
Étude de la vulnérabilité à la pollution du système phréatique du sahel de Sfax par les outils SIG

Nadia Trabelsi, Imen Hentati, Ibtissem Triki, Moncef Zairi

*Laboratoire « Eau, énergie et environnement », École nationale d'ingénieurs
de Sfax, route Soukra, BP 1173, 3038 Sfax. Tunisie*

RÉSUMÉ. Le système phréatique du sahel de Sfax (Tunisie) constitue une source importante d'approvisionnement. Ces eaux ne cessent d'être menacées par la pollution nitrique. Dans le but de protéger cet aquifère, une étude de la vulnérabilité intrinsèque a été effectuée. Pour cela on a eu recours à l'utilisation de la méthode SI (Susceptibility Index) qui prend en considération les différents critères de vulnérabilités, régissant le processus de transfert de contaminants. Il s'agit des facteurs géologiques, hydrogéologiques, d'occupation du sol, de la topographie, ainsi que de la météorologie. Dans la présente étude, une modification de la méthode SI a été faite. Une méthode dérivée du modèle SI est présentée (SI modifié). Elle repose sur une démarche qui intègre la modélisation hydrologique sous Agriflux et les SIG. Le divers recours aux SIG a permis l'exécution des différentes opérations de calcul de débits, la création de bases de données ainsi que la cartographie des paramètres influençant la vulnérabilité. L'analyse de la carte de vulnérabilité a permis de distinguer trois zones de degrés de vulnérabilité différents allant du faible au très vulnérable. Les indices SI standard et SI modifié sont combinés, les deux indices de vulnérabilité sont mis en perspective et la pertinence des paramètres utilisés pour chacun est discutée. La cohérence des indices est comparée avec l'occurrence des nitrates dans la plaine de Sfax. La nouvelle carte a permis d'obtenir une meilleure corrélation entre les concentrations en nitrates mesurées et les zones vulnérables par rapport à la méthode originale.

ABSTRACT. The Sfax phreatic system is an important source of water supply. The latter is constantly threatened by nitric pollution. In order to protect this aquifer, a study of the intrinsic vulnerability has been carried out using the SI (Susceptibility Index) method. The model takes into consideration the various vulnerability criteria governing the process of contaminant transfer. These are geological, hydrogeological, land use, topography, and meteorological factors. In this study, a method derived from the SI model is presented (modified SI). The model is based on an approach that integrates hydrological modeling under Agriflux and GIS. Indeed, the use of GIS allowed the execution of various operations of flow calculation, the creation of databases as well as the mapping of the different parameters influencing the vulnerability. The vulnerability map analysis identified three areas of varying degrees of vulnerability ranging from weak to very vulnerable. The standard SI and modified SI indices are combined, the two vulnerability indices are put into perspective and the relevance of the parameters used for each has been discussed. The consistency of the indices has been compared with the occurrence of nitrates in the plain of

Sfax. The new map has achieved a better correlation between the nitrates concentrations measured and vulnerable zones compared with the original method.

MOTS-CLÉS : SIG, vulnérabilité des aquifères, méthode SI, modélisation hydrologique.

KEYWORDS: GIS, aquifer vulnerability, SI method, hydrological modeling.

DOI: 10.3166/rig.2019.00087 © 2019 Lavoisier

1. Introduction

La pollution des ressources hydriques, résultant essentiellement de l'intensification des activités agricoles et industrielles, est un problème majeur. Dans la mesure où l'eau représente un facteur clé du développement durable (Dottridge, 1998 ; Heathcote, 1983), une politique de gestion ainsi qu'une prévision de sa contamination sont essentielles. La meilleure approche pour la protection d'un aquifère à l'échelle régionale est d'utiliser des outils préventifs à sa contamination. Cette action est d'autant plus utile que la décontamination des nappes d'eaux souterraines polluées (Albinet et Margat, 1970). Ainsi l'étude et l'évaluation de la vulnérabilité des nappes permettent de répondre à ce besoin.

La vulnérabilité exprime le caractère de ce qui est vulnérable, donnée comme synonyme de fragilité (Dutheil-Warolin, 2004). C'est un état de moindre résistance aux nuisances et aux agressions (Ollierou et Quantinet, 2004).

Le terme vulnérabilité a été introduit dans le domaine d'hydrogéologie par Albinet et Margat (1970) en France et de plus en plus utilisé dans les années 1980 (Haertle, 1983 ; Aller *et al.*, 1987). Pour les hydrogéologues, la vulnérabilité des eaux est liée à la notion de contamination. Ce concept devrait refléter la facilité avec laquelle un système aquifère transforme une pression (en amont) en un impact (en aval) (Popescu *et al.*, 2008). La vulnérabilité décrit le degré de protection que procure le milieu physique en relation de la ressource en eau vis-à-vis des polluants (Bézègues *et al.*, 2002). D'après Aït Sliman *et al.* (2009) l'évaluation de la vulnérabilité consiste à une estimation de la sensibilité de la ressource à toute forme de polluant introduit à partir de la surface du sol en se basant sur les propriétés physiques du milieu.

Dans la littérature, différentes approches d'évaluation de la vulnérabilité aux contaminations sont proposées (Liggett et Talwar, 2009 ; Tesoriero *et al.*, 1998). Parmi ces dernières figurent les méthodes paramétriques, considérées comme les plus pertinentes vis-à-vis des réalités des terrains (Gogu et Dassargues, 2000 ; Vrba et Zaporozec, 1994). Le principe de ces systèmes consiste à sélectionner les paramètres sur lesquels se base l'évaluation de la vulnérabilité. Chaque paramètre est subdivisé en intervalles de valeurs significatives et est affecté d'une note croissante, en fonction de son importance dans la vulnérabilité (Mimou et Graillot, 2010).

On obtient comme résultat une représentation spatiale 2-D du degré de vulnérabilité d'un aquifère donné à une contamination potentielle, basée sur les attributs de celui-ci (Ducommun, 2010).

L'application de ces méthodes montre la diversité et le nombre important de données à gérer et nécessite de longues opérations de calculs. Pour cela, le recours à l'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) s'avère indispensable. Ces derniers, comme tous les domaines à forte composante de haute technologie, constituent un secteur d'activité en très forte expansion (Tuffery, 1993). Ils représentent la synthèse des progrès réalisés dans le traitement numérique de l'information géographique, puisqu'ils permettent de replacer dans un cadre cohérent les données géoréférencées, de les analyser et de les cartographier (Denègre, 1992). Ces outils offrent l'avantage de stocker et utiliser des données multisources (Awawdeh *et al.*, 2013). Ils constituent un puissant outil d'analyse de toutes variations spatiales (Manap *et al.*, 2013).

Durant ces dernières années, on observe un accroissement du nombre d'études environnementales, utilisant la synergie SIG-vulnérabilité. En effet plusieurs auteurs ont eu recours à cette approche pour l'élaboration d'outils méthodologiques d'évaluation de la vulnérabilité (Manche, 1997 ; Hrkal, 2001 ; Montz et Evans, 2001 ; Thirumalaivasan *et al.*, 2003 ; Dixon, 2005 ; Szlafszstein et Sterr, 2007 ; Nobre *et al.*, 2007 ; Carreras *et al.*, 2015 ; Trabelsi *et al.*, 2016 ; Mondal *et al.*, 2018 ; Motevalli *et al.*, 2018 ; Subzar et Shukla, 2019 ; Ramakrishna *et al.*, 2019, Marjuanto *et al.*, 2019, etc.).

Propeck-Zimmermann et Saint Gerand (2001) définit les cartes comme un outil indispensable à la gestion du risque, parce qu'elles permettent de le matérialiser, de rendre visible l'invisible. Elles constituent la méthode d'expression et de diffusion des informations la plus commode vis-à-vis diverses catégories d'utilisateurs (Albinet et Margat (1970). Elles permettent aussi de représenter une multitude de données en provenance de sources variées, en les modulant en un nombre limité d'indices relatifs de vulnérabilité (Ducommun, 2010). C'est dans ce contexte qu'une cartographie de la vulnérabilité des eaux du sahel de Sfax s'avère intéressante.

Le secteur d'étude fait partie de la Tunisie orientale, situé entre les latitudes 35°40 et 34°10 Nord et les longitudes 9°33 et 11°10 Est (figure 1). Cette région, s'étend sur une superficie de 8 000 km². Elle montre une topographie monotone avec des altitudes qui dépassent rarement les 200 m (Ghribi, 2010). Comme la majorité des zones arides, le sahel de Sfax fait face d'une part, à l'accroissement des demandes lié à la démographie et au développement socio-économique et, d'autre part, à l'accentuation de la sécheresse ces dernières décennies. À cette dégradation quantitative s'ajoute une dégradation qualitative. Les rejets industriels et domestiques et l'intrusion marine sont des sources principales de pollution des eaux phréatiques du secteur d'étude. Il est donc essentiel d'évaluer la vulnérabilité de l'aquifère et de trouver le moyen de gérer cette ressource pour en assurer la durabilité. Ceci passe par la cartographie des zones du système phréatique susceptibles d'être contaminées par des polluants que l'on qualifiera de vulnérables.

L'objectif de ce travail est de développer une plate-forme système d'information géographique (SIG) permettant une évaluation de la vulnérabilité des eaux du système phréatique du sahel de Sfax. Cet article porte sur une innovation méthodologique qui consiste à croiser différentes approches. La démarche adoptée permet d'utiliser

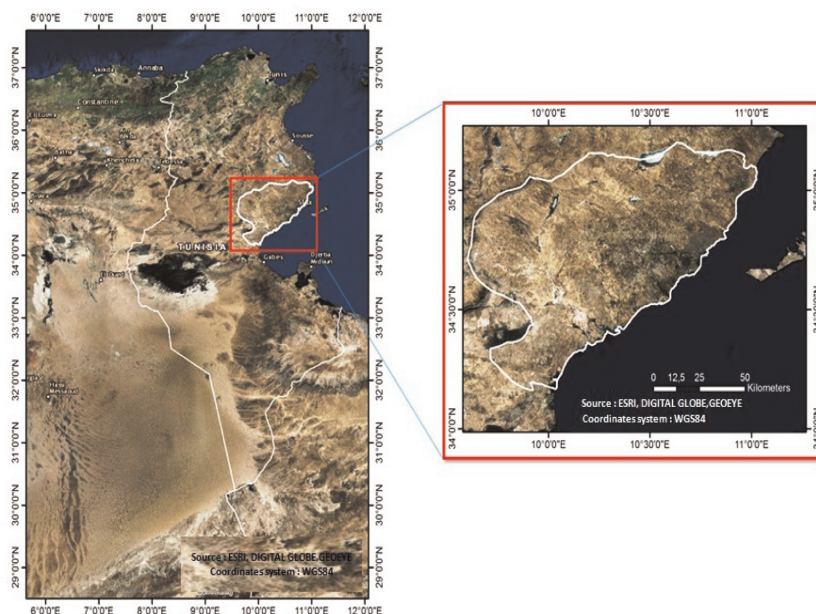


Figure 1. Localisation géographique du secteur d'étude

conjointement la modélisation hydrologique, les techniques d'analyse spatiale et de cartographie ainsi que les modèles paramétriques.

2. Méthodologie

2.1. Présentation de la méthode SI

La méthode SI (*Susceptibility Index* ou méthode d'indice de susceptibilité) couplée à un SIG est appliquée. Elle estime la vulnérabilité verticale spécifique à la pollution agricole (essentiellement par les nitrates et également par les pesticides), développée au Portugal par Ribeiro (2000). Le modèle SI utilise un système de cotation numérique. Il prend en compte la majeure partie des facteurs hydrogéologiques affectant et contrôlant l'infiltration de l'eau de pluie ou de surface et l'écoulement des eaux souterraines, c'est-à-dire les propriétés physiques qui ont un rôle dans la migration et l'atténuation d'un contaminant au sein du complexe zone non saturée/aquifère. Il s'agit des paramètres suivants: la profondeur de la nappe, la recharge de l'aquifère, la lithologie de l'aquifère, et la pente topographique du terrain. Un cinquième paramètre a été introduit : le paramètre occupation des sols (OS).

Chaque paramètre est agencé en classes associées à des cotes variant de 0 à 100. Les faibles cotes représentent les conditions de plus faible vulnérabilité à la pollution. Une

valeur numérique, appelée poids paramétrique (tableau 1) est ensuite attribuée à chaque paramètre, reflétant son degré d'influence.

Les valeurs de l'indice de la vulnérabilité hydrogéologique de l'aquifère sont alors

Tableau 1. Poids attribués aux paramètres SI (Ribeiro, 2000)

Paramètres	Profondeur du plan d'eau (D)	Recharge (R)	Lithologie de l'aquifère (A)	Pente (T)	Occupation des sols (OS)
Poids	0,186	0,212	0,259	0,121	0,222

calculées en faisant la somme des produits des cotes par les poids des paramètres correspondants selon l'équation suivante (1) :

$$SI = Dp * Dc + Rp * Rc + Ap * Ac + Tp * Tc + OSp * OSc \quad (1)$$

Où D, R, A, T, et OS sont les cinq paramètres de la méthode SI, p étant les poids du paramètre et c, la note associée.

Ces valeurs sont ensuite classées en quatre classes permettant de définir 4 degré de vulnérabilité: faible, moyen, élevé et très élevé (tableau 2).

Selon El Garouani et Merzouk (2006), la cartographie de la vulnérabilité comprend toutes les techniques nécessaires pour recueillir, documenter, interpréter et représenter l'information sous forme graphique, dans le but d'arriver à une compréhension globale du fonctionnement des systèmes hydrologiques.

Ces définitions précitées résument bien notre méthodologie de travail, qui s'appuie sur quatre étapes (figure 2) :

Tableau 2. Classes de vulnérabilité dans la méthode SI (Ribeiro, 2000)

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	< 45
Moyen	45-64
Élevé	65-84
Très élevé	85-100

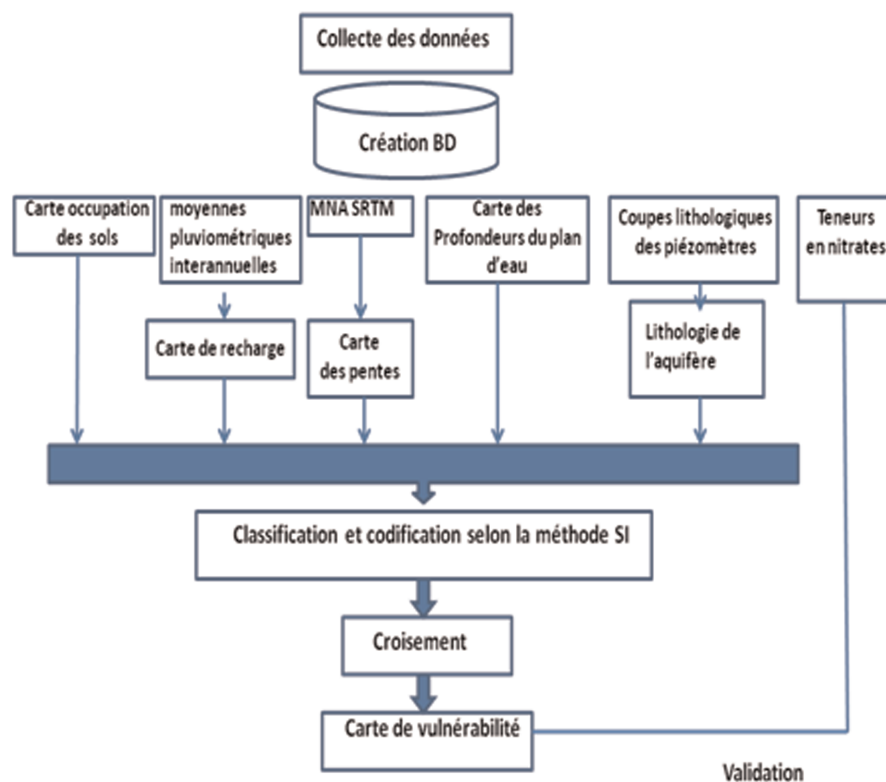


Figure 2. Méthodologie adoptée pour la cartographie de la vulnérabilité

– acquisition des données : la qualité d’une carte de vulnérabilité dépend principalement de la disponibilité et la qualité des données. Ainsi une compilation des informations a été faite. Il s’agit de données bibliographiques : travaux universitaires (thèses, articles) et rapports administratifs des acteurs de la gestion de la ressource en eau (Commissariat régional au développement agricole de Sfax-CRDA, direction générale des ressources en eau-DGRE, etc.) ; de travaux de terrain (campagne d’échantillonnage) et de laboratoire (analyses physico-chimiques des eaux échantillonnées).

– création d’un système d’information géographique (SIG) : en raison de la masse très importante des données, le recours aux SIG est essentiel (Sinan, 2003). Les données peuvent être très variées et les informations spatiales et temporelles saisies portent sur les aspects suivants : l’hydrologie, la géologie, le climat, la pédologie, l’occupation des sols ainsi que la qualité des eaux souterraines. L’ensemble de ces données a permis de constituer une base de données géo-référencée. Le recours au SIG facilite le traitement et la manipulation de ces différentes données spatiales (Archambault et Bédard, 1990) ;

– analyse géographique : les SIG disposent de nombreux puissants outils d’analyse, on peut citer : l’analyse de proximité et l’analyse spatiale. En effet pour mieux

appréhender la vulnérabilité, le travail méthodologique nécessite l'analyse et la manipulation des nombreux paramètres des systèmes complexes pour discerner les différents facteurs intervenant dans la vulnérabilité (Tayebi, 2011). Le croisement des différentes informations aboutit alors à une évaluation du risque (Gonzva *et al.*, 2016).

– visualisation : une carte représente une vision subjective de la réalité exprimée dans un langage de représentation (Sheeren, 2002). L'objectif principal de l'étude est l'obtention d'une carte de vulnérabilité. Elles matérialisent des informations nombreuses et complexes et sont un outil efficace pour l'évaluation des enjeux (Rufat, 2007). Cette carte permettra de déterminer les périmètres particulièrement vulnérables et de générer des délimitations hiérarchisées des risques de pollution. Son intérêt réside dans la nécessité de protéger la ressource (Bencherki, 2008).

2.2. Présentation de la méthode SI modifiée (SI_{mod})

Dans la littérature plusieurs modifications ont été faites sur les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité (Denny *et al.*, 2007 ; Trepanier, 2008 ; Sinan *et al.*, 2003 ; Singh *et al.*, 2015 ; Jang *et al.*, 2016 ; Zafane *et al.*, 2018 ; Nazzal *et al.*, 2019 ; Kozłowski et Sojka, 2019 ; Noori *et al.*, 2019 ; Kumar et Krishna, 2019 ; Moustafa, 2019). Dans notre étude une modification a été apportée à la méthode SI. Il s'agit de remplacer le paramètre recharge (R) par la carte des potentialités hydriques du secteur d'étude (figure 3).

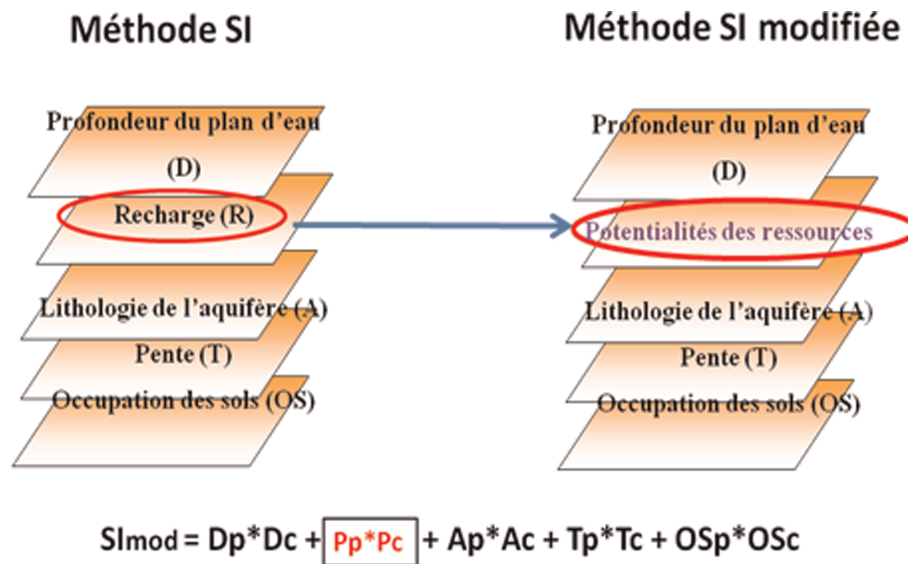


Figure 3. Principe de la méthode SI modifiée

Cette carte est le résultat de toute une méthodologie intégrant divers approches dont la modélisation hydrologique et les SIG. En effet, la carte des potentialités renseigne sur les différents réservoirs possibles. Ceci dit, une évaluation de ce facteur se base essentiellement sur une quantification des taux d'infiltrations dans le domaine d'étude. Dans ce but, on a adopté une démarche qui repose sur une approche d'intégration modélisation hydrologique et SIG.

2.2.1. Modélisation hydrologique

L'objectif principale de notre démarche est une quantification de l'infiltration efficace. Il s'agit de la quantité d'eau infiltrée depuis la surface, qui traverse la zone non saturée et parvient effectivement à la zone saturée (Castany, 1967 ; Dupy, 1997). Plusieurs modèles répondent à cette problématique, mais notre choix a porté sur le modèle Agriflux.

Le modèle Agriflux est un modèle 1-0 analytique (Banton *et al.*, 1993) basé sur une approche en différences finies par réservoirs pour l'évaluation quantitative des flux d'eau, de nitrates et de pesticides parvenant à la nappe. Le module hydriflux est utilisé. Deux types de données ont été nécessaires. Il s'agit principalement de données climatiques et de données hydrauliques du sol (tableau 3).

Afin de préparer le fichier climat, une collecte des données auprès de la CRDA de Sfax est faite (figure 4). En ce qui concerne la caractérisation hydraulique du sol, la carte pédologique du secteur d'étude (CRDA, 2006) a été d'un grand intérêt. En se basant sur les différentes textures du sol, les données granulométriques (pourcentages en sable, limon et argile) sont déterminées à partir des classes texturales des sols (*triangle textural*). Les valeurs des points de flétrissement, de porosité, de capacité au champ et la conductivité hydraulique à saturation sont dérivées de valeurs théoriques. Une fois les entrées du modèle définies, on procède à la simulation par Agriflux du comportement de l'eau dans le sol à travers le module Hydriflux. En effet pour chaque zone climatique et chaque texture (avec les différentes épaisseurs relatives des sols), une simulation est faite

Tableau 3. Données de paramétrage du modèle Agriflux (Banton *et al.*, 1993)

Fichier Sol	Fichier Climat
Épaisseur (m). Porosité (m^3/m^3) Capacité au champ (m^3/m^3) Point de flétrissement (m^3/m^3) Conductivité hydraulique à saturation (m/j) % sable % limon % argile Profondeur maximum d'évaporation m)	Evaporations et températures moyennes mensuelles. Moyennes mensuelles pluviométrique.

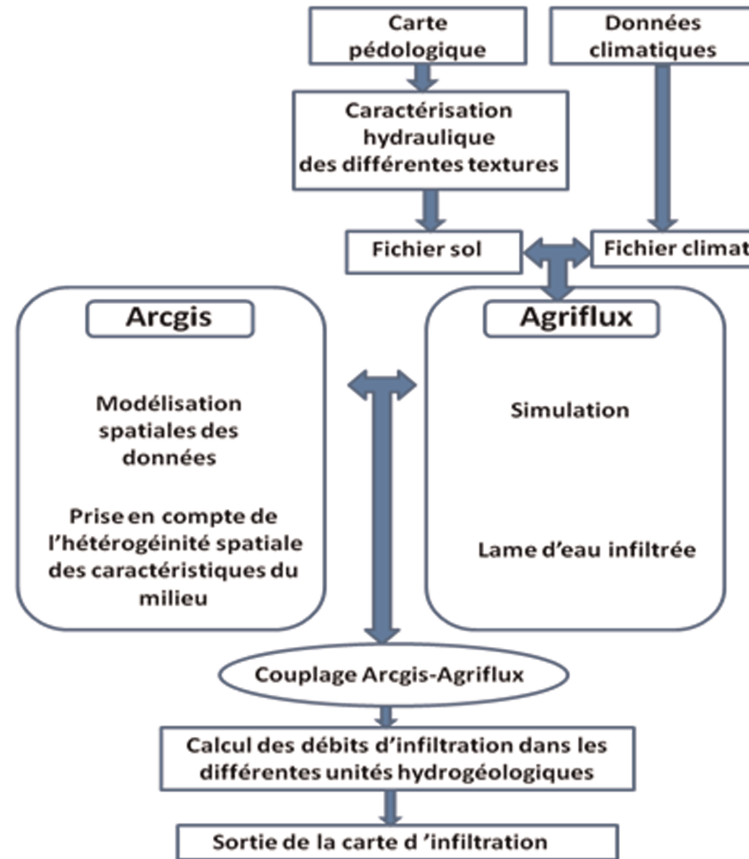


Figure 4. Couplage AGRIFLUX-SIG et élaboration de la carte d'infiltration

2.2.2. Couplage modélisation hydrologique et SIG

C'est à partir des années 1980 que l'idée d'intégration des SIG aux modèles hydrologiques a émergée. Cela faisait partie des efforts de la communauté SIG afin d'améliorer les fonctionnalités analytiques des SIG, d'une part et de la volonté des hydrologues d'apporter plus de précision à la présentation du processus hydrologique, d'autre part (Zhang *et al.*, 2014). Le recours aux SIG a montré une grande efficacité au niveau des étapes de pre-processing et de post-processing de la modélisation hydrologique (Goodchild, 1993).

Ruelland (2004) distingue trois catégories de typologie des modes d'intégration modélisation-SIG. Il s'agit des systèmes connectés (*loose coupling*), des systèmes interfacés (*tight coupling*) et des systèmes de pleine intégration (*full coupling*). Dans notre étude il s'agit d'un système connecté. L'intégration réside dans le transfert des données et la spatialisaiton des résultats (figure 4).

La méthodologie comporte trois étapes :

- élaboration du maillage : dans un premier temps, le secteur d'étude, qui s'étend sur une superficie de 8 000 km² est divisé en mailles régulières qui permettent une représentation géométrique du bassin. La superficie de la cellule est 1 km². Le maillage établi servira de support pour les différentes couches d'informations : la texture du sol, la profondeur du sol et la localisation géographique des différentes stations météorologiques.

- Introduction des résultats de simulations. Au cours de cette phase, le croisement des couches thématiques diverses (texture et épaisseur des sols) présentes sur un même support, permet de faciliter l'analyse spatiale. En effet, une introduction des flux d'eaux calculés est faite. Grâce à la maîtrise du milieu, on peut attribuer à chaque maille la valeur d'eau infiltrée calculée par le modèle tout en respectant la nature du sol, son épaisseur et la zone climatique. Cette étape s'avère primordiale dans notre démarche, car elle nous permettra par la suite de calculer les débits d'infiltration.

- Estimation des volumes d'eau infiltrée et sortie de la carte d'infiltration. Les calculs des débits de recharge naturelle sont faits selon la relation suivante :

$$\text{Recharge} = A * L \quad (2)$$

Avec : A : superficie du bassin du secteur d'étude ; L : lame d'eau infiltrée calculée par Agriflux.

Une fois la carte d'infiltration efficace obtenue la croiser avec les autres données géomorphologiques nous permettra d'obtenir une estimation de la carte des zones à potentialité aquifère du sahel de Sfax.

La validité des cartes de vulnérabilités obtenues a été testée en établissant une comparaison entre la répartition des nitrates dans les eaux souterraines et celle des différentes classes de vulnérabilité.

3. Résultats

3.1. Caractérisation de la vulnérabilité par la méthode SIsland

L'application de cette méthodologie nous a permis, dans un premier temps, une spatialisation des différents critères de vulnérabilités, régissant le processus de transfert de contaminants. Il s'agit des facteurs géologiques, hydrogéologiques, d'occupation du sol, de la topographie, ainsi que de la météorologie :

- la profondeur de la nappe (D) ou épaisseur de la zone non saturée (ZNS) : ce critère est fondamental pour appréhender le temps de transfert d'une pollution jusqu'à la nappe. L'aquifère est d'autant plus vulnérable que la profondeur est faible (Bézèlges *et al.*, 2002).

– la recharge efficace de l’aquifère : dans les zones de faible topographie telles que le secteur d’étude, la recharge nette est directement proportionnelle au taux de précipitations. Ceci dit, la carte des précipitations est utilisée pour représenter le paramètre « recharge » dans l’étude de la vulnérabilité des eaux souterraines (CRDA, 2012).

– la lithologie de l’aquifère (A) : l’estimation de ce paramètre a été réalisée à partir des calculs des perméabilités équivalentes (Hentati *et al.*, 2011 ; Saidi *et al.*, 2011). En se basant sur les coefficients de perméabilité de référence attribués pour chaque lithologie (Castany, 1967), on calcule la perméabilité équivalente horizontale, pour chaque piézomètre, par la formule de Castany (1967, 1982) :

$$K_{mh} = K_{eq} = \Sigma(h_i k_i) / \Sigma(h_i) \quad (3)$$

K_{mh} : perméabilité moyenne horizontale (m/s) ; $\Sigma(h_i)$: puissance totale de la zone saturée (m) ; h_i : épaisseur de la couche i (m) ; k_i : perméabilité de la couche i (m/s).

– la pente du terrain (T) : les pentes fortes favorisent le ruissellement et limitent l’infiltration des substances polluantes dans l’aquifère, ce qui leur confère un aspect protecteur (Thüli, 2014).

– l’occupation des sols (OS) : l’occupation du sol conditionne les volumes et la nature des polluants potentiels. Elle peut être de type naturel (forêt) ou agricole (cultures, élevage) ou urbain (habitat, tissu industriel, etc.).

L’élaboration de la carte de vulnérabilité est effectuée par le calcul de l’indice de vulnérabilité (SI) qui intègre les cotes pondérées des cinq paramètres selon l’équation (1). Cet indice reflète qualitativement la tendance générale des activités anthropiques productrices des polluants et les prédispositions naturelles de protection de l’aquifère phréatique dans le secteur étudié (figure 5).

Les valeurs de l’indice SI s’échelonnent de 31 à 82. Ces indices ont été répartis en trois degrés de vulnérabilité à la pollution (tableau 2) : faible, moyen et fort. La classe « faible » représente 7 % du sahel de Sfax et se rencontre au centre et au sud de la zone étudiée. La classe « moyenne » représente 36 % de la zone majoritairement localisée dans les parties ouest et centrale de la plaine de Sfax. Toutefois, des îlots isolés de cette classe se rencontrent dans le secteur nord de la zone d’étude. Enfin, la classe « élevée » couvre 57 % de la zone d’étude. Cette classe occupe un peu plus de la moitié de la zone et par conséquent a une répartition spatiale assez homogène sur toute l’étendue de la région avec une dominance dans les parties nord, ouest et est. Dans ces zones, les paramètres intrinsèques de la nappe sont favorables à une pénétration de polluant où la profondeur du plan d’eau est faible, la lithologie est relativement perméable, les pentes sont en majorité faibles et l’état de surface est majoritairement constitué de mosaïque de cultures permanentes.

3.2. Caractérisation de la vulnérabilité par la méthode SImod

Le premier résultat du couplage modélisation SIG consiste dans la sortie de la carte des infiltrations moyennes annuelles du sahel de Sfax (figure 6).

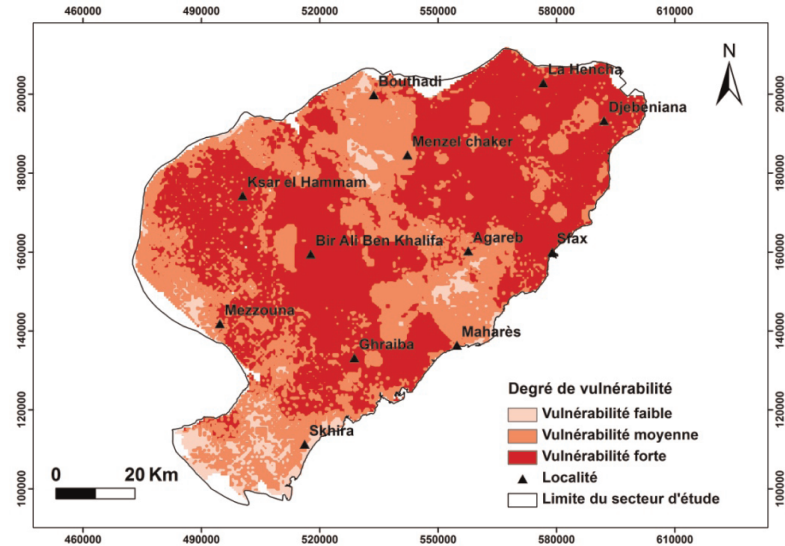


Figure 5. Carte de vulnérabilité à la pollution du système phréatique du sahel de Sfax (SI standard)

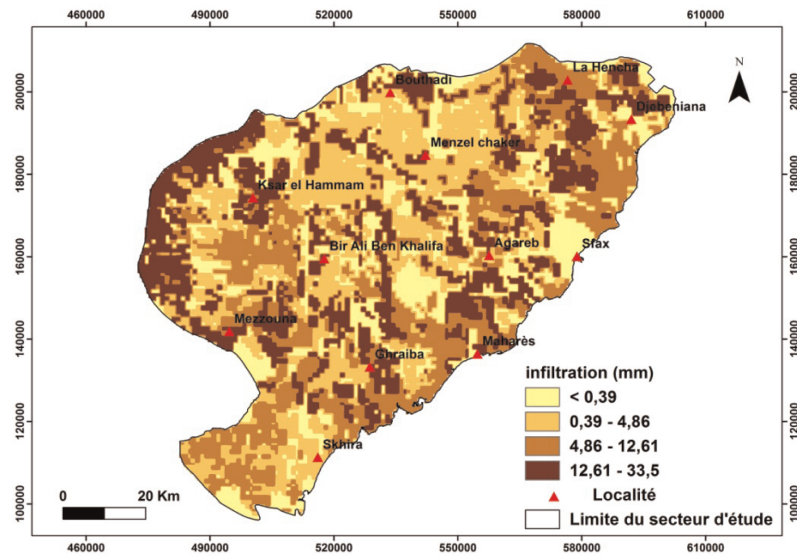


Figure 6. Carte des infiltrations moyennes annuelles du sahel de Sfax

Tableau 4. Système de ponctuation pour la carte des potentialités des ressources en eau de Sfax

Classe de potentialité en ressources en eau	Score
Potentialité mauvaise	10
Potentialité médiocre	60
Potentialité bonne	80
Potentialité excellente	100

Dans le bassin de Sfax, la carte des potentialités des ressources en eau est classée en quatre intervalles selon des potentiels de vulnérabilité croissants. À ces intervalles on a associé un intervalle de valeurs variables de 10 à 100. Ces dernières sont données dans le tableau 4.

Les valeurs de l'indice SI mod s'échelonnent de 18 à 89. Cet intervalle est subdivisé en trois classes comme illustré dans le tableau 2 où la vulnérabilité est qualifiée de faible à forte. La figure 7 montre la répartition spatiale des classes de vulnérabilité du système

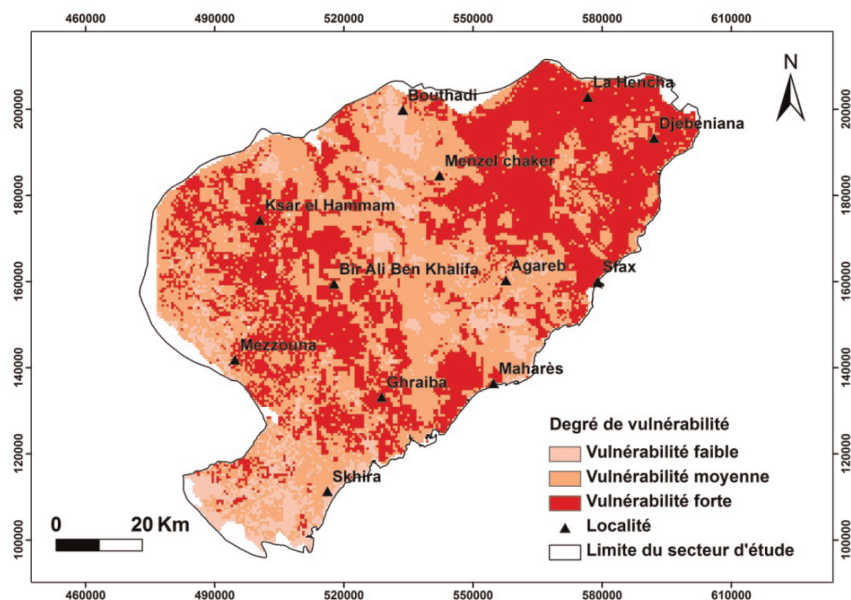


Figure 7. Carte de vulnérabilité à la pollution du système phréatique du sahel de Sfax (SI modifié)

phréatique du sahel de Sfax. L'analyse de cette carte montre l'importance de la superficie des secteurs à vulnérabilité moyenne et élevée. La classe de vulnérabilité faible représente environ 11 % du secteur d'étude. La classe de vulnérabilité moyenne montre une légère prédominance avec un pourcentage de 45 %, rencontrée presque dans tout le secteur d'étude en particulier dans les parties centrales et ouest. Pour la classe de forte vulnérabilité, elle représente 44 % du secteur étudié et intéresse essentiellement le secteur nord.

3.3. Validation des résultats

Les deux cartes SI (standard et modifiée) fournissent des résultats assez homogènes avec une prédominance des classes de vulnérabilité forte et moyenne. On remarque que la carte SI modifiée montre une tendance à augmenter la superficie des zones à vulnérabilité faible et moyenne au détriment de la classe forte par rapport à la carte SI standard.

La validité de l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution de la nappe par la méthode SI est testée par la mesure de la pollution des teneurs en nitrates dans les eaux (DGRE, 2012). Cette activité a été réalisée en établissant une comparaison entre la répartition des nitrates dans les eaux de la nappe et la distribution des classes de vulnérabilité.

Les figures 8a et 8b présentent les cartes de vulnérabilité à la pollution (SIstand et SImod) associées à la répartition des quatre classes de concentrations en nitrates. Si on veut comparer les deux cartes générées, la carte de vulnérabilité SI modifiée paraît la carte la plus représentative (figures 8c et 8d) :

- dans les deux cartes, 100 % des points ayant des concentrations supérieures à 100 mg/l coïncident avec la zone de vulnérabilité forte ;
- un taux de coïncidence élevé entre les concentrations importantes des nitrates (supérieurs à 50 mg /l) des eaux souterraines de la zone d'étude et les classes de forte vulnérabilité des deux cartes SI modifiée (74 %) et SI standard (69 %). Cependant on remarque que la première carte montre un taux de coïncidence plus élevé.
- la carte SI modifiée montre un taux de coïncidence de 65 % entre les faibles teneurs en nitrates (inférieurs à 50 mg/l) et les classes à faible et moyenne vulnérabilité, contre un taux de coïncidence de 40 % pour la carte SI stand. On remarque aussi que cette dernière montre un taux de coïncidence égal à 0 entre les faibles teneurs en nitrates et la classe de vulnérabilité faible (figure 8c).

4. Discussion

Cette étude constitue une approche d'aide à la protection et à la prévention de la pollution des eaux souterraines du système phréatique du sahel de Sfax. Elle permet

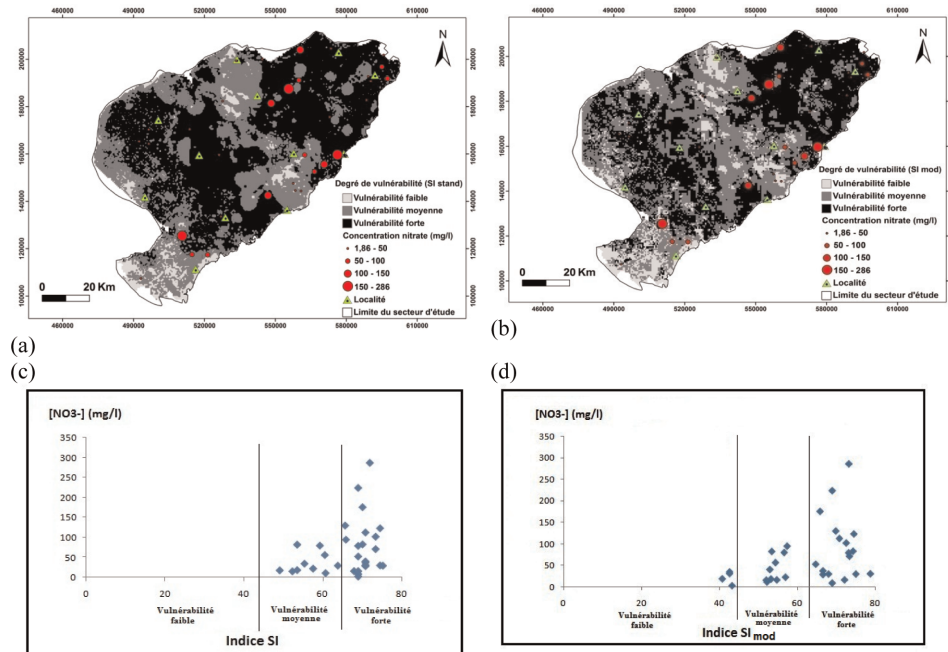


Figure 8. Validation des cartes de vulnérabilité SI

d'identifier les zones à fort risque de contamination. La méthode paramétrique SI est caractérisée par la facilité de lecture des cartes de vulnérabilité ainsi que leur comparaison entre elles, qu'il s'agisse de cartes provenant du même secteur ou de régions totalement éloignées (Fagnan, 1998).

Cependant l'application de la méthode montre une certaine imprécision. En effet, la construction d'une carte est soumise à une série d'incertitudes qui se glissent dans chaque étape de sa réalisation (Arnaud, 2015). Le manque d'information précise pourrait aussi influencer la qualité de la cartographie (Murat, 2000). Dans le but de limiter les erreurs, Murat *et al.* (2003) proposent un jumelage des méthodes d'interpolation avec des méthodes d'analyse de données afin de tenir compte du caractère variable des critères de vulnérabilité dans l'espace.

En ce qui concerne les cartes de vulnérabilité réalisées dans cette étude, leur comparaison est intéressante car elle permet de montrer les différences dans l'évaluation de la vulnérabilité

– du point de vue applicabilité : la méthode SI standard est plus simple et permet de dépasser le problème lié au manque de données. En effet, la densité des points étudiés par rapport à l'étendue de la zone d'étude est moyenne, la méthode de cotation numérique est donc recommandée selon Vrba et Zaporozec (1994). Cependant, la méthode proposée dans ce papier nécessite un nombre de données et un temps de mise

en œuvre plus importants. En effet, cette approche prend en considération le paramètre potentialité de l'aquifère issu principalement de la modélisation hydrologique. Bien que notre choix se porte sur l'utilisation du modèle Agriflux, qui répond au principe de parcimonie consistant en la représentation adéquate d'un système avec le plus petit nombre possible de paramètres (Madier, 2007), la masse de données requise par la méthode demeure considérable.

– concernant la précision des résultats : l'examen des résultats issus des deux méthodes montre que la modification de la méthode standard a résulté d'une diminution des superficies caractérisées par une vulnérabilité « élevée » et une augmentation des superficies à vulnérabilité « moyenne ». Ceci nous ramène à déduire que la méthode SI standard a tendance à surestimer le degré de vulnérabilité.

L'analyse des résultats montre que l'utilisation de la méthode SI modifiée a permis d'obtenir une meilleure corrélation entre les concentrations mesurées et les zones de vulnérabilité par rapport à la méthode standard. Ceci paraît logique et peut être expliqué par le détail hydrogéologique qu'apporte la modélisation. Dans ce contexte, Ducommun (2010) suggère que pour avoir une carte de vulnérabilité intrinsèque fiable, les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité devraient prendre en compte, outre les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère, des données sur les volumes de flux de recharge. Ce critère a été pris en compte dans la méthode SI modifiée qui considère les flux d'eau infiltrés dans le sahel de Sfax.

Malgré ses imperfections, la méthode paramétrique SI demeure parmi une des approches les plus utilisées en raison de sa simplicité et sa fiabilité. La modification de l'approche originale a permis d'affiner les résultats. En effet, son utilisation apporte une amélioration à la caractérisation de la vulnérabilité des eaux souterraines du secteur d'étude. La méthode présentée montre un caractère innovant en combinant la modélisation hydrologique, les modèles paramétriques et les SIG. L'introduction du facteur « potentialité des ressources » dans l'établissement des méthodes de vulnérabilité est une nouveauté.

Cette méthode, malgré le grand nombre de données qu'elle demande par rapport à la méthode originale, montre une clarté d'utilisation ainsi qu'une pertinence des résultats. Elle constitue un outil pour assurer de manière contrôlée la protection des ressources en eau.

5. Conclusion

Une tentative a été faite pour évaluer la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère de la plaine de Sfax. Nous avons utilisé, pour cet objectif, la méthode paramétrique SI moyennant le SIG. Les cinq paramètres du modèle ont été construits, classés et codés en utilisant l'outil SIG. Dans cette étude deux cartes de vulnérabilité sont réalisées. La première carte SI standard (Ribeiro, 2000) et la seconde carte SI modifiée issue d'une nouvelle méthodologie combinant la modélisation hydrologique et les SIG. Une estimation des taux d'infiltration efficaces est faite. La cartographie de la recharge a

permis l'estimation de la carte des potentialités des ressources en eaux. Ce facteur servira de nouveau paramètre dans l'équation de la méthode SI.

Trois classes de vulnérabilité sont discernées : faible, moyenne et forte. Les zones ayant des degrés de vulnérabilité très élevés sont localisées essentiellement dans les secteurs nord et ouest caractérisés par une prédisposition naturelle favorable à la pollution. Les zones à vulnérabilité faible occupent les parties centrales et sud. L'analyse des cartes de vulnérabilité conjuguée à l'étude de la répartition des teneurs en nitrates confirme la performance de la méthode SI. Les deux cartes de vulnérabilité semblent globalement concorder avec les concentrations mesurées.

Cependant, la modification de la méthode standard a entraîné une diminution des superficies caractérisées par une vulnérabilité « élevée » et une augmentation des superficies à vulnérabilité « moyenne ». De plus, le pourcentage de superficie à vulnérabilité faible a augmenté. L'utilisation de la méthode SI modifiée a permis d'obtenir une meilleure corrélation entre les concentrations mesurées et les zones de vulnérabilité par rapport à la méthode standard. Ceci paraît logique et peut être expliqué par l'apport de la modélisation hydrologique.

La comparaison des deux cartes générées est intéressante car elle permet de mettre en évidence l'importance du paramètre recharge dans le processus de l'évaluation de la vulnérabilité. Il a une influence déterminante sur la fonction d'entrée d'un contaminant potentiel dans le système.

En conclusion, le présent article a permis :

- de quantifier la vulnérabilité des eaux souterraines et d'identifier clairement les sites les plus vulnérables, une nouvelle approche d'évaluation vulnérabilité est présentée.
- montrer l'applicabilité du modèle Agriflux dans notre secteur d'étude. Les résultats ont conduit à une quantification de l'infiltration. Ceci constitue un premier essai d'évaluation d'infiltration efficace dans un aussi vaste secteur d'étude.
- apprécier l'apport du couplage SIG-modélisation hydrologique. Cette synergie aura contribué à améliorer la prise en considération et la spatialisation des caractéristiques physiques des bassins versants ;
- mettre en évidence l'apport et l'utilité du SIG dans le cadre de la gestion qualitative et quantitative des ressources en eau souterraine ;
- d'intégrer des SIG et des méthodes d'estimation de vulnérabilité. Ceci constitue une voie privilégiée et incontournable pour faire évoluer le SIG vers un véritable système d'aide à la décision.

La présente étude se présente comme un document d'orientation, capable de faciliter les décisions et d'indiquer les directions de recherche (étude d'impact, par exemple). Une validation des résultats mériterait d'être effectuée au moyen d'une modélisation numérique du transport des nitrates.

En se basant sur les cartes de vulnérabilité obtenues, une étude pour l'optimisation du réseau de surveillance des nitrates des eaux du système phréatique du sahel de Sfax serait aussi intéressante.

Bibliographie

- Aït Sliman A., Fekri A., Laftouhi N., Taj-Eddine K. (2009). Utilisation des systèmes d'information géographique et du modèle DRASTIC pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines dans la plaine de Berrechid, Maroc. *Geographia Technica*, n° 2, p. 81-93.
- Albinet M., Margat J. (1970). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Pollution des Eaux Souterraines. *Actes du Colloque 1971*, Moscou.
- Aller L., Bennett T., Lehr J.H., Petty R.J., Hackett G. (1987). *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*, US.
- Archambault L., Bédard Y. (1990). Géomatique et SIRS en foresterie, L'Aubelle. *Revue de l'Ordre des Ingénieurs Forestiers du Québec*, n° 81.
- Arnaud A. (2015). *Les limites de la cartographie des risques littoraux : des perspectives pour la compréhension de tous*, <http://journals.openedition.org/vertigo/15743>.
- Awawdeh M., Obeidat M., Al-Mohammad M., Al-Qudah K., Jaradat R. (2013). Integrated GIS and remote sensing for mapping groundwater potentiality in the Tulul al Ashaqif, Northeast Jordan. *Arabian Journal of Geosciences*, 10.1007/s12517-013-0964-8.
- Banton O., Larocque M., Surateau F., Villeneuve J.-P. (1993). Évaluation des pertes de composés azotés dans les eaux souterraines lors de l'épandage des fumiers et lisiers. Développement d'un outil d'évaluation - logiciel AgriFlux, manuel d'utilisateur. Rapport scientifique N°R-380, INRS-Eau, septembre 1993.
- Bencherki A. (2008). *Réalisation d'une carte de vulnérabilité des nappes phréatiques de la région de Saïda, en Algérie, avec l'aide des systèmes d'information géographique*. Thèse de Doctorat, Université de Moncton.
- Bézèlguès S., DesGarets E., Mardhel V., Dörfliger N. (2002). Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grand-Terre et de Marie-Galatie (Guadeloupe). Phase 1 : méthodologie de détermination de la vulnérabilité. BRGM/RP-51783-Fr, novembre.
- Carreras X., Fraile J., Garrido T., Cardona C. (2015) Groundwater Vulnerability Mapping Assessment Using Overlay and the DRASTIC Method in Catalonia. DOI: 10.1007/698-2015-441
- Castany G. (1982). *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*, Dunod Université, Paris.
- Castany G. (1967). *Traité Pratique des eaux Souterraines* (2nd édition), Dunod, Paris.
- CRDA (2006). *Analyses des éléments majeurs*. Rapport interne, Commissariat Régional de Développement Agricole, Sfax, Tunisie.
- CRDA (2012). *Piézométrie*. Rapport annuel, Commissariat Régional de Développement Agricole, Sfax, Tunisie.

- Denègre J. (1992). Nouvelles technologies au service de l'investigation géographique : le rôle de la télédétection spatiale et des systèmes d'information géographique. *SIGAS*, vol. 2, n° 2, p. 139-149.
- Denny S.C., Allen D.M., Journey J.M. (2007). DRASTIC-Fm: a modified vulnerability mapping method for structurally controlled aquifers in the southern Gulf Islands, British Columbia, Canada. *Hydrogeology Journal*, vol. 15, n° 3, p. 483-493.
- Dixon B. (2005). Groundwater vulnerability mapping: A GIS and fuzzy rule based integrated tool. *Applied Geography*, vol. 25, n° 4, p. 327-347.
- Dottridge J. (1998). Water resources quality, sustainability and development. *Arid land resources and their management, Jordan's desert margin*. London, p. 67-80.
- Ducommun R. (2010). *Estimation et cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines en milieu urbain*. Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel.
- Dupy A. (1997). *Simulation de la contamination diffuse des eaux souterraines par les nitrates à l'échelle du bassin versant*. Thèse de doctorat, Université de Poitier.
- Dutheil-Warolin L. (2004). *La notion de vulnérabilité de la personne physique en droit privé*. Thèse de doctorat, Université de Limoges.
- El Garouani A., Merzouk A. (2006). Délimitation des zones de protection autour de la retenue du barrage Hachef (Maroc) par télédétection et SIG. *Revue des sciences de l'eau*, vol. 19, n° 1, p. 1-10.
- Fagnan N. (1998). *Cartographie hydrogéologique régionale et vulnérabilité des aquifères*. Maître ès sciences, Université du Québec INRS.
- Ghribi R. (2010). *Etude morpho-structurale et évolution des paléochamps de contraintes du sahel tunisien/ implications géodynamiques*. Thèse de Doctorat, Université de Sfax, Tunisie.
- Gonzva M., Barroca B., Lhomme S., Gautier P.E., Diab Y. (2016). Apport de la sûreté de fonctionnement à l'analyse spatialisée du risque inondation. *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 26, n° 3, p. 329-361.
- Gogu R.C., Dassargues A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology*, vol. 39, n° 6, p. 549-559.
- Goodchild M.F. (1993). The state of GIS for environmental problem solving. *Environmental modeling with GIS*, New York, Oxford University Press, p. 8-15.
- Haertle A. (1983). Method of working and employment of EDP during the preparation of groundwater vulnerability maps. *International Association of Hydrogeological Sciences*, vol. 142, n° 1983, p. 1073-1085.
- Heathcote R.L. (1983). *The arid lands: their use and abuse*. Longman, London.
- Hentati I., Zairi M., Ben Dhia H. (2011). A statistical and geographical information system analysis for groundwater intrinsic vulnerability: a validated case study from Sfax-Agareb, Tunisia. *Water and Environment Journal*, vol. 25, n° 3, p. 400-411.
- Hrkál Z. (2001). Vulnerability of groundwater to acid deposition, Jizerské Mountains, northern Czech Republic: construction and reliability of a GIS-based vulnerability map. *Hydrogeology Journal*, vol. 9, n° 4, p. 348-357.

- Jang C.S., Lin C.W., Liang C.P., Chen J.S. (2016). Developing a reliable model for aquifer vulnerability. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 30, p. 175-187.
- Kozłowski M, Sojka M. (2019). Applying a Modified DRASTIC Model to Assess Groundwater Vulnerability to Pollution: A Case Study in Central Poland. *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 28, n° 3, p. 1223-1231.
- Kumar A., Krishna A.P. (2019). Groundwater vulnerability and contamination risk assessment using GIS-based modified DRASTIC-LU model in hard rock aquifer system in India. *Geocarto International*, p. 1-30.
- Liggett J.E., Talwar S. (2009). Groundwater vulnerability assessments and integrated water resource management. *Watershed Management Bulletin*, vol. 13, n° 1, p. 18-29.
- Madier S. (2007). *De la mesure à la modélisation de transferts de produits phytosanitaires à l'échelle du bassin versant : Quantification des incertitudes et définition de la stratégie d'échantillonnage*. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg.
- Manap M.A., Sulaiman W.N.A., Ramli M.F., Pradhan B., Surip N. (2013). A knowledge-driven GIS modeling technique for groundwater potential mapping at the Upper Langat Basin, Malaysia. *Arabian Journal Geosciences*, vol. 6, n° 5, p. 1621-1637.
- Manche Y. (1997). Propositions pour la prise en compte de la vulnérabilité dans la cartographie des risques naturels prévisibles. *Revue de Géographie Alpine*, vol. 85, n° 2, p. 49-62.
- Marjuanto A.A., Putranto T.T., Sugianto D.N. (2019). Mapping of Groundwater Vulnerability Index in the Alluvial Plain of Semarang City Using the Susceptibility Index Method. *The 4th International Conference on Energy, Environmental and Information System (ICENIS)*.
- Mimou D., Graillot D. (2010). Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères alluviaux de montagne par utilisation conjointe d'un modèle d'écoulement souterrain et d'un modèle de suivi de particules. Application au Massif Central (France). *Colloque Eau, Déchets et développement Durable 2010*, Alexandrie, Egypt.
- Mondal N.C., Adike S., Anand Raj P., Singh V.S., Ahmed S., Jayakumar K.V. (2018). Assessing Aquifer Vulnerability Using GIS-Based DRASTIC Model Coupling with Hydrochemical Parameters in Hard Rock Area from Southern India, *Groundwater*. Springer, Singapore.
- Montz B.E., Evans T.A. (2001). Gis and Social Vulnerability Analysis. *Coping With Flash Floods*. Springer, p. 37-48.
- Motevalli A., Moradi H.R., Javadi S. (2018). A Comprehensive evaluation of groundwater vulnerability to saltwater up-coning and sea water intrusion in a coastal aquifer (case study: Ghaemshahr-juybar aquifer). *Journal of Hydrology*, vol. 557, p. 753-773.
- Moustafa M. (2019). Assessing perched aquifer vulnerability using modified DRASTIC: a case study of colliery waste in north-east England (UK). *Hydrogeology Journal*, vol. 27, n° 5, p. 1837-1850.
- Murat V. (2000). *Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution: Application aux aquifères granulaires du Piémont LAURENTIEN*. Mémoire de maîtrise, INRS-Géosciences, Québec, p. 127

- Murat V., Paradis D., Savard M.M., Nastev M., Bourque É., Hamel A., Lefebvre R., Martel R. (2003). *Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD*. Rapport de recherche. Canada.
- Nazzal Y., Howari F.M., Iqbal J., Ahmed I., Bouorm N., Yousef A. (2019). Investigating aquifer vulnerability and pollution risk employing modified DRASTIC model and GIS techniques in Liwa area, United Arab Emirates. *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 8, p. 567-578.
- Nobre R.C.M., Rotunno Filho O.C., Mansur W.J., Cosenza C.A.N. (2007). Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 94, n° 3, p. 277-292.
- Noori R., Ghahremanzadeh H., Kløve B., Adamowski J.F., Baghvand A. (2019). Modified-DRASTIC, modified-SINTACS and SI methods for groundwater vulnerability assessment in the southern Tehran aquifer. *Journal of Environmental Science and Health*, vol. 54, n° 1, p. 89-100.
- Ollierou R., Quantinet B. (2004). Vulnérabilité une notion d'avenir. *Rapport de recherche*. Ecole nationale supérieure des mines. pp55. 2012
- Popescu I.C., Gardin N., Brouyère S., Dassargues A. (2008). *Groundwater vulnerability assessment using physically-based modelling: from challenges to pragmatic solutions*, Denmark.
- Propeck-Zimmermann E., Saint Gerand T. (2001). Modélisation cartographique des RTM : de la connaissance du risque à sa gestion ou objectiver le risque dans un SIG pour l'objectiviser, *Actes du Colloque risque et territoires 2001*, Lyon, Vaulx-en-Velin.
- Ramakrishna B., Rajasekhar P., Vaheed S. (2019). Assessment of Aquifer Vulnerability of Nizamabad District, Telangana State, India Using GIS and Drastic Method. *International Conference on Emerging Trends in Engineering (ICETE)*. Springer, Cham.
- Ribeiro L. (2000). *SI: a new index of aquifer susceptibility to agricultural pollution*. Internal report, ERSHA/CVRM. Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal.
- Ruelland D. (2004). SENEQUE, logiciel SIG de modélisation prospective de la qualité de l'eau. *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 14, n° 1, p. 97-117.
- Rufat S. (2007). L'estimation de la vulnérabilité urbaine, un outil pour la gestion du risque: Approche à partir du cas de l'agglomération lyonnaise. *Géo Carrefour*, vol. 82, n° 1-2.
- Saidi S., Bouri S., Ben Dhia H. (2011). Sensitivity analysis in groundwater vulnerability assessment based on GIS in the Mahdia-Ksour Essaf aquifer, Tunisia: A validation study. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 56, n° 2, p. 288-304.
- Sheeren D. (2002). L'appariement pour la constitution de bases de données géographiques multi-résolutions. Vers une interprétation des différences de représentation. *Revue Internationale de géomatique*, vol. 12, n° 2, p. 151-168.
- Sinan M., Maslouhi R., Razack M. (2003). Utilisation des SIG pour la caractérisation de la vulnérabilité et de la sensibilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Application à la nappe du Haouz de Marrakech, Maroc. *Regional Conference 2003*, Marrakech, Morocco.

- Singh A., Srivastay S.K., Kumar S., Chakrapani G. (2015). A modified-DRASTIC model (DRASTICA) for assessment of groundwater vulnerability to pollution in an urbanized environment in Lucknow, India. *Environmental Earth Sciences*, vol. 74, n° 7.
- Subzar M.M., Shukla J.P. (2019). GIS modelling approach for assessment of groundwater vulnerability in parts of Tawa river catchment area, Hoshangabad, Madhya, India. *Groundwater for Sustainable Development*.
- Szlafsztein C.F., Sterr H. (2007). A GIS-based vulnerability assessment of coastal natural hazards, state of Pará, Brazil. *Journal of Coastal Conservation*, vol. 11, n° 1, p. 53-66.
- Tayebi A. (2011). *Vulnérabilité des ressources en eaux karstiques en milieu méditerranéen semi-aride: le massif des Béni Snassen (Maroc oriental). Approche pluridisciplinaire et utilisation des méthodes « SIG »*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- Tesoriero A.J., Inkpen E.L., Voss F.D. (1998). Assessing ground-water vulnerability using logistic regression. *Proceedings for the Source Water Assessment and Protection 98 Conference*, Dallas.
- Thirumalaivasan D., Karmegam M., Venugopal K. (2003). AHP-DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS. *Environmental Modelling and Software*, vol. 18, p. 645-656.
- Thüler L. (2014). *Estimation et cartographie de la vulnérabilité des aquifères en milieu forestier*. Thèse de Doctorat, Université de Neuchâtel.
- Trabelsi N., Triki I., Hentati I., Zairi M. (2016). Aquifer vulnerability and seawater intrusion risk using GALDIT, GQI SWI and GIS: Case of a coastal aquifer in Tunisia. *Environmental Earth Science*, vol. 75, n° 669.
- Trepanier S. (2008). *Caractérisation, modélisation et étude de la vulnérabilité de l'eau souterraine contaminée aux nitrates dans un sous-bassin de la vallée d'Annapolis Nouvelle-Master's thesis*, UQAM, Montréal.
- Tuffery C. (1993). Les SIG entre recherche et développement. *Revue de Geomatique*, vol. 3, n° 12.
- Vrba J., Zaporozec A. (eds.) (1994). Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. Verlag Heinz Heise, Hannover, Germany. *International Contributions to Hydrogeology*.
- Zafane D., Gharbi B., Douaoui A. (2018). A New Model (DRASTIC-LU) for Evaluating Groundwater Vulnerability in Alluvial Aquifer of Upper Cheliff (Algeria). *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions*.
- Zhang L., Ofosu Anim D., Kabo-bahi A.T. (2014). Integration of Geographical Information Science (GIS) technology in Hydrological Modeling: A critical review. *Advanced Materials Research*, vol. 838, p. 2284-2291.