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**

Soutenue 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, Examinateur**

**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**

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

---


**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 évolué des roche-mères (RFU=20 mm). Le débit d'alimentation des aquifères du synclinal d'El Bayadh est estimé, pour l'année moyenne 2009, 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 concentré 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 primordiales à la cartographie « SIG et de la télédétection » ont été exploité pour la réalisation des cartes schématique et opérationnelle 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.

**Mots clés** : Djebel Amour, synclinal d'El Bayadh, vulnérabilité, pollution, SIG, télédétection

## 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 $10^6$ $m^3$/ 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.*

**ملخص**

*تم تطوير طرق مختلفة لتقييم حساسية المياه الجوفية للمصادر التلوث، يستخدم الكثير منها العوامل الرئيسية التي تتحكم في الضعف الامطاروالتربة 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 تنطوي 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 التسلل، 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 تقريبًا 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 جيريفيل) 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 التكوينات الهيدروجيولوجية الرأسية والجانبية لخط البيض المزامن. الحجارة الرملية القارية وتشكل المناطق البينية والطباشيرية موردا هاما جدا للمياه الجوفية.*

*تسلط العلاقة بين شبكة الأعطال والشبكة الهيدروغرافية الضوء على مجالات الخسارة التي تعزيز التسلل 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 المجمعة لمرونة الأطلسية الشمالية تظهر التحليلات الإحصائية للبيانات الهيدروكيميائية لخط البيض أن الطابع الغجري 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 النتوءات*

*تضاريس الحجر الرملي على قمم الجبال حيث النفاذية المختلطة عالية، مناطق الخسارة تربة متكررة وغير متطورة المنخفضات الرملية وعمق منسوب المياه الضحلة على الرغم من التضاريس (منخفضة RFU) 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 الرئيسية: جبل عمور، مزامنة البيض، هشاشة، التلوث، نظام المعلومات الجغرافية، الاستشعار عن بعد*