



13 years ESJ
Special edition

Nouvelle Approche d'Etude de la Vulnérabilité à la Pollution des Eaux Souterraines : Cas de la Nappe Mio-Plio- Quaternaire du Bassin du Tadla (Maroc)

Amroumoussa Benmoussa

Département des Ressources Naturelles, Environnement et Santé,
Université, Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Techniques,
Béni Mellal, Morocco

Amina Wafik

Laboratoire Dynamique de la Lithosphère et Genèse des Ressources
Université Cadi Ayad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

Najine Abdsamad

Sahar Khrmouch

Département de Géologie, Université Cadi Ayad,
Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

[Doi:10.19044/esj.2023.v19n40p49](https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n40p49)

Submitted: 20 June 2022
Accepted: 18 May 2023
Published: 31 October 2023

Copyright 2023 Author(s)
Under Creative Commons BY-NC-ND
4.0 OPEN ACCESS

Cite As:

Benmoussa A., Wafik A., Abdsamad N. & Khrmouch S. (2023). *Nouvelle Approche d'Etude de la Vulnérabilité à la Pollution des Eaux Souterraines : Cas de la Nappe Mio-Plio-Quaternaire du Bassin du Tadla (Maroc)*. European Scientific Journal, ESJ, 19 (40), 49.
<https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n40p49>

Résumé

Les méthodes de protection des eaux souterraines, basées sur les cartes de vulnérabilité des nappes à la pollution, permettent de caractériser une zone selon son aptitude à l'auto-protection. Il s'agit en effet, dans ces études, d'aménager le territoire en tenant compte des risques susceptibles de menacer les aquifères directement exposés aux problèmes de pollution et d'apporter des corrections dans les zones déjà contaminées. L'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du bassin Tadla a été basée principalement sur l'analyse intégrale des paramètres intrinsèques agissant directement sur la propagation d'un polluant et préconisés par la méthode DRASTIC. Cependant, le caractère peu précis et ambigu de la définition de certains paramètres a été la source principale des problèmes fréquemment observés

lors de l'application de cette méthode. Partant de ce constat, un point de vue plus physique du concept de vulnérabilité est proposé, basé sur l'examen de la capacité d'atténuation intrinsèque d'un polluant. Cette propriété reflète les mécanismes et processus d'auto-épuration des eaux souterraines et dépend principalement de la perméabilité hydraulique et la nature des matériaux aquifères. Les notations et les poids accordés aux différents facteurs ont permis d'établir une cartographie de la vulnérabilité de la nappe phréatique dégageant plusieurs zones classées suivant le degré de vulnérabilité et de sensibilité à la pollution, alors cette étude a permis d'obtenir trois classes de vulnérabilité identique avec la méthode utilisée : une classe de vulnérabilité faible, une classe de vulnérabilité moyenne et une classe de vulnérabilité élevée.

Mots-clés : Eaux souterraines, Pollution, Vulnérabilité, Sensibilité, Capacité d'atténuation intrinsèque, Cartographie

New Approach for Studying Vulnerability to Groundwater Pollution: Case of the Mio-Plio-Quaternary Aquifer of the Tadla Basin (Morocco)

Amroumoussa Benmoussa

Département des Ressources Naturelles, Environnement et Santé,
Université, Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Techniques,
Béni Mellal, Morocco

Amina Wafik

Laboratoire Dynamique de la Lithosphère et Genèse des Ressources
Université Cadi Ayad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

Najine Abdsamad

Sahar Khrmouch

Département de Géologie, Université Cadi Ayad,
Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco

Abstract

Groundwater protection methods, based on maps of the vulnerability of aquifers to pollution, make it possible to characterize an area according to its aptitude for self-protection. The aim of these studies is to develop the territory taking into account the risks likely to threaten the aquifers directly exposed to pollution problems and to make corrections in the already contaminated areas. The assessment of the vulnerability to pollution of the groundwater in the Tadla basin was based mainly on the integral analysis of

the intrinsic parameters acting directly on the propagation of a pollutant and recommended by the DRASTIC method. However, the imprecise and ambiguous nature of the definition of certain parameters was the main source of the problems frequently observed when applying this method. Based on this observation, a more physical view of the vulnerability concept is proposed, based on the examination of the intrinsic attenuation capacity of a pollutant. This property reflects the self-purification mechanisms and processes of groundwater and depends mainly on the hydraulic permeability and the nature of the aquifer materials. The ratings and weights given to the various factors have made it possible to draw up a vulnerability map of the water table, which shows several zones classified according to the degree of vulnerability and sensitivity to pollution. then this study made it possible to obtain three identical vulnerability classes with the method used: a low vulnerability class, a medium vulnerability class and a high vulnerability class.

Keywords: Groundwater, Pollution, Vulnerability, Sensitivity, Intrinsic attenuation capacity, Mapping

Introduction

La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines permet d'identifier les zones à haut risque de contamination indépendamment du type de polluant. Elle devrait en principe conditionner les plans d'occupation des sols, ou du moins permettre de cibler les zones où des mesures rigoureuses de protection devraient être adoptées (Denny et al., 2007). La mise en œuvre de ces cartes constitue un outil d'aide efficace pour l'aménagement du territoire. Elles permettent d'intervenir en amont et d'instaurer des moyens préventifs contre tout risque de dégradation des ressources en eau. Enfin, les cartes de vulnérabilité contribuent avec d'autres variables territoriales et environnementales à une analyse intégrale permettant la délimitation des périmètres de protection (SINAN, 2000). De telles cartes peuvent être élaborées grâce à la méthode DRASTIC, développée en 1987 aux Etats-Unis par la NWWA (Natural Water Well Association). C'est une méthode standardisée d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines indépendamment du type de polluant et qui prend en compte la majeure partie des facteurs hydrogéologiques qui affectent et contrôlent l'écoulement des eaux souterraines : la profondeur de l'eau, la recharge efficace, les matériaux de l'aquifère, le type de sol, la topographie, l'impact de la zone non saturée et la perméabilité de l'aquifère (Aller et al., 1987). Ces facteurs concernent trois compartiments définis selon un schéma en strates. Dans la partie inférieure se situe l'aquifère proprement dit (zone saturée) qui est séparé de la couche supérieure (sol) par une interface (zone non saturée)

assurant à des degrés différents la protection de la ressource contre d'éventuelles introductions des polluants et leur propagation dans l'aquifère.

L'évaluation des différents paramètres considérés par les méthodes DRASTIC, GOD et SI à titre exemple nécessitent les données multi-sources et leur bonne connaissance. Il s'agit des données géologiques, hydrogéologiques, pédologiques, d'occupation de l'espace, de la topographie.

D'une manière général La méthode DRASTIC a fait l'objet, cette tendance à la vulnérabilité faible est suivie par celle de vulnérabilité forte. Il est donc souhaitable de contrôler les zones et les sources de pollution et de faire le suivi des paramètres de pollution, afin de caractériser la sensibilité de l'aquifère car cette vulnérabilité peut évoluer par les effets conjugués de l'homme et des années pluviales.

L'application de la méthode DRASTIC au contexte géologique particulier de la plaine du Tadla présente des difficultés à cause du caractère peu précis et ambigu de la définition de certains paramètres. En effet, dans de nombreux endroits de la zone d'étude, il est difficile de déterminer exactement la nature du faciès des tranches saturée et non saturée et ceci pour les raisons suivantes :

1. Absence d'affleurements géologiques (plaine agricole cultivée dans sa quasi-totalité) ;
2. Rareté et répartition irrégulière des forages mécaniques (densité = 0,0125 par km²)
3. Caractère hétérogène du système aquifère : il s'agit de terrains alluvionnaires très hétérogènes présentant d'innombrables variations de faciès latérales et verticales dont le détail est encore loin d'être connu. Ainsi, il est difficile de déterminer en chaque endroit de la plaine, la nature lithologique des terrains géologiques constituant les différents compartiments du sous-sol et d'affecter par conséquent des notes exactes pour chaque maille.

D'un autre côté, Les valeurs de la perméabilité hydraulique ont été obtenues par des essais de pompage sur une quarantaine de forages dispersés dans la plaine. Les estimations sont difficiles en raison de la forte variabilité spatiale et de l'impossibilité d'obtenir des données pour tout le territoire, laissant de vastes zones sans information. Les pondérations sont sujettes à des variations importantes et ne permettent pas d'établir des différences concrètes.

Partant de ce constat, une modification de la méthode DRASTIC est proposée dans cet article en faisant remplacer la perméabilité hydraulique et la nature de la zone non saturée par un nouveau paramètre : la Capacité d'Atténuation Intrinsèque. Cette propriété reflète les mécanismes et processus d'auto-épuration des eaux souterraines et permet de différencier les zones facilitant le transfert du polluant.

2- Présentation de la zone d'Etude

2.1. Cadre géographique et géologique

La plaine du Tadla couvre une superficie de 3600 km² environ, elle s'étend au Nord de la chaîne du Haut Atlas à 180 km au Sud-Ouest de Casablanca. Elle est limitée vers le Nord par le Plateau des Phosphates. Vers l'Est la plaine se rétrécit le long de l'Oum-er-Rbia en direction des reliefs accusés des pays Zayan. Enfin à l'Ouest, aucune limite géographique ne sépare le Tadla de la Bahira qui lui fait suite. La longueur de la plaine ainsi définie atteint environ 125 km tandis que sa largeur maximum au centre est de 50 km environ (Figure 1).

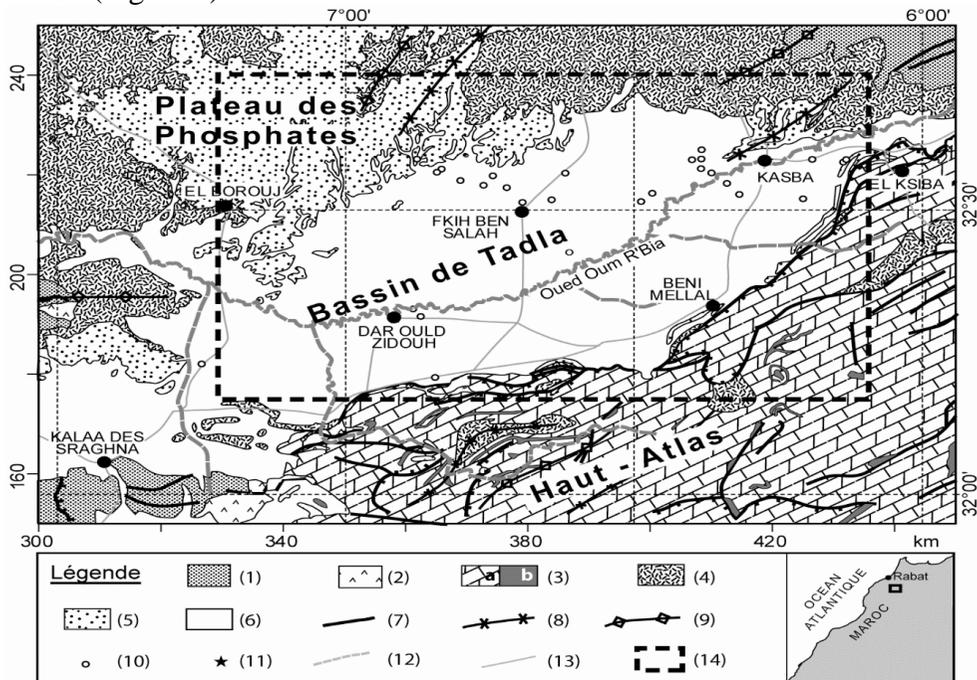


Figure 1. Carte géologique du bassin de Tadla. (1) Paléozoïque (schistes et quartzites). (2) Trias (argiles rouges et basalte). (3) Jurassique (a, calcaires et dolomies, b, diorite et gabbro). (4) Crétacé (faciès détritique rouge). (5) Tertiaire (calcaires, marnes et sables phosphatés). (6) Quaternaire (alluvions). (7) Faille. (8) Axe synclinal. (9) Axe anticlinal. (10) Forage. (11) Ville. (12) Rivière. (13) Route.

Géologiquement, le Tadla se présente comme une vaste dépression asymétrique recouverte de dépôts mio-plio-quaternaires hétérogènes. Il s'agit d'un synclinal dont l'axe est situé près de sa bordure sud ou sous l'Atlas et dans lequel se sont déposées de puissantes séries allant du Trias au Quaternaire (Figure 2).

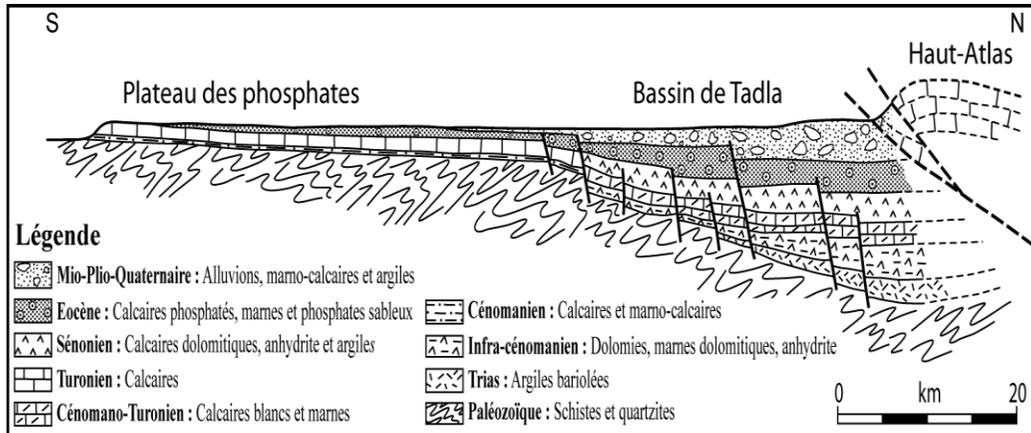


Figure 2. Coupe géologique montrant la structure du système aquifère du bassin de Tadla

La région étudiée se présente comme un vaste plateau stratiforme recouvert de dépôts mio-plio-quaternaires hétérogènes reposant sur un socle paléozoïque. Il s'agit d'une série géologique dans laquelle se sont déposées de puissantes séries allant au Trias au Quaternaire (Radouani et al., 2013).

- ◆ **Trias** : formé d'une série argilo-gréseuse, basaltique ou argilo-salifère ;
- **Infra-Lias** : argilo-dolomitique, devenant sub-récifal dans l'Atlas. Il se biseaute rapidement pour disparaître au Nord de Bou-Ghazi ;
- **Infra-cénomaniens** : silicoclastique à argiles rouges et grès gris avec quelques intercalations de calcaires clairs. Il est parfois mal distingué du Trias à cause de son faciès et sa datation sommairement le Crétacé inférieur ;
- **Cénomaniens transgressifs** : équivalent aux autres formations du Crétacé supérieur discordant sur les plates-formes. Il s'agit principalement de laminites argilo-carbonatées, parfois légèrement évaporitiques (sulfates) ;
- **Cénomano-turonien marin** : calcaire, à faune marine franche de plate-forme interne à moyenne, et parfois dolomitisé. Il se distingue alors au sommet du plateau par des bancs métriques très massifs ou caverneux ;
- **Sénonien lagunaire ou évaporitique** : fortement développé dans les zones à forte subsidence où il constitue une formation écran entre les aquifères. A l'affleurement, le Sénonien est argilo-calcaire ;
- **Sénonien marin** : assez puissant vers le sillon atlasique ; il est formé de biocalcarénites ; en amont, il se traduit dans le Sénonien indifférencié par des intercalations plus calcaires et plus riches en faunes qui donnent à la formation ses propriétés aquifères ;
- **Eocène** : on y distingue, au dessus d'un écran composé de marnes bitumineuses phosphatées du Maestrichtien, des dépôts alternants à débris phosphatés, lits calcaires et lits plus fins, se chargeant en silex vers le haut ;
- **Mio-Plio-Quaternaire** : c'est par excellence le niveau où circulent, les nappes phréatiques de la plaine du Tadla. Le Miocène, plus ou moins conglomératique, impliqués dans la phase de déformation atlasique, n'est individualisé que dans la partie basse du sillon ou au contact de l'Atlas dans la partie épaisse du prisme sédimentaire. Ailleurs, on parle surtout de Plio-Quaternaire dans lequel les faciès fluvio-lacustre du Villafranchien prennent une grande place, notamment près de l'Oum-er-Rbia. A proximité de l'Atlas, les grandes épaisseurs de dépôts sont partiellement dues à de grands cônes de piémont formés de produits de démantèlement de la chaîne.

La plaine du Tadla est caractérisée par des précipitations irrégulières et des variations saisonnières extrêmes de température. Cependant, elle est devenue une zone agricole fertile grâce à l'installation d'un réseau d'irrigation et l'aménagement de dizaines de milliers d'hectares. Cette transformation a permis à la région de contribuer activement à la production nationale dans différents secteurs. Malheureusement, la qualité de l'eau de surface et souterraine, en particulier celle de la nappe mio-plio-quadernaire, se dégrade en raison de l'utilisation accrue des ressources en eau (salinité supérieure à 1,7 g/l) et de l'intensification de l'agriculture, ce qui génère une pollution diffuse et ponctuelle provenant d'activités humaines et agro-industrielles.(Figure 3).

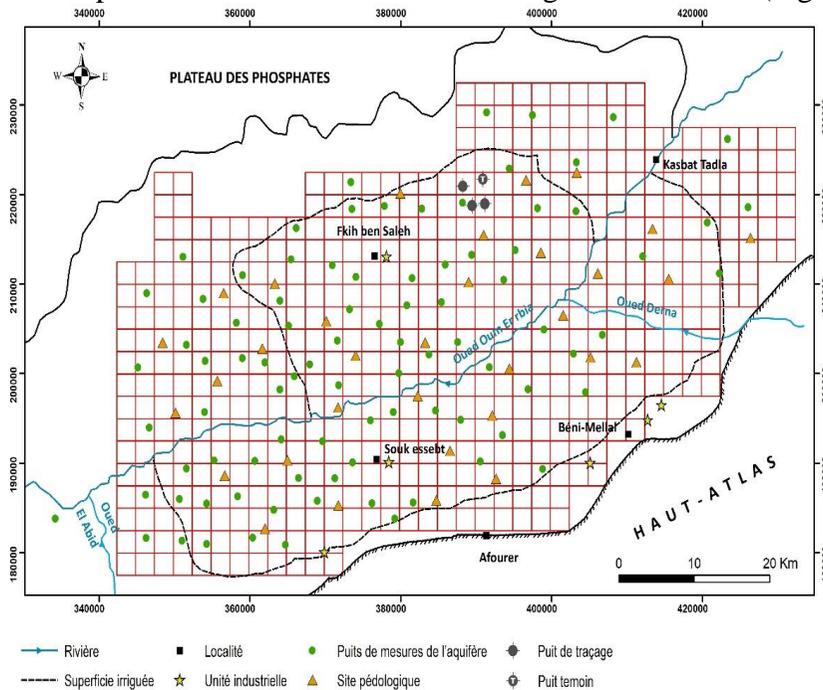


Figure 3. Carte schématique du bassin du Tadla et maillage de l'aquifère mio-plio-quadernaire

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

2-2. Données topographiques

La topographie est généralement régulière sauf dans une bande étroite de part et d'autre des lits encaissés des principaux oueds (Oum-er-Rbia, Oued El Abid...) et dans la zone de piémont de l'Atlas où apparaît une série de grands cônes de déjection. La pente est dans l'ensemble douce et régulière (1°/°) orientée globalement NE-SW. L'altitude moyenne est de l'ordre de 400

m. Cette topographie limite le ruissellement, favorise l'infiltration et confère ainsi à la nappe une forte vulnérabilité. Un modèle numérique de terrain (MNT) a été élaboré pour l'ensemble de la plaine et a permis de dresser une carte de pentes topographiques pour traiter la cartographie de la vulnérabilité.

2-3. Etude pédologique

Le fonctionnement épuratoire des sols dépend de plusieurs mécanismes, y compris les propriétés physiques, hydrodynamiques, physico-chimiques, biologiques, ainsi que du rôle des plantes et des micro-organismes qui y sont associés. La migration des polluants dans le sol est déterminée par les interactions physico-chimiques entre ses différentes phases, notamment l'adsorption, l'échange d'ions et les réactions physico-biochimiques (dénitrification, oxydo-réduction...)(Boizard et al., 2004). Dans le Tadla, des recherches ont été menées pour établir une classification des sols en fonction des facteurs liés à l'irrigation, tels que la topographie, les caractéristiques hydrauliques et les possibilités de drainage, dans le but de mettre en valeur les terres irriguées et de déterminer les aménagements fonciers nécessaires.

L'étude des sols dans la région du Tadla a permis d'établir une carte de texture montrant que la majorité des sols ont une texture équilibrée, seules les textures extrêmes étant considérées comme des critères de discrimination. Trois types de textures ont été retenus : sableuse, limoneuse et argileuse. Une carte de l'épaisseur du sol permet également de distinguer trois catégories : catégories (Hinde Cherkaoui Dekkaki, 2007) : sol peu épais (0-40 cm), sol moyennement épais (40-60 cm) et sol très épais (>60 cm)

L'identification des différents faciès pédologiques et leur profondeur a permis d'évaluer le degré de vulnérabilité lié au sol. Les principaux sols rencontrés dans la région du Tadla se caractérisent par des sols iso-humiques, des sols calcimagnésiques, des sols à sesquioxydes de fer, des sols hydromorphes, des sols peu évolués et complexes de sols.

2-4. Etude hydrogéologique

Cette partie a commencé par l'identification et la caractérisation des différentes unités géomorphologiques et faciès de la plaine. Elle comprend également une étude régionale du style structural, de la stratigraphie des formations aquifères (terrains sédimentaires du Secondaire et du Tertiaire (Bouchaou et al., 1997), ainsi que des dépôts fluvio-lacustres qui les recouvrent (sédiments quaternaires). Des cartes géologiques synthétiques et des coupes à différentes échelles ont été établies. Ces données constituent un support important qui permettra de mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique de la nappe mio-plio-quaternaire.

L'essentiel de l'étude hydrogéologique s'est déroulée en quatre étapes principales :

- la compilation des données disponibles ;
- l'acquisition de données complémentaires sur le terrain ;
- l'intégration et l'analyse des données ;
- l'élaboration des cartes hydrogéologiques.

La nappe libre étudiée plio-quadernaire formé essentiellement de couches calcaires et marno-calcaire alterné par des couches d'argile. L'alimentation est assurée par :

- Les eaux d'irrigation : c'est l'alimentation principale de la nappe, elle s'agit du volume emmagasiné dans la nappe par le fait du retour des eaux d'irrigation provenant du barrage de Bine El Ouidane responsable de la remontée des niveaux piézométriques ;
- Les eaux de pluie : les infiltrations pluviales étant du second ordre pour la recharge de la nappe, ceci est confirmé par les remontées décimétriques de la nappe observées après la mise en eau des périmètres irrigués. Leur modulation interannuelle peut être négligée par ce qu'elle n'a que peu d'effets sur les fluctuations piézométriques ; cela montre que les précipitations ne participent que de façon marginale à la recharge des nappes phréatiques sauf en années fortement humides.

Il existe des hypothèses qui ne sont pas encore confirmées et qui prouvent que la nappe peut être alimentée par drainance ascendante à partir des nappes profondes.

Les sorties des nappes sont de deux types :

- Sortie naturelle : qui se fait principalement par drainage que se soit par l'Oum-er-Rbia, ou par drainance descendante vers les nappes profondes et secondairement par l'évapotranspiration et l'évaporation qui peut atteindre 2000 mm/an.
- Sortie artificielle : elle se présente sous forme de volume d'eau prélevé par pompage utilisé soit pour l'irrigation agricole ou pour l'eau potable.

De nombreux essais de pompage, sur puits ou forages, permettent de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques des nappes phréatiques. En effet, un nombre important d'essais de pompage a été réalisé dès les années soixante-dix. Les transmissivités étaient connues dans plus de 320 points uniquement dans les Béni-Moussa. Les données datant de cette période continuent à être considérées comme une référence de base pour les études hydrogéologiques dans la région.

D'une façon générale, les transmissivités sont généralement comprises entre 2.10^{-2} et $1,6 10^{-1} m^2 /s$. La plupart des mesures se situent entre 10^{-3} et $5.10^{-2} m^2/s$.

Les valeurs de perméabilité sont calculées à partir des valeurs des transmissivités et des tranches d'eau ou hauteurs crépinées. Elles sont généralement comprises entre 5.10^{-4} et $10^{-2} m /s$.

L'alimentation naturelle de la nappe est constituée par les précipitations (moyenne annuelle variant de 329 mm à 450 mm) (Figure 4) et par les apports latéraux à partir des formations ante-quaternaires du plateau des phosphates. La nappe contenue dans le Turonien, en charge sous le Tadla, ainsi que les nappes du Sénonien et de l'Eocène pourraient également contribuer par drainance à l'enrichissement de la nappe phréatique.

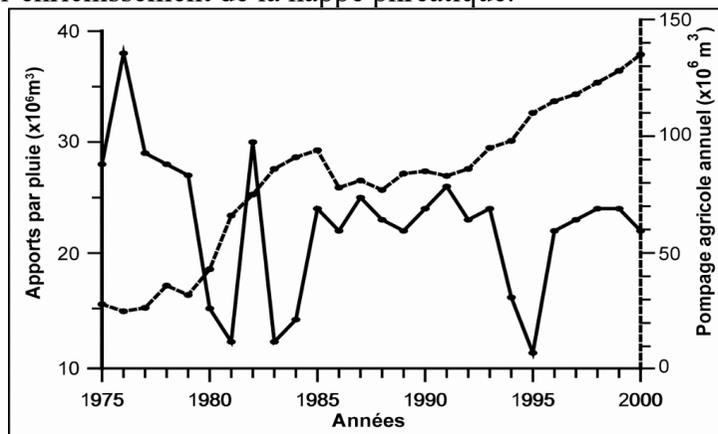


Figure 4. Evolution des apports de pluie dans le périmètre de Béni-Amir (en millions de m^3) et Evolution annuelle du pompage agricole à partir de la nappe de Béni-Amir (en millions de m^3)

La mise en eau du périmètre du Tadla a fondamentalement modifié l'équilibre de la nappe en zone irriguée à cause des infiltrations des eaux d'irrigation et des pertes dans les canaux en terre. Le niveau de la nappe, qui varie d'ailleurs au cours des années, est remonté à moins de deux mètres du sol sur de grandes étendues (plus de 15000 hectares) en Août 1971. Les valeurs des volumes d'eau distribués annuellement pour l'irrigation sont mesurées à l'origine des canaux secondaires. Ces apports se rattachent à deux catégories :

- Les irrigations traditionnelles à partir des sources atlasiques ou encore à partir des eaux de crues provenant des bassins versants dominant la plaine.- Les irrigations modernes gravitaires à partir des eaux des barrages de Kasba Tadla sur l'Oum-er-Rbia et de Bine El Ouidane sur l'Oued El Abid. Les sorties de la nappe comprennent les exhaures par pompage, le drainage par l'Oum-er-Rbia et par un réseau de drains artificiels. Les prélèvements par pompage sont difficiles à estimer puisque les volumes pompés par les agriculteurs sont pratiquement

incontrôlables. Seul le pompage industriel pour l'Office Chérifien des Phosphates dans la région de Fkih Ben Salah a fourni des données nouvelles sur le comportement de la nappe dans une zone assez étendue et a permis notamment un calcul global du coefficient d'emmagasinement. Un pompage intensif de ce genre a pour effet d'abaisser le niveau piézométrique de la nappe et par voie de conséquence de diminuer l'évaporation et les dangers de remontées subites dues aux précipitations. De plus l'eau pompée par l'Office Chérifien des Phosphates n'est pas recyclée contrairement à celle pompée pour les besoins agricoles, mais est exportée hors de la plaine du Tadla. Le drainage de la nappe du Tadla s'effectue naturellement par l'Oum-er-Rbia qui traverse la plaine et artificiellement par un réseau de drains et collecteurs. En effet, dès l'apparition des zones marécageuses dans les bas fonds de la plaine, des actions d'assainissement ont été entreprises par la mise en place d'un premier réseau principal qui a permis d'abaisser le niveau de la nappe. Ces actions ont été menées en parallèle avec les remontées connues de la nappe. Les mesures des débits de drainage de l'Oum-er-Rbia et des collecteurs se font moyennant les stations de jaugeage. Ces mesures sont effectuées par les soins de la Direction Régionale d'Hydraulique le long de l'Oum-er-Rbia et dans les tronçons en aval des collecteurs principaux depuis 1972.

Dans l'état actuel des connaissances, il est illusoire de prétendre établir un bilan hydrique précis de la nappe phréatique du Tadla. Des données de première importance manquent ou sont trop imprécises : volumes des eaux drainées, volumes des eaux pompées, évaporation, etc. Les valeurs données au (Tableau 1) doivent être considérées comme des ordres de grandeur.

Tableau 1. Bilan de la nappe phréatique du Tadla

ENTREES	SORTIES
<p>1- Pluie efficace : - Surface de la nappe : 3650 Km² - Stations pluviométriques utilisées : Fkih Ben Salah, Kasba Tadla, Béni-Mellal, Afourer - Valeur de l'excédent pluviométrique moyen : 130 mm - Répartition ruissellement et infiltration : 50% et 50% (région très plate) - Alimentation annuelle moyenne de la nappe du Tadla par la pluie : 6,7 m³/s 2- infiltration des eaux d'irrigation : - Surface irriguée : 114.000 hectares - Moyenne des volumes annuels distribués : 580 millions de m³ - Coefficient d'infiltration : 42%</p>	<p>1- Exhaures par pompage : - Valeur estimée : 17,5 m³/s 2- Drainage gravitaire : - Il s'agit de la valeur moyenne mesurée sur l'ensemble du réseau de drainage - Valeur calculée : 3,2 m³/s 3- Drainage par l'Oum-er-Rbia et évaporation : - Valeur estimée : 4,5 m³/s</p>

- Valeur calculée : 7,4 m ³ /s 3- Apports occultes : Il s'agit principalement de la drainance à partir des nappes anté-quaternaires Valeur estimée : 3 m ³ /s Total des entrées dans la nappe : 17,1 m³/s	Total des sorties de la nappe : 25,2 m³/s
--	---

Suite à une analyse comparative entre différents états piézométriques, la carte piézométrique de référence retenue est celle de l'année 1991; le choix de la période où le niveau de la nappe a atteint des côtes élevées permettra de minimiser les risques de vulnérabilité liée à la zone non saturée (Ouedraogo et al., 2016). Sur la base des informations fournies par les différents sondages sur lesquels le niveau piézométrique de référence a été reporté, l'épaisseur de la zone non saturée a été déduite en chaque point, en procédant pour chaque sondage à la différence entre la surface piézométrique et l'altitude du sol. Le taux de recharge de la nappe a été ainsi calculé pour chaque maille au moyen du bilan annuel dans lequel l'infiltration est la seule inconnue en supposant pour un cycle hydrologique les variations du stock négligeables. L'équation s'écrit :

$$\text{Equation (1) : } P + I + L = E + R + I_{\text{eff}}$$

dans laquelle P : hauteur de la pluviométrie annuelle ; I : apports par irrigation ; L : apports latéraux ; E : évapotranspiration réelle et évaporation à partir de la nappe ; R : terme comprenant le ruissellement des eaux de surface et le drainage à partir de la nappe ; I_{eff} : infiltration efficace.

D'où $I_{\text{eff}} = P + I + L - (R + E)$. Ce coefficient représente l'effet combiné des eaux de pluie et des eaux d'irrigation. Toutefois, la proportion des eaux de l'irrigation et celle de la pluviométrie sont très différentes. Pour cela les coefficients d'infiltration des eaux de pluie et d'irrigation seront déterminés séparément, sur la base des apports bruts, respectivement par les expressions suivantes : $I_p = a I_{\text{eff}} / P$ et $I_i = b I_{\text{eff}} / I$ avec $a = P / (P+I)$ et $b = I / (P+I)$ où a et b représentent respectivement les proportions de pluie et d'irrigation de l'ensemble des apports).

3. Historique de la vulnérabilité à la pollution de la Nappe Du Tadla

Avant la mise en eau du périmètre du Tadla en 1936, la nappe phréatique était à une profondeur de 30 à 50 m dans la partie amont et de 25 m dans la partie avale. L'agriculture traditionnelle pratiquée ne polluait pas la plaine, la rendant peu vulnérable à la pollution. Cependant, la mise en eau des premiers secteurs avec des canaux secondaires non cimentés a modifié l'équilibre naturel de la nappe, ce qui a entraîné une remontée régulière du niveau piézométrique d'environ 2 à 3 mètres par an. Cette remontée a transformé certaines zones en marécages. Des analyses physico-chimiques ont

été effectuées sur une centaine d'échantillons d'eaux souterraines prélevées dans différents endroits de la plaine (Hammani et al., 2008) avant la mise en eau, ce qui a confirmé que la nappe était peu vulnérable à la pollution.

L'introduction de l'irrigation a été accompagnée d'une utilisation excessive des intrants agrochimique et des produits phytosanitaire et la mise en place des premières unités industrielles. Ainsi, la quasi-totalité du périmètre irrigué devenait très vulnérable à fortement vulnérable à la pollution notamment les zones touchées par la remontée piézométrique et la bordure atlasique.

Au début des années 1980, l'avènement de la sécheresse a induit un développement relativement important des pompages pour pallier à l'insuffisance des eaux d'irrigation de surface (Figure 4) et la desserte des agglomérations urbaines et rurales en eau potable. L'analyse de l'évolution piézométrique de la nappe depuis 1981 montre un rabattement moyen annuel du niveau d'au moins 1 m, voire de plus de 5 m par endroits (Figure 5).

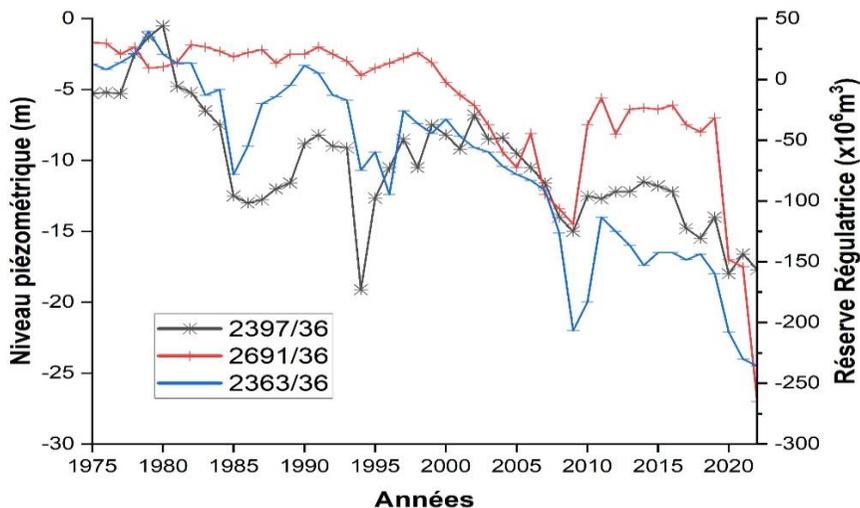


Figure 5. Evolution du niveau piézométrique (en mètres) dans les puits 2363/36, 2691/36 et 2397/36 de la plaine de Tadla et évolution de la réserve régulatrice de la nappe de Béni-Amir (en millions de m³)

Cette baisse a été généralisée par la modernisation de la majeure partie des centres de mise en valeur (canaux bétonnés et extension du réseau de drainage). Enfin, l'encouragement des services publics et les facilités de crédits accordés aux projets d'irrigation par pompage ont contribué également d'une manière remarquable au déstockage de la nappe. En 1982, la réserve régulatrice de la nappe des Béni-Amir (rive droite de l'Oum-er-Rbia) a atteint 370.106 m³. A partir de cette année-là une diminution du stock de 70.106 m³

a été observée jusqu'en 1984 où elle atteint 150.106 m³ (Figure 5). Dès 1986, presque la moitié des collecteurs étaient pratiquement à sec, les autres voyant leur débit chuter considérablement (Latifi & Chaab, 2017). Par conséquent, le degré de vulnérabilité des eaux de la nappe phréatique a diminué d'une manière considérable dans plusieurs zones du périmètre du Tadla. Cependant, les zones de piémont alimentées par les eaux des sources atlasiques et l'aval de la nappe demeurent très vulnérables à la pollution en raison du taux de recharge relativement important.

A partir de 1988, et malgré le retour aux conditions climatiques normales, le rabattement de la nappe s'est poursuivi mais à un rythme faible. Le taux de recharge subit des fluctuations variables mais reste tributaire aux apports d'irrigation. L'analyse de l'évolution intra-annuelle du niveau piézométrique montre qu'il enregistre les valeurs maximales pendant la période estivale (Avril à Septembre).

4- Approche méthodologique

La carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe mio-plio-quaternaire a été élaborée suite à une analyse intégrale des paramètres intrinsèques agissant directement sur la propagation des polluants. Les paramètres les plus pertinents pris en considération pour l'étude de la vulnérabilité intrinsèque sont ceux susceptibles d'exercer une contrainte au transfert vertical et horizontal de la contamination (Hinde Cherkaoui Dekkaki, 2007).

La méthode DRASTIC demeure la plus employée au contexte marocain (Amharref et al., 2007) du fait qu'elle se base sur le traitement et l'analyse d'un grand nombre de facteurs en relation avec les trois compartiments du sol (Figure 6).

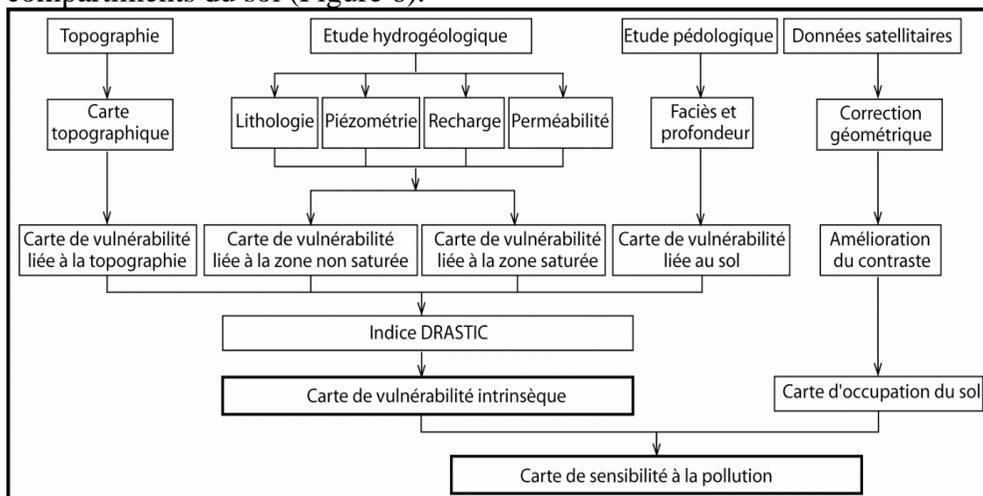


Figure 6. Organigramme d'élaboration de la carte de vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines par la méthode DRASTIC (Aller et al., 1987)

Les périmètres étudiés ont été jugés adéquats pour l'application de la méthode DRASTIC, qui nécessite une superficie de plus de 0,4 km² et la propagation de polluants à partir de la surface. Chaque paramètre a été évalué en fonction de son importance pour la protection des eaux souterraines et attribué à un poids correspondant. Ensuite, chaque paramètre a été divisé en classes avec une note correspondante. Les poids et les notes ont été intégrés dans un modèle additif pour calculer un indice global de vulnérabilité, appelé l'indice DRASTIC, noté ID:

$$\text{Equation (2)} : ID = D_p D_n + R_p R_n + A_p A_n + S_p S_n + T_p T_n + I_p I_n + C_p C_n$$

Avec D : Profondeur de la nappe (Depth), R : Recharge, A : Nature des matériaux de l'aquifère, S : Type de sol, T : Topographie, I : Impact de la zone non saturée, C : Conductivité des eaux souterraines, p : poids, n : note

L'indice DRASTIC minimum est de 23 tandis que le maximum est de 226. Ces extrêmes théoriques sont toutefois très rares et les indices calculés sont plutôt dans la gamme 50 à 200 (Denny et al., 2007).

La méthode DRASTIC requiert une importante collecte des données qui servent à la caractérisation des unités hydrogéologiques (Weatherington-Rice et al., 2006). L'évaluation de la vulnérabilité dépend essentiellement de la répartition et de la densité des données de base. Dans ce sens, le recueil de l'information concernant les trois compartiments du sol (sol, zone non saturée et zone saturée) doit couvrir la totalité de la zone d'étude (Latifi & Chaab, 2017).

Toutefois, il paraît évident que le caractère très hétérogène des terrains alluvionnaires de la nappe mio-plio-quaternaire du Tadla rend très difficile l'évaluation de certains paramètres intrinsèques, en particulier la perméabilité hydraulique et la nature des matériaux aquifères. En effet, l'aquifère mio-plio-quaternaire du Tadla est un complexe alluvionnaire présentant d'innombrables variations de faciès latérales et verticales dont le détail est encore loin d'être connu. On y trouve essentiellement des marno-calcaires, des argiles et des calcaires lacustres éparpillés dans la masse alluvionnaire sous forme de lentilles. Cet état confère à cette nappe les caractéristiques d'un système multicouche dont les niveaux aquifères seraient séparés les uns des autres par des horizons plus ou moins imperméables (Hammani et al., 2008). Ces horizons aquifères communiqueraient entre eux soit par drainage, soit à la faveur de variations de faciès. Les valeurs déterminées de la perméabilité hydraulique et de la nature des matériaux aquifères varient brutalement dans de larges intervalles, par conséquent, il devient difficile d'affecter des notes exactes à ces paramètres dans chaque maille. Il en résulte une pondération subjective et variable en fonction du type et de la quantité d'informations disponibles, des erreurs occasionnés sur la prise des données, et de la méthode de détermination des paramètres. Il est possible que la même classe et que le

même coefficient soient attribués à des facteurs qui sont de toute évidence différents.

Partant de ce constat, une modification de la méthode DRASTIC basé sur la capacité d'atténuation intrinsèque du polluant dans la nappe est proposée. Cette propriété physique est conditionnée principalement par la perméabilité hydraulique et la nature des matériaux aquifères, elle est évaluée en se basant sur la comparaison entre la concentration maximale (C_0) observée après injection d'une masse donnée d'un traceur non réactif en un point donné de la nappe et la concentration mesurée (C_m) en un autre point.

La réduction naturelle de la pollution est représentée par le rapport entre la concentration maximale (C_m) au niveau du puit témoin et la concentration initiale au point d'injection (C_0) : $R = C_0 / C_m$

Ce rapport varie entre 0 (correspondant à une disparition complète du polluant) et 1 (pas de diminution de la concentration).

Une campagne de mesure de la capacité d'atténuation intrinsèque a été effectuée conjointement entre la Faculté des Sciences et Techniques de Béni-Mellal et l'Office National de l'Eau Potable en Juin 2002. Une étude de traçage par Chlorure de Sodium a été réalisée dans le bassin du Tadla en utilisant un réseau de 42 puits surveillés et géoréférencés dans le but de déterminer le cheminement des produits polluants et de définir les périmètres de protection des eaux souterraines. Des analyses hydrogéochimiques ont été effectuées de manière systématique pour suivre les processus d'atténuation, qui conduisent à la réduction des concentrations en substances polluantes. (Figure 8).

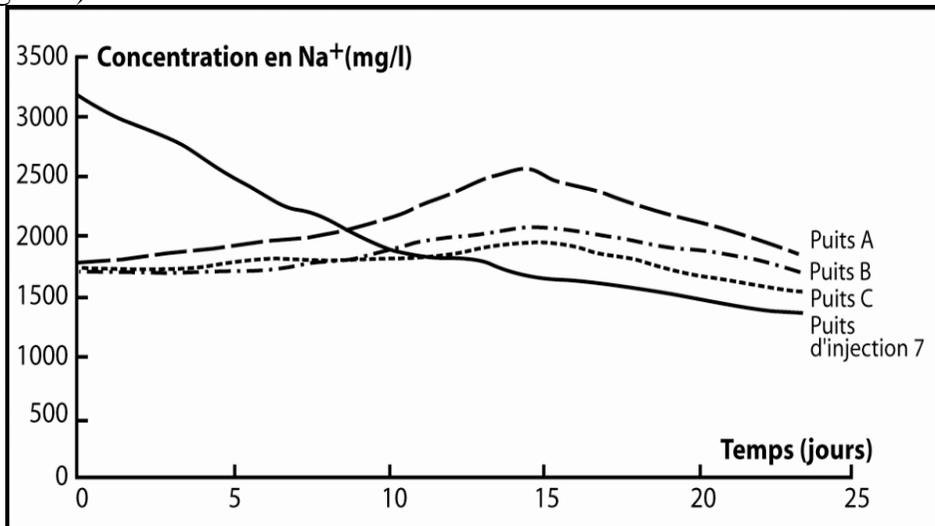


Figure 8. Evolution de la concentration en sel dans certains puits témoins

Les valeurs de la concentration mesurées en chaque point ont permis ensuite de calculer en chaque endroit la capacité d'atténuation intrinsèque de

l'aquifère. Cinq classes ont été définies (Tableau 2), caractérisée chacune par une note et définissant l'évolution de la contamination dans l'aquifère.

Tableau 2. Classes de la capacité d'atténuation intrinsèque

Classes	Poids	Notes	Capacité d'atténuation intrinsèque
0 - 0,2	6	1	Très forte
0,2 - 0,4		3	Forte
0,4 - 0,6		6	Moyenne
0,6 - 0,8		8	Faible
0,8 - 1		9	Très faible

Les notations et les poids accordés aux six facteurs de vulnérabilité (Epaisseur de la zone non saturée, recharge, sol, topographie, impact de la zone non saturée et capacité d'atténuation intrinsèque) (Knouz et al., 2019) sont associés dans un modèle additif permettant d'aboutir à un indice de vulnérabilité globale (Iv) variant entre 23 et 220 (Tableaux 3 et 4).

Tableau 3. Poids et notes des facteurs de vulnérabilité intrinsèque

Facteurs de vulnérabilité	Poids	Notes
Epaisseur de la zone non saturée	5	1-10
Recharge	4	1-9
Nature du sol	2	1-10
Topographie	1	1-10
Nature de la zone non saturée	5	1-10
Capacité d'atténuation intrinsèque	6	1-9

Tableau 4. Indices et classes de vulnérabilité intrinsèque à la pollution

Indice de vulnérabilité (Iv)	Degré de vulnérabilité
23-72	Peu vulnérable
73-121	Vulnérable
122-170	Très vulnérable
171-220	Fortement vulnérable

L'élaboration de la carte de vulnérabilité a été réalisée grâce à l'utilisation d'un système d'information géographique combinant un système de gestion de bases de données graphiques et alphanumériques.

Dans une démarche analogue à celle de l'établissement de la carte de vulnérabilité intrinsèque, la carte de sensibilité à la pollution est obtenue suite à une superposition de la carte de l'occupation des sols (tirée à partir des images satellitaires, des photo-aériennes et des cartes topographiques) à celle de la vulnérabilité intrinsèque (Latifi & Chaab, 2017).

5- Resultats et discussion

L'étude de la vulnérabilité a permis d'établir une cartographie détaillée de la région dégageant plusieurs zones classées suivant le degré de

vulnérabilité et de sensibilité à la pollution (Figure 9), ces classes sont indéniablement en relation avec la présence de nombreux paramètres litho-géophysiques et facteurs anthropiques agissant sur la sensibilité du milieu naturel (Radouani et al., 2014). Sur la carte de vulnérabilité intrinsèque, quatre zones ont pu être identifiées (Figure 9 et Tableau 5) :

Tableau 5. Récapitulation de la zonalité observée sur la carte de vulnérabilité

Degré de vulnérabilité	Indice DRASTIC	Superficie	Facteurs
Fortement vulnérable	> 150	27% (972km ²)	- Recharge importante - Relief faible - Sol à granulométrie grossière
Vulnérable	120 à 150	50% (1800km ²)	- Recharge importante - Faible profondeur de la nappe
Moyennement vulnérable	80 à 120	20% (720km ²)	- Relief faible - Pompage intense - Sol à granulométrie moyenne
Peu vulnérable	< 80	3% (108km ²)	- Zone non irriguée (faible recharge) - Nappe profonde - Sol fin

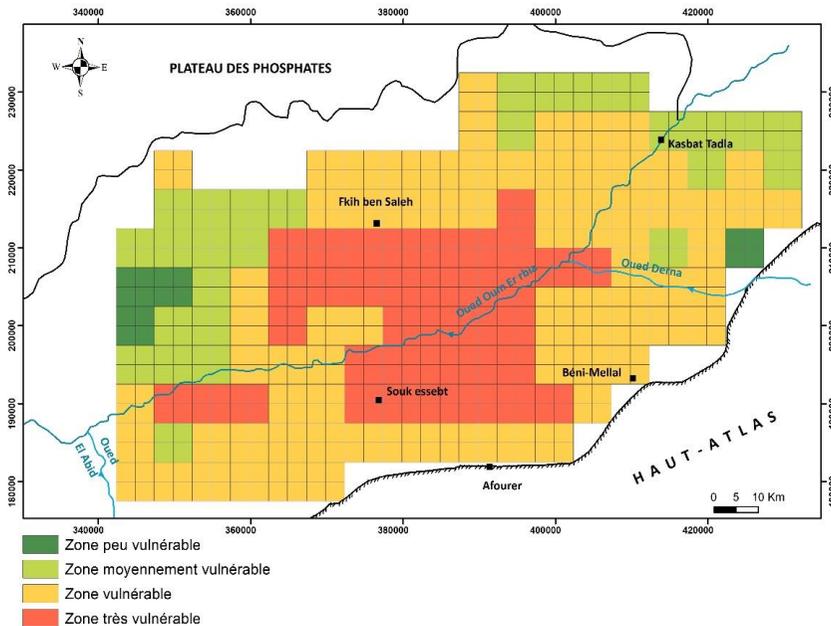


Figure 9. Carte de vulnérabilité intrinsèque à la pollution de l'aquifère mio-plio-quaternaire du bassin du Tadla. 1. Zone peu vulnérable, 2. Zone moyennement vulnérable, 3. Zone vulnérable, 4. Zone très vulnérable.

- Une zone très vulnérable située au centre de la plaine du Tadla et concerne particulièrement la zone irriguée médiane des Béni-Moussa et la zone Ouest des Béni-Amir. Dans ces zones, le relief est assez doux

et l'ensemble des terrains pend régulièrement et légèrement vers le sud-Ouest, une forte percolation des eaux étant alors favorisée en l'absence du ruissellement. D'autant plus, le drainage superficiel à l'intérieur du périmètre est tellement négligeable que la lame d'eau excédentaire nette est pratiquement infiltrée dans la nappe. Le drainage profond de la nappe par l'Oum-er-Rbia reste à son tour très limité en raison du sens de l'écoulement de la nappe qui suit le pendage des assises géologiques plio-quadernaires vers le sud-ouest et de l'existence d'un réseau de failles qui longe l'Oum-er-Rbia. Ce réseau de failles forme avec les horizons marneux, qui jalonnent l'Oued, un écran relativement imperméable. Bien que la proportion de l'infiltration de la pluie par rapport aux apports d'irrigations ne dépasse guère 20% même pour les années pluviométriques excédentaires, la recharge de la nappe par précipitation semble marquer l'évolution du niveau de la nappe. En effet, le caractère semi-aride du climat de la plaine fait que les pluies sont souvent sous forme de fortes averses de faible durée. Celles-ci, et en l'absence de drainage superficiel, participeraient à la remontée du niveau piézométrique de la nappe qui peut même affleurer en certaines zones.

- Une zone vulnérable : présentée dans une large superficie de la plaine du Tadla. La pente topographique est très faible avec la présence dans certains endroits de larges cuvettes favorisant l'infiltration des eaux. La profondeur du niveau piézométrique est fonction directe du taux de recharge engendrée par l'infiltration des eaux de pluie et celles des sources de Dir.
- Une zone moyennement vulnérable : concerne principalement la partie Ouest et Nord -Est de la plaine du Tadla. Les différents paramètres agissant sur la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines présentent des valeurs intermédiaires. Le taux de recharge est relativement faible, et le sol est de type isohumique moyennement profond.
- Une zone peu vulnérable : située au Nord Ouest de la plaine. Ce caractère est dû principalement au faible taux de recharge (zone non irriguée et pluviométrie inférieure généralement à 350 mm) et à la grande épaisseur de la zone non saturée. La profondeur du niveau piézométrique dépasse généralement les 15 m. En plus, le faciès pédologique représenté dans cette zone a une texture fine limitant ainsi une infiltration rapide des eaux.
- Les zones sensibles sont déduites de la carte de vulnérabilité intrinsèque en tenant compte des différentes sources de pollution. Ces sources sont représentées essentiellement par les rejets domestiques des différentes agglomérations urbaines, les produits azotés et

phytosanitaires utilisés en agriculture et par les rejets industriels notamment ceux des unités sucrières. La carte dérivée (Figure 10 et Tableau 6) a permis de dégager trois zones classées selon le degré de sensibilité des eaux à la pollution.

Tableau 6. Récapitulation de la zonalité observée sur la carte de sensibilité

Degré de sensibilité	Indice de Sensibilité	Superficie	Facteurs
Très sensible	> 8	36% (1296km ²)	- Zone irriguée (engrais+pesticides+élevage) - Présence d'unités industrielles - Drains d'évacuation des eaux usées
Sensible	4 à 8	49% (1764km ²)	- Zone irriguée (engrais+pesticides+élevage) - Présence de fosses sceptiques
Peu sensible	< 4	15% (540km ²)	- Zone non irriguée - Pas d'unités industrielles - Pas de grandes agglomérations

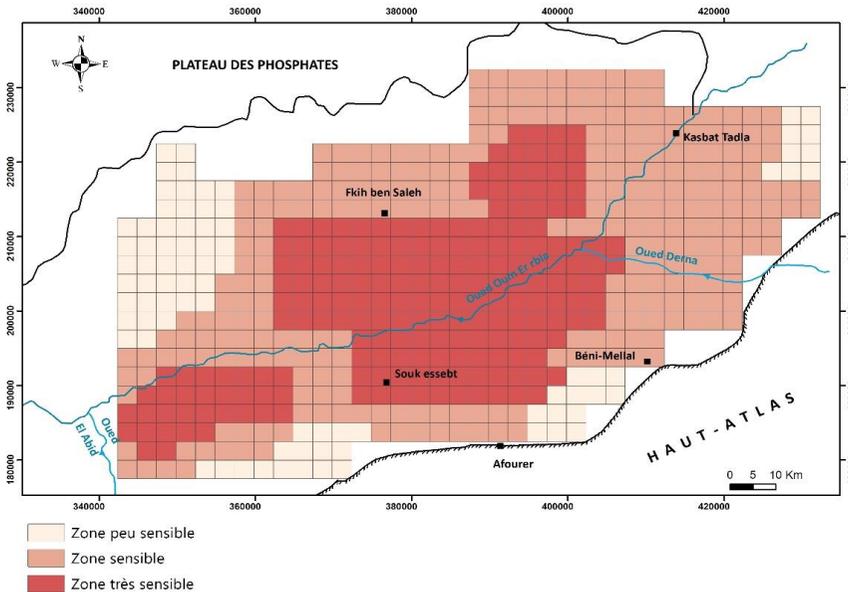


Figure 10. Carte de sensibilité à la pollution de l'aquifère mio-plio-quaternaire du bassin du Tadla. 1. Zone peu sensible, 2. Zone sensible, 3. Zone très sensible

- Une zone très sensible : représentée dans trois parties de la plaine :
 - A l'amont hydraulique de la nappe mio-plio-quaternaire ; cette sensibilité est induite par l'activité agricole conjuguée aux fuites des eaux de surface au niveau du canal médian d'irrigation qui amène les eaux salées de l'Oum-er-Rbia ;
 - Au centre de la zone d'étude, à proximité du drain d'évacuation des eaux usées du village de Fkih Ben Salah ; les eaux de ce drain sont

sollicitées pour l'irrigation des parcelles qui l'avoisinent. Cette situation est également observée au droit des drains d'évacuation des eaux résiduaires provenant des trois unités sucrières de la région ;

- A l'aval hydraulique de l'aquifère étudié, la sensibilité à la pollution est principalement due au recyclage des eaux de la nappe par pompage agricole et à la concentration des solutés par évapotranspiration. Dans cette zone, la nappe est peu profonde rendant la zone non saturée peu épaisse, ce qui retarde le lessivage des polluants.

Les résultats des analyses chimiques effectuées sur les échantillons M1, M2, et M3 (Figure 10 et Tableau 7) qui ont été prélevés respectivement à l'amont hydraulique, au Sud de Fkih Ben Salah et au Sud-Ouest du périmètre du Tadla tendent à conforter l'approche DRASTIC dans ce secteur. En effet, les analyses montrent la présence d'éléments polluants notamment les nitrates à des teneurs dépassant très nettement les normes admises (80 mg/l).

Les résultats des analyses hydrogéochimiques effectuées dans ces trois zones ont bien mis en évidence la gravité de l'état de pollution de la nappe par les nitrates. Cette situation est d'autant plus critique que les eaux souterraines constituent les seules ressources en eau disponibles pour les populations locales.

- Une zone sensible concernant une large superficie du bassin de Tadla et qui est principalement engendrée par l'activité agricole et le recyclage des eaux de la nappe par pompage. L'abondance des fosses sceptiques dans cette zone a également un impact important sur la qualité des eaux souterraines.

Les résultats de l'analyse chimique de l'échantillon M4 établis par une méthode de détermination colorimétrique à l'aide d'un spectrophotomètre UV-VIS (LANGE HACH DR6000) (précision ± 1 nm). (Figure 10 et Tableau 7) semblent également conforter notre approche dans ce secteur de la plaine. Les nitrates dosés, quoiqu'en teneurs plus faibles que dans les échantillons M1, M2 et M3, sont à des seuils dépassant les normes admises.

Tableau 7. Résultats des analyses hydrogéochimiques des échantillons M1, M2, M3, M4 et M5 prélevés dans la nappe de Tadla en février

Puits	Concentration ionique (mg/l)								Résidu sec (mg/l)
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	
M1	212	238,34	860,20	1,72	2091,52	96,00	378,20	88,62	3966,60
M2	248	223,74	379,50	1,32	1067,82	528,00	357,46	82,43	2888,27
M3	262	215,65	512,5	1,1	928,5	112,00	332,40	81,60	2445,75
M4	268	119,16	505,0	0,78	564,95	72,00	344,05	80,12	1954,06
M5	88	53,50	18,22	0,54	132,37	20,22	351,36	36,25	700,46

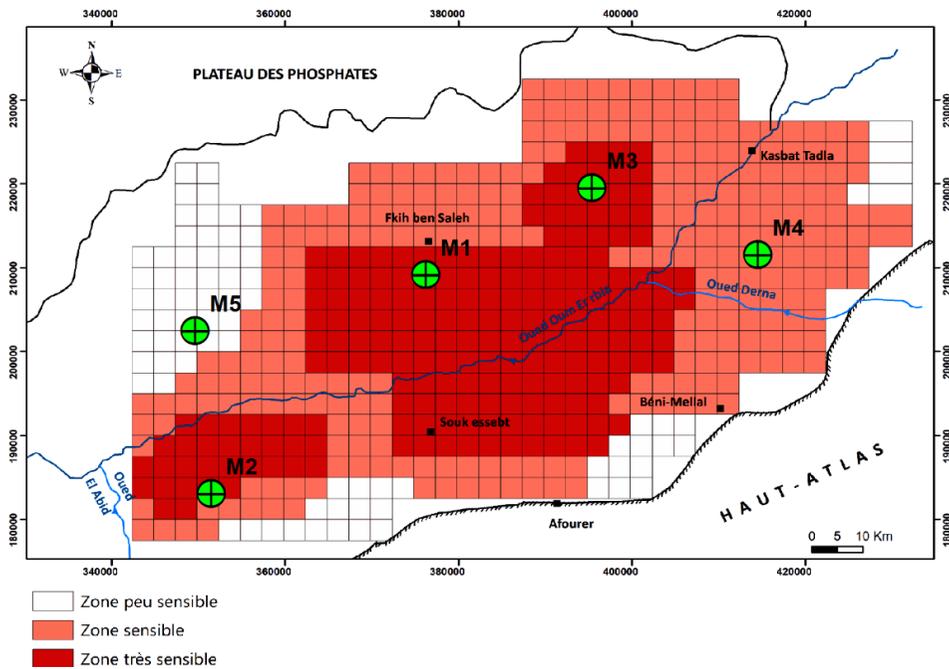


Figure 11. Carte de sensibilité à la pollution de l'aquifère mio-plio-quaternaire du bassin de Tadla. 1. Zone peu sensible, 2. Zone sensible, 3. Zone très sensible./avec les points de validation

- Une zone à faible sensibilité des eaux à la pollution est observée au Sud et au Nord-Ouest de la région étudiée. Au Sud, cette zone correspond à la bordure de la chaîne du Haut-Atlas où la nappe ne présente pas des chemins préférentiels d'écoulement. L'analyse hydrogéochimique de l'échantillon M5 (Figure 10 et Tableau 7) montre des teneurs admissibles de potabilité (Selon les normes préconisées par l'OMS) et confirme l'aspect peu sensible à la pollution de cette zone.

Conclusion

Les travaux de recherche présentés dans cet article notent a pour ambition la mise au point d'une nouvelle méthode d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque. L'analyse de la capacité d'atténuation intrinsèque de l'aquifère s'est révélée performante dans cet environnement complexe. Ce paramètre, une fois déterminé d'une manière représentative sur l'ensemble du bassin, permettra de décrire le comportement de la pollution de la nappe phréatique et évaluer sa capacité de transfert.

A l'issue de ce premier test, l'adéquation des zones très vulnérables avec celles où sont observés des cas de pollution aggravée tend à vérifier la méthode.

La particularité de cette démarche réside dans le fait qu'elle étend le champ de vision à l'ensemble du bassin et ne se limite pas aux endroits où la pollution a déjà contaminé les eaux souterraines et où elle est mesurée. De ce fait, cette méthode ne pourrait se substituer à une expertise hydrogéologique requise pour un projet spécifique, dont les incidences concernent des superficies généralement petites. En effet, des microzones fortement vulnérables peuvent subsister dans des endroits de la plaine classés comme étant faiblement vulnérables (Hinde Cherkaoui Dekkaki, 2007).

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

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). DRASTIC : A Standardized Method for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. *NWWA/Epa-600/2-87-035*, 455.
2. Amharref, M., Aassine, S., Bernoussi, A. S., & Haddouchi, B. Y. (2007). Cartography of the vulnerability to pollution of groundwater: Application to the Gharb's plain (Morocco). *Revue Des Sciences de l'Eau*, 20(2), 185–199. <https://doi.org/10.7202/015812ar>
3. Boizard, H., Richard, G., Defossez, P., Estrade, J. R., & Boiffin, J. (2004). Etude de l'effet à moyen et long terme des systèmes de culture sur la structure d'un sol limoneux-argileux du Nord du Bassin Parisien. *Etudes et Gestions Des Sols*, 11(1), 11–20.
4. Bouchaou, L., Chauve, P., Mudry, J., Mania, J., & Hsissou, Y. (1997). Structure et fonctionnement d'un hydrosystème karstique de montagne sous climat semi-aride: Cas de l'Atlas de Beni-Mellal (Maroc). *Journal of African Earth Sciences*, 25(2), 225–236. [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(97\)00100-0](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(97)00100-0)
5. 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*, 15(3), 483–493. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0102-8>
6. Hammani, A., Kuper, M., Li, I. A. V. H., & Li, H. (2008). *Caractérisation des pompages des eaux souterraines dans le Tadla , Maroc*. 4–7.
 7. Hinde Cherkaoui Dekkaki. (2007). (PDF) *Évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution moyennant la méthode P.R.K. : Application à la nappe phréatique du Souss au niveau du champ captant Ahmar Boudhar (Souss médian)*. April 2019. https://www.researchgate.net/publication/332211662_Evaluation_de_la_vulnerabilite_des_eaux_souterraines_a_la_pollution_moyennant_la_methode_PRK_Application_a_la_nappe_phreatique_du_Souss_au_niveau_du_champ_captant_Ahmar_Boudhar_Souss_median
 8. Knouz, N., Boudhar, A., Mostafa, E., & Aghzaf, B. (2019). *Méditerranée*. May.
 9. Latifi, S., & Chaab, S. (2017). Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines, selon les méthodes DRASTIC et GOD, dans la plaine alluviale de Guelma, Nord-Est Algérien. *Synthèse: Revue Des Sciences et de La Technologie*, 62, 48–62.
 10. Ouedraogo, I., Defourny, P., & Vanclooster, M. (2016). Mapping the groundwater vulnerability for pollution at the pan African scale. *Science of the Total Environment*, 544, 939–953. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.135>
 11. Radouani, F., Najine, A., Aifa, T., Ouzerbane, Z., & Aïfa, T. (2013). Reconnaissance du système aquifère du Nord-Ouest de la plaine du Tadla (Maroc oriental) par imagerie électrique Reconnaissance du système aquifère du nord-ouest de la plaine du Tadla (Maroc central) par imagerie électrique. *Journal of Hydrocarbons Mines and Environmental Research*, 4(4), 33–41. <http://jhmer.univ-rennes1.fr>
 12. Radouani, F., Najine, A., Aifa, T., Ouzerbane, Z., Radouani, F., Najine, A., Aifa, T., & Ouzerbane, Z. (2014). *Reconnaissance du système aquifère du Nord-Ouest de la plaine du Tadla (Maroc oriental) par imagerie électrique*.
 13. SINAN, M. (2000). *Méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en SOUTENANCE DE THESE DE DOCTORAT D'ETAT Présentée par : M . Mohamed SINAN DOCTEUR ES SCIENCES APPLIQUEES Option : Hydrogéologie METHODOLOGIE D'IDENTIFICATION, D'ÉVAL*. January. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3954.1843>
 14. Weatherington-Rice, J., Christy, A. D., Angle, M. P., & Aller, L.

(2006). DRASTIC hydrogeologic settings modified for fractured till:
Part 1. Theory. *Ohio Journal of Science*, 106(2), 45–50.