362	7,9	7	1355
97	1270	17,3	17,1	1252,9	141	1361	6	5,5	1355,5
98	1258	14,2	13,6	1244,4	142	1377	26,5	26,2	1350,8
99	1261	11,9	11,3	1249,7	143	1380	21,6	21,4	1358,6
100	1245	3,6	2,4	1242,6	144	1372	11,8	9,7	1362,3
101	1247	16,7	14,1	1232,9	145	1372	8,7	6,7	1365,3
102	1256	8,3	7,1	1248,9	146	1371	4,2	3,3	1367,7
103	1257	10,1	8	1249	147	1369	5,5	4,7	1364,3
104	1271	12,5	11,3	1259,7	148	1371	7,7	6,7	1364,3
105	1348	20,4	20,2	1327,8	149	1371	7,5	7,1	1363,9
106	1367	33,4	33	1334	150	1371	11,7	7,7	1363,3
107	1359	24,7	24,4	1334,6	151	1369	8,3	8,2	1360,8
108	1384	34	30,8	1353,2	152	1369	9,1	8,3	1360,7
109	1397	38,4	38,2	1358,8	153	1370	9,8	8,4	1361,6
110	1355	9,7	5,9	1349,1	154	1367	8,7	8,5	1358,5
111	1353	5,1	4,9	1348,1	155	1364	5,5	4,5	1359,5
112	1352	7,2	3,9	1348,1	156	1359	3	2	1357
113	1351	7,2	4,5	1346,5	157	1292	8,8	8	1284
114	1351	7	4,2	1346,8	158	1345	17	15	1330
115	1348	6,3	4	1344	159	1311	31,5	31,2	1279,8
116	1347	5,6	3,5	1343,5	160	1329	15,9	15,5	1313,5
117	1348	6,1	5,8	1342,2	161	1315	5,2	4	1311
118	1343	4,5	2,6	1340,4	162	1315	7,2	4	1311
119	1347	11,6	10	1337	163	1312	5,5	2,6	1309,4
120	1348	8,1	6,25	1341,75	164	1316	7,5	7,2	1308,8
121	1351	4,9	3,6	1347,4	165	1320	7,4	7,3	1312,7
122	1367	2,3	1	1366	166	1320	4,8	3,8	1316,2
123	1419	30	18	1401	167	1327	5,2	4,9	1322,1
124	1388	9,2	5	1383	168	1330	7,1	5	1325
125	1387	4	2,3	1384,7	169	1330	7	5,4	1324,6
126	1422	45,5	45,4	1376,6	170	1323	5,8	4,3	1318,7
127	1394	21,6	20,1	1373,9	171	1325	6,7	3,7	1321,3
128	1393	25	20	1373	172	1332	7	5,6	1326,4

n°puits	Z	Prof	NS	N-piézo	n°puits	Z	Prof	NS	N-piézo
173	1330	5,9	5,2	1324,8	217	1383	34,5	30,7	1352,3
174	1330	5,2	4,7	1325,3	218	1345	8	2	1343
175	1336	9,7	7	1329	219	1335	12	6	1329
176	1339	12,7	9,6	1329,4	220	1391	6,5	6	1385
177	1337	7,6	6,3	1330,7	221	1380	12,4	10,8	1369,2
178	1338	8,4	6,7	1331,3	222	1366	15	13	1353
179	1360	3,8	2,2	1357,8	223	1367	17	16	1351
180	1361	19,9	19,6	1341,4	224	1363	30	16	1347
181	1363	4,5	3,5	1359,5	225	1482	15,9	9,7	1472,3
182	1365	7,6	6,9	1358,1	226	1519	7,2	5,2	1513,8
183	1377	14,9	14,3	1362,7	227	1443	9,2	7,3	1435,7
184	1386	18,4	18,2	1367,8	228	1441	6	4,5	1436,5
185	1377	10,4	9,7	1367,3	229	1444	6,9	6,3	1437,7
186	1375	6,7	5,6	1369,4	230	1414	12	9	1405
187	1373	14,7	14,3	1358,7	231	1430	7	6,6	1423,4
188	1374	11,3	11,2	1362,8	232	1456	9	7	1449
189	1372	39,1	38,3	1333,7	233	1426	4,9	3,6	1422,4
190	1346	9	7	1339	234	1428	6,4	5,2	1422,8
191	1350	9	8,2	1341,8	235	1432	5,2	4,3	1427,7
192	1357	10	9	1348	236	1421	22,5	19,5	1401,5
193	1355	9	8	1347	237	1427	10,2	5,8	1421,2
194	1399	40	38	1361	238	1390	18,9	16,8	1373,2
195	1402	45	44	1358	239	1370	18	17	1353
196	1492	5,8	3,9	1488,1	240	1392	16,8	16,6	1375,4
197	1433	32,8	29,6	1403,4	241	1358	33	32	1326
198	1411	8,2	2,2	1408,8	242	1366	24	23	1343
199	1419	11,9	4,2	1414,8	243	1354	25	20	1334
200	1415	8,4	7,3	1407,7	244	1352	23	20,2	1331,8
201	1422	8,5	6	1416	245	1390	47	30,8	1359,2
202	1423	7,1	6,6	1416,4	246	1376	47	18,2	1357,8
203	1420	8,5	7,6	1412,4	247	1358	7	2	1356
204	1415	8,4	7,1	1407,9	248	1337	6,4	4,9	1332,1
205	1424	14,9	11,3	1412,7	249	1398	40	32,4	1365,6
206	1423	7,5	6,8	1416,2	250	1390	30	26	1364
207	1426	9,3	9	1417	251	1379	30	11,7	1367,3
208	1427	7,2	6,8	1420,2	252	1381	40	38	1343
209	1404	29,6	28,7	1375,3	253	1377	17	15	1362
210	1383	27	26,8	1356,2	254	1376	16	14	1362
211	1450	9,4	7,7	1442,3	255	1379	14,6	12,6	1366,4
212	1385	33	31	1354	256	1373	12,9	11,1	1361,9
213	1357	14	12	1345	257	1369	11,2	10	1359
214	1364	30,3	27,2	1336,8	258	1386	16,3	13,5	1372,5
215	1368	32,9	30,9	1337,1	259	1369	11	8,7	1360,3
216	1370	25,3	25,2	1344,8	260	1352	17,6	10	1342

261	1352	21	8	1344					
262	1340	6,6	4,9	1335,1					
263	1340	8,1	3,2	1336,8					
264	1345	20	14	1331					
265	1330	23,5	18,8	1311,2					
266	1326	40	20	1306					
267	1324	30	16,7	1307,3					
268	1330	25	18	1312					
269	1335	23	20	1315					
270	1326	20	19,5	1306,5					
271	1322	12,4	12	1310					
272	1326	21,6	13	1313					
273	1319	20,2	15,2	1303,8					
274	1331	20	16,9	1314,1					
275	1345	12,4	10,5	1334,5					
276	1334	15	12,9	1321,1					
277	1351	15,2	14,7	1336,3					
278	1335	27	25	1310					
279	1349	30	26	1323					
280	1349	21	17	1332					
281	1346	30	23	1323					
282	1358	49	1	1357					
283	1341	20	7	1334					
284	1337	33	25	1312					
285	1337	31	25	1312					
286	1340	31,6	17,4	1322,6					
287	1336	21	15	1321					
288	1319	15	11	1308					
289	1328	30	26	1302					
290	1326	22	21	1305					
291	1321	20	16	1305					
292	1341	22	21	1320					
293	1323	27	21	1302					
294	1350	28	23	1327					
295	1344	20	14	1330					

n° Forage	z	prof	N-S	N-Piézo	n° Forage	z	prof	N-S	N-Piézo
174	1384	70	18	1366	220	1397	70	30	1367
175	1384	350	35	1349	221	1385	70	30	1355
176	1399	70	30	1369	222	1382	70	27	1355
177	1398	70	30	1368	223	1375	70	24	1351
178	1390	115,5	20	1370	224	1382	70	30	1352
179	1380	100	30	1350	225	1417	100	30	1387
180	1378	70	20	1358	226	1418	70	35	1383
181	1379	85	24,4	1354,6	227	1421	70	35	1386
182	1393	70	36	1357	228	1403	70	38	1365
183	1385	70	12	1373	229	1400	70	33	1367
184	1371	70	17	1354	230	1392	70	30	1362
185	1369	70	15	1354	231	1421	52	30	1391
186	1380	131,7	11	1369	232	1420	70	45	1375
187	1386	310	40	1346	233	1413	80	52	1361
188	1378	210	40	1338	234	1431	70	50	1381
189	1492	75	40	1452	235	1400	70	50	1350
190	1495	75	15	1480	236	1399	70	40	1359
191	1479	70	15	1464	237	1400	70	40	1360
192	1389	70	35	1354	238	1397	70	40	1357
193	1380	95	24	1356	239	1389	70	35	1354
194	1380	70	28	1352	240	1389	70	30	1359
195	1404	70	45	1359	241	1393	70	40	1353
196	1375	70	20	1355	242	1390	70	45	1345
197	1385	70	30	1355	243	1401	70	35	1366
198	1399	70	40	1359	244	1399	65	61	1338
199	1401	340	20	1381	245	1374	200	44	1330
200	1360	34	6	1354	246	1377	70	20	1357
201	1349	34	6,6	1342,4	247	1369	70	30	1339
202	1358	34	6	1352	248	1379	70	40	1339
203	1391	100	25	1366	249	1381	70	30	1351
204	1389	82	26	1363	250	1377	80	21	1356
205	1415	200	45	1370	251	1379	70	23	1356
206	1400	301	25	1375	252	1372	70	19	1353
207	1401	70	20	1381	253	1377	70	20	1357
208	1392	70	35	1357	254	1377	50	23	1354
209	1390	70	35	1355	255	1397	70	30	1367
210	1393	65	53	1340	256	1390	100	30	1360
211	1409	70	21	1388	257	1380	70	25	1355
212	1378	301	25	1353	258	1381	70	17,7	1363,3
213	1402	70	35	1367	259	1374	70	25	1349
214	1405	70	55	1350	260	1401	76	33,7	1367,3
215	1402	70	53	1349	261	1407	69	32,8	1374,2
216	1395	70	52	1343	262	1413	60	35,7	1377,3
219	1379	70	30	1349	263	182	70	23	159

Nom source	X Lambert	Y Lambert	X UTM	Y UTM	Z
A. khathiri aek	360256	359534	332353,57	3744173,76	1361
A. sidi ahmed	356335	352342	328409,08	3736991,89	1416
A. oum redjam	358065	354391	330145,94	3739036,13	1465
ouina el bahdha	353724	359990	325821,12	3744650,32	1368
A. ben zarga 01	344099	346052	316149,59	3730737,63	1338
A. benzarga 02	344130	346070	316180,66	3730755,54	1338
A. el baydha	347419	352040	319489,29	3736717,45	1352
A. oum zelfane	329146	324228	301124,15	3708950,21	1354
ouinet kaddour	328805	322978	300779,26	3707700,67	1334
A. ellouh	343305	344243	315349,73	3728930,42	1301
ouinet ellouh	343377	344152	315421,48	3728839,16	1308
A. boutuizka brahim	351633	340016	323667,70	3724676,43	1506
A. mgaoucheche 01	363603	374014	335747,03	3758646,92	1263
A. touile	363687	373138	335828,27	3757770,44	1294
A. liken	370156	371282	342292,86	3755893,56	1244
A. djellouli cheikh	369953	371325	342089,95	3755937,21	1246
A. mekther	349334	352204	321405,44	3736875,56	1370
A. bencheikh mahamed	349369	352150	321440,29	3736821,43	1368
A. massoud (mkimene)	350506	353345	322581,37	3738013,29	1451
A. lemhadjer	355203	349746	327268,71	3734398,60	1460
A. ouled yahia 01	344440	346314	316491,52	3730998,67	1359
A. ouled yahia 02	344311	346198	316362,12	3730883,03	1360
A. Annba			327843,86	3734026,28	
A. Areg ez Zerria			334618,41	3744882,06	
A. Bou Azza			322527,07	3737584,18	
A. Defla			311012,8	3726320,7	
A. El Khecheb			346472,49	3756047,63	
A. Korima			327730,75	3749045,27	
A. Laredj			337148,8	3752734,66	
A. Lirhen			318694,307	3730601,16	
A. Lirhene			342128,81	3755685,65	
A. Mekter			320641,121	3735303,65	
A. Mouilah			317666,26	3730899,34	
A. Moullah			307963,73	3721776,41	
A. Sfaïa			326258,15	3729574,61	
A. Zoubia			325957,909	3741650,35	

Annexe n°6 : Analyses hydrochimiques de la région d'El Bayadh (rouge : mauvaise analyse, orange : analyse acceptable, vert : bonne analyse)

N°	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	SiO ₂
S1_	150	44,35	170	9,12	301,75	372	232	16,4	3,2
S2	110	75,33	69	9,02	142	260	244	15,6	3,28
S4	140	35,23	29,6	2,2	71	255	206	10,6	2,97
S5_	76	14,6	21,2	2,7	62,12	53	238	15,6	2,85
S6_	56	27,94	31	2,9	71	62,4	207	11,29	2,76
S8	104	25,51	37,4	4,3	88,75	63,5	228	25,5	3,06
S16_	90	37,7	120	5,9	276,9	80	238	40,8	2,99
S18_	56	35,23	17,4	1,7	71	40	268	46,9	2,94
S20_	110	36,45	16	0,78	53,25	138	311	24,6	2,84
S21	220	98,41	67,6	2,4	151	590	262	15,7	3,11
P2_	260	97,2	95,7	8,9	301,7	600	360	25,6	2,75
P3	620	279,45	590	14,1	1136	2102	207	3	3,24
P4_	112	37,7	19,7	1,94	62,12	60,1	451	15,7	2,96
P5	120	72,9	17,1	2,03	53,25	300	238	9,6	2,58
P29	186	52,24	272	28,4	595	300	220	16,6	3,06
P33	108	86,3	65	6,1	177,5	242	384	9,9	2,84
P34_	90	19,4	27,4	2,5	71	41	268	67,4	2,78
P36	140	44,95	84	2,84	257,4	130	329	2,3	3,16
P37_	114	27,94	42,7	2,7	115,4	55,3	390	19	2,98
F1_	48	4,86	25,6	2,67	42,6	60,5	100	31	3,1
F7_	68	6,1	35,6	2,04	62,12	76	140	40,9	2,04
F9_	52	15,18	21	2,07	35,5	100,2	116	40,97	2,37
F10	280	92,34	67	11,1	115,4	830,5	268	28,8	3,2
F11_	92	21,87	70	3,9	97,62	149	244	29,9	2,5
F12	140	46,17	49,3	7,9	88,75	250	256	39,87	2,64
F15_	82	17	39	2,9	71	53	207	45,4	2,64
F16_	78	23,1	29	1,9	53,25	71	292	16,6	2,1
F17	150	48,6	27,3	2,04	71	176	360	8,6	2,77
F18	110	26,73	54,1	8,7	97,62	50	348	10,2	2,06
F19	100	36,45	59,8	8,06	115,4	48,3	335	10,9	0,94
F44	140	61,96	86	7,4	177,5	174	420	9	1,99
F58	114	34	29,9	3	71	100	250	13	2,7
F59_	230	92,34	63	8	124,25	500	302	120	3,06
F62_	80	46,17	49	6,4	115,4	108	274	41	2,63
F63_	70	29,16	18,6	5,4	62,12	49,1	268	45,51	2,2
F64_	72	34	29,4	5,7	79,9	40,4	268	59,9	2,04
F69	86	44,95	47,4	2,1	97,6	58	317	3	2,93
F70	110	34	49,1	6,1	106,5	69,4	317	25	1,93
F71	140	111,78	88	2,9	177,5	351	427	8	2,97
F75_	92	29,2	36,1	3,1	88,75	54	353	11,3	2,59

F78	90	31,6	30,9	4,1	79,9	59	329	6,6	2,6
F80	150	176,2	179	7,3	373	530	390	50,94	3,16
F81	94	27,94	22	1,9	71	62	290	8,9	2,77
F82_	120	25,51	43	5,9	105,6	111	286	38,87	2,69
F 20_	102	55,9	80	9,3	151	146	250	51,2	1,6
F 21_	90	74,11	94,6	11	177,5	202	268	85	2,94
F 24	190	83,83	297	12,7	568	415	228	25	3,18
F 25_	106	36,45	67,7	9,9	150,9	87	244	63,4	2,96
F 28	108	41,31	160	8,1	301,75	96	262	8,6	2,91
S3_	70	7,29	28,6	3,1	53,25	76	146	38,97	0,21
F Rehab	101	40	90	4	99	278	248	5	13
F Krekda	102	32	44	7	40	317	128	2	15,5

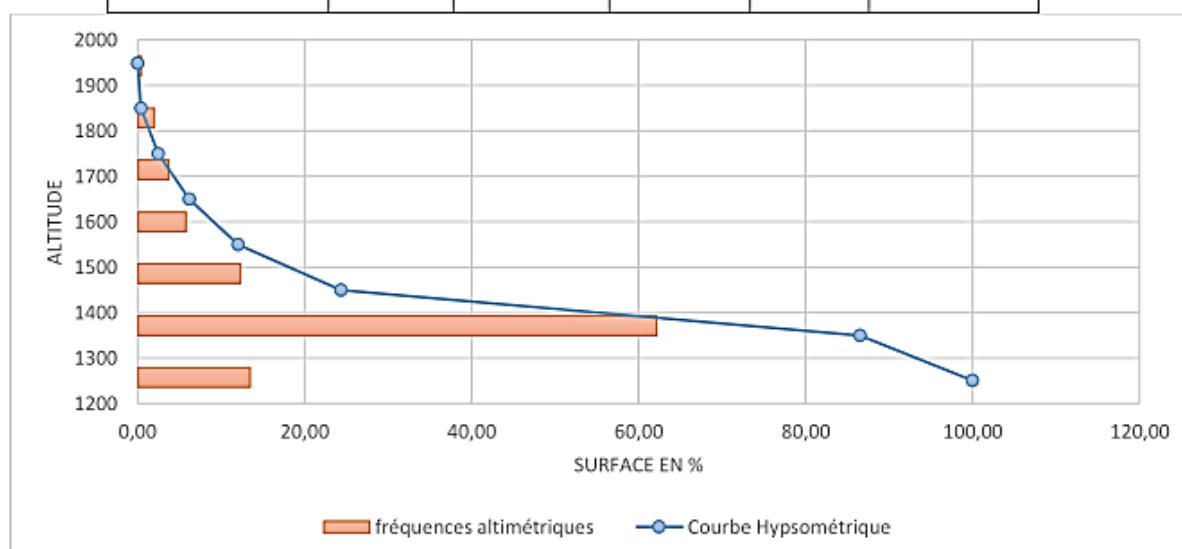
Ostry et al, (1987)	HCS				•			•			
Minstr. Flemish Comm. (1986) Goossens et Van Damme (1987)	MS				•						
Carter et al. (1987) Palmer (1988)	MS				•		•	•			
Marcolongo et Prtto (1987) Méthode1	RS				•					•	•
Marcolongo et Prtto (1987) Méthode2	AR					•				•	•
GOD Foster (1987, 1988)	RS										•
Schmidt (1987)	RS				•				•		•
Troyan et perry (1988)	PCSM	•	•				•			•	•
GNDCI BASIC, Civita (1990)	HCS								•		•
DRASTIC, Aller et al. (1985, 1987)	PCSM		•		•					•	•
SINTACS, Civita (1991); Civita et Maio (1997, 2000)	PCSM		•	•	•				•	•	•
ISIS, De Regibus (1994)	PCSM		•		•					•	•
PaPRIKA, Döerfliger & Plangnes	PCSM		•		•		•			•	

PPiK, Tayebi et al, (2010)	?	●	●		●					●	●
TCR, Amharref et al, (2001)	?				●		●				●
PI, Goldscheider et al, (2000)	?		●	●	●						
GLA, Hölting (1995)	?				●						●
DRAV- modèle, Jinlong Zhou et al, (2009)	?				●					●	●

HCS : méthode cartographique (Hydrogeological Complex and Setting method) ; PCSM : méthode à pondération et à poids (Point Count System Model) ; RS : méthode relations analogiques et modèles numériques (Analogic Relation) ; MS : système matriciel (Matrix System).

Annexe n° 8 : Répartition et courbe hypsométrique et histogrammes des fréquences altimétriques du bassin versant d'oued Deffa

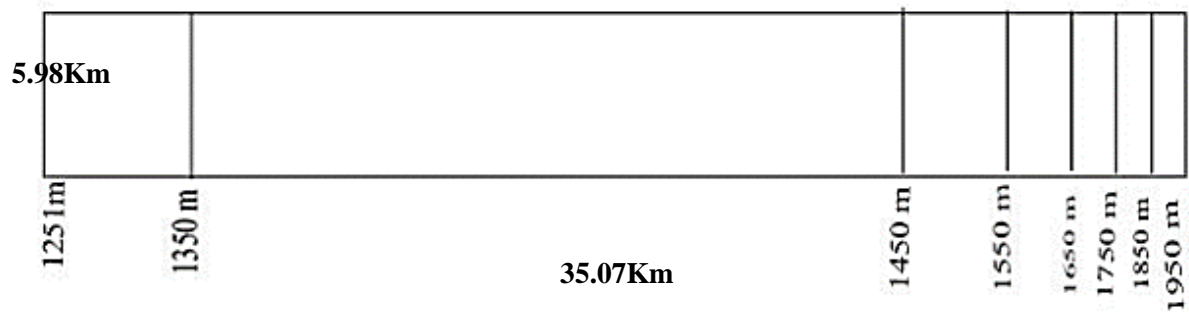
Elévation courbe de niveau (m)	Surface Partielles		Surface Cumulées		Pourcentage au-dessus limite l'intérieur en (%)
	Surface entre les courbes A (Km ²)	Pourcentage de chaque surface partielle Ai (%)	Surface cumulée (Km ²)	Surface cumulée (%)	
1251-1350	28,25	13,47	28,25	13,47	100,00
1350-1450	130,34	62,16	158,59	75,64	86,53
1450-1550	25,84	12,33	184,44	87,96	24,36
1550-1650	12,22	5,83	196,66	93,79	12,04
1650-1750	7,86	3,75	204,52	97,54	6,21
1750-1850	4,22	2,01	208,74	99,55	2,46
1850-1949	0,94	0,45	209,68	100,00	0,45



Donnée pour le calcul de l'altitude moyenne du bassin versant

Altitude	A en Km ²	$\sum A_i \left(\frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right)$
1251-1350	28,25	36738,7192
1350-1450	130,34	182482,918
1450-1550	25,84	38767,3859
1550-1650	12,22	19555,6293
1650-1750	7,86	13363,834
1750-1850	4,22	7587,00444
1850-1949	0,94	1792,43889
Somme	209,68	300287,93

Rectangle équivalent du bassin versant



LISTE DE FIGURES

- Figure 1 : Schéma géologique du Maghreb (Elmi 1978)
- Figure 2 : Situation géographique du secteur d'étude
- Figure 3 : Présentation en 3D du synclinal d'El Bayadh
- Figure 4 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles (mm) des stations de Stitten et d'El Bayadh
- Figure 6: Précipitations annuelles (mm) à la station d'El Bayadh 1972-2018
- Figure 7 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles à la station d'El Bayadh de la
- Figure 8 : Températures moyennes mensuelles de la station d'El Bayadh (2009-2018)
- Figure 9 : Graphique de bilan de l'eau à El Bayadh (2009)
- Figure 10 : Organigramme de calcul de l'ETR et PE (Yousfi *et al* 2013) adapté à la zone d'étude
- Figure 11: PE et ETR journalières de l'année 2009 ; **a** : RFU=20mm, **b** : RFU=23mm et **c** : RFU=45mm
- Figure 12 : Histogramme des P, ETP, ETR et PE annuelles de l'année 2009 (mesurées et calculées à l'échelle journalière)
- Figure 13 : Carte géologique d'El Bayadh et la partie sud de Chott Echergui avec les traits de coupes géologiques (Cornet 1952)
- Figure 14 : Colonne lithostratigraphique ; a : de la feuille d'El Bayadh ; b : du synclinal d'El Bayadh
- Figure 15 : Grands traits structuraux du Maghreb (Elmi 1978)
- Figure 16 : Coupes géologiques du synclinal d'El Bayadh (Cornet 1952)
- Figure 17 : Carte structurale de la région d'El Bayadh
- Figure 18 : Colonne hydrogéologique des formations du synclinal d'El Bayadh et leurs descriptions hydrogéologiques. (Por. : porosité ; P : perméabilité)
- Figure 19 : Carte schématique des aquifères du synclinal d'El Bayadh
- Figure 20: Carte hydrogéologique de l'aquifère multicouche du synclinal d'El Bayadh (données HYBACO 2003)
- Figure 21 : Contexte d'émergence des sources Annba et Bou Azza
- Figure 22 : Contexte d'émergence des sources Ain Sfaïa et Ain Mekter
- Figure 23 : Contexte d'émergence d'Ain Moullah
- Figure 24 : Contexte d'émergence d'Ain Laredj
- Figure 25 : Contexte d'émergence d'Ain Mouilah
- Figure 26 : Contexte d'émergence d'Ain Defla

Figure 27 : Relation entre le réseau hydrographique et le réseau de faille (Cornet 1952, ANRH 2008)

Figure 28 : Carte de relation entre l'écoulement souterrain et le réseau de failles

Figure 29 : Carte de la variation de la minéralisation de la région d'El Bayadh

Figure 30 : Analyse en composantes principales (plan factoriel IxII) espaces des variables

Figure 31 : Variation verticale de la minéralisation moyenne des eaux en fonction des formations

Figure 32: Principales étapes de la télédétection (Centre Canadien de Télédétection)

Figure 33 : Fuite d'eau usée à partir du canal au niveau de l'oued Deffa

Figure 34 : Rejet d'eau usée domestique au niveau de l'oued Deffa

Figure 35 : Rejet d'eau usée domestique au niveau d'un affluent d'oued Deffa

Figure 36: Ancienne décharge

Figure 37 : Nouvelle décharge

Figure 38 : a : Influence des principaux facteurs et variables sur la vulnérabilité des ressources en eau des aquifères fissurés (Vías *et al* 2006), b : Facteurs d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines dans les zones arides

Figure 39 : Représentation des cinq principes fondamentaux (5A) pour élaborer le modèle de vulnérabilité du synclinal d'El Bayadh

Figure 40: Fonction mathématique utilisée pour déterminer la densité de fracturation

Figure 41: Diagramme de la méthode d'estimation de la pluie efficace journalière

Figure 42 : Modèle utilisé pour déterminer la vulnérabilité de la ressource souterraine dans les zones arides et semi-arides

Figure 43 : Présentation des cartes géologiques du Chott Echergui et celle d'El Bayadh après géoréférencement

Figure 44 : Géologie digitalisée

Figure 45 : Réseau de faille digitalisé sur le fond géologique

Figure 46 : Réseau hydrographique et les sources de la zone d'étude

Figure 47 : La topographie digitalisée et la représentation de la zone d'étude

Figure 48 : Equation de calcul et présentation des résultats de la densité de fracturation

Figure 49 : Calcul de la profondeur de la nappe par le Surfer

Figure 50 : Carte des conditions d'infiltration calculée par le surfer à partir de la carte des zones de pertes, pentes et densité de fracturations

Figure 51 : Présentation de la fenêtre d'application GridMath

Figure 52 : Carte du facteur « Lithologie »

Figure 53 : Carte du facteur « Condition d'infiltration »

Figure 54: Carte du facteur « Profondeur de la nappe »

Figure 55: Carte du facteur «précipitation efficace »

Figure 56: Classes de vulnérabilité de l'aquifère d'El Bayadh obtenus avec la méthodologie proposée

Figure 57 : Superposition de la carte de vulnérabilité et les différents facteurs

Figure 58 : Superposition de la carte de vulnérabilité et la carte géomorphologique

Figure 59 : Situation et délimitation du bassin versant d'Oued Deffa

Figure 60 : Modèle numérique présentant les oueds principaux du réseau hydrographique (a) et la carte hypsométrique (b) du Bassin versant d'Oued Deffa

Figure 61 : Carte de la pente du Bassin versant d'Oued Deffa

Figure 62 : Différentes étapes de traitement des données

Figure 63: Exemple d'un Arbre de décision (Moonjun et al 2010)

Figure 64 : Modèle GOD pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution d'un aquifère (Foster *et al* 2007)

Figure 65 : Génération d'une carte de vulnérabilité à la pollution des aquifères à l'aide du Système GOD (Foster *et al* 2007)

Figure 66 : Photos des affleurements montrant la fissuration des roches dans la zone d'étude. Grès de la formation de Aïssa (a) et de Tiout (b)

Figure 67 : Illustration de la méthode PI : a. quand l'infiltration est diffusée, b. quand il y a un ruissellement et/ou infiltration concentrée) 1.topsol (terre végétale), 2. subsol, 3. substrat rocheux non-karstique, 4. substrat rocheux karstique non-saturé. En relation avec le facteur I. (Goldscheider *et al*, 2000)

Figure 68 : Etat de l'eau dans le sol

Figure 69 : Etapes et paramètres utilisés pour l'estimation du facteur P (Goldscheider *et al*, 2000)

Figure 70 : Schéma des différents paramètres du facteur I

Figure 71 : Etapes et paramètres utilisés pour l'estimation du facteur I (Goldscheider *et al*, 2000)

Figure 72 : (a) image de NDVI et (b) son histogramme de la région d'étude

Figure 73 : Composition coloré des images Landsat 8-OLI, RGB=765, 753, 543

Figure 74 : Assemblage des bands ratios des images Landsat 8-OLI en RGB: (6/7, 6/4, 6/5) (6/7, 4/2, 5/4) et (7/6, 5/6, 2/4)

Figure 75 : (a) Réseau de failles par assemblage des résultats des 4 filtres directionnels (le fond est celui du filtre 135°) de l'image Landsat 8 OLI, (b) rosace des résultats des linéaments (sur RockWork)

Figure 76 : Carte géo-structural en rassemblant toutes les données dans le SIG

Figure 77 : Image de l'indice de Rougeur de la zone d'étude

Figure 78 : Quatre classes résultant du traitement de l'AD

Figure 79 : Carte de l'AD de la zone d'étude

Figure 80 : Types d'aquifères de la couche G selon l'indice GOD

Figure 81 : Nature lithologique de la couche O selon l'indice GOD

Figure 82: Profondeur de la nappe de la couche D selon de l'indice GOD

Figure 83 : Carte de vulnérabilité par la méthode GOD

Figure 84 : Sous-couche du Topsol (T)

Figure 85 : sous-couche « Subsol » (S)

Figure 86 : sous-couche « Lithologie » (L)

Figure 87: sous-couche « fracturation » (F)

Figure 88 : Sous-couche « substrat rocheux » (B)

Figure 89 : Couche P selon l'indice PI

Figure 90 : Sous-couche Propriétés du sol

Figure 91 : Classes de la pente utilisés (a) pour créer la couche I' (b)

Figure 92 : Couche I selon l'indice PI

Figure 93 : Carte de vulnérabilité par la méthode PI

Figure 94 : Cartes de vulnérabilité estimées par les méthodes GOD et PI

Figure 95 : Répartition spatiale de NO_3^- , utilisé pour la validation des cartes de vulnérabilité

Figure 96 : Corrélation entre les indices PI et GOD et la concentration des nitrates

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1 : Répartition générale des terres dans la région d'El Bayadh
- Tableau 2 : Stations météorologiques de la région d'El Bayadh avec coordonnées et les périodes de données
- Tableau 3 : ETP moyenne mensuelle de l'année 2009 de la station d'El Bayadh
- Tableau 4 : Bilan de l'eau à El Bayadh (2009) d'après Thornthwaite : *RU réserves d'eau utilisables du sol*, Δ *RU réserves d'eau utilisées pendant le mois*. *ETR= ETP, lorsque $P > ETP$ et à $P + \Delta$ RU dans le cas contraire. ETP-ETR donne la déficience de l'évaporation.*
- Tableau 5 : Valeurs indicatives de la RFU pour trois types de sols (Rieul et Ruelle 2003) et la description du sol dans le synclinal d'El Bayadh
- Tableau 6 : Paramètres hydrodynamiques des principaux aquifères de la région d'El Bayadh
- Tableau 7: Exemples de méthodes de vulnérabilité utilisés dans la zone semi-aride et aride
- Tableau 8 : Sources de pollution dans la région d'El Bayadh (Géowater 2003, HYBACO 2013)
- Tableau 9: Principaux formations géologiques et leurs cotes
- Tableau 10: Cotes des Conditions d'infiltration
- Tableau 11: Cote du facteur de la profondeur de la nappe
- Tableau 12 : Cote de facteur Pluie efficace
- Tableau 13: Cote « Lithologie »
- Tableau 14: Résumé statistique des facteurs de vulnérabilité carte type et coefficient de variation
- Tableau 15: Statistiques sur la sensibilité à l'enlèvement d'un facteur
- Tableau 16: Corrélation statistique (coefficient de détermination) parmi les facteurs de vulnérabilité et les index
- Tableau 17: Caractéristique de forme du Bassin Versant d'oued Deffa
- Tableau 18 : Principaux paramètres du bassin versant d'oued Deffa
- Tableau 19 : Différentes classes du facteur PI, P et I (Goldscheider *et al*, 2000)
- Tableau 20 : Cotes des formations aquifères selon l'indice G
- Tableau 21 : Cotes de la nature lithologique de l'indice GOD
- Tableau 22 : Cotes de la profondeur de la nappe de l'indice GOD
- Tableau 23 : Cotes de la sous-couche T
- Tableau 24 : Cotes de la sous-couche S

Tableau 25 : Cotes de la sous-couche L

Tableau 26 : Cotes de la sous-couche F

Tableau 27 : Cotes de la sous-couche Propriétés du sol

Tableau 28 : Valeurs de I' en fonction de la pente et le type de sol

BIBLIOGRAPHIE

Références cites et liens :

AGRO-PASTORALISME (s. d.) : Définitions des S.I.G,

<https://sites.google.com/site/pastoraldz/cartographie-gps/initiation-au-systeme-d-information-geographique/definitions-des-s-i-g>

Centre Canadien de Télédétection (s. d.) :

<https://www.rncan.gc.ca> ;

<https://www.rncan.gc.ca/sites/www.rncan.gc.ca/files/earthsciences/images/resource/tutor/fundam/images/rsprocess.gif>

C.I.U.L : Centre informatique Université de Lausanne (s. d.): Qu'est-ce qu'un SIG ? www.unil.ch

GLOSSAIRE DES SIG (2013) :

http://www.emse.fr/tice/uved/SIG/Glossaire/co/Systeme_Information_Geog_1.html

Références bibliographiques :

Abed S. et Harket 1982: Lithostratigraphie et sédimentologie du Jurassique moyen et supérieur du Djebel Amour (Atlas saharien central, Algérie). *Thèse 3^{ème} cycle, Pau, 242 p.*

Adams B. *et al.*, 2003: COST Action 620. Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers. *Zwahlen F. Editor-in-chief. Final Report.*

Aller L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R.J., Hackett G., 1987: DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. *NWWA/EPA Series, EPA-600/2-87-035.*

Amharref M., Mania J., Haddouchi B., 2001: Adaptation of an evaluation vulnerability method to groundwater pollution. *Proc. of Salt Water Intrusion in Coastal Aquifer: Monitoring, Modeling, and Management. Essaouira, Maroc, 23-25 april. pp. 1-10;* www.olemiss.edu/sciencenet/saltnet/swica1/swica1.html

Andrea N., 2011: Vulnerability map for Lusaka and surroundings using the pi-method – *a documentation and manual.*

ANHR, 2008 : Carte hydrogéologique interprétative d'El Bayadh 1/200 000.

ANHR, 2008 : Carte hydrogéologique interprétative de Chellala Dahrانيا 1/200 000.

Azzaz H., 1992 : Etude hydrogéologique du synclinal d'El Bayadh. *Mémoire d'ingénieur, Univ. d'Oran.*

- B. E. T.G. H., Bureau d'études techniques de géologie et hydrogéologie, Geo-Water, 2003 : Etude géologique et hydrogéologique du secteur ELBayadh.
- Bassoulet J.P., 1973 : Contribution à l'étude stratigraphique du Mésozoïque de l'Atlas saharien occidental (Algérie). *Thèse. Sci. Nat, Univ-Paris VI, 2 tomes, 497 p, 50 Fig, 32 Pl.*
- Ben-Dor E., Levin N., Singer A., Kamieli A., Braun O., Kidron G. J., 2006. Quantitative mapping of the soil rubification process on sand dunes using an airborne hyperspectral sensor. *Geoderma 131, pp1-21.*
- Benslimane M., Hamimed A., El Zerey W., Khaldi A. et Mederbal K., 2008. Analyse et suivi du phénomène de la désertification en Algérie du nord », *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], *Volume 8 Numéro 3 | décembre 2008, mis en ligne le 18 février 2009, consulté le 29 avril 2021.* URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/6782> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.6782>
- Bentaher I., Raji M., 2020. Comparison of Landsat OLI, ASTER, and Sentinel 2A data in lithological mapping : A Case study of Rich area (Central High Atlas, Morocco), *Advances in Space Research, Volume 67, Issue 3, Pages 945-963, ISSN 0273-1177, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.037>*
- Bonham-Carter, G.F., 1994. Geographical Information Systems for Geoscientists; Modelling with GIS, *Pergamon, Kidlington.*
- Boucherdoud S., Bouferma M., 2008 : Etude géologique de l'Infra-crétacé et du Valenginien-Hautérvien de la région d'El Bayadh (Atlas saharien central). *Mémoire d'Ingénieur d'état, Univ. Oran.*
- Civita M., 2009 : The Combined Approach When Assessing and Mapping Groundwater Vulnerability to Contamination. *J. Water Resource and Protection, 2010, 2, 14-28 doi:10.4236/jwarp.2010.21003 (<http://www.scirp.org/journal/jwarp>).*
- Civita M., De Maio M. 2004: Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian "combined" approach. *Geofísica Internacional (2004), Vol. 43, Num. 4, pp. 513-532.*
- Civita, M., De Maio M., 2000: Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico. SINTACS R5 a new parametric system for the assessment and automatic mapping of groundwater vulnerability to contamination. *Pitagora Editrice, Bologna pp.240. Pubbl. n°2200 del GNDCI-CNR.*
- Cornet A., 1947 : Observations géologiques dans l'Atlas saharien sud oranais. *Bull. Soc. Hist. Nat, Afrique du Nord, t.38, Fasc. 1 – 9, pp. 63 –69, 8 fig.*

- Cornet A., 1950 : Carte géologique Chott Ech Chergui 1/200 000. *Service de la carte géologique de l'Algérie*.
- Cornet A., 1950 : Carte géologique Géryville (El Bayadh) 1/200 000. *Service de la carte géologique de l'Algérie*.
- Cornet A., 1952 : L'Atlas Saharien Sud Oranais. *XIX^{ème} Congrès géologique interne, Alger, Monographies régionales, 51 p, 9 fig, 1 pl.*
- Daly D., Dassargues A., Drew D., Dunne S., Goldscheider N., Neale S., Popescu C., Zwhalen F., 2002: MAIn concepts of the “European Approach” for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeol J 10(2):340–345.*
- Denègre J. et Salgé F., 2004 Les systèmes d'information géographique. *Presse Universitaire de France.*
- Denny S.C., Allen D.M., Journeay J.M., 2007: DRASTIC-Fm: a modified vulnerability mapping method for structurally controlled aquifers in the southern Gulf Islands, British Columbia, Canada. *Hydrogeology Journal (2007) 15: 483–493.*
- Didier M., 1990 : Utilité et valeur de l'information géographique. *Economica, Paris. NRC, 1993: Groundwater vulnerability assessment, contamination potential under condition of uncertainty. National Academy Press. Washington DC.*
- Dörfliger N., Plagnes V., 2009 : Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide Méthodologique de la méthode PaPRIKa. *BRGM/RP-57527-FR.*
- Dörfliger N., Plagnes V., Kavouri K., Balayre S., Paris C., Muet P., Subias C., Marchet P., 2010 : PaPRIKa, une méthode multicritère de cartographie de la vulnérabilité pour une gestion des ressources et des captages en milieu karstique. Exemples d'application dans le Sud-Ouest de la France. *Méthodologie pour la caractérisation de la sensibilité des aquifères. BRGM.*
- Douïhasni M., 1976 : Etude géologique d'Ain Ouarka–Boussemgoun. Analyse structurale (Partie centrale des Monts des Ksour, Atlas Saharien, Algérie). *Thèse 3^{ème} cycle, Univ. d'Oran, 272 p, 52 fig., 4 pl.*
- Durand J.H., 1952 : Etude géologique, hydrogéologique et pédagogique des croûtes en Algérie. *Publication Gouvernement général de l'Algérie. Service colonisation et hydraulique. Birmandreis. Alger. 203 p.*
- Eakin H. et Luers A. L., 2006: Assessing the vulnerability of social-environmental systems. *ANNUAL REVIEW OF ENVIRONMENT AND RESOURCES Book Series: Annual Review of Environment and Resources Volume: 31 Pages:365-394 DOI: 10.1146/annurev. energy. 30.050504.144352.*

- Ekaka-A E.N., Chukwuocha E. O., Nafu N. M., 2012: Sensitivity Analysis of a Physiochemical Interaction Model Undergoing Changes in the Initial Condition and Duration of Experiment Time. *J. Appl. Sci. Environ. Manage. June, 2012 Vol. 16 (2)180 – 184.*
- El Fellah Idrissi B, Hinaje S., Cherai B., Mehdi K., 2016 : Rôle de la fracturation dans la circulation des eaux souterraines et la répartition des sources : cas du bassin hydrogéologique de Sefrou (Moyen Atlas Septentrional, Maroc). *European Scientific Journal August 2016 edition vol.12, No. 24.*
- Eldosouky M.A., Abdelkareem M., Elkhateeb O.S., 2017. Integration of remote sensing and aeromagnetic data for mapping structural features and hydrothermal alteration zones in Wadi Allaqi area, south eastern desert of Egypt, *J. Afr. Earth Sci.*, 130, pp. 28-37.
- Elmi S., 1978 : Polarité tectono-sédimentaire pendant l'effritement des marges septentrionales du bâti africain au cours du Mésozoïque (Maghreb). *Annales. Soc. Géol. Nord, XCVII, pp. 315-323.*
- Engle E.M., Harrison J.B.J., Hendrickx J.M.H., and Borchers B., 2010. Digital Soil Boundary Detection Using Quantitative Hydrologic Remote Sensing. *Digital Soil Mapping, Progress in Soil Science 2*, DOI 10.1007/978-90-481-8863-5_11, C Springer Science+Business Media B.V.
- Escadafal, R ; Pouget, M., 1987. Cartographie des formations superficielles en zone aride (Tunisie méridionale) avec Landsat TM, *Vol 26, Num 4, pp 9-12.*
- Faurot E., 2010 : La carte géographique dans le document composite. *Thèse Doctorat de l'Univ. de Caen/Basse-Normandie.*
- Filippini M., Gargini A., Gkemitzi A., Kvaerner J., Meeks J., Stumpp C., Róžański K., Wachniew P., Witzak S., Żurek A., 2013: Critical review of methods for assessment of vulnerability of groundwater systems. *Project of Groundwater and Dependent Ecosystems: New Scientific and Technological Basis for Assessing Climate Change and Land-use Impacts on Groundwater.*
- Flamand G.B.M., 1911 : Recherches géologiques et géographiques sur le haut pays de l'Oranie et sur le Sahara (Algérie et territoires du Sud). *Thèse Sciences. Lyon. n° 47 et A. Rey. Edit, 1001 p, 157 fig, 22 cartes, 16 pl.*
- Flandrin J., 1948: Contribution à l'étude du Nummulitiques algérien. *Bull. serv.de la carte géol. de l'Algérie. Alger, 334p-81pl.*
- Focazio M.J., Reilly T.E., Rupert M.G., Helsel D.R., 2001: Assessing ground–water vulnerability to contamination: providing scientifically defensible information for decision makers. *U.S. Geological Survey Circular 1224.*

- Foin P., 1985: Cours de télédétection, *Ecole nationale des sciences géographiques*.
- Footprint, 2006-2009: FOOTPRINT: creating tools for pesticide risk assessment and management in Europe. *EU FP6 Project*. <http://www.eu-footprint.org> ; Access 2013.04.01 .
- Foster S. S. D., 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. *Proceedings of International Conference: Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. Noordwijk, The Netherlands*.
- Foster S.S.D., Duijvenboden W., Waegeningh H.G. 1987: Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. TNO Comm. on Hydro. Research. Hague, Proc. and Inform.*, 38:69–86
- Foster S. S. D. et Chilton P. J., 2003: Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B. 358, 1957–1972*.
- Foster S., Hirata R., Gomes D., D'Elia M., Paris M., 2007. Groundwater quality protection - a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies (also in Spanish & Portuguese). *The World Bank, Washington, D.C*.
- Foster, S. S. D. and Hirata R., 1988. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. *WHO-PAHO/HPECEPIS Technical Manual. Lima, Peru*.
- Gabr S.S., Hassan S.M., Sadek M.F., 2015. Prospecting for new gold-bearing alteration zones at El-Hoteib area, South Eastern Desert, *Egypt, using remote sensing data analysis, Ore Geol. Rev.*, 71, pp. 1-13.
- GEO-WATER 2003: Etude géologique et hydrogéologique du secteur d'El Bayadh. *Bureau d'études techniques de géologie et hydrogéologie*.
- Ghazav R. and Ebrahim, Z., 2015. Assessing groundwater vulnerability to contamination in an arid environment using DRASTIC and GOD models. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-015-0813-2>
- Gilli E., Mangan C., Mudry J., 2004 : Hydrogéologie, Objets, méthodes, applications. *Paris, Dunod*.
- Gogu RC. et Dassargues A., 2000: Sensitivity analysis for the EPIK method of vulnerability assessment in a small karstic aquifer, southern Belgium. *Hydrogeol J* 8:337–345.
- Goldscheider N., 2003. Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb. *Hydrogeol J* 13(4):555–564.
- Goldscheider N., Klute M., Sturm S., Hötzl H., 2000: The PI method– a GIS- based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Zeitschrift für Angewandte Geologie* 46 (3):157–166.

- Gray J. M., Bishop F.A. T., Wilfordc J. R., 2016. Lithology and soil relationships for soil modelling and mapping. *Catena* 147, 429–440. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.045>
- Guerrero F. J. D. T, Hinojosa-Corona A., and Kretzsch T. G. (2016): A Comparative Study of NDVI Values Between North- and South-Facing Slopes in a Semiarid Mountainous Region mar *IEEE Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing*, vol. 9, no. 12, December.
- Halimi A., 1980 : L'Atlas Blideen-Climat et étage végétaux-. *Office des publication universitaires, Alger*.
- Hash, S.J., 2008. Use of decision tree analysis for predictive soils mapping and implementation on the Malheur County, Oregon initial soil survey. *Masters Thesis, Oregon State University, Corvallis*. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(99\)00042-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(99)00042-4).
- Hasiniaina F., Zhou J., Guoyi L., 2010: Regional assessment of groundwater vulnerability in Tamsag basin, Mongolia using drastic model). *Journal of American Science* 2010; 6 (11).
- Hirata R. et Bertolo R., 2003 : Groundwater vulnerability in different climatic zones. *Encyclopedia of life support systems EOLSS-UNESCO*).
- Højberg A.L., Kjaer J., Nolan B.T., 2006: Characteristics of European groundwater vulnerability scenarios. *Report DL10 of the FP6 EU-funded FOOTPRINT project www.eufootprint.org*, 38p. Access 2013.04.01.]
- Hölting B., Haertle T., Hohberger K.H., Nachtigal K.H., Villinger E., Weinzierl W., Wrobel J.P., 1995 : Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasser uberdeckung. *Geol. Jahrbuch, Reihe C, Heft 63, Hannover*
- HYBACO 2013 : Actualisation de l'étude de réaménagement de l'Oued Deffa. *Rapport levé de réserves*.
- Iain R Lake, Lovett A. L, Hiscock K.M., Betson M, Foley A., Sünnerberg G., Evers S., Fletcher S., 2003. Evaluating factors influencing groundwater vulnerability to nitrate pollution: developing the potential of GIS, *Journal of Environmental Management, Volume 68, Issue 3, Pages 315-328, ISSN 0301-4797*, [https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(03\)00095-1](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(03)00095-1)
- Institut Géographique National, 1966 : Carte topographique d'El Bayadh 1/200 000.
- Institut Géographique National, 1966 : Carte topographique de Chellala Dahrانيا 1/200 000.
- Jensen, J. R., 1996. Introductory to Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective, 2ed., *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ*.

- Kacemi A., 2005 : Cartographie et dynamique sédimentaire de la série fin Dogger début Crétacé (Djara-Rhoundjaia) des Monts des Ksour (Atlas saharien-Algérie). *Mémoire Magister Univ. d'Oran*.
- Kacemi A., 2013 : Evolution lithostructurale des Monts des Ksour (Atlas saharien, Algérie) au cours du Jurassique : géodynamique, typologie du bassin et télédétection. *Thèse de Doctorat, Univ. Tlemcen*.
- Kazi Tani L., 2016. Cartographie numérique des sols à l'échelle du paysage. Cas de la région des Traras orientaux (Nord-Ouest de l'Algérie). *PhD Thesis, Univ. De Tlemcen*.
- Kili M., El Mansouri B., Chao J., 2008 : Bilan hydrique des sols et recharge de la nappe profonde de la plaine de Gharb (Maroc). *Sécheresse vol. 19 n°2, avril-mai-juin 2008*.
- Kufs P.G., 1992. Statistical models of hydrogeologic data e part 1: regression and AANOVA models. *Groundwater Monitoring Review 12 (2), 120e130*.
- Kumar A. and Krishna A. P., 2018. Groundwater vulnerability and contamination risk assessment using GIS-based modified DRASTIC-LU model in hard rock aquifer system in India, *Geocarto International, DOI: 10.1080/10106049.2018.1557259*.
<https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1557259>
- Lodwick WA., Monson W., Svoboda L., 1990: Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical information systems: suitability analysis. *Int J Geogr Inf Syst; 4(4):413–28*.
- Madeira J., 1993. Étude quantitative de relations constituantes minéralogiques. Réflectance diffuse des latosols brésiliens. *Ed. ORSTOM. Collection ÉTUDES et THÈSES, Paris, 236p*.
- Madi M., Meddi M., Abdesselam B., 2018. Gestion rationnelle de l'eau de pluie et flux hydriques dans le système sol-plante-atmosphère au bassin du Haut Chélif, Algérie. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét. (2018) 6 (4): 505-514, [230580626.pdf \(core.ac.uk\)](#)*
- Mahboubi M., 1983: Etude géologique et paléontologique du Crétacé post-aptien et du Tertiaire de la bordure méridionale du Djebel Amour (Atlas saharien central, Algérie). *Thèse 3^{ème} cycle. Univ. Oran*.
- Mansour H., 2007: Hydrogéologie du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal en domaine aride. Exemple des Monts des Ksour (Atlas saharien occidental – Algérie). *Thèse Doctorat d'Etat Univ. d'Oran-407 p.162 fig.8 Pl.*
- Mansour H., Issaadi A., Stamboul M., Zeroual I., 2008 : Apport des systèmes d'information à l'établissement d'une cartographie hydrogéologique régionale (Monts des Ksour, Atlas

- saharien occidental, Algérie). *Bulletin du Service Géologique National- Vol. 19, n° 1, pp. 71-85, 7 fig., 2 pl., 2008.*
- Margane A., 2003: Guideline for groundwater vulnerability mapping and risk assessment for the susceptibility of groundwater resources to contamination. *Vol. 4, Technical cooperation project management, Protection and sustainable use of groundwater and soil resources in the Arab Region. Damascus.*
- Marín A.I., Andreo B., Mudarra M., 2005. Vulnerability mapping and protection zoning of karst springs. Validation by multitracer tests, *Science of The Total Environment, Volume 532, 2015, Pages 435-446, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.029>*
- Marin A. I., Dörfli N., Andreo B., 2011: Comparative application of two methods (COP and PaPRIKa) for groundwater vulnerability mapping in Mediterranean karst aquifers (France and Spain). *Environ Earth Sci DOI 10.1007/s12665-011-1056-2.*
- Martiny N., Camberlin P., Richard Y. & Philippon N., 2006. Compared regimes of NDVI and rainfall in semi-arid regions of Africa, *International Journal of Remote Sensing, 27:23, 5201-5223, DOI: [10.1080/01431160600567787](https://doi.org/10.1080/01431160600567787).*
- Mfumum Kihumba A., Vanclooster M., Ndembo Longo J., 2017. Assessing groundwater vulnerability in the Kinshasa region, DR Congo, using a calibrated DRASTIC model, *Journal of African Earth Sciences, Volume 126, ,Pages 13-22,ISSN 1464-343X, <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.11.025>.*
- Moonjun R., Farshad A., Shrestha D.P., and Vaiphasa C., 2010. Artificial Neural Network and Decision Tree in Predictive Soil Mapping of Hoi Num Rin Sub-Watershed, Thailand. J.L. Boettinger et al. (eds.), *Digital Soil Mapping, Progress in Soil Science 2, DOI 10.1007/978-90-481-8863-5_11, C Springer Science+Business Media B.V.*
- Mounier J., 1965 : Les besoins en eau d'une région, d'après Thornthwaite. Essai d'application à la Bretagne. *In: Norois, n°48, Octobre-Décembre 1965. pp. 437-448; http://www.persee.fr/doc/noroi_0029-182x_1965_num_48_1_7263*
- Msatef K., Benaabidate L., Bouignane A., 2018 : Hydrological and hydroclimatic regimes in the Ouergha watershed. *E3S Web of Conferences 37, 04001 (2018) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183704001>*
- Muet P., Vier E., Crochet P., Marsaud B., Mondain P. H., 2011 : Stratégie de protection des ressources karstiques utilisées pour l'eau potable, guide pratique. *Agence de l'eau Adour-Garonne.*
- Murthy K. V. S., 1998: Automatic construction of decision trees from data: A multi disciplinary survey. *Data Mining and Knowledge Discovery, 2(4):345-389.*

- Nedjma Y., 2010 : Lithostratigraphie et sédimentologie de la série crétacée du synclinal de Kbeur El Marhsel (Atlas saharien central, Algérie). *Mémoire d'Ingéniorat d'état, Univ. Oran.*
- Pouget M., 1980 : Les sols à croûte calcaire dans les steppes algériennes : Quelques aspects morphologiques et esquisse actuelle. *Cah. ORSTOM., sér. Pédol., vol. xviii, n^{os}3-4, 1980-1981: 235-246.*
- Pournamdary M., Hashim M., Pour B.A., 2014. Spectral transformation of ASTER and Landsat TM bands for lithological mapping of Soghan ophiolite complex, south Iran *Adv. Space Res., 54 (4), pp. 694-709,*
- Qian, H., Li P., Howard, K.W.F., et al. , Chao Yang C., Zhang X., 2012. Assessment of groundwater vulnerability in the Yinchuan Plain, Northwest China using OREADIC. *Environ Monit Assess* 184, 3613–3628. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2211-7>
- Rawls W., Brakensiek D., Saxton K. E., 1982: Estimating Soil Water Retention from Soil Properties. *J. Irrig. Drain. Eng. 108(IR2): 166-171.* <http://uved.univ-lemans.fr/>
- Regagba A., 2006 : Etude sédimentologique de la série du Jurassique moyen et supérieur de la région d'El Bayadh (Atlas saharien central, Algérie). *Mémoire de Magister, Univ. Oran.*
- Regagba Z., 2012: Dynamique des populations végétales halophytes dans la région Sud-est de Tlemcen. Aspects phytoécologiques et cartographiques. *Thèse de Doctorat en biologie, Univ. de Tlemcen.*
- Reichert J. M., Albuquerque J. A., Kaiser D. R., Reinert D. J., Urach F. L., Carlesso R., 2009 : Estimation of water retention and availability in soils of rio grande do sul(1). *R. Bras. Ci. Solo, 33:1547-1560*
- Ridwan M. A., Radzi N. A. M. , Ahmad W. S. H. M. W. , Mustafa I. S. , Din N. M. , Jalil Y. E. , Isa A. M. , Othman N. S. , Zaki W. M. D. W., 2018. Applications of Landsat-8 Data: a Survey. *International Journal of Engineering & Technology, 7 (4.35), 436-441.*
- Rieul L. et Ruelle P., 2003: Guide pratique irrigation. *Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts (France).*
- Rieul L. et Ruelle P., 2003: Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts (France). *Guide pratique irrigation 2003 (pp156-158) :* <https://books.google.dz/books?id=ubAsBa9qWPgC&pg=PA2&lpg=PA2&dq=Guide+pratique+irrigation+2003+Le%CC%81opold+Rieul:+Pierre+Ruelle&source=bl&ots=g179xoLmbP&sig=u03QiGMK3DovI9ntC0T3iL8Yk7c&hl=fr&sa=x&ei=eIjUVLbEF4P1aKmLgsAE&ved=0CBwQ6AEwAA#v=onepage&q=RFU&f=false>

- Ritter E., 1902 : Le Djebel Amour et les Monts des Ouled Nail. *Bull. n° 43, publ. Sc. Geol. De l'Algérie.*
- Rouse J. W., Haas R., Schell J., Deering D. W., Harlan J. C., 1974: Monitoring the vernal advancement and rétrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. *NASA/ GSFC Type III Final Report, Grennbelt, Maryland, (1974) 50 p.*
- Saidi, S., Bouri, S., Dhia, H.B., 2011. Sensitivity analysis in groundwater vulnerability assessment based on GIS in the Mahdia-Ksour Essaf aquifer, Tunisia: a validation study. *Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques* 56 (2), 288–304. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.552886>
- Secund, S., Collin, M.L., Melloul, A.J., 1998. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. *Journal of Environ. Management.* 54, 39–57. <https://doi.org/10.1006/jema.1998.0221>.
- Sorichetta, A., 2010: Groundwater vulnerability assessment using statistical methods. *PhD thesis. Scuola di Dottorato in Terra, Ambientee Biodiversita. Universita' degli Studi di Milano.*
- Stamboul M., 2005: Contribution à l'étude hydrogéologique de l'Atlas saharien l'exemple du Djebel Amour. *Thèse de Doctorat Es sciences, Univ. Oran.*
- Tayebi A., Jaillet S., Gasquet D., Delannoy J.-J., 2010 : Réflexion Méditerranéenne Pour l'analyse de la vulnérabilité des ressources en eau karstiques, exemple du massif des Béni Snassen orientaux (Maroc). *La cinquième session du congrès international Géotunis, L'utilisation des SIG et la télédétection pour le développement durable. Tunis.*
- Thomas R. and Duraisamy V., 2018. Hydrogeological delineation of groundwater vulnerability to droughts in semi-arid areas of western Ahmednagar district, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, Volume 21, Issue 2, , Pages 121-137, ISSN 1110-9823, https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.11.008.*
- Thornthwaite C.W. et Mather J.R., 1955. The water balance. *Publications in Climatology, Vol. 8, No. 1, pp. 5-86. Laboratory of Climatology, Drexel Institute of Technology, Centerton, New Jersey*
- Thornthwaite C.W., Mather J. R., 1957: Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Genterton New- Jersey, Drexel Institute of Technology. Publications in Climatology, vol. X, n° 3, 311 p.*
- Tixerront J., Berkaloff E. 1951. Bilan d'eau des massifs calcaires tunisiens (Bruxelles). *Vol. IV, pp. 47-53.*
- UNCDD 2011: Désertification, une synthèse visuelle.
- UNDDD, 2005 : Evaluation des écosystèmes pour le Millénaire.

http://www.un.org/fr/events/desertification_decade/value.shtml

- USGS, "Landsat Missions: Imaging the Earth Since 1972", 2019. Available online: <https://landsat.usgs.gov/landsat-missions-timeline>, last visit: December 2019.
- Vias J. M., Andreo B., Perles M. J., Carrasco F., Vadillo I., Jimienez P., 2006: Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hydrogeology Journal* 14 (6), 912–925.
- Vias J. M., Neukum C., Hötzl H., Andreo B., 2006: Statistical comparison and control of different vulnerability mapping methods in Bauschlotter Platte aquifer (Germany). *Proceedings of the 8th conference on limestone hydrogeology 2006, Neuchâtel Switzerland*. Presses universitaires de Franche-Comté,- ISBN 2-84867-143-2. *Goldscheider N., Mudry J., Savoy L. & Zwahlen F. editors*
- Vilain M., 1989 : La production végétale, *volume 1 et 2, ed. Lavoisier*.
- Vrba J. et Zaporozec A., 1994 : Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. *International Contributions to Hydrogeology, Vol. 16, Verlag Heinz Heise, Hannover, 131 p.*
- Vrba J. et Civita, M., 1994 : Guidebook on mapping groundwater vulnerability. *Tomo 16, capítulo Assessment of groundwater vulnerability, págs. 3148. International contributions to hydrogeology, Verlag Heinz Heise, Hannover.*
- Weir J. and Herring D., 2000: Measuring Vegetation (NDVI & EVI), https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_1.php
- World Health Organization (WHO), 2011: Nitrate and Nitrite in Drinking-Water; Background Document for Development of WHO GUIDELINES for Drinking-Water Quality; WHO: Geneva, Switzerland.
- Yadav S.K., Borana S.L., 2019 : Modis derived NDVI based time series analysis of vegetation in the Jodhpur area. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-3/W6, 2019 ISPRS-GEOGLAM-ISRS Joint Int. Workshop on "Earth Observations for Agricultural Monitoring", 18–20 February 2019, New Delhi, India.*
- Yousfi S., 2014 : Étude hydrodynamique et modélisation des écoulements souterrains dans les gouttières synclinales gréseuses du Barrémo-Albo-Aptien d’Ain Séfra (partie centrale des Monts des Ksour – Atlas Saharien, Nord-Ouest Algérie). *Thèse Doctorat Hydrogéologie Univ. – Oran.*

- Yousfi S., Kerzabi R., Mansour H., Mudry J., 2013: Estimation and condition of groundwater recharge in semiarid zone: example from the Ksour Ridge, NW Algeria. *Arabian Journal of Geosciences* ISSN 1866-7511 Arab J. Geosci DOI 10.1007/s12517-013-1175z.
- Zeraatpisheh M., Ayoubi S., Jafari A., Tajik S., Finke P., 2018. Digital mapping of soil properties using multiple machine learning in a semi-arid region, central Iran, *Geoderma*. Volume 338, 2019, Pages 445-452, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.006>.
- Zoheir B. and Emam A., 2012. Integrating geologic and satellite imagery data for high-resolution mapping and gold exploration targets in the south eastern desert, *Egypt J. Afr. Earth Sci.*, 66–67 pp. 22-34.
- Zumsprekel H., Prinz T., 2000. Computer-enhanced multispectral remote sensing data: a useful tool for the geological mapping of Archean terrains in (semi)arid environments, *Computers & Geosciences*, Volume 26, Issue 1, 2000, Pages 87-100, ISSN 0098-3004