

Évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines par la méthode DRASTIC : cas de la nappe alluviale de Rich (Haut Atlas central, Maroc)

Assessment of groundwater vulnerability to pollution using the DRASTIC method in the Rich alluvial aquifer (Central High Atlas of Morocco)

Youssef El Kayssi, Mohamed Hilali, Taoufiq Kouz et Ilias Kacimi

Volume 32, numéro 4, 2020

Reçu le 25 mars 2019, accepté le 28 octobre 2019

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1069568ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/1069568ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

El Kayssi, Y., Hilali, M., Kouz, T. & Kacimi, I. (2020). Évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines par la méthode DRASTIC : cas de la nappe alluviale de Rich (Haut Atlas central, Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science*, 32(4), 317–334.
<https://doi.org/10.7202/1069568ar>

Résumé de l'article

L'urbanisation rapide et les rejets des eaux usées correspondants, ainsi que l'utilisation de plus en plus intensive d'engrais chimiques, constituent un risque potentiel pour la pollution des eaux souterraines. La cartographie de la vulnérabilité de ces eaux à la pollution minimise ce risque par l'identification des zones les plus sensibles en vue d'une bonne gestion qualitative de la ressource. Ici, la vulnérabilité a été évaluée pour la nappe alluviale de Rich (Haut Atlas central du Maroc) en utilisant la méthode DRASTIC avec une comparaison avec la méthode PRK (où P est la pente topographique, R est le rapport entre la variation piézométrique et l'épaisseur de la zone non saturée et K est la perméabilité de la formation aquifère). La carte DRASTIC obtenue a été testée et validée par la conductivité électrique de 44 puits via le test de Kappa (K) et le taux de coïncidence. Le résultat obtenu montre un indice K négligeable (0,006) et un taux de coïncidence faible de 24 %, ce qui conduit à valider avec réserves la carte obtenue. Les classes de vulnérabilité obtenues ont montré que 21,7 % de la zone d'étude présentait une vulnérabilité faible à très faible, 56,6 % une vulnérabilité modérée et 21,7 % une vulnérabilité forte à très forte. La complexité dans la réalisation de cette carte réside dans le choix du paramètre de conductivité électrique pour refléter l'état de pollution et dans la densité des données ponctuelles introduites et la façon d'introduire ces données, souvent par interpolation, assignant des valeurs dans des secteurs où aucune donnée n'est connue ou n'existe. Une mise à jour de cette carte devient nécessaire par le choix d'un autre indicateur de pollution représentatif et par l'intégration d'une masse de données plus importante pour avoir un résultat plus fiable qui peut être utilisé comme un outil permettant de sensibiliser davantage les services publics concernés par les eaux souterraines dans la région.

ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ À LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES PAR LA MÉTHODE DRASTIC : CAS DE LA NAPPE ALLUVIALE DE RICH (HAUT ATLAS CENTRAL, MAROC)

Assessment of groundwater vulnerability to pollution using the DRASTIC method in the Rich alluvial aquifer (Central High Atlas of Morocco)

YOUSSEF EL KAYSSI^{1*}, MOHAMED HILAL², TAOUFIQ KOUZ³, ILLAS KACIMI¹

¹Laboratoire de Géosciences, Eau et Environnement (LG2E), Département des sciences de la terre, Faculté des sciences de Rabat-Agdal, Université Mohammed V, 4, avenue Ibn Battouta, BP 1014, Rabat, Maroc

²Équipe de Recherche de Génie des Mines, de l'Eau et de l'Environnement (GMEE), Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques, Université Moulay Ismail, BP 509, Boutalamine, 52000 Errachidia, Maroc

³Laboratoire de Génie de l'Eau et de l'Environnement, Faculté des Sciences et Techniques d'Al Hoceima, Université Mohammed Premier, BP 34, Ajdir 32003 Al-Hoceima, Maroc

Reçu le 25 mars 2019, accepté le 28 octobre 2019

RÉSUMÉ

L'urbanisation rapide et les rejets des eaux usées correspondants, ainsi que l'utilisation de plus en plus intensive d'engrais chimiques, constituent un risque potentiel pour la pollution des eaux souterraines. La cartographie de la vulnérabilité de ces eaux à la pollution minimise ce risque par l'identification des zones les plus sensibles en vue d'une bonne gestion qualitative de la ressource. Ici, la vulnérabilité a été évaluée pour la nappe alluviale de Rich (Haut Atlas central du Maroc) en utilisant la méthode DRASTIC avec une comparaison avec la méthode PRK (où P est la pente topographique, R est le rapport entre la variation piézométrique et l'épaisseur de la zone non saturée et K est la perméabilité de la formation aquifère). La carte DRASTIC obtenue a été testée et validée par la conductivité électrique de 44 puits via le test de Kappa (K_c) et le taux de coïncidence. Le résultat obtenu montre un indice K négligeable (0,006) et un taux de coïncidence

faible de 24 %, ce qui conduit à valider avec réserves la carte obtenue. Les classes de vulnérabilité obtenues ont montré que 21,7 % de la zone d'étude présentait une vulnérabilité faible à très faible, 56,6 % une vulnérabilité modérée et 21,7 % une vulnérabilité forte à très forte. La complexité dans la réalisation de cette carte réside dans le choix du paramètre de conductivité électrique pour refléter l'état de pollution et dans la densité des données ponctuelles introduites et la façon d'introduire ces données, souvent par interpolation, assignant des valeurs dans des secteurs où aucune donnée n'est connue ou n'existe. Une mise à jour de cette carte devient nécessaire par le choix d'un autre indicateur de pollution représentatif et par l'intégration d'une masse de données plus importante pour avoir un résultat plus fiable qui peut être utilisé comme un outil permettant de sensibiliser davantage les services publics concernés par les eaux souterraines dans la région.

Mots-clés : DRASTIC, vulnérabilité, cartographie, nappe de Rich, Maroc.

ABSTRACT

Rapid urbanization and corresponding wastewater discharges and the increasing use of chemical fertilizers in agriculture are a potential risk for groundwater pollution. Mapping the vulnerability of groundwater to pollution minimizes this risk by identifying the most sensitive areas to help a good qualitative management of the resource. Here, the vulnerability was assessed using the DRASTIC method, in comparison with PRK method (where P is the topographic slope, R the ratio of the piezometric level fluctuations to the thickness of the unsaturated zone, and K the aquifer permeability) for the Rich alluvial aquifer (Central High Atlas of Morocco). The vulnerability map obtained was tested and validated with the electrical conductivity of 44 wells using the Kappa test and the coincidence rate. The result obtained showed a low K (0.006) and a low coincidence rate of 24%, which validated partly the obtained vulnerability map. The vulnerability classes obtained showed that 21.7% of the study area had low to very low vulnerability, 56.6% moderate vulnerability, and 21.7% high to very high vulnerability. The complexity in producing this vulnerability map comes from the choice of the parameter to reflect the state of the pollution, and also in the density of the input data and how it is introduced, often by interpolation, assigning values in sectors where no data is known or exists. Finally, an update of this vulnerability map becomes necessary by choosing a different pollution indicator or by using a greater amount of data in the model in order to have a more reliable result to be used to raise awareness of the public services concerned by groundwater in the area.

Key words: *mapping, multicriteria analysis, favorable zones, manual boreholes, GIS, Ivory Coast.*

1. INTRODUCTION

Les eaux souterraines représentent la principale ressource en eau dans les zones semi-arides et sont souvent menacées par les activités humaines (BAALI *et al.*, 2007). L'usage de plus en plus important d'engrais chimiques dans les terres agricoles et l'augmentation des rejets domestiques et industriels les rendent encore plus vulnérables (MOHAMMADI *et al.*, 2009). La notion de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution intègre les différents facteurs physiques qui déterminent dans les conditions naturelles la sensibilité de ces nappes à la pollution à partir de la surface du sol (ALBINET et MARGAT, 1975). La prévention par cartographie de ces zones sensibles constitue une étape importante, à laquelle les scientifiques consentent de plus en plus d'efforts. Les premiers travaux sur la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines remontent aux années

1970 (ALBINET et MARGAT, 1970). Ces travaux visaient à montrer les variations spatiales de la protection naturelle des aquifères et identifiaient les zones où des mesures de protection doivent être envisagées (LALLEMAND-BARRES, 1994; ROBINS *et al.*, 1996). De nombreuses méthodes d'évaluation de la vulnérabilité ont été développées dans le monde (STIGTER *et al.*, 2006). Dans cette étude, notre choix a porté sur l'application de la méthode DRASTIC dont l'usage est très répandu au monde et particulièrement au Maroc (SINAN et RAZACK, 2009). Cette méthode paramétrique est la plus pertinente vis-à-vis de la réalité de terrain, du fait de la prise en compte de l'importance relative de chaque critère vis-à-vis de la vulnérabilité générale de la nappe. Elle se présente sous forme d'un système de cotation numérique, basé sur la considération des différents facteurs influençant le système hydrogéologique.

L'application de cette méthode a été effectuée au niveau de la nappe alluviale de Rich. Ce secteur a été choisi par la diversité de l'occupation des sols et le développement urbain de plus en plus croissant.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Aire d'étude

La zone d'étude est située au niveau du haut bassin de Ziz, dans le Haut Atlas central du Maroc avec une superficie d'environ 110 km² (Figure 1). Elle s'étend de Ait Saleh au sud à Foum Tillicht et M'Zizel au nord et à l'ouest, sur une large dépression longitudinale, délimitée au nord et au sud par des rides anticlinales prolongées et subparallèles (LAVILLE, 1977), lesquelles sont traversées par l'oued Ziz et l'oued Sidi Hamza, formant respectivement les cluses de M'Zizel et de Tillicht (ABHGZR, 2011).

La zone d'étude est constituée par un centre urbain (centre de Rich), des agglomérations rurales représentées par les localités de M'Zizel et Zaouiat Sidi Hamza et des habitations rurales avoisinantes. Selon le dernier recensement général de la population et de l'habitat de 2014, 38 834 habitants ont été enregistrés, contre 37 464 habitants recensés en 2004, soit un taux moyen d'accroissance de 3,53 %. La taille moyenne des ménages est de 5,95, ce qui reste relativement élevé par comparaison avec la moyenne nationale (5,28).

La population urbaine est relativement importante, elle représente 67 % par rapport à 33 % de population rurale. Cette dernière a presque stagné durant la dernière décennie, ce qui s'est traduit par l'augmentation du taux d'urbanisation dans le secteur (ABHGZR, 2016).

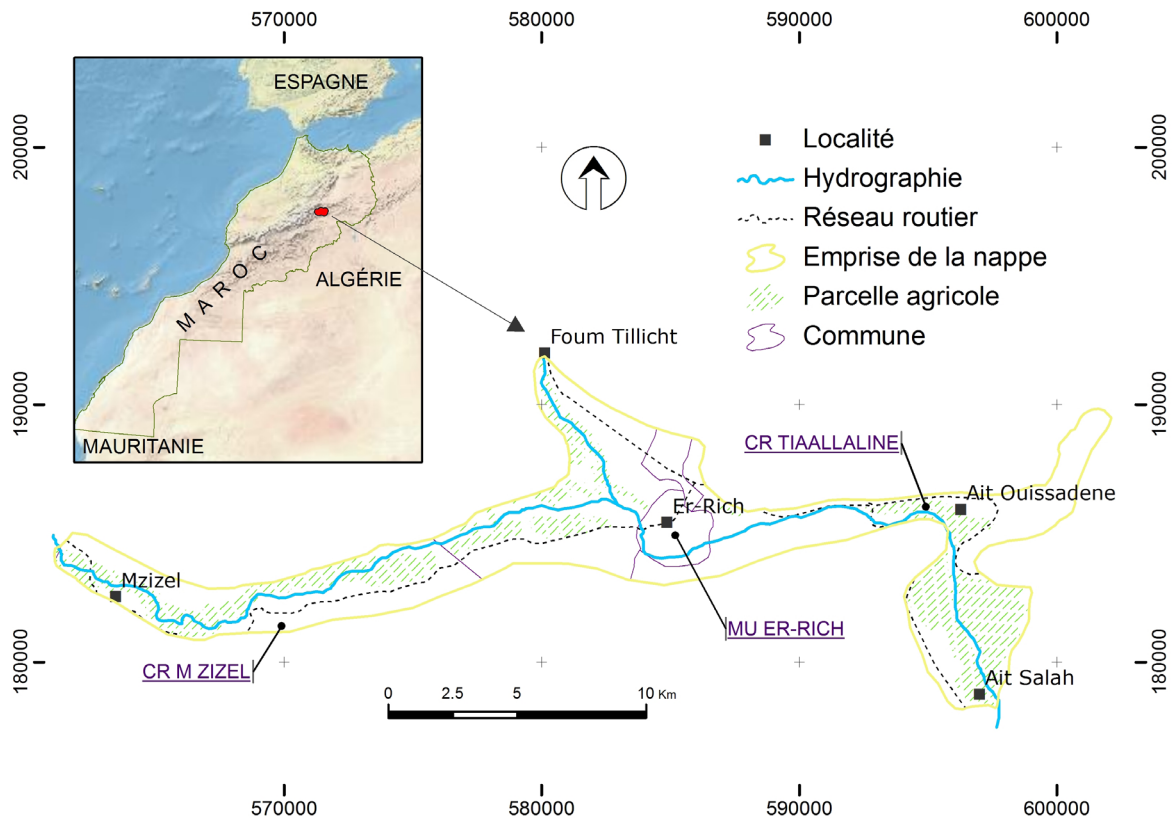


Figure 1. Situation de la zone d'étude (Lambert Maroc zone 1).
Location of the study area (Lambert Morocco zone 1).

La zone d'étude est occupée par un périmètre irrigué de 90 ha. Il s'agit d'un périmètre de la petite et moyenne hydraulique (PMH) qui est axée autour des moyens d'irrigation traditionnels (seguias et canaux de déviation) et irrigués notamment lors des périodes des crues. Dans le reste de la zone, ce n'est que des fins d'irrigations disparates qui sont développées et elles sont basées notamment sur les prélèvements d'eau à partir des petites poches d'eau à productivité limitée (ABHGZR, 2016).

Les terrains agricoles de la zone sont occupés en particulier par l'arboriculture (64 %), la céréaliculture (26 %) et les cultures fourragères (5 %). Le reste de la zone, soit 5 %, est occupé par des cultures fourragères et des légumineuses.

L'irrégularité des précipitations et la sécheresse sont des facteurs limitant le développement du secteur agricole dans la zone (ORMVAT, 2015).

L'évaluation des différents paramètres considérés dans la méthode DRASTIC nécessite une bonne connaissance du contexte naturel de la zone d'étude. En effet, la région de Rich est caractérisée par un climat semi-aride avec des précipitations interannuelles moyennes de 183 mm et une température moyenne annuelle de 17,6 °C. D'après les données de la station de M'Zizel (ABHGZR, 2011), les précipitations connaissent une grande variabilité selon les saisons; la période

pluvieuse s'étend de septembre à mai. Durant cette période, les précipitations connaissent une répartition irrégulière avec une prédominance en septembre et en octobre. En été, en particulier en juillet, les pluies sont rares ou quasi inexistantes. Ce contexte climatique irrégulier a donné naissance à un écoulement superficiel discontinu. L'analyse des débits mensuels interannuels des cours d'eau traversant la nappe (Ziz et Sidi Hamza) montre de longues périodes de débits faibles ou inexistantes et quelques crues parfois violentes, mais de courte durée, observées notamment pendant l'automne et le printemps. L'essentiel des apports en eaux superficielles se fait durant ces crues.

Le contexte géologique régional est sous forme d'un bassin d'effondrement affecté par un ensemble de failles, en donnant naissance à des blocs basculés du Lias et du Dogger, habituellement descendantes conformément à la pente générale du bassin (MARGAT, 1952; EL KOCHRI, 1996), sur lequel se sont déposés des matériaux plioquaternaires formant une nappe alluviale.

La lithologie de la zone d'étude a été étudiée en exploitant la carte et la coupe géologique (Figures 2 et 3). En effet, on trouve des poudingues, des graviers et des galets en relation avec les alluvions des lits actuels des oueds. En allant vers les

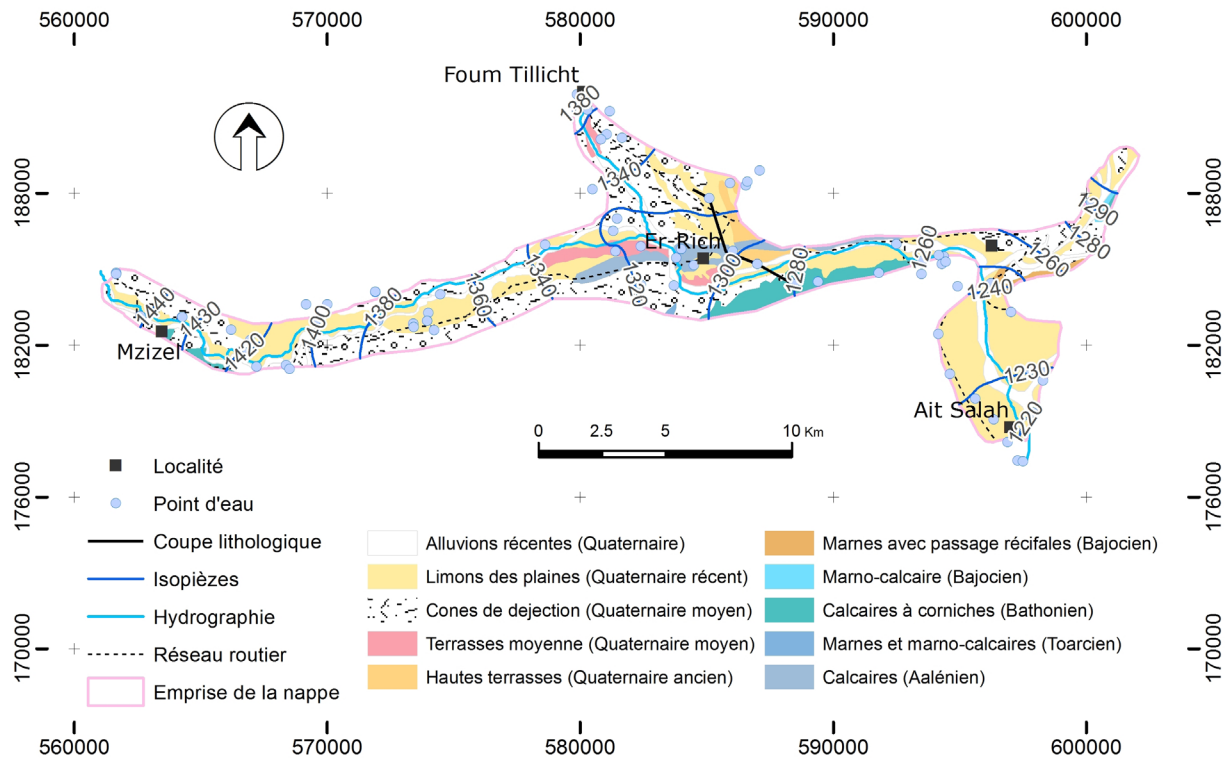


Figure 2. Géologie et piézométrie de la zone d'étude (Lambert Maroc zone 1).
 Geological and piezometric map of the study area (Lambert Morocco zone 1).

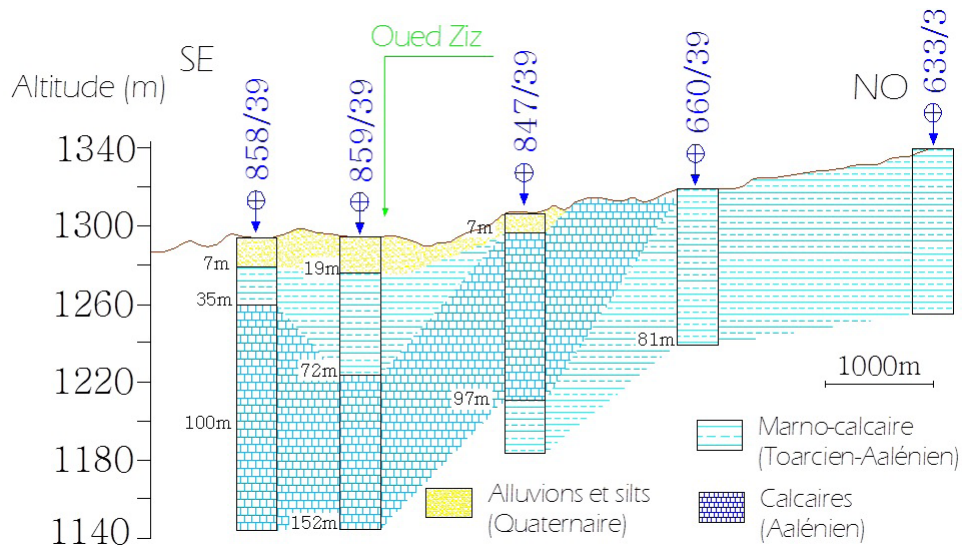


Figure 3. Corrélation entre les forages traversant la nappe de Rich.
 Correlation between boreholes penetrating the Rich aquifer.

rides anticlinales avoisinantes, ce sont des dépôts fluviolacustres qui apparaissent avec des calcaires gréseux, parfois marneux, peu perméables. Ces limites imperméables ou semi-perméables sont caractérisées par l'absence de flux d'eau souterraine vers l'aquifère. Des études géologiques réalisées sur le Haut Atlas par AIT ADDI (1998, 2000) ont mis en évidence un substratum Aalénien-Toarcien généralisé et constant. Cependant, l'analyse des coupes lithologiques ayant traversés ce substratum montre que sa puissance est irrégulière et réduite, elle croit vers les axes des cours d'eau traversant la nappe et dépasse rarement 70 m (Figure 3), au moins à l'échelle de la nappe.

Les limites de l'aquifère ont été déterminées. Selon ANDERSON et WOESSNER (1992), ces limites doivent coïncider avec les formations géologiques imperméables ou ceux dont la perméabilité est d'au moins deux ordres de grandeur inférieure à celle de l'aquifère. Le réservoir aquifère est libre, son toit est assimilé à la topographie. Sa puissance montre un maximum d'accumulation entre Ait Ouissadene et Ait Saleh (entre 10 et 30 m). À l'ouest du centre de Rich, la puissance alluvionnaire est moins importante (de 10 à 20 m), il est fonction de la remontée du substratum, éventuellement sous l'action des failles inverses profondes (EL KOCHRI, 1996). Dans les zones frontières, la puissance oscille entre 6 et 10 m.

Les paramètres hydrogéologiques de la nappe sont bien définis et discutés par EL KAYSSI *et al.* (2016) après une étude de modélisation mathématique sous GMS (*Global Modelling System*). Le calage du modèle a montré une hétérogénéité importante en termes de perméabilité conformément avec la lithologie du réservoir aquifère, allant des alluvions grossières jusqu'à des dépôts fluviolacustres marneux ou gréseux. Les perméabilités reconstituées par le modèle montrent que les zones les plus perméables de l'aquifère (10^{-3} à 10^{-2} m·s⁻¹) se situent près du centre de Rich, tandis que les perméabilités sont relativement inférieures ailleurs (jusqu'à 10^{-5} m·s⁻¹).

Le bilan obtenu par le modèle en régime permanent montre que l'essentiel de la recharge s'effectue par l'infiltration des eaux de crues avec un taux de 67 %. La recharge par les précipitations représente seulement 33 % des entrées de la nappe.

Conformément à la topographie du substratum, l'écoulement général se fait de l'ouest vers l'est entre Mzizel et Ait Ouissadene et du nord vers le sud entre Foug Tillicht et Rich et entre Ait Ouissadene et Ait Salah (ABHGZR, 2011; EL KAYSSI *et al.*, 2016) montrant ainsi une alimentation depuis les cluses de Foug Tillicht et de Mzizel. La convergence des isopièzes autour des cours d'eau montre un lien hydraulique entre les eaux superficielles et souterraines. Le gradient hydraulique présente des valeurs moyennes de 0,03 à 0,05 dans les zones amont et diminue très sensiblement vers Ait Saleh (0,01 à 0,03) du fait de l'élargissement de la plaine. Il s'accroît

en revanche vers M'Zizel et Foug Tillicht (0,05 à 0,7) en liaison avec la diminution de la puissance de la nappe et de la perméabilité du réservoir aquifère (Figure 2).

Les concentrations de la conductivité électrique contenues dans les eaux souterraines de la nappe de Rich varient de 310 à 2 900 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Ces valeurs sont dans la plupart inférieures aux normes marocaines (2 700 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et révèlent quatre classes principales : la classe excellente <750 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, la classe bonne (750-1 300 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), la classe moyenne (1 300-2 700 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et la classe mauvaise (2 700-2 920 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Cette dernière est observée en aval hydraulique du centre de Rich. D'une manière générale, les valeurs de la conductivité électrique augmentent de l'amont vers l'aval de la nappe (Figure 4).

L'occupation du sol de la zone d'étude est un paramètre important dans l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution. Dans notre cas, l'occupation du sol du secteur a été générée par la combinaison de plusieurs sources de données : cartes topographiques au 1/50 000, cartes géologiques au 1/200 000, plan d'aménagement du centre de Rich et le site web Wikimapia (<http://wikimapia.org>) cartographiant la Terre au moyen des vues satellitaires. Les informations extraites ont été traitées et complétées sous SIG par des données de terrain. En effet, la zone d'étude est occupée par cinq types de terres (Figure 5) : forêts et zones semi-naturelles, milieux aquatiques, cultures permanentes, zones urbaines continues et discontinues, périmètres irrigués et zones d'activité, cette dernière englobe des carrières, des décharges, des stationnements, des marchés hebdomadaires, des stations d'essence et des stations de trituration d'olives.

2.2 Notion de la vulnérabilité

La vulnérabilité représente la capacité de l'eau en surface à rejoindre la zone saturée de la nappe d'eau souterraine. La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique en relation procure un degré plus ou moins élevé de protection vis-à-vis des pollutions suivant les caractéristiques de ce milieu.

Ainsi, de nombreuses méthodes ont été développées dans le monde pour évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines, allant des plus simples, avec des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (GOGU et DASSARGUES, 2000), à des méthodes plus complexes avec des modèles qui prennent en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone noyée, ce qui nécessite une masse et une qualité importante des données d'entrée.

Le groupe des méthodes paramétriques à système de classes pondérées PCSM (*Point Count System Models*), dont la méthode DRASTIC, apparaît le plus pertinent vis-à-vis la réalité de terrain (MOHAMMAD, 2017). Ce sont aussi les méthodes

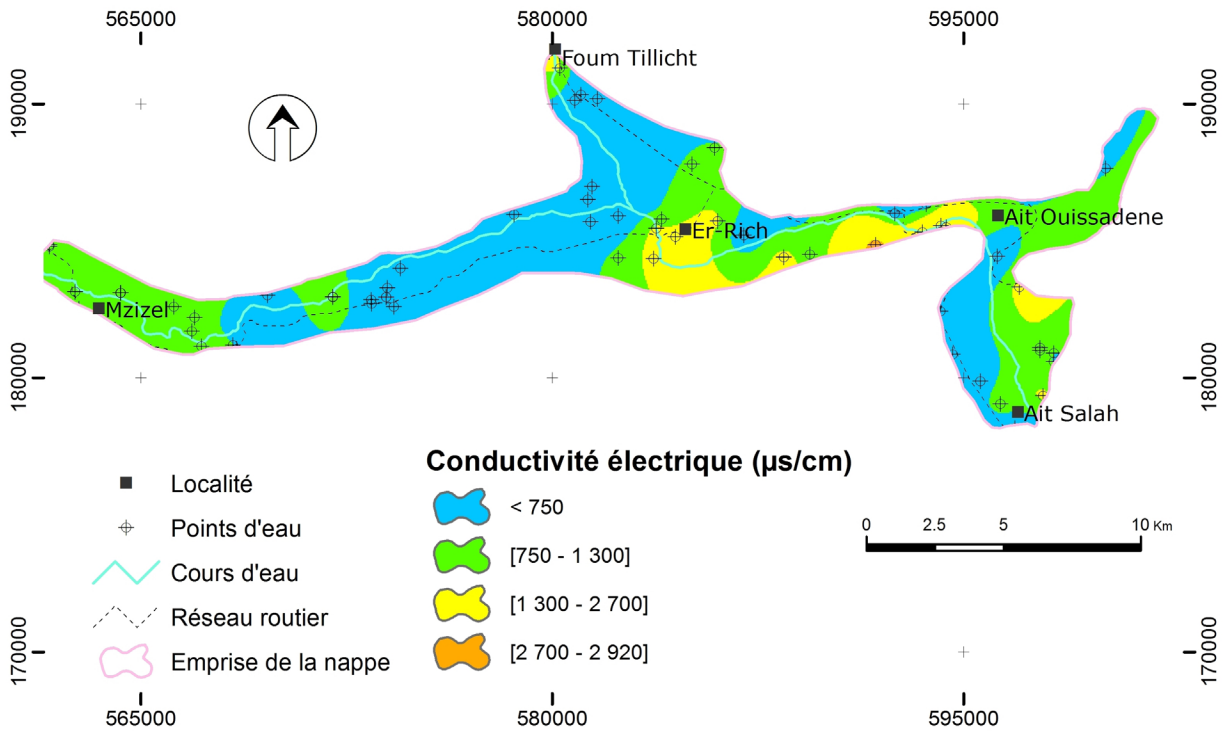


Figure 4. Conductivité électrique de la nappe de Rich (Lambert Maroc zone 1).
Electrical conductivity of the Rich aquifer (Lambert Morocco zone 1).

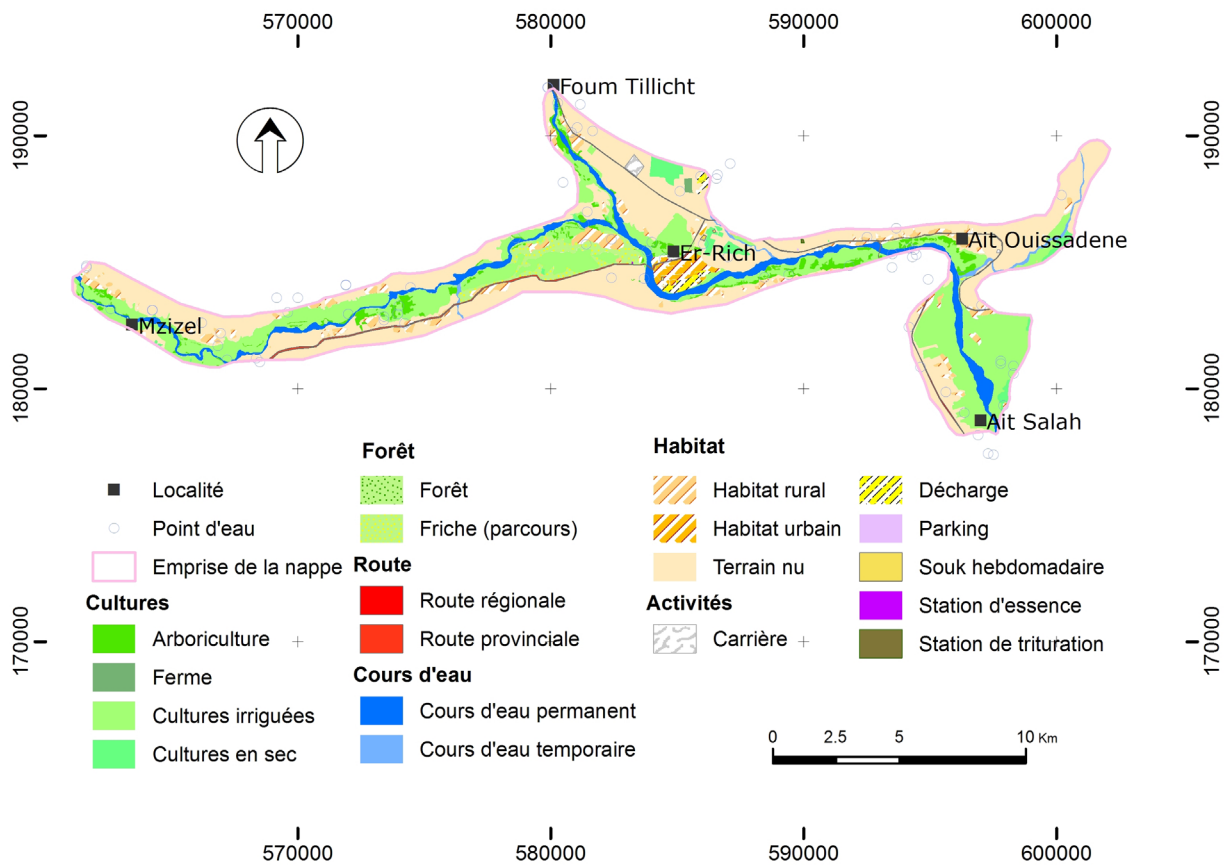


Figure 5. Occupation du sol de la zone d'étude (Lambert Maroc zone 1).
Land use of the study area (Lambert Morocco zone 1).

les plus reconnues et utilisées à l'heure actuelle. ANANE *et al.* (2013), GHAZAVI et EBRAHIMI (2015) ont utilisé ce groupe pour l'évaluation de la vulnérabilité de la nappe de Hammamet à Tunisia et la plaine d'Abarkooh à Iran. Ce groupe est basé sur l'affectation de notes aux paramètres qui sont retenus pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines en définissant des intervalles. Par la suite, une pondération de ces notes est effectuée en fonction de l'importance de chacun des paramètres sélectionnés dans l'évaluation de la vulnérabilité. La méthode DRASTIC fait partie de ce groupe des méthodes et elle sera évaluée dans la présente étude.

2.3 Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité selon l'indice DRASTIC

Il existe deux versions de la méthode DRASTIC : la version DRASTIC standard, appliquée dans le cas où les contaminants sont des polluants inorganiques (cas de notre article), et la version DRASTIC « pesticides », appliquée dans le cas où les contaminants considérés sont des pesticides. La méthode DRASTIC a été développée dans les années 1980 par les services de l'Agence américaine de protection de l'environnement (USEPA) (ALLER *et al.*, 1987). Elle permet d'évaluer la vulnérabilité intrinsèque verticale à la pollution des aquifères par systèmes paramétriques. Elle a fait l'objet de plusieurs travaux : KHOSRAVI *et al.* (2018) l'ont utilisée pour étudier l'aquifère de Sari-Behshahr à Iran, ALLOUCHE *et al.* (2017) l'ont testée dans la côte Est tunisienne, HAMZA *et al.* (2007) l'ont adoptée pour évaluer la vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique de Metline-Ras Jebel-Raf au Nord-est tunisien. HAMZA *et al.* (2008) l'ont utilisée pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe côtière alluvionnaire de Meltine-Ras Jebel-Raf au Nord-est tunisien, BENTEKHICI *et al.* (2018) l'ont utilisée pour l'évaluation des risques de la pollution des eaux et vulnérabilité de la nappe alluviale de la plaine de Sidi Bel Abbès au Nord-ouest algérien. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de cette méthode pour délimiter les zones à risque et vulnérables à la pollution, quelle que soit son origine.

La méthode DRASTIC est un modèle qui repose sur une analyse spatiale classique. L'acronyme DRASTIC correspond aux initiales de sept facteurs déterminants la valeur de l'indice de vulnérabilité : la profondeur de la nappe (D), la recharge efficace (R), les matériaux de l'aquifère (A), le type de sol (S), la topographie ou la pente (T), l'impact de la zone vadose ou zone aérée (I) et la perméabilité ou la conductivité hydraulique de l'aquifère (C). Chacun de ces paramètres est subdivisé en classes, indexés des cotes variant de 1 à 10 et attribués un poids numérique compris entre 1 et 5 en fonction de son degré d'influence et des conditions hydrogéologiques locales (Tableau 1). Les valeurs des poids et des cotes utilisées sont

celles de la version standard de la méthode DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987).

L'indice de vulnérabilité (IDRASTIC) est calculé en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants :

$$\text{IDRASTIC} = (D_w \times D_r) + (R_w \times R_r) + (A_w \times A_r) + (S_w \times S_r) + (T_w \times T_r) + (I_w \times I_r) + (C_w \times C_r) \quad (1)$$

où D , R , A , S , T , I , et C sont les sept paramètres de la méthode DRASTIC, w étant le poids du paramètre et r la cote associée.

L'indice IDRASTIC est représenté par une valeur numérique variant de 23 à 226. Il exprime le degré de vulnérabilité. Plus cette valeur est élevée, plus la vulnérabilité à la pollution est grande. Pour établir la carte de vulnérabilité à la pollution de la zone d'étude, nous avons adopté le classement proposé par ALLER *et al.* (1987) présenté au tableau 2.

2.4 Préparation des données du modèle DRASTIC

L'évaluation des différents paramètres considérés dans la méthode DRASTIC requiert une bonne connaissance du milieu naturel. Toutes les couches de données requises ont été préparées dans un GIS. Le détail de chaque couche thématique est décrit ci-dessous.

2.4.1 Profondeur de la nappe (D)

Elle représente toute l'épaisseur des horizons traversés par un polluant pour atteindre la nappe. Ce paramètre contrôle le degré d'interaction entre les matériaux et le contaminant et par conséquent la possibilité d'atténuation d'une telle contamination. Afin d'établir la carte des profondeurs du plan d'eau, les données des 44 puits (état d'avril 2012) ont été utilisées pour interpoler la profondeur de la nappe phréatique en utilisant la méthode IDW (*Inverse Distance Weighted*). Il s'agit d'une méthode rapide, facile à calculer et simple à interpréter (LU et WONG, 2008).

Ensuite, la profondeur a été divisée en dix intervalles : <2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-11, 11-14, 14-18, 18-25, 25-33 et >33 en se basant sur la classification d'ALLER *et al.* (1987). La carte obtenue est illustrée dans la figure 6.

2.4.2 Recharge nette (R)

La recharge nette définit la quantité d'eau qui atteint l'aquifère. Le taux d'infiltration de cette fraction d'eau guide le transport des contaminants dans le sol jusqu'à la zone saturée. Au niveau de la nappe alluviale de Rich, la recharge se fait essentiellement par l'infiltration des eaux de crues avec un taux de 67 % des entrées de la nappe et par infiltration

Tableau 1. Scores et poids des paramètres DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987).Table 1. Scores and weight of DRASTIC parameters (ALLER *et al.*, 1987).

Paramètre	Poids (<i>w</i>)	Classe	Score
Profondeur de l'eau (<i>D</i>)	5	0-2	10
		2-4	9
		4-6	8
		6-8	7
		8-11	6
		11-14	5
		14-18	4
		18-25	3
		25-33	2
		>33	1
Recharge nette (<i>R</i>)	4	2-5	1
		5-10	3
		10-15	6
Lithologie de l'aquifère (<i>A</i>)	3	Sol de Sebkhata	1
		Argile sableuse	2
		Sable argileux	4
		Sable	6
		Grès	7
Type de sol (<i>S</i>)	2	Gravier	9
		Zone urbaine	1
		Sol complexe	2
		Sols hydromorphes et allomorphes	3
		Sol isohumique	4
		Sol peu évolué et vertisols	5
		Sol gypseux	6
		Sol brun calcaire	7
		Rendzine	8
		Sol minéral et lits de oueds	9
Pente (<i>T</i>)	1	>25	1
		17-25	2
		12-17	4
		10-12	5
		8-10	7
		6-8	8
		3-6	9
0-3	10		
Lithologie de la zone non saturée (<i>I</i>)	5	Sols de Sebkhata	2
		Limons	3
		Argiles, sables et limons	4
		Argiles-graviers	7
Conductivité hydraulique (<i>C</i>)	3	Graviers et sables	9
		0-5	1
		5-10	3
		10-15	5
		15-25	7
>25	8		

Tableau 2. Critères d'évaluation de la vulnérabilité DRASTIC selon ALLER *et al.* (1987).Table 2. Criteria for assessing DRASTIC vulnerability according to ALLER *et al.* (1987).

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Minimum	23-80
Très faibles	80-100
Faible	100-120
Moyennement faible	120-140
Moyennement forte	140-160
Forte	160-180
Très forte	180-200
Maximum	200-226

des eaux des précipitations avec un taux de 33 % (EL KAYSSI *et al.*, 2016). La recharge par retour des eaux d'irrigation est considérée négligeable, du fait que le système d'irrigation adopté est traditionnel (seguias et canaux de déviation pendant les périodes des crues) et l'absence de mesures des volumes d'eau consommés par les parcelles agricoles.

La recharge par infiltration des eaux de pluie a été calculée en se basant sur la carte des isohyètes des moyennes interannuelles de la période (1957-2003) et sur un coefficient d'infiltration de 5 % (ABHGZR, 2011). La fraction infiltrée est de 2,27 Mm³ (EL KAYSSI *et al.*, 2016).

La recharge par infiltration dans le lit des oueds concerne l'infiltration des eaux de crues. Les débits des oueds Ziz et Sidi Hamza sont contrôlés à l'entrée de la nappe, respectivement, par les stations d'Amouguer M'Zizel et de Foum Tillich. Un coefficient de 4 % est appliqué aux apports moyens des cours d'eau à leur entrée à la nappe (EL KAYSSI *et al.*, 2016). Ce coefficient est moins important que celui relatif aux précipitations du fait que les vitesses des eaux de crues sont plus élevées. Cette recharge est répartie tout le long des lits des oueds avec un volume calculé de 4,5 Mm³ (EL KAYSSI *et al.*, 2016).

Ainsi, à partir des valeurs de la recharge nette calculée, on a pu établir la répartition spatiale de ce paramètre. Dans la zone d'étude, on a défini deux classes de recharge nette montrant la variation spatiale de ce paramètre. Ensuite, la recharge a été divisée en deux intervalles : 5-10 et 10-15 en se basant sur la classification d'ALLER *et al.* (1987). La carte obtenue est illustrée dans la figure 6.

2.4.3 Milieu aquifère (*A*) et zone non saturée (*I*)

Pour décrire la nature lithologique de la zone saturée et non saturée de la nappe de Rich, nous avons compilé les données de 55 coupes lithologiques ayant traversés complètement la

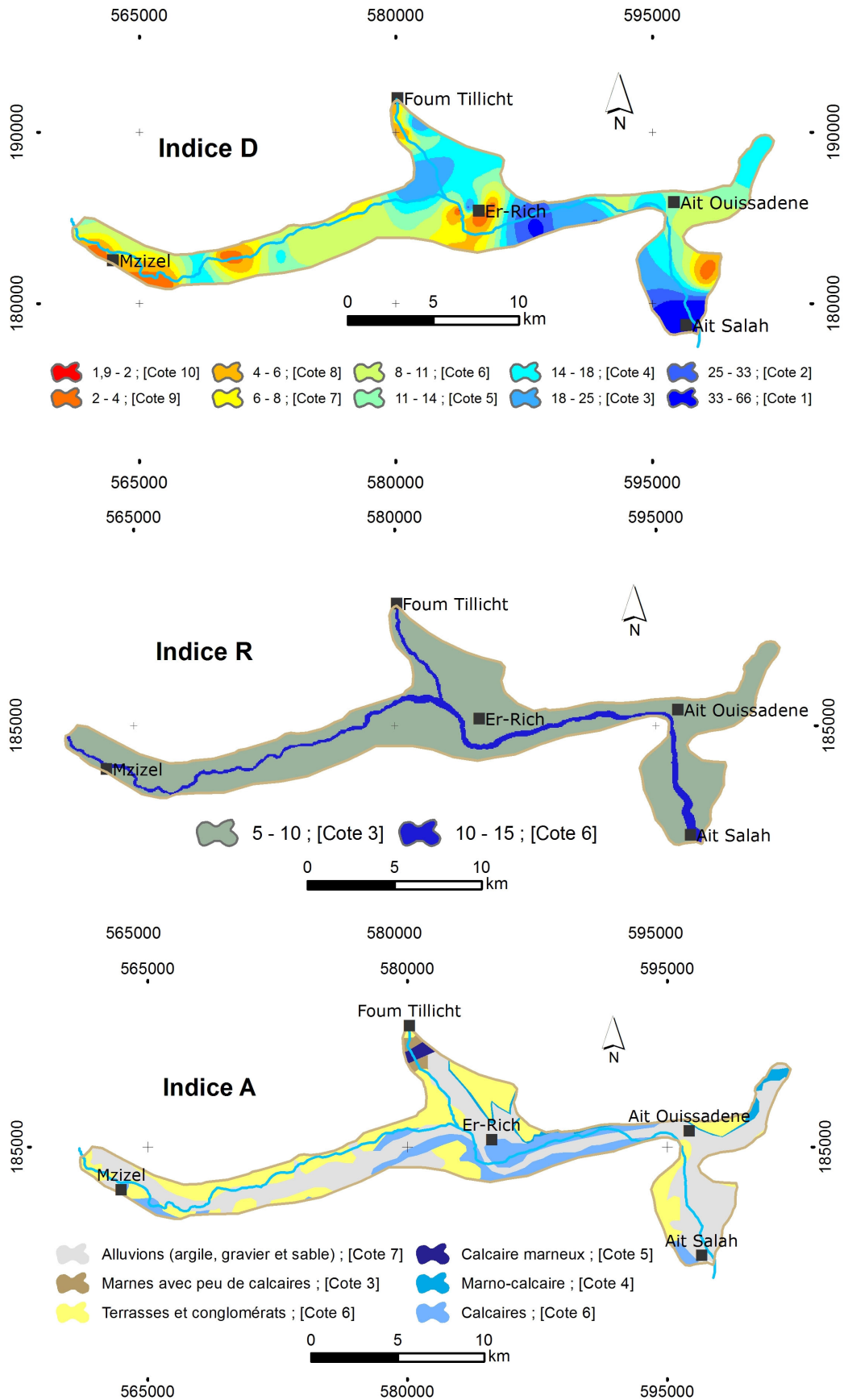


Figure 6. Facteurs de vulnérabilité de la nappe de Rich (Lambert Maroc zone 1). Indice *D* : profondeur de la nappe; *R* : recharge efficace; *A* : matériaux de l'aquifère.
Vulnerability factors of the Rich aquifer (Lambert Morocco zone 1). Parameter D: depth to groundwater; R: net recharge; A: aquifer media.

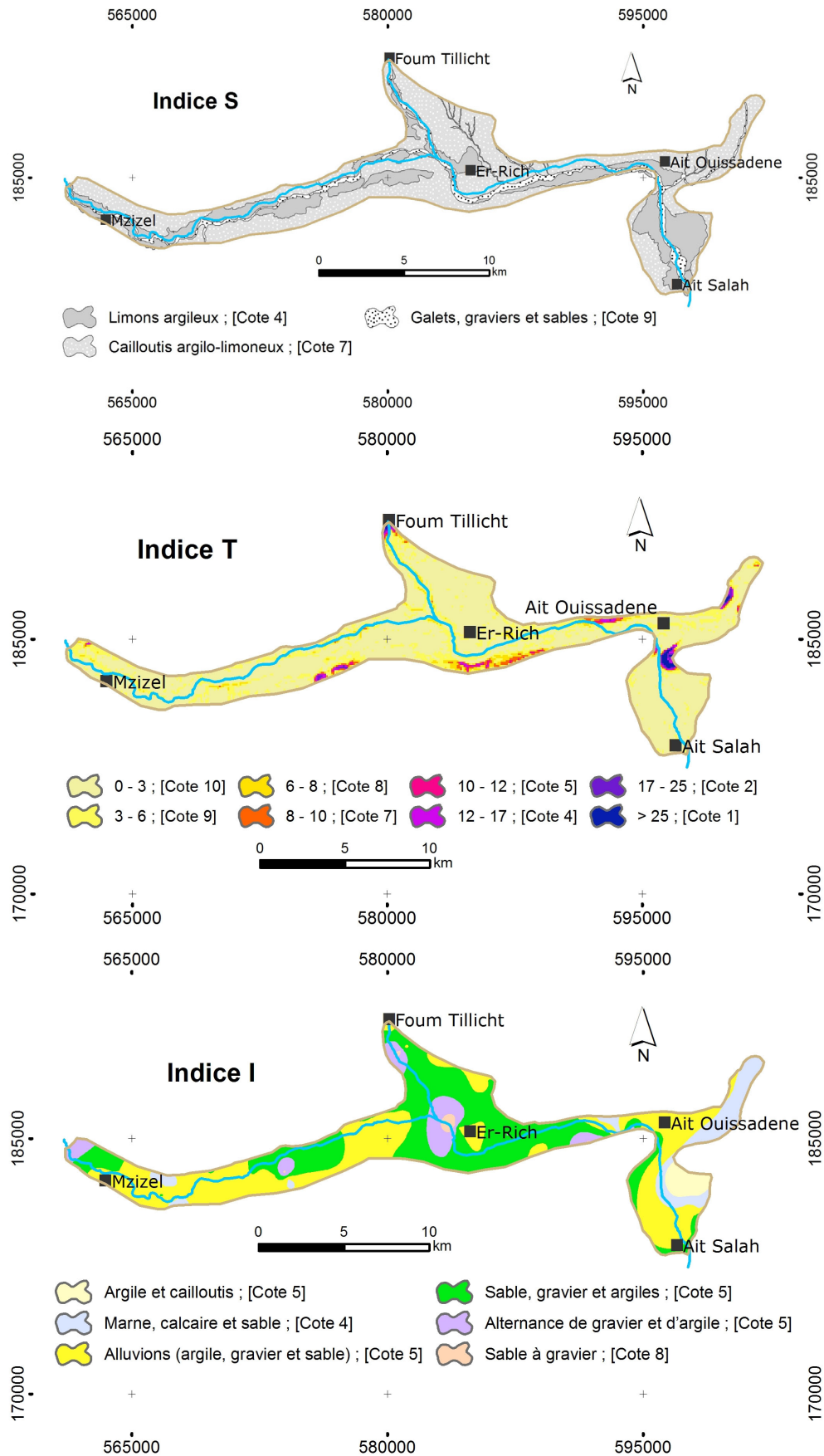


Figure 6. Facteurs de vulnérabilité de la nappe de Rich (Lambert Maroc zone 1). (suite) **Indice S** : type de sol; **T** : topographie ou pente; **I** : impact de la zone vadose ou aérée. (continued) *Vulnerability factors of the Rich aquifer (Lambert Morocco zone 1). Parameter S: soil media; T: general topography or slope; I: vadose zone.*

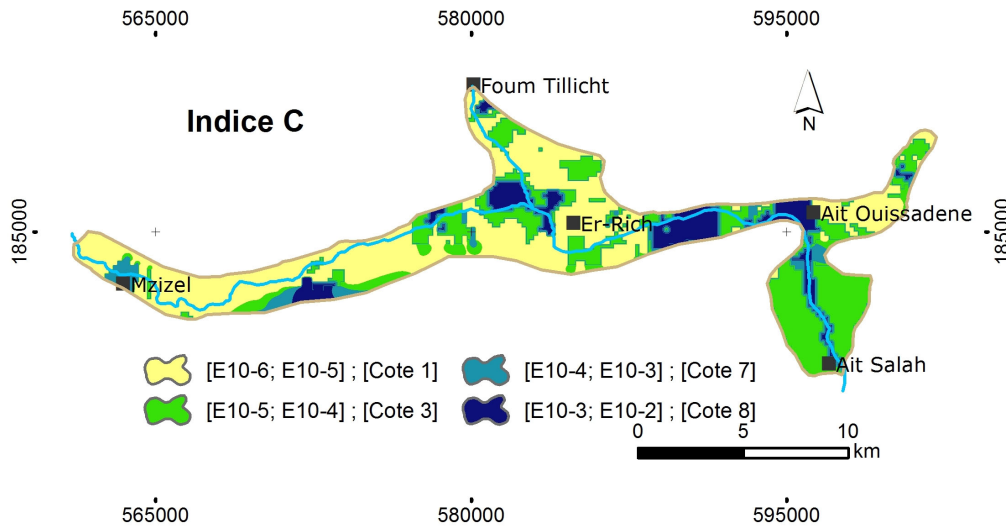


Figure 6. Facteurs de vulnérabilité de la nappe de Rich (Lambert Maroc zone 1). **Indice C :** (suite) perméabilité ou conductivité hydraulique de l'aquifère.
(continued) Vulnerability factors of the Rich aquifer (Lambert Morocco zone 1). **Parameter C:** hydraulic conductivity of the aquifer.

nappe, les feuilles géologiques couvrant la nappe et les coupes géologiques établies par AIT ADDI (2000) et EL KOCHRI (1996). Les profondeurs totales des forages sélectionnés varient entre 6 et 50 m. La distinction entre la zone saturée et non saturée a été faite en tenant compte du niveau de la nappe mesuré en 2012.

Devant le nombre important et la diversité des descriptions lithologiques retrouvées et pour des raisons de simplification, nous nous sommes limités à 13 faciès lithologiques principaux, groupés en trois classes majeures pour la zone non saturée et en cinq classes majeures pour la zone saturée. Ensuite, nous avons attribué à chaque faciès lithologique sa note correspondante. Le milieu aquifère (*A*) et la zone non saturée (*I*) ont été par la suite divisés chacun en six et en intervalles en se basant sur la classification d'ALLER *et al.* (1987). Les cartes correspondantes sont présentées à la figure 6.

2.4.4 Type de sol (*S*)

L'absence d'une carte du sol couvrant le périmètre de la nappe de Rich nous a permis de réfléchir sur d'autres moyens pour caractériser la pédologie locale. Cette réflexion est basée sur les données de 40 coupes lithologiques des sondages mécaniques disponibles, notamment la description du premier niveau traversé. Les informations acquises ont été compilées avec les données des feuilles géologiques de Rich et de Gourrama. L'information compilée a permis d'effectuer un zoning constitué de trois classes principales : classe 1 constituée de limons argileux, couvrants notamment les terres cultivables et les périmètres irrigués; classe 2 constituée de cailloutis argilolimoneux, couvrants les terres nues en bas des talus qui constituent les éboulis et les dépôts des cônes de déjections, et

classe 3 constituée essentiellement de matériaux alluvionnaires (galets, graviers et sables), il s'agit des lits des cours d'eau et leurs plaines alluviales immédiates. Ensuite, ces classes ont été reconverties en trois intervalles en se basant sur la classification d'ALLER *et al.* (1987). La carte obtenue est illustrée dans la figure 6.

2.4.5 Topographie (*T*)

La topographie affecte également l'infiltration à la surface du sol. Une pente forte favorise le ruissellement des eaux superficielles et par conséquent une faible contamination des eaux souterraines. Par contre, une pente faible a une tendance à retenir l'eau pendant une période longue et de ce fait, un plus grand potentiel de migration des contaminants vers la nappe sous-jacente. Les pentes de la nappe alluviale de Rich ont été calculées en utilisant un modèle numérique de terrain (MNT), extrait des données du Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), version 4, disponibles en téléchargement libre de droits (<http://srtm.csi.cgiar.org/>). Le calcul des pentes a été fait en utilisant l'outil slope de l'extension 3D Analyst d'ArcGis 10.1. Les pentes générées ont été ensuite réparties en huit classes (0-3, 3-6, 6-8, 8-10, 10-12, 12-17, 17-25, >25) en se basant sur la classification d'ALLER *et al.* (1987). Le résultat obtenu est représenté dans la figure 6.

2.4.6 Conductivité hydraulique (*C*)

La conductivité hydraulique d'un aquifère décrit la capacité d'un milieu aquifère (sol et roche) à transmettre de l'eau à travers des espaces de pores ou des fractures et joue un rôle important dans la vitesse et la dispersion de la migration des polluants. La conductivité hydraulique (*K*) de la nappe de Rich est déduite du modèle calé en permanent par EL KAYSSI

et al. (2016), qui représente le seul travail de ce genre dans la zone d'étude. Le calage du modèle a montré une hétérogénéité importante en termes de perméabilité conformément avec la lithologie du réservoir aquifère, allant des alluvions grossières jusqu'à des dépôts fluviolacustres marneux ou gréseux. Les perméabilités reconstituées par le modèle varient entre 10^{-6} et 10^{-2} m·s⁻¹. Ces valeurs sont ensuite subdivisées en quatre classes conformément à la classification d'ALLER *et al.* (1987). La carte obtenue est illustrée dans la figure 6.

2.4.7 Validation de la carte de vulnérabilité à la pollution par la conductivité électrique

En absence de données représentatives sur les concentrations des nitrates dans les eaux souterraines de la nappe de Rich (analyse irrégulière des eaux d'un seul puits), la carte de vulnérabilité obtenue est testée et validée par la conductivité électrique de 44 puits via un test de conformité, qui permet de vérifier la concordance des classes de vulnérabilité obtenues. Cette concordance a été établie par le calcul du coefficient de Kappa (K_c), qui est un coefficient destiné à mesurer l'accord entre deux variables qualitatives ayant les mêmes modalités (COHEN, 1960). Le coefficient Kappa se calcule en appliquant la formule ci-dessous :

$$K_c = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e} \quad (2)$$

où P_0 est la proportion d'accord observée et P_e est la proportion de cas où, selon la théorie des probabilités, on peut s'attendre à un accord simplement dû au hasard. Plus ce rapport est proche de 1, plus l'écart entre la proportion d'accords observée et la proportion théorique d'accords « aléatoires » se rapproche de l'écart entre l'accord parfait des deux observateurs et leur concordance aléatoire. Une échelle d'interprétation de Kappa a été proposée par BERNARD (1993). Elle détermine le taux d'accord en fonction de la valeur observée de Kappa (Tableau 3).

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Carte de vulnérabilité à la pollution selon DRASTIC standard

L'indice de vulnérabilité DRASTIC a été calculé après l'intégration des sept couches de données à l'aide d'un SIG, conformément à l'équation 1. Sur la base du tableau de coïncidence (Tableau 4), le coefficient de Kappa pour 44 échantillons, une proportion d'accord observée égale à 0,21 et une proportion théorique d'accord aléatoire égal à 0,24 a donné une valeur très faible de 0,006 pour la carte de vulnérabilité

Tableau 3. Échelle d'interprétation de Kappa (BERNARD, 1993).
Table 3. Kappa interpretation scale (BERNARD, 1993).

Valeurs observées de Kappa	Interprétation
<0	Accord quasi-inexistant
0-0,20	Faible accord
0,21-0,40	Accord passable
0,41-0,60	Accord modéré
0,61-0,80	Accord important
0,81-1,00	Accord presque parfait

DRASTIC. En se référant à l'échelle d'interprétation de Kappa (Tableau 3), il correspond à un accord faible pour les indices de vulnérabilités obtenus. Ce résultat s'apparente à celui obtenu par SAOUINI *et al.* (2014) dans la nappe de R'Mel au nord du Maroc ($K_c = 0,12$) dans un contexte différent et diffère à celui obtenu par UHAN *et al.* (2011) dans un contexte similaire (nappe alluviale à climat semi-aride) dans la basse vallée de Savinja en Slovénie ($K_c = 0,87$).

Les valeurs de vulnérabilité résultantes comprises entre 78 et 186 (Figure 7). Selon ALLER *et al.* (1987), cet intervalle a été subdivisé en sept classes de vulnérabilité : minimum (78-80), très faible (80-100), faible (100-120), moyennement faible (120-140), moyennement forte (140-160), forte (160-180) et très forte (180-186). Ces classes représentent le potentiel de pollution relatif à l'aire d'étude. En termes d'étendue, 2,8 % de la zone d'étude est classée comme ayant un minimum potentiel de pollution, 18,9 % sont classées comme ayant un potentiel de pollution très faible, 18,9 % sont classées comme ayant un potentiel de pollution faible, 18,9 % sont classées comme ayant un potentiel de pollution moyennement faible, 18,9 % sont classées comme ayant un potentiel de pollution moyennement forte, 17,9 % est classée comme ayant un potentiel de pollution forte et 3 % de la zone d'étude est classée comme ayant un potentiel de pollution très forte.

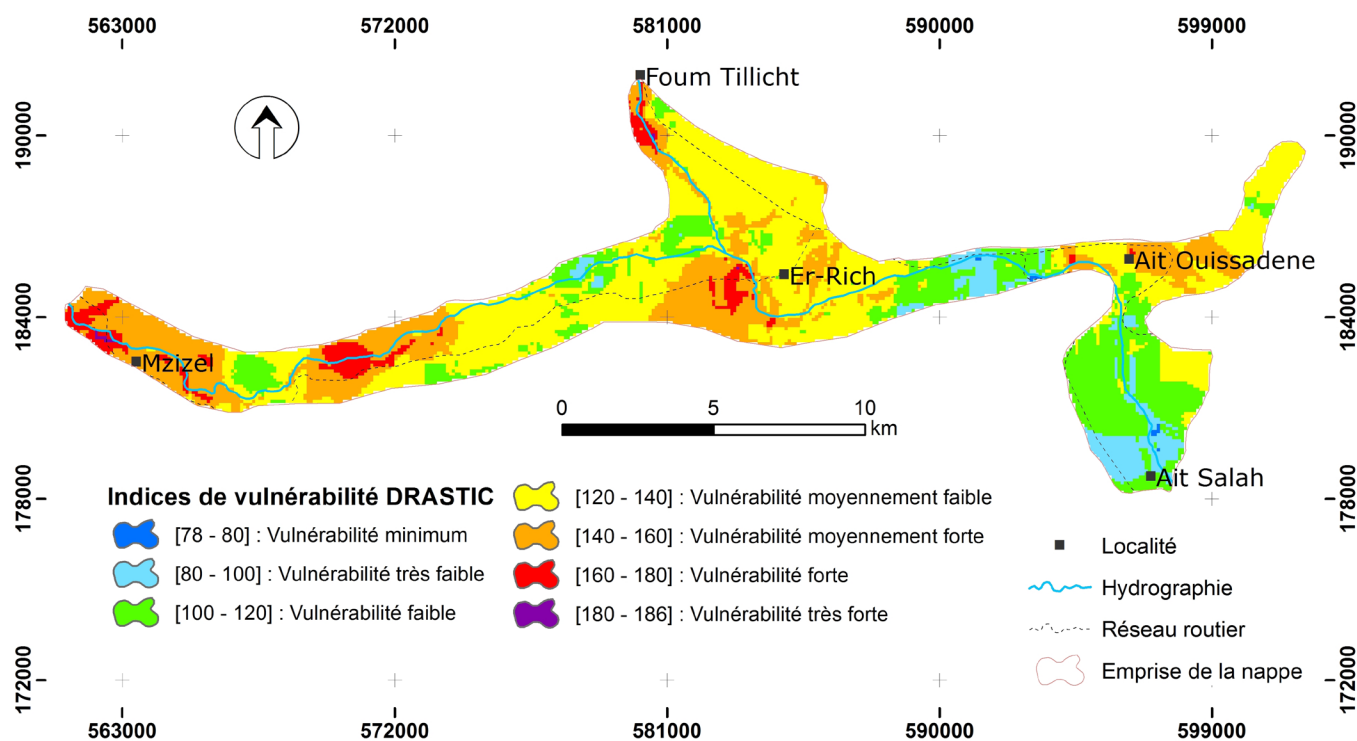
Les secteurs près du centre de Rich et à côté des localités Ait Ouissadène Foum Tillichet et M'Zizel présentent des zones de vulnérabilité moyennement fortes à fortes. Cependant, les parties centrales, est et sud présentent une vulnérabilité moyennement faible à faible.

En outre, la carte de vulnérabilité établie révèle que l'aquifère est situé sous un secteur agricole traditionnel inclus dans la catégorie de vulnérabilité moyenne à la pollution (périmètre de moyen hydraulique). Ainsi, l'ABHGZR (2011) a indiqué que la concentration de la conductivité électrique (CE) la plus élevée se situait hors périmètre irrigué (Figures 4 et 5), ce qui atteste que l'activité agricole n'est pas une source potentielle à la pollution dans la zone. Cette anomalie semble

Tableau 4. Coïncidence entre les valeurs de la conductivité électrique (CE) et les différentes classes de vulnérabilité des méthodes DRASTIC et PRK.

Table 4. Coincidence between electrical conductivity values and the vulnerability classes of the DRASTIC and PRK methods.

Degré de vulnérabilité		Nombre de points d'eau avec une conductivité électrique ($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)			
		CE < 750	CE [750-1 300]	CE [1 300-2 700]	CE [2 700-3 000]
DRASTIC	Minimum	0	0	0	0
	Très faible	2	3	2	1
	Faible	5	6	2	0
	Moyennement faible	2	6	3	0
	Moyennement forte	0	5	4	0
	Forte	1	3	1	0
	Très forte	0	0	0	0
PRK	Très faible	7	21	8	2
	Faible	1	2	4	1
	Moyenne	0	0	0	0
	Forte	0	1	0	0
	Très forte	0	0	0	0
	Extrême	0	2	1	0

Figure 7. Carte de vulnérabilité DRASTIC standard de la nappe de Rich, classification d'ALLER et al. (1987)
Standard DRASTIC vulnerability map of the Rich aquifer, classification of ALLER et al. (1987).

provenir d'une autre source de pollution que nous allons tenter à l'identifier dans ce qui suit.

3.2 Discussion

La cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale de Rich a permis d'obtenir trois grandes classes de vulnérabilité : une classe de vulnérabilité faible à très faible où la nappe semble être protégée, une classe de vulnérabilité moyenne où la nappe est sensible à une éventuelle pollution et une classe de vulnérabilité forte à très forte qui mérite une surveillance particulière. Ces caractéristiques n'excluent pas cependant une contamination de la nappe dans les zones à faible vulnérabilité, car un site avec un indice faible n'est pas protégé entièrement à une contamination, mais ce site est moins susceptible à la contamination par rapport à un autre site ayant un indice de vulnérabilité à la pollution élevé (OSBORN *et al.*, 1998).

Les scores élevés des paramètres DRASTIC, en particulier les scores élevés de la profondeur de l'eau, de la conductivité hydraulique et du milieu de l'aquifère sont responsables des zones à forte vulnérabilité. Par contre, les scores moyens à faibles sont le résultat de la combinaison de la zone vadose moins poreuse, de la profondeur de l'eau et de la conductivité hydraulique. En règle générale, l'indice DRASTIC augmente du sud vers le nord et le nord-ouest de la zone d'étude.

Les valeurs des indices DRASTIC obtenues ici varient de 78 à 186. Par comparaison avec les niveaux de vulnérabilité obtenus dans d'autres nappes similaires ayant des indices de vulnérabilité généralement moyennes, on peut positionner la nappe alluviale de Rich comme ayant aussi un niveau de vulnérabilité moyen. Par exemple, les indices de vulnérabilité obtenus ici (78 à 186) s'apparentent à celles obtenues par ALLOUCHE *et al.* (2017) à Sfax en Tunisie (37 à 168), par PACHECO *et al.* (2015) au niveau de la nappe alluviale de Tejo et Sado au Portugal (79 à 186) et par ABDESLAM *et al.* (2017) au niveau de l'aquifère alluvial de Morssot El Aouinet au nord-est de l'Algérie (75 à 153) qui montrent en général un niveau de vulnérabilité moyen.

Les tendances de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la nappe de Rich ont été testées par 44 mesures de la conductivité électrique (CE), dont les valeurs augmentent, globalement, du sud vers le nord et vers le nord-ouest, avec une bonne superposition entre les zones de faible conductivité électrique et les zones où l'indice DRASTIC est faible à moyennement faible (zones assurément bien protégées). Cependant, les autres zones de moyenne à forte vulnérabilité ne se superposent pas bien avec les conductivités électriques correspondantes, ce qui minimise éventuellement la fiabilité de la carte obtenue.

La faible relation entre la carte de la vulnérabilité et celle de la conductivité électrique pourrait être expliquée soit par la faible fiabilité de la carte obtenue (indice K faible), elle pourrait aussi être expliquée par l'influence d'autres facteurs sur la minéralisation des eaux souterraines. Par définition, la conductivité électrique est déterminée par la teneur en substances dissoutes, la charge ionique, la capacité d'ionisation, la mobilité et la température de l'eau. Par conséquent, elle renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau. On sait toutefois que, dans la grande majorité des eaux, le calcium et le magnésium contribuent le plus à la conductivité. En gros, 1 °GH (dureté) produit une conductivité de $30 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à une température de 20 °C (EAU DU MAROC, 2017).

À l'état naturel, les travaux de RODIER *et al.* (1996) ont montré que les teneurs en calcium dans les eaux souterraines pourraient être attribuées à la dissolution de la calcite ainsi que d'autres minéraux calciques tels que le gypse. Selon BREMOND et VUICHARD (1973), la teneur en magnésium dans les eaux souterraines dépend de la composition des roches sédimentaires, il provient de l'attaque par l'acide carbonique des roches magnésiennes et de la mise en solution du magnésium sous forme de carbonates et bicarbonates.

Cependant, à l'échelle de la zone d'étude, les travaux de NOUAYTI *et al.* (2015) ont montré que les teneurs en calcium et en magnésium dans les eaux de la nappe de Rich ont des concentrations inférieures aux valeurs maximales admissibles (NORME MAROCAINE DE QUALITÉ DES EAUX, 2002). Il semble donc raisonnable que la minéralisation des eaux de la nappe de Rich provienne d'autres sources génératrices, éventuellement anthropiques.

L'analyse de la carte de la conductivité électrique de Rich montre que les eaux souterraines sont faiblement à moyennement minéralisées, avec des valeurs supérieures à $2\,700 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Les puits présentant cette forte minéralisation sont localisés entre le centre de Rich et la localité d'Ait Ouissadène (Figure 4) et ponctuellement au droit des localités rurales de Fom Tillicht et de Mzizel.

En superposant la carte d'occupation du sol (Figure 5) et celle de la conductivité électrique (Figure 4) on peut remarquer facilement que les zones ayant les CE les plus élevées se coïncident avec la décharge de Rich et en aval de celle-ci, ce qui peut contribuer à une infiltration des lixiviats à travers la zone non saturée avant de rejoindre la nappe.

Selon l'ABHGZR (2016), aucune décharge contrôlée ou station d'épuration ne sont mises en place ou programmées au niveau du centre de Rich et les localités avoisinantes. Les rejets arrivent directement sur les cours d'eau sans traitement préalables.

Selon ce constat, il semble raisonnable que les rejets liquides et les déchets solides issus du centre de Rich et les localités avoisinantes soient les responsables de la minéralisation des eaux souterraines dans les endroits où il n'y a pas une bonne superposition entre la carte de la vulnérabilité et celle de la conductivité électrique.

L'utilisation d'une autre méthode de vulnérabilité à la pollution devient alors nécessaire, et ce afin de comparer et valider ces résultats. Pour ce faire nous avons exploité les travaux de DEKKAKI *et al.* (2016) sur la même nappe en utilisant la méthode de vulnérabilité (PRK). Le résultat montre que la classe de vulnérabilité dominante est très peu vulnérable avec 89 % de la superficie totale. Le reste de la nappe est partagé entre les classes suivantes : peu vulnérable, moyennement vulnérable, très vulnérable, fortement vulnérable et extrêmement vulnérable. Cette dernière est répartie très ponctuellement autour des localités de Ait Salah, Ait Ouissadene, Foul Tillicht et de Mzizel. La validation de cette carte par la même carte de la conductivité (Figure 4) a donné un indice K_c négatif -0,013 (accord quasi inexistant) et un taux de coïncidence légèrement plus faible (18 %) par rapport à celui obtenu pour DRASTIC (Tableau 4), ce qui valide notre conclusion sur la fiabilité de la carte obtenue et atteste que pour les deux méthodes utilisées (DRASTIC et PRK), la conductivité électrique de l'eau souterraine de la nappe de Rich ne reflète pas son état de pollution.

En plus de ce qui est discuté ci-dessus, la complexité dans la réalisation d'une carte de vulnérabilité à la pollution selon DRASTIC au niveau de la nappe de Rich est liée aussi aux sept facteurs hydrogéologiques de l'acronyme DRASTIC. La plupart des paramètres d'entrées comme la recharge, la conductivité hydraulique, la profondeur de la nappe, l'impact de la zone vadose, ont été produits par interpolation, tout en générant des valeurs dans des endroits où aucune donnée n'est connue ou n'existe, cette interpolation n'est fiable qu'à l'intérieur des intervalles délimités par les données ponctuelles (MATHERON, 1965, 1971).

La difficulté de l'application de la méthode DRASTIC provient aussi de la variété des sources de données de chaque couche d'entrée en modélisant la réalité de terrain de façon différente, ce qui les rend souvent incompatibles (WANG et HOWARTH, 1994). Ainsi cette difficulté provient aussi des limites des classes et les cotes qui sont assignées aux différents paramètres (MURAT *et al.* 2003). Les limites des classes standards ne reflètent pas souvent la réalité de la zone d'étude du fait que ces classes peuvent regrouper des entités différentes (WANG et HOWARTH, 1994). Dans ces conditions, l'agrégation des cotes n'est pas toujours identique à celle définie par la méthode DRASTIC de même que les indices de vulnérabilité. Les limites des différentes classes ne sont donc pas des valeurs absolues, mais relatives (BERNARD, 1993).

Ces limites peuvent alors varier d'une étude à une autre comme d'une région à une autre.

4. CONCLUSION

L'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines est devenue actuellement un outil efficace de gestion durable des ressources en eaux souterraines dans le monde. Dans cette étude, la méthode DRASTIC standard a été évaluée au niveau de la nappe alluviale de Rich et comparée avec la méthode PRK. L'efficacité de DRASTIC a été évaluée quantitativement à l'aide de l'indice statistique de Kappa en quantifiant le niveau de concordance entre les classes de vulnérabilité obtenues et les valeurs de la conductivité électrique des eaux souterraines mesurées. Les résultats montrent que les scores élevés des paramètres DRASTIC, en particulier les scores élevés de la profondeur de l'eau, de la conductivité hydraulique et du milieu de l'aquifère sont responsables de la zone de forte vulnérabilité. Par contre, les scores moyens à faibles sont le résultat de la combinaison de la zone vadose moins poreuse, de la profondeur de l'eau et de la conductivité hydraulique.

L'intégration de cette carte de vulnérabilité dans un SIG permet de cartographier les zones à risques et d'identifier les secteurs à hiérarchiser en termes de surveillance des eaux souterraines et d'occupation du sol. Les efforts visant à appliquer la méthode proposée ici déboucheront sur une approche rentable pour protéger la source d'approvisionnement en eau du centre de Rich et les localités avoisinantes et atteindre la durabilité des eaux souterraines souhaitée pour les générations futures. L'étude peut également être mise à jour par l'utilisation d'un autre indicateur de pollution autre que la CE, elle peut être mise à jour par intégration d'une masse de données plus importante pour avoir des résultats plus fiables qui peuvent être utilisés comme un outil permettant de sensibiliser davantage les services publics concernés par les eaux souterraines dans la région.

Enfin, la superposition de la carte de vulnérabilité DRASTIC et la carte d'occupation du sol (Figures 5 et 7) nous a permis de définir les degrés de risque suivants :

1. Zones à haut risque : outre le degré de vulnérabilité élevé, ces zones sont caractérisées par une forte densité de la population et des activités anthropiques intensives sous forme de cultures permanentes irriguées, des carrières et des décharges publiques non contrôlées. Ces caractéristiques peuvent contribuer à la modification de la qualité des eaux souterraines. Ces zones sont principalement situées autour des zones urbaines, rurales et dans certains secteurs agricoles et couvrent 21,3 % de la zone d'étude.

2. Zones à risque modéré : elles se caractérisent par un degré de vulnérabilité moyen et un développement limité des cultures permanentes et des activités anthropiques. Ces zones représentent près de 45,5 % de la zone d'étude.
3. Zones à faible risque : elles sont classées par degré de vulnérabilité faible et sont essentiellement occupées par des cultures en sec, des parcours et des terrains nus qui ne couvrent que 33,2 % de la zone d'étude.

Cependant, aucune action de prévention de la pollution n'a été lancée jusqu'à ce jour par les autorités compétentes, notamment dans les endroits les plus vulnérables au droit du centre de Rich et les autres centres ruraux avoisinants (M'Zizel Foum Tillicht et Ait Ouissadene).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient plus particulièrement la direction de l'Agence du Bassin Hydraulique de Guir-Ziz-Rhéis pour son aide documentaire précieuse et sa disponibilité.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDESLAM I., C. FEHDI et L. DJABRI (2017). Application of drastic method for determining the vulnerability of an alluvial aquifer: Morsott-El Aouinet Northeast of Algeria: using ArcGIS environment. *Energy Procedia*, 119, 308-317.
- AGENCE DE BASSIN HYDRAULIQUE DE GUIR-ZIZ-RHÉRI (ABHGZR) (2011). *Actualisation du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau des bassins de Guir - Ghris - Ziz et Maider. Phase 1 : provinces Er-Rachidia, Ouarzazate, Zagora et Figuig. Mission 1 : évaluation des ressources en eau*. ABHGZR, Rapport technique, Maroc, 114 p.
- AGENCE DE BASSIN HYDRAULIQUE DE GUIR-ZIZ-RHÉRI (ABHGZR) (2016). *Élaboration des monographies des ressources en eau des provinces et des communes relevant de la zone d'action de l'Agence du Bassin Hydraulique du Guir-Ziz-Rhéis - Ville de Rich, Mission 2*. ABHGZR, Rapport technique, Maroc, 53 p.
- AIT ADDI A. (1998). Nouvelles données sédimentologiques et géodynamiques sur les faciès de l'Aalénien-Bajocien inférieur du Haut Atlas marocain (Nord d'Errachidia). *Comptes rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA, Earth Planet. Sci.*, 326, 193-200.
- AIT ADDI A. (2000). Les séries du Dogger du Haut Atlas au nord d'Errachidia : sédimentologie et lithostratigraphie d'une nouvelle formation : la formation Tazigzaout. *Géol. Méditerran.*, 27, 57-69.
- ALBINET M. et J. MARGAT (1970). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bull. BRGM*, 2^e série, 3, 13-22.
- ALBINET M et J. MARGAT (1975). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Dans : *Moscou symposium 1971. Groundwater pollution*. IAHS-AISH Publication, N° 103, Royaume-Uni, pp. 58-70.
- ALLER L., T. BENNETT, J.H. LEHR, R.J. PERRY et G. HACKETT (1987). *DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings*. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, EPA/600/2-87/035, Washington (DC), États-Unis, 455 p.
- ALLOUCHE N., M. MAANAN, M. GONTARA, N. ROLLO, I. JMAL et S. BOURI (2017). A global risk approach to assessing groundwater vulnerability. *Environ. Model. Softw.*, 88, 168-182.
- ANANE M., B. ABIDI, F. LACHAAL, A. LIMAM et S. JELLALI (2013). GIS-based DRASTIC, pesticide DRASTIC and the susceptibility index (SI): comparative study for evaluation of pollution potential in the Nabeul-Hammamet shallow aquifer, Tunisia. *Hydrogeol. J.*, 21, 715-731.
- ANDERSON M.P. et W.W. WOESSNER (1992). The role of the postaudit in model validation. *Adv. Water Resour.*, 15, 167-173.
- BAALI F., A. ROUABHIA, N. KHERICI, L. DJABRI, L. BOUCHAOU et A. HANI (2007). Qualité des eaux souterraines et risque de pollution en milieu semi-aride. Cas de la cuvette de Chéria (NE Algérien). *Estudios Geológicos*, 63, 127-133.

- BENTEKHICI N., Y. BENKESMIA, F. BERRICHI et S. BELLAL (2018). Évaluation des risques de la pollution des eaux et vulnérabilité de la nappe alluviale à l'aide des données spatiales. Cas de la plaine de Sidi Bel Abbès (Nord-Ouest Algérien). *J. Water Sci.*, 31, 43-59.
- BREMOND R. et R. VUICHARD (1973). *Paramètres de la qualité des eaux*. Ministère de l'Écologie et du Développement durable (MEDD), Documentation française, Paris, France, 179 p.
- BERNARD P. (1993). *Théorie et application du coefficient de Kappa de Cohen*. Thèse de doctorat, Univ. Laval, Canada, 275 p.
- COHEN J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educ. Psychol. Meas.*, 20, 37-46.
- DEKKAKI H.C., Y. EL KAYSSI, M. HILALI, I. KACIMI et H. SAHBI (2016). Évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution moyennant la méthode P.R.K. : application à la nappe phréatique du Rich (Sud du Maroc). *Int. J. Innov. Appl. Stud.*, 14, 917-926.
- EAU DU MAROC (2017). Tranches de facturation et tarifs d'eau potable à Casablanca. <http://www.eaumaroc.com> (consultation le 18 septembre 2018).
- EL KAYSSI Y., M. HILALI et I. KACIMI (2016). Modélisation hydrodynamique de la nappe alluviale de Rich (Haut Atlas central, Maroc). *Int. J. Innov. Appl. Stud.*, 14, 758-767.
- EL KOCHRI A. (1996). *Géométrie et mécanismes de la déformation du Haut Atlas centro-oriental (Maroc)*. Thèse de doctorat, Univ. Mohammed V de Rabat, Maroc, 212 p.
- GHAZAVIR. et Z. EBRAHIMI (2015). Assessing groundwater vulnerability to contamination in an arid environment using DRASTIC and GOD models. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 12, 2909-2918.
- GOGU R.C. et A. DASSARGUES (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environ. Geol.*, 39, 549-559.
- HAMZA M.H., A. ADDED, A. FRANCES et R. RODRIGUEZ (2007). Validity of the vulnerability methods DRASTIC, SINTACS and SI applied to the study of nitrate pollution in the phreatic aquifer of Metline-Ras Jebel-Raf Raf. *CR Geosci.*, 339, 493-505.
- HAMZAM.H., A. ADDED, A. FRANCÈS, R. RODRIGUEZ, M. AJMI et S. ABDELJAOUED (2008). Évaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle de la nappe côtière alluvionnaire de Meltine-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-Est tunisien) selon les méthodes paramétriques DRASTIC, SINTACS et SI. *J. Water Sci.*, 21, 75-86.
- KHOSRAVI K., M. SARTAJ, F.T.C. TSAI, V.P. SINGH, N. KAZAKIS, A.M. MELESSE, I. PRAKASH, D.T. BUI et B.T. PHAM (2018). A comparison study of DRASTIC methods with various objective methods for groundwater vulnerability assessment. *Sci. Total Environ.*, 642, 1032-1049.
- LALLEMAND-BARRES A. (1994). *Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions*. Étude documentaire préliminaire. Rapport BRGM R37928, Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), Ministère de l'Environnement, Direction de l'Eau, Orléans, France, 22 p.
- LAVILLE E., J.L. LESAGE et M. SEGURET (1977). Géométrie, cinématique (dynamique) de la tectonique atlasique sur le versant sud du Haut Atlas marocain. Aperçu sur les tectoniques hercyniennes et tardi-hercyniennes. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 7, 527-539.
- LU G.Y. et D.W. WONG (2008). An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Comput. Geosci.*, 34, 1044-1055.
- NORME MAROCAINE DE QUALITÉ DES EAUX (2002). *Arrêté conjoint du ministre de l'équipement et du ministre chargé de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, de l'habitat et de l'environnement n° 1277-01 du 10 chaabane 1423 (17 octobre 2002) portant fixation des normes de qualité des eaux superficielles utilisées pour la production de l'eau potable*. Bulletin Officiel N° 5062, 30 ramadan 1423 (5 décembre 2002), Maroc, 4 p.
- MARGAT J. (1952). *Le Haut Atlas calcaire (hydrogéologie du Maroc - Chap. VI-2)*. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, 97, 254-262.
- MATHERON G. (1965). *Les variables régionalisées et leur estimation : une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature*. Masson, Paris, France, 305 p.
- MATHERON G. (1971). *The theory of regionalized variables and its applications*. Les cahiers du Centre de morphologie mathématique de Fontainebleau. Vol. 5, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 211 p.

- MOHAMMAD A.H. (2017). Assessing the groundwater vulnerability in the upper aquifers of Zarqa River Basin, Jordan using DRASTIC, SINTACS and GOD methods. *Int. J. Water Resour. Environ. Eng.*, 9, 44-53.
- MOHAMMADI K., R. NIKNAM et V.J. MAJD (2009). Aquifer vulnerability assessment using GIS and fuzzy system: a case study in Tehran-Karaj aquifer, Iran. *Environ. Geol.*, 58, 437-446.
- MURAT V., D. PARADIS, M.M. SAVARD, M. NASTEV, E. BOURQUE., A. HAMEL, R. LEFEBVRE et R. MARTEL (2003). *Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD*. Commission géologique du Canada, Ressources naturelles Canada, Ottawa, Canada, 16 p.
- NOUAYTI N., D. KHATTACH et M. HILALI (2015). Évaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc). *J. Mater. Environ. Sci.*, 6, 1068-1081.
- OFFICE RÉGIONAL DE MISE EN VALEUR AGRICOLE DE TAFILALET (ORMVAT) (2015). *Monographie des CMV de la zone d'action de l'ORMVA du Tafilalet*. Rapport technique, Errachidia, Maroc, 148 p.
- OSBORN N.I., E. ECKENSTEIN et K.Q. KOON (1998). *Vulnerability assessment of twelve major aquifers in Oklahoma*. Oklahoma Water Resources Board, Technical Report 98-5, Oklahoma City (OK), États-Unis, 29 p.
- PACHECO F.A.L., L.M.G.R. PIRES, R.M.B. SANTOS et L.S. FERNANDES (2015). Factor weighting in DRASTIC modeling. *Sci. Total Environ.*, 505, 474-486.
- ROBINS N., B. ADAMS, S. FOSTER et R. PALMER (1996). Groundwater vulnerability mapping: the British perspective. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 1, 33-9A.
- RODIER J., C. BAZIN, J.P. BROUTIN, P. CHAMBON, H. CHAMPSAUR et L. RODI (1996). *L'analyse de l'eau*. 8^e édition, Dunod, Paris, France, 152 p.
- SAOUINI H. E., M. AMHARREF et A.S. BERNOUSSI (2014). Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : statique ou dynamique ? Application à la nappe de R'Mel (Maroc). *Int. J. Innov. Appl. Stud.*, 6, 929-940.
- SINAN M. et M. RAZACK (2009). An extension to the DRASTIC model to assess groundwater vulnerability to pollution: application to the Haouz aquifer of Marrakech (Morocco). *Environ. Geol.*, 57, 349-363.
- STIGTER T.Y., L. RIBEIRO et A.C. DILL (2006). Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeol. J.*, 14, 79-99.
- UHAN J., G. VIŽINTIN et J. PEZDIČ (2011). Groundwater nitrate vulnerability assessment in alluvial aquifer using process-based models and weights-of-evidence method: Lower Savinja Valley case study (Slovenia). *Environ. Earth Sci.*, 64, 97-105.
- WANG M. et P.J. HOWARTH (1994). Multi-source spatial data integration: problems and some solutions. *Can. J. Remote Sens.*, 20, 360-367.