

Revue des sciences de l'eau

**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)**

Nadjla Bentekhici, Yamina Benkesmia, Faouzi Berrichi et Sid Ahmed Bellal

Volume 31, numéro 1, 2018

URI : id.erudit.org/iderudit/1047052ar

DOI : [10.7202/1047052ar](https://doi.org/10.7202/1047052ar)

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

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

ISSN 0992-7158 (imprimé)
1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Bentekhici, N., Benkesmia, Y., Berrichi, F. & Bellal, S. (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). *Revue des sciences de l'eau*, 31(1), 43–59. doi:10.7202/1047052ar

Résumé de l'article

En raison d'une forte croissance démographique et d'une évolution des modes de consommation, on se retrouve face à une augmentation rapide des volumes de déchets qui engendrent des risques pour la qualité des eaux dans la plaine de Sidi Bel Abbès. L'étude réalisée porte sur l'évaluation des risques de pollution ainsi que la cartographie de la vulnérabilité de la nappe alluviale à la pollution. Une première étape de l'étude consiste à utiliser des données spatiales du capteur algérien ALSAT-2A à haute résolution (2,5 m) pour l'identification et la cartographie des sources de pollution des eaux d'origines urbaines et industrielles. Ces données offrent la possibilité d'augmenter la rapidité et la précision de cette cartographie. Une deuxième étape vise la protection des ressources en eau contre les sources de pollution. Cette préservation est essentielle, particulièrement dans les zones semi-arides où l'eau souterraine constitue une importante source hydrique. La cartographie de la vulnérabilité de la nappe alluviale à la pollution est utile pour connaître les zones qui nécessitent une protection. La cartographie est faite en appliquant la méthode DRASTIC basée sur sept paramètres physiographiques et hydrogéologiques obtenus à partir des données de télédétection (MNT) et des données exogènes (lithologiques, pédologiques, pluviométriques, hydrogéologiques). La zone d'étude est la plaine de Sidi Bel Abbès (1 166 km²) au nord-ouest algérien. Il s'agit d'une cuvette à remplissage quaternaire. Le choix de la zone est lié à l'existence d'une unité hydrogéologique (nappe alluviale); c'est une zone à haute valeur agricole et où il y a une multiplication des sources de pollution des eaux. Les résultats obtenus traduisent le risque de pollution des ressources en eau (nappe alluviale, eaux du barrage de Chorfa et oued Mekerra) par des sources variées, urbaines et industrielles, notamment le centre d'enfouissement technique et les eaux usées industrielles. L'écoulement des eaux polluées vers le barrage de Chorfa dégrade la qualité de ces eaux. En décembre 2016, les eaux de ce barrage étaient très polluées et présentaient un résidu sec de 1 940 mg-L⁻¹, l'oxygène dissous de 66,5 %, le NH₄ de 2 mg-L⁻¹, le nitrite de 0,22 mg-L⁻¹ et le phosphore de 0,51 mg-L⁻¹. Les eaux de l'oued Mekerra analysées en 2010 étaient de très mauvaise qualité : demande biochimique en oxygène (DBO₅) de 41,296 t-a⁻¹, demande chimique en oxygène (DCO) de 123,465 t-a⁻¹, azote total de 3 193 t-a⁻¹ et phosphore total de 2 342 t-a⁻¹. Étant donné la connexion permanente entre l'oued et la nappe, on assiste à une détérioration de la qualité des eaux souterraines. Face à cette dégradation, une carte de la vulnérabilité a été réalisée afin de distinguer les zones de forte vulnérabilité en vue de prendre les dispositions de protection nécessaires. Ces zones représentent 34 % de la surface de la nappe alluviale.

Tous droits réservés © Revue des sciences de l'eau, 2018

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter en ligne. [<https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>]



Cet article est diffusé et préservé par Érudit.

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. www.erudit.org

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)

Assessing water pollution risks and groundwater vulnerability using spatial data. Case of the Sidi Bel Abbès plain (North-West Algeria)

NADJLA BENTEKHICI^{*}, YAMINA BENKESMLA¹, FAOUZI BERRICHI¹, SID AHMED BELLAL²

¹Département de Géographie, Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers, Université Oran 2 Ahmed Ben Ahmed, Centre des Techniques Spatiales, BP13 Arzew, Algérie

²Département de Géographie, Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers, Université Oran 2 Ahmed Ben Ahmed, Oran, Algérie

Reçu le 10 juillet 2017, accepté le 16 octobre 2017

RÉSUMÉ

En raison d'une forte croissance démographique et d'une évolution des modes de consommation, on se retrouve face à une augmentation rapide des volumes de déchets qui engendrent des risques pour la qualité des eaux dans la plaine de Sidi Bel Abbès. L'étude réalisée porte sur l'évaluation des risques de pollution ainsi que la cartographie de la vulnérabilité de la nappe alluviale à la pollution. Une première étape de l'étude consiste à utiliser des données spatiales du capteur algérien ALSAT-2A à haute résolution (2,5 m) pour l'identification et la cartographie des sources de pollution des eaux d'origines urbaines et industrielles. Ces données offrent la possibilité d'augmenter la rapidité et la précision de cette cartographie. Une deuxième étape vise la protection des ressources en eau contre les sources de pollution. Cette préservation est essentielle, particulièrement dans les zones semi-arides où l'eau souterraine constitue une importante source hydrique.

La cartographie de la vulnérabilité de la nappe alluviale à la pollution est utile pour connaître les zones qui nécessitent une protection. La cartographie est faite en appliquant la méthode DRASTIC basée sur sept paramètres physiographiques et hydrogéologiques obtenus à partir des données de télédétection (MNT) et des données exogènes (lithologiques, pédologiques, pluviométriques, hydrogéologiques). La zone d'étude est la plaine de Sidi Bel Abbès (1 166 km²) au nord-ouest algérien. Il s'agit d'une cuvette à remplissage quaternaire. Le choix de la zone est lié à l'existence d'une unité hydrogéologique (nappe alluviale); c'est une zone à haute valeur agricole et où il y a une multiplication des sources de pollution des eaux. Les résultats obtenus traduisent le risque de pollution des ressources en eau (nappe alluviale, eaux du barrage de Chorfa et oued Mekerra) par des sources variées, urbaines et industrielles, notamment le centre d'enfouissement technique et les eaux usées industrielles. L'écoulement des eaux polluées vers le barrage de Chorfa dégrade la qualité de ces eaux. En décembre 2016, les eaux de

ce barrage étaient très polluées et présentaient un résidu sec de 1 940 mg·L⁻¹, l'oxygène dissous de 66,5 %, le NH₄ de 2 mg·L⁻¹, le nitrite de 0,22 mg·L⁻¹ et le phosphore de 0,51 mg·L⁻¹. Les eaux de l'oued Mekerra analysées en 2010 étaient de très mauvaise qualité : demande biochimique en oxygène (DBO₅) de 41,296 t·a⁻¹, demande chimique en oxygène (DCO) de 123,465 t·a⁻¹, azote total de 3 193 t·a⁻¹ et phosphore total de 2 342 t·a⁻¹. Étant donné la connexion permanente entre l'oued et la nappe, on assiste à une détérioration de la qualité des eaux souterraines. Face à cette dégradation, une carte de la vulnérabilité a été réalisée afin de distinguer les zones de forte vulnérabilité en vue de prendre les dispositions de protection nécessaires. Ces zones représentent 34 % de la surface de la nappe alluviale.

Mots-clés : *sources de pollution, images ALSAT-2A, vulnérabilité, plaine Sidi Bel Abbès, ressources en eaux.*

ABSTRACT

Due to strong population growth and changing consumption patterns, we are faced with a rapid increase in the volumes of waste that create risks for water quality in the Sidi Bel Abbès plain. The study carried out concerns the assessment of the risks of pollution as well as the mapping of the vulnerability of the alluvial groundwater to pollution. A first step of the study was the use of ALSAT-2A high resolution (2.5 m) Algerian sensor spatial data for the identification and mapping of pollution sources from urban and industrial waters. These data offer the possibility to increase the speed and accuracy of this mapping. A second step involved the protection of water resources from sources of pollution. This preservation is especially necessary in semi-arid areas where groundwater is the major water source. The mapping of the vulnerability of the alluvial groundwater to pollution is useful to identify the areas that require protection. The mapping is done by applying the DRASTIC method, based on seven physiographic and hydrogeological parameters from remote sensing data (DTM) and exogenous data (lithological, pedological, meteorological, hydrogeological). The study area is the plain of Sidi Bel Abbès (1 166 km²) in Northwest Algeria. It is a Quaternary depression. The choice of the zone is linked to the existence of a hydrogeological unit (alluvial water table), a zone with high agricultural value and a multiplication of sources of water pollution. The results obtained translated the risk of pollution of water resources (alluvial water and Chorfa dam water, stream Mekerra) by various sources, urban and industrial, including landfills and industrial wastewater. The flow of polluted water towards the Chorfa dam degrades the quality of these waters. The waters retained by this dam in December 2016 were highly polluted and had a dry residue of 1 940 mg·L⁻¹, dissolved oxygen of

66.5%, NH₄ of 2 mg·L⁻¹, nitrite of 0.22 mg·L⁻¹ and phosphorus of 0.51 mg·L⁻¹. Stream Mekerra waters analysed in 2010 were of very poor quality: biochemical oxygen demand (BOD₅) of 41.296 t·a⁻¹, chemical oxygen demand (COD) of 123.465 t·a⁻¹, total nitrogen of 3 193 t·a⁻¹ and total phosphorus of 2 342 t·a⁻¹. Given the permanent connection between the stream and the groundwater, there is a deterioration in the quality of groundwater. In view of this degradation, a vulnerability map was drawn up to distinguish the zones of high vulnerability in order to take the necessary protective measures; these zones represent 34% of the surface of the alluvial sheet.

Key words: *pollution sources, satellite images, vulnerability, Sidi Bel Abbès plain, water resources.*

1. INTRODUCTION

L'intensification des activités industrielles et agricoles associée à l'urbanisation très rapide des agglomérations dans la plaine de Sidi Bel Abbès a abouti à une nette augmentation de la demande en eau, accompagnée d'une pollution importante des oueds et de la nappe alluviale. La plaine de Sidi Bel Abbès connaît actuellement une pollution multiple due aux rejets liquides non traités (urbains et industriels) vers l'oued Mekerra, aux rejets solides vers les décharges sauvages, et le centre d'enfouissement technique qui constitue un danger permanent de dégradation des ressources en eaux.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'état actuel et le risque de pollution des ressources en eau en se basant sur les données de la télédétection et d'autres données exogènes (qualité des eaux). La réalisation de la cartographie de la vulnérabilité de la nappe à la pollution a pour but de protéger et de préserver les eaux souterraines. Afin d'atteindre ces objectifs, nous avons mené une démarche méthodologique qui s'articule autour de deux points : identifier les sources de pollution des eaux et produire un document de protection des eaux souterraines.

Dans ce cadre, à l'aide des données spatiales à haute résolution (images satellitaires ALSAT-2A) et le modèle numérique de terrain (MNT) ASTER DEM (*Digital Elevation Model*), il est possible de cartographier les différentes sources de pollution telles que : les zones de pollution agricoles par les fertilisants et les produits phytosanitaires, la pollution d'origine urbaine solide et liquide (points de rejets des eaux usées, centre d'enfouissement technique et décharges publiques) et la pollution d'origine industrielle (eaux usées), ainsi que l'extraction automatique du réseau hydrographique par le MNT afin de voir le cheminement des rejets des eaux usées dans l'oued et l'évaluation de ses impacts.

L'identification des sources de pollution nécessite une surveillance des eaux souterraines, ceci ne peut se faire que par la cartographie de la vulnérabilité de la nappe à la pollution. Cette cartographie est faite en appliquant la méthode DRASTIC et en utilisant des données de télédétection comme le MNT pour établir la carte du paramètre topographique et des données exogènes pour réaliser les autres cartes thématiques.

La vulnérabilité représente la capacité de l'eau située en surface de rejoindre le milieu souterrain saturé en eau. La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique en relation avec la nappe d'eau souterraine procure un degré plus ou moins élevé de protection vis-à-vis des pollutions selon les caractéristiques du milieu (SCHNEBELEN *et al.*, 2002). L'application de cette méthode a conduit à l'élaboration d'un document cartographique qui permet de localiser les zones de vulnérabilité élevée, donc les zones où des protections soutenues s'imposent (HADDOUCHE, 2011).

2. ZONE D'APPLICATION : CAS DE LA PLAINE DE SIDI BEL ABBÈS

Dans le cadre de cette étude, la zone d'application fait partie de l'ensemble des hautes plaines de l'Oranais. C'est la plaine de Sidi Bel Abbès, située dans l'extrême Nord-Ouest d'Algérie, d'une superficie de 1 166 km². Elle se situe entre -0°94' de latitude et 35°17' de longitude (Figure 1). L'altitude minimale est de 405 m et maximale de 1 200 m. Elle est d'une topographie relativement plane encadrée par les reliefs suivants : au nord, par les monts de Tessala, segment occidental de l'atlas tellien, à structure plissée; au sud, par l'ensemble montagneux d'oued Mimoun, Sidi Ali Benyoub, formant la bordure septentrionale des hauts plateaux; à l'ouest par la vallée de l'oued Isser; à l'est par les reliefs des Beni Chougrane et Bou Hanifia qui forment la limite orientale (ABTOUT, 2013) (Figure 1).

C'est une zone de structure en cuvette avec un remplissage alluvionnaire, un climat semi-aride, une connexion permanente entre les oueds et la nappe (fluctuation saisonnière) et un siège important d'alimentation de la nappe (SOURISSEAU *et al.*, 1973). Cette zone est caractérisée par la vocation agricole avec une superficie agricole totale (SAT) de 97 598 ha (DIRECTION DES SERVICES AGRICOLES DE SIDI BEL ABBÈS, 2016). Les activités industrielles sont localisées dans la zone industrielle de Sidi Bel Abbès qui figure parmi les plus grandes sur le territoire Algérien.

La plaine fait partie du bassin versant d'oued Mekerra d'une superficie de 3 046 km², l'oued principal est d'une longueur de 120 km. À l'exception des oueds Mekerra, Tissaf et

Anefress, tous les oueds de la plaine sont temporaires : secs en été et immédiatement en crue à la suite de pluies torrentielles (HALLOUCHE *et al.*, 2010). Le débit moyen annuel de l'oued Mekerra est de 0,82 m³.s⁻¹ (MEDDI *et al.*, 2009). La plaine comporte une nappe alluviale plio-quadernaire qui constitue le principal aquifère dans la région d'une superficie de 730 km². Elle est alimentée selon trois processus : alimentation directe par les eaux des précipitations; alimentation par des aquifères adjacents soit par infiltration latérale directe ou par l'intermédiaire des sources; et enfin une alimentation par des oueds. La profondeur moyenne de la nappe est de l'ordre de 15 à 20 m avec des zones faibles profondeurs (moins de 10 m) le long des oueds Lamtar et Tissaf.

Les ressources en eaux mobilisables dans la plaine sont constituées de sources. Les seules sources ayant un débit permanent plus ou moins important, destinées à l'alimentation en eau potable, sont : la source de Sidi Ali Boussidi (Ain El Hadjar) et les sources de Sidi Ali Benyoub; ces sources drainent le réseau karstique des dolomies et calcaires gris-bleu du Jurassique supérieur des monts de Tlemcen (MEGHERFI, 2010). La production globale de ces sources est de 15 000 m³.j⁻¹. La troisième est la source d'Ain Mekhareg constituée de deux griffons captés (orifices de sortie visibles et localisés d'une source) qui rejoignent une chambre de prise et servent à l'alimentation par gravité de la ville de Sidi Bel Abbès, avec un débit de 80 L.s⁻¹. Enfin, la source d'Ain Skhoua possède un débit de 70 L.s⁻¹ (110 L.s⁻¹ en hiver) (DIRECTION DES SERVICES DE L'HYDRAULIQUE DE SIDI BEL ABBÈS, 2016). Généralement, ces potentialités hydriques sont très exposées aux différentes sources de pollution et conduisent à la dégradation qualitative des eaux, mettant en danger la santé publique et l'environnement.

3. MATÉRIELS ET MÉTHODES

La recherche a été effectuée à partir de données multisources spatiales et exogènes. Il s'agit de données cartographiques et statistiques telles que :

- Des données climatiques qui ont été obtenues auprès de l'Office national de météorologie pour la période de 1985 à 2012, ainsi que des données sur les analyses des mesures de la perméabilité des 22 points d'échantillons d'analyse, en se basant sur les données de YOUSFI (2008).
- Des données piézométriques issues de la campagne réalisée en décembre 2011 et obtenues auprès de l'Agence nationale des ressources hydriques (ANRH).
- Des données cartographiques qui comportent la carte hydrogéologique à 1/100 000 (SOURISSEAU, 1973) et celle de l'esquisse pédologique à 1/100 000 fournie par les travaux de FARAOUN et BENABDELI (2010).

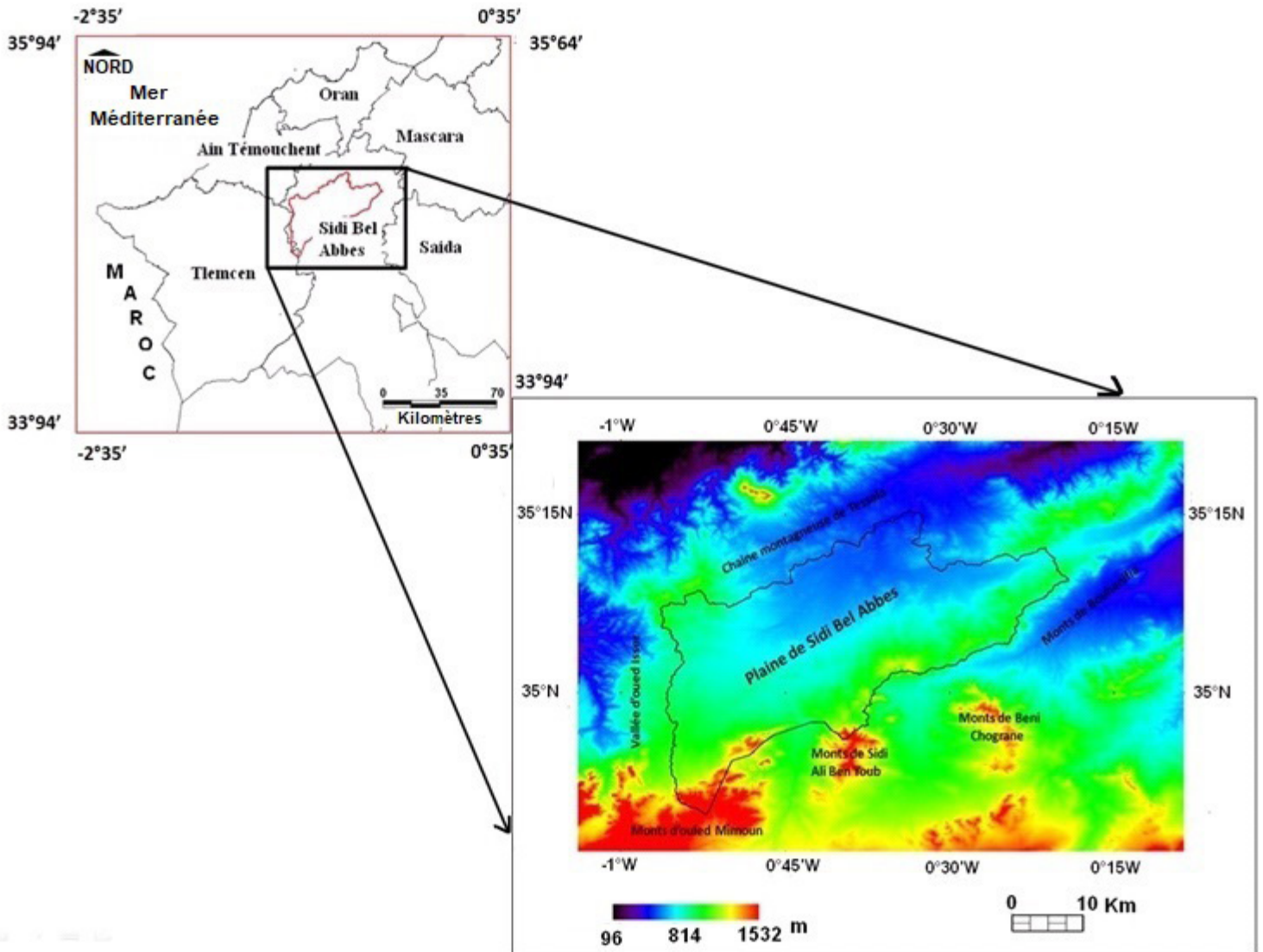


Figure 1. Localisation géographique de la zone d'étude.
Geographical location of the study area.

Il s'agit aussi des données de télédétection comme :

- Le modèle numérique de terrain ASTER DEM réalisé en 2002 pour délimiter la plaine de Sidi Bel Abbès, la réalisation de la carte des pentes et l'extraction automatique du réseau hydrographique.
- Des images satellitaires du capteur Landsat 8 prises en mars 2016, d'une résolution de 30 m, et des images à haute résolution fusionnées ALSAT-2A prises en juillet 2016. Le satellite ALSAT-2A est un capteur algérien comportant quatre bandes multispectrales (bleu, vert, rouge et proche infrarouge) d'une résolution de 10 m et panchromatique d'une résolution de 2,5 m. Le fusionnement donne une image de 2,5 m et d'une fauchée de 17,5 km.

Le traitement de cette masse d'informations a été effectué dans l'environnement SIG (ArcGis) et avec le logiciel de traitement des images ENVI 4.5. Durant cette étude, nous

avons traité deux phases. L'une correspond à l'identification des sources de pollution et les impacts sur les ressources en eau. L'autre correspond à la cartographie de la vulnérabilité de la nappe à la pollution, et ce, dans le but de protéger la nappe contre les risques de la pollution.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Cartographie des sources de pollution des eaux à partir des images satellitaires

La protection des ressources en eaux contre la pollution constitue un aspect prioritaire de cette étude. Avec l'apparition des outils de télédétection et les images à haute résolution, il

est devenu facile de détecter les sources agricoles, urbaines et industrielles de la pollution. Pour ce faire, nous avons utilisé des données satellitaires ALSAT-2A, qui par leur haute résolution, fournissent les détails nécessaires pour la cartographie des sources de pollution.

4.1.1 Cartographie de l'occupation du sol

La végétation est la résultante des facteurs physico-géographiques (relief, lithologie et climat) à laquelle s'ajoute le facteur anthropique via le défrichement et la mise en culture ainsi que le reboisement. Son influence sur l'écoulement de surface autant que souterrain peut être négligée, d'une part en diminuant la force vive des eaux pluviales, et d'autre part en favorisant l'infiltration (BOULGHORBA, 2006). Du point de vue hydrologique, la végétation n'est pas considérée sous son aspect botanique ou phytogéographique, c'est l'aspect de la couverture du sol qui compte le plus. En fait, c'est la densité de l'occupation du sol qui intervient comme élément de différenciation tant sur le plan de l'écoulement que de l'infiltration (BOULGHORBA, 2006). Dans ce contexte, la connaissance de l'occupation du sol dans la plaine de Sidi Bel Abbès est très importante, car elle peut identifier les zones d'infiltration et de ruissellement et donc les zones de contamination de la nappe en cas de sources de pollution.

Nous avons réalisé une carte de l'occupation du sol de la plaine de Sidi Bel Abbès à partir de la méthode de classification supervisée de l'image Landsat 8 prise en mars 2016, en utilisant l'algorithme maximum de vraisemblance. Ainsi, en nous basant sur la méthode d'interprétation visuelle et de la classification supervisée de l'image ALSAT-2A, nous avons établi une carte d'occupation du sol plus détaillée de la plaine (Figure 2). Ces cartes d'occupation permettent de constater une superficie de 22,4 % de la surface occupée par des sols boisés, couvrant la partie sud entre El Hçaiba et Moulay Slissen. Dans les forêts denses et claires arbustives, le ruissellement est généralement très faible, protégeant le sol contre l'énergie des gouttes de pluie et favorisant une bonne infiltration des eaux.

Les terrains agricoles occupent une surface de 53,75 % (Tableau 1); ils rassemblent toutes les cultures, comme la céréaliculture, le maraîchage et l'association entre l'arboriculture et le maraîchage. Généralement, ces terrains présentent une infiltration moyenne des eaux, donc un risque moyen de contamination de la nappe, mais avec l'utilisation excessive des fertilisants, le risque de pollution des nappes est important.

4.1.2 Cartographie des zones d'irrigation intensive et d'arboriculture

La biomasse végétale présente une bonne réflectance dans la bande proche infrarouge. Nous avons établi une composition colorée en codant le proche infrarouge par la couleur rouge. Le résultat donne une image dont la couleur rouge foncé présente une importante biomasse végétale. Par l'interprétation

Tableau 1. Superficie de l'occupation du sol dans la plaine de Sidi Bel Abbès.

Table 1. Land cover in the Sidi Bel Abbès plain.

Occupation	Superficie (%)
Forêt	5,71
Forêt et maquis	16,69
Agriculture	41,25
Jachère	12,5
Terrain dégradé	3,2
Sol nu	2,6
Végétation clairsemée	13,5
Périmètre urbain	2,78
Zone incendiée	1,72
Plan d'eau	0,16

visuelle et l'application de l'indice de végétation normalisée (NDVI) sur l'image, les fortes valeurs de NDVI présentent une forte activité chlorophyllienne. Dans ce cas, nous avons cartographié les terrains en bonne activité chlorophyllienne, ce qui correspond à l'irrigation intensive et à l'arboriculture (Figure 3). Des produits fertilisants sont épanchés sur ces terrains. C'est un type de pollution diffuse des eaux

4.1.3 Identification des sources de la pollution d'origines urbaines solides

La plaine dispose de 12 décharges publiques sur une superficie de 49 ha (DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT DE SIDI BEL ABBÈS, 2016), localisées en majorité sur des terrains à hautes valeurs agricoles. À l'aide de l'image ALSAT-2A, nous avons cartographié les zones de décharges et le centre d'enfouissement technique (CET). Le CET de Sidi Bel Abbès est localisé sur un site agricole, à 450 m de la zone urbaine; c'est un danger pour la santé de la population en raison du biogaz. Le CET présente un risque de pollution des eaux souterraines, car il est localisé sur des impluviums des nappes phréatiques de faible profondeur avec des formations lithologiques perméables (mélange limon, marne, argile, sable, congolomérats) exposant les eaux souterraines à un grand risque de dégradation par les lixiviatés (Figure 4).

Si la mise en décharge demeure le moyen le plus économique et donc le plus utilisé pour l'élimination des déchets, elle présente cependant des risques de dégradation de l'environnement par la production des biogaz et des lixiviatés. Ces lixiviatés, en s'infiltrant dans le sous-sol, entraînent une forte dégradation des eaux souterraines (CHOFGI *et al.*, 2006).

4.1.4 Identification des sources de la pollution par les eaux usées urbaines

L'oued Mekerra reçoit les eaux usées urbaines sur 24 points de rejet, l'équivalent de 250 L.s⁻¹ d'eaux usées (Figure 5). Cet oued traverse plusieurs agglomérations dans la plaine sur une

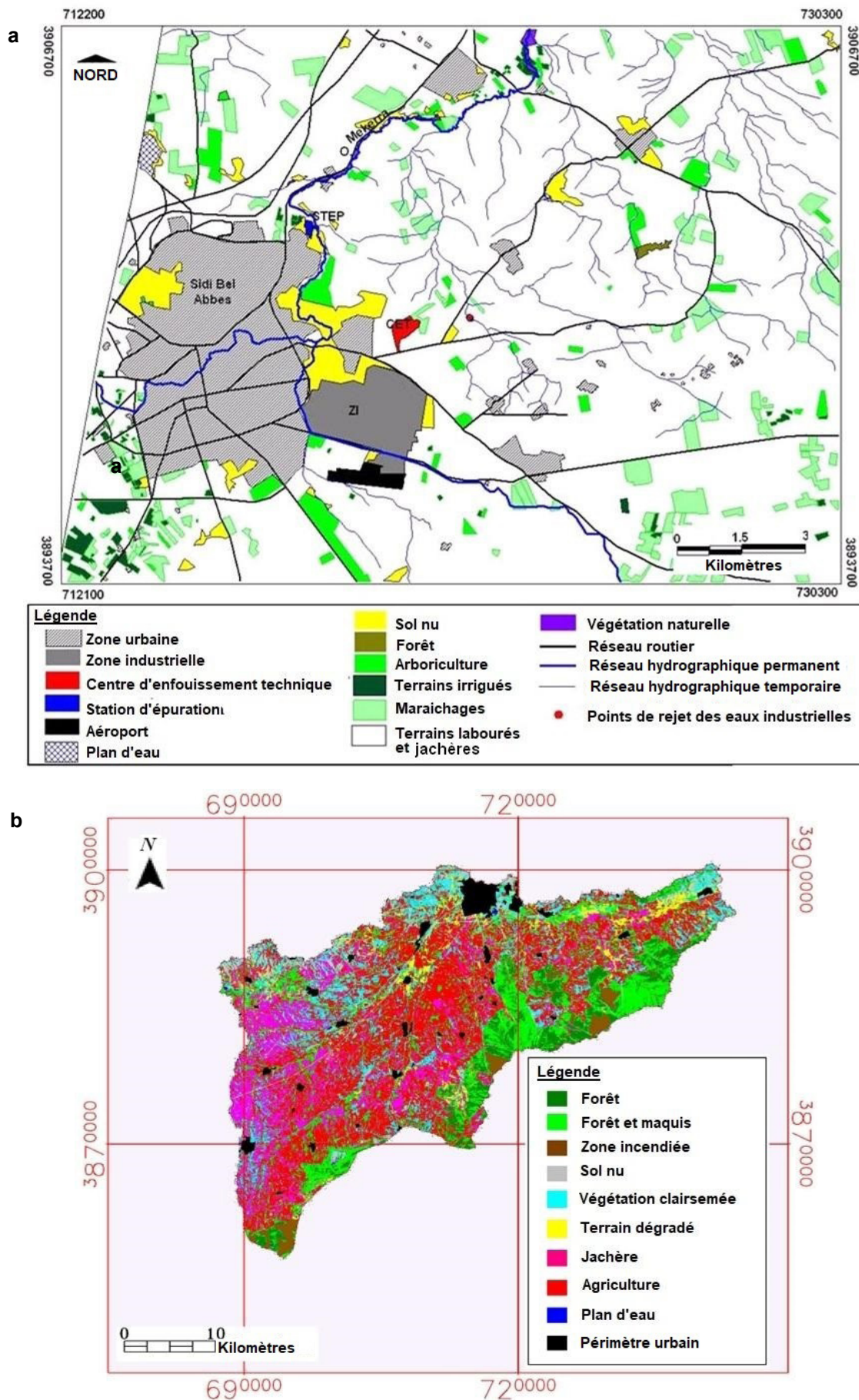


Figure 2. Cartes de l'occupation du sol de la plaine de Sidi Bel Abbès : a) image ALSAT-2A et b) image Landsat 8. *Land use maps of the Sidi Bel Abbès plain: a) ALSAT-2A image and b) Landsat 8 image.*

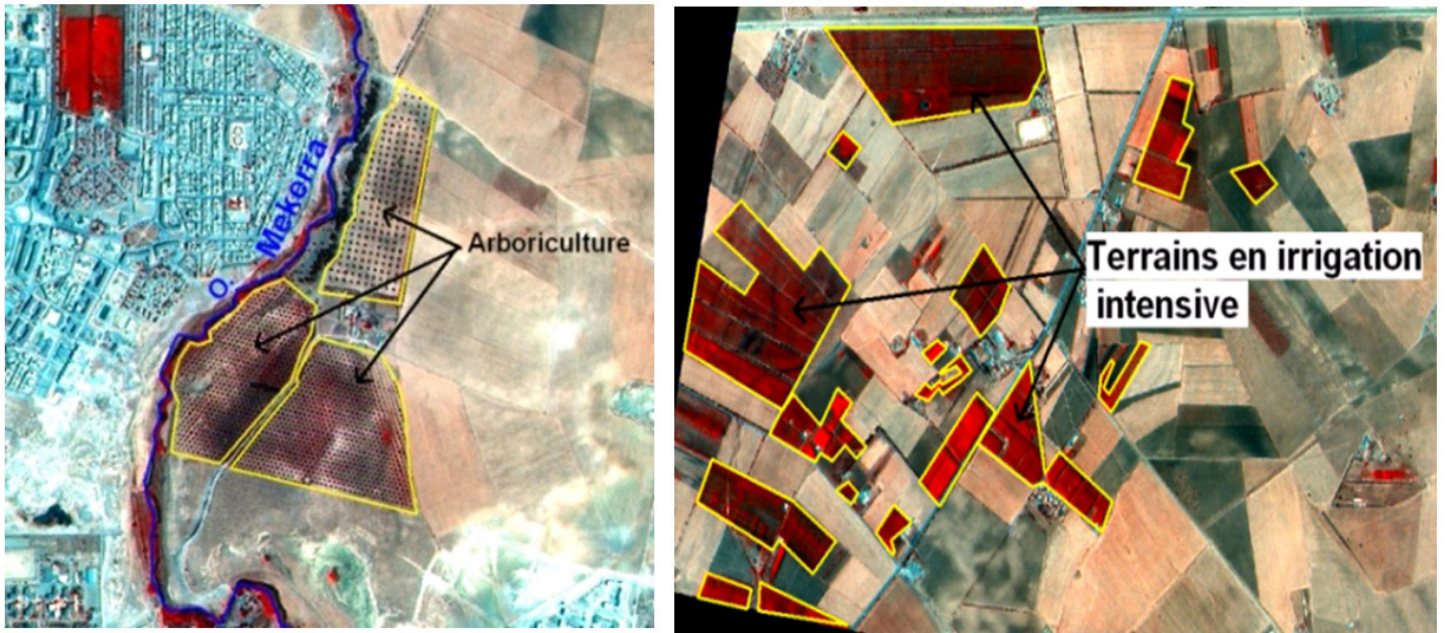


Figure 3. Cartographie des parcelles agricoles d'arboriculture et d'irrigation intensive.
 Mapping of agricultural plots of arboriculture and intensive irrigation.

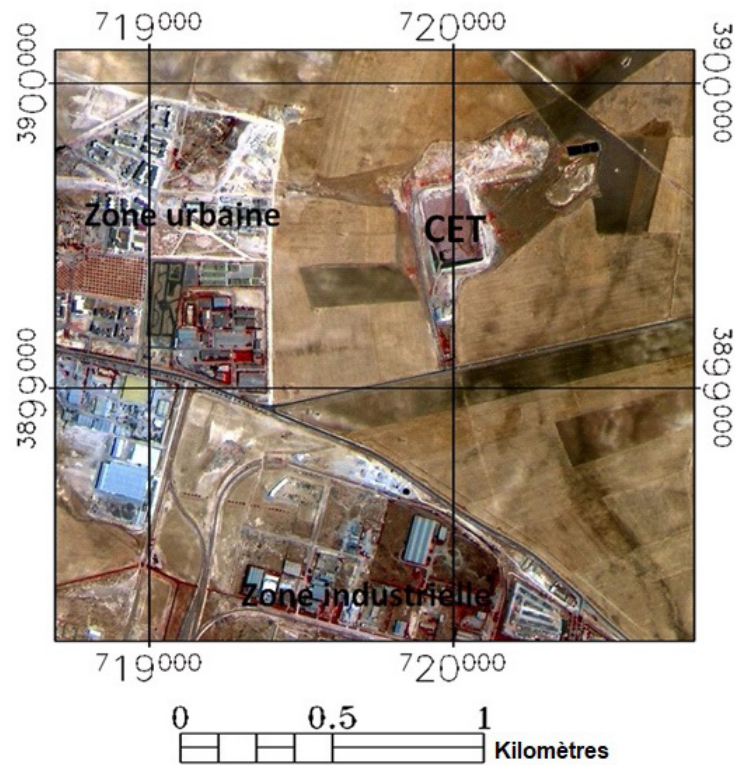


Figure 4. Localisation du centre d'enfouissement technique (CET) en plein milieu agricole et très proche d'une zone urbaine.
 Location of the technical landfill facility (CET) in an agricultural sector and very close to an urban area.

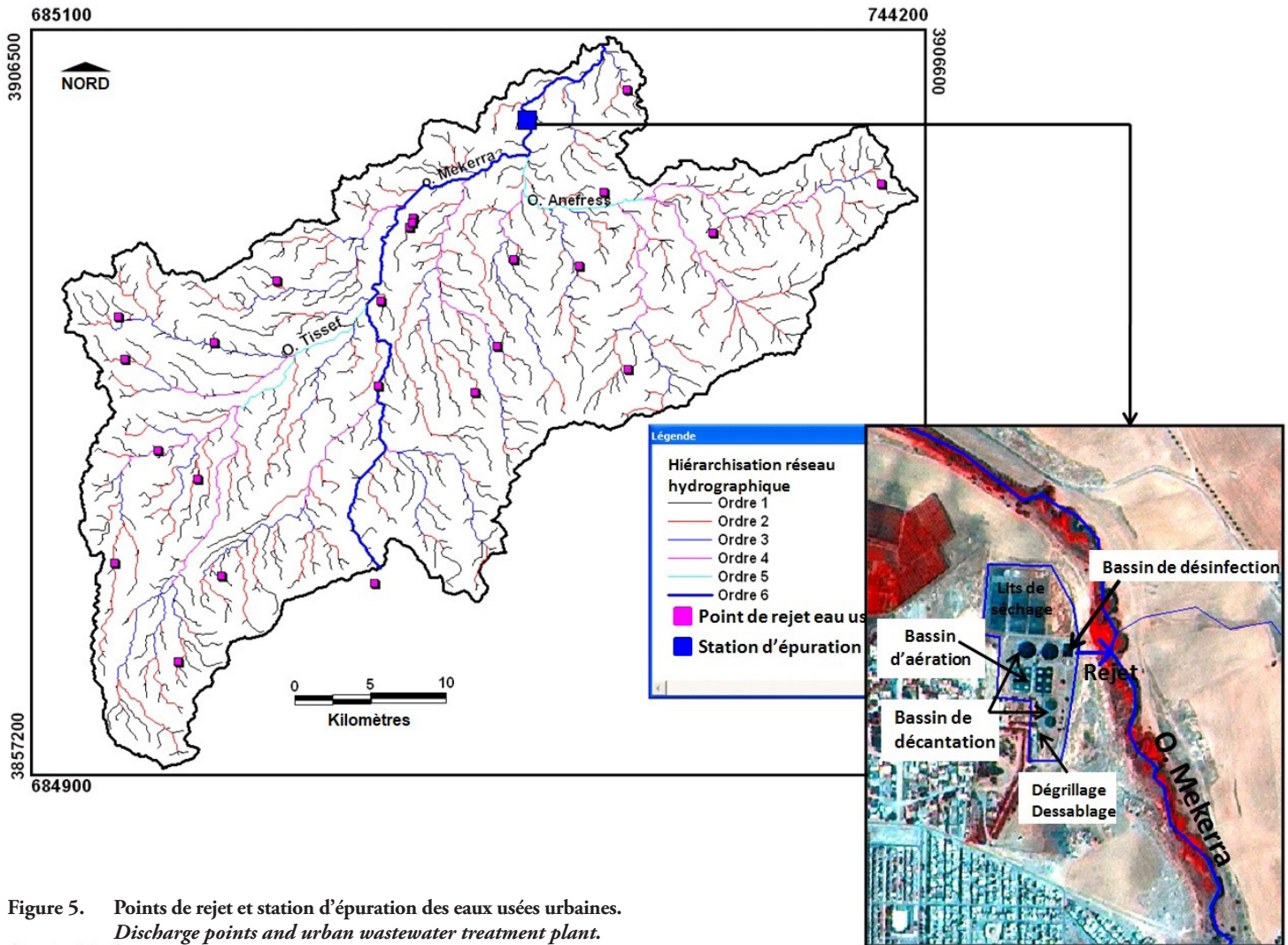


Figure 5. Points de rejet et station d'épuration des eaux usées urbaines.
Discharge points and urban wastewater treatment plant.

distance de 17,5 km (DIRECTION DES SERVICES DE L'HYDRAULIQUE DE SIDI BEL ABBÈS, 2016) et seules les eaux usées de l'agglomération de Sidi Bel Abbès sont traitées.

Selon la Direction des services de l'hydraulique de Sidi Bel Abbès pour la qualité des eaux, une étude effectuée durant l'année 2010 indique que la charge polluante des eaux de l'oued Mekerra est : DBO_5 de $41,296 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, DCO de $123,465 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, azote total $3\,193 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$, phosphore total $2\,342 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$. Ces valeurs font que les eaux d'oued Mekerra sont très polluées. L'oued présente une très faible concentration en oxygène et une très grande concentration en DBO_5 et DCO , d'où une eau fortement polluée provoquant le phénomène d'eutrophisation des eaux. Cet oued présente tous les types de pollution (physique, chimique et biologique), ce qui conduit, par conséquent, à une forte pollution des eaux du barrage de Chorfa.

L'évacuation des eaux usées non traitées présente un risque majeur de pollution des eaux souterraines, notamment pour l'oued Tissaf qui alimente constamment la nappe, car la majeure partie des débits de cet oued se réinfiltre dans la

nappe, particulièrement au niveau du chenal conglomeratique d'âge plio-quaternaire récent près de Sidi Khaled (YOUSFI, 2008). Ceci peut être étayé par l'analyse comparative des débits moyens journaliers collectés auprès de l'ANRH enregistrés par les deux stations hydrométriques de Sidi Bel Abbès (amont de la plaine) et de Sid Ali Benyoub (aval de la plaine) en période de hautes et basses eaux (1978/1979-2008/2009). Les débits moyens journaliers montrent l'existence d'une connexion permanente entre l'oued Tissaf (amont de la plaine) et la nappe alluviale pendant toute l'année (Figure 6).

En hautes eaux de novembre à mai, la logique d'accroissement des débits de la plaine d'amont vers l'aval est globalement respectée. Les nappes sont alors à leur niveau maximum où les oueds réagissent aux pluies. Cependant, en périodes stables (pas de crue), le débit de base de la station de Sidi Bel Abbès est relativement supérieur à celui de station de Sidi Ali Benyoub. Ce surplus de l'eau dans l'oued ne pourrait s'expliquer que par l'apport des eaux souterraines. En basses eaux, allant de juin jusqu'à la fin d'août, la relation oued-nappe est bien claire et confirme la situation stable qui a été enregistrée

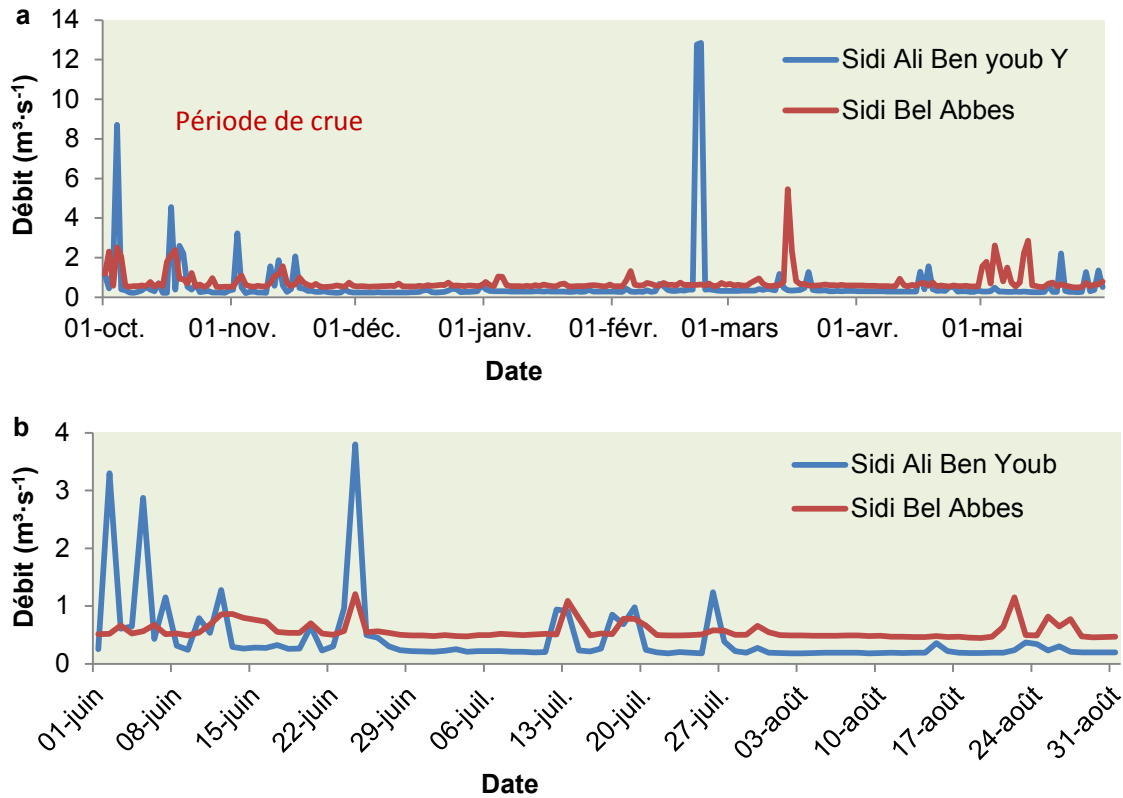


Figure 6. Analyse comparative des débits moyens journaliers des deux stations hydro-métriques (1978/1979-2008/2009) en période de a) hautes eaux et b) basses eaux.

Comparative analysis of the average daily flows at the two hydrometric stations (1978/1979-2008/2009) in: a) high water period and b) low water period.

en période des hautes eaux où les débits tendent à se rapprocher à ceux en période d'étiage.

4.1.5 Identification des sources de la pollution par les eaux usées industrielles : problème majeur de dégradation des eaux usées urbaines traitées

Sidi Bel Abbès dispose d'une zone industrielle située à l'est de l'agglomération. Elle est considérée comme le troisième pôle industriel de la région ouest de l'Algérie. Elle s'étend sur plus de 434 ha. Elle dispose d'un tissu industriel diversifié : électronique, mécanique agricole, agroalimentaire et parapharmaceutique. La zone industrielle utilise un volume considérable d'eau évacuée dans le réseau domestique à plus de 80 %. Ces eaux usées industrielles riches en matière organique et métaux lourds sont évacuées vers l'oued Elmaleh (effluent d'oued Mekerra). Les deux stations d'épuration existant au niveau du complexe de production du matériel agricole et l'industrie laitière OROLAIT sont en état d'arrêt. Donc l'oued est devenu le déversoir de toutes les unités industrielles. La majorité de ces unités n'étant pas équipées de dispositif de traitement des eaux, les résidus industriels s'accumulent dans l'oued. Ceci contribue de façon significative à la pollution des eaux usées traitées déversées dans l'oued Mekerra après le confluent avec l'oued Elmaleh (BENSALEM, 2008) (Figure 7).

Des analyses physicochimiques de quatre principaux sites de la station d'épuration des eaux usées ont été effectuées au laboratoire de la station STEP (BENSALEM, 2008) :

- St 1 : site situé à la station de pompage des eaux usées vers la STEP.
- St 2 : site situé à la sortie de la STEP où sont déversées les eaux épurées vers l'oued.
- St 3 : site localisé à 500 m du point de rejet des eaux épurées dans l'oued Mekerra. Il est choisi pour contrôler le devenir de la qualité des eaux épurées (possibilités d'utiliser les eaux épurées).
- St 4 : site localisé après le confluent de l'oued Makerra avec l'oued Elmaleh.

Dans la station St 4, la forte charge de métaux lourds est expliquée par la nature de déversement de la zone industrielle. La forte charge en phosphore est traduite par l'absence de la technique de la déphosphoration dans la STEP (BENSALEM, 2008). Ainsi, nous pouvons expliquer que la dégradation des eaux usées traitées par les nitrates est due essentiellement aux rejets des eaux industrielles non traitées (Figure 8). L'évacuation d'un volume important des eaux industrielles non traitées amène à une forte pollution des eaux urbaines traitées de Sidi Bel Abbès. À cet effet, la réutilisation de ces eaux en irrigation

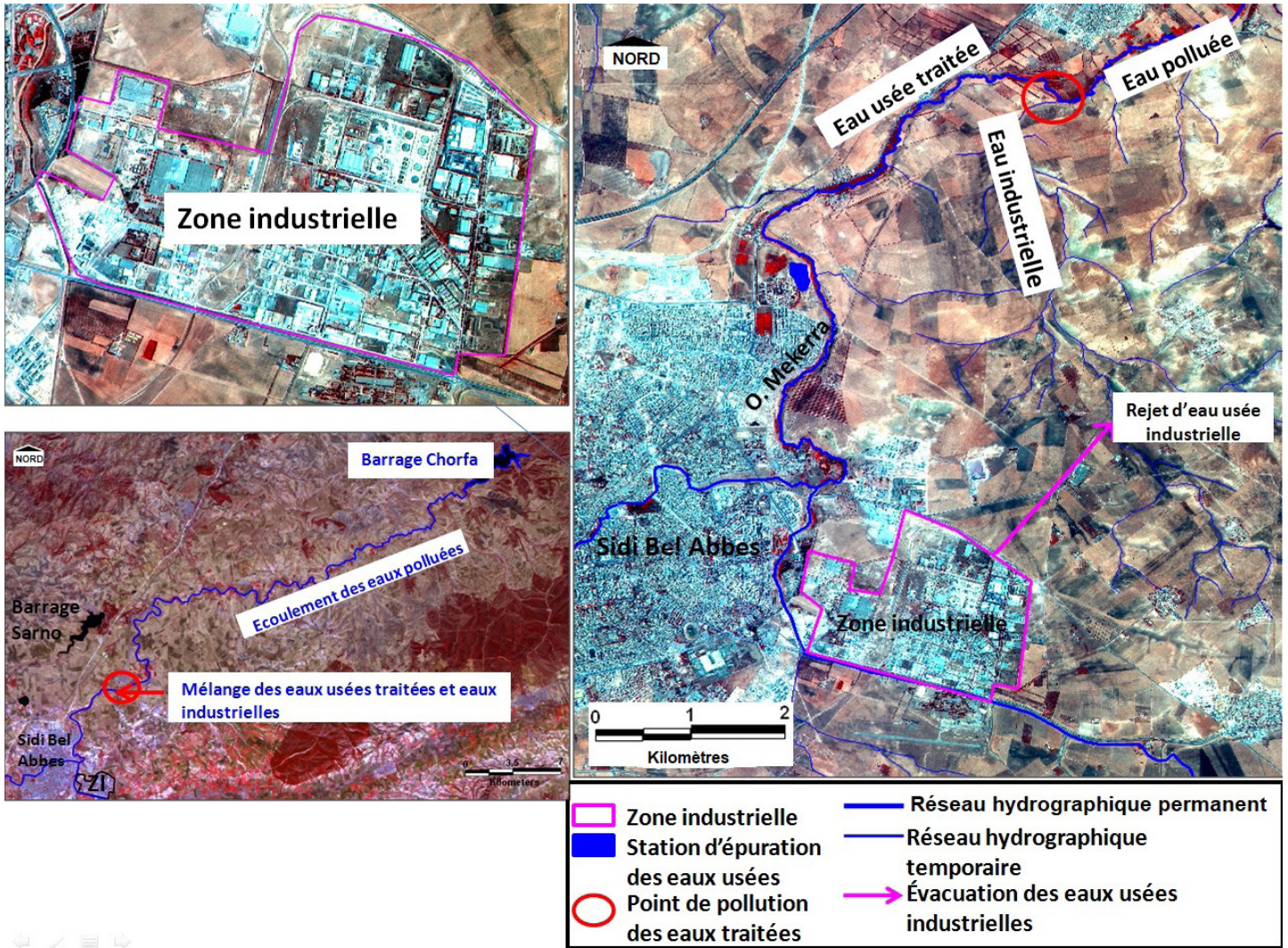


Figure 7. Rejet des eaux usées industrielles, pollution des eaux traitées et eaux du barrage de Chorfa. *Discharge of industrial wastewater, pollution of treated waters, and Chorfa dam waters.*

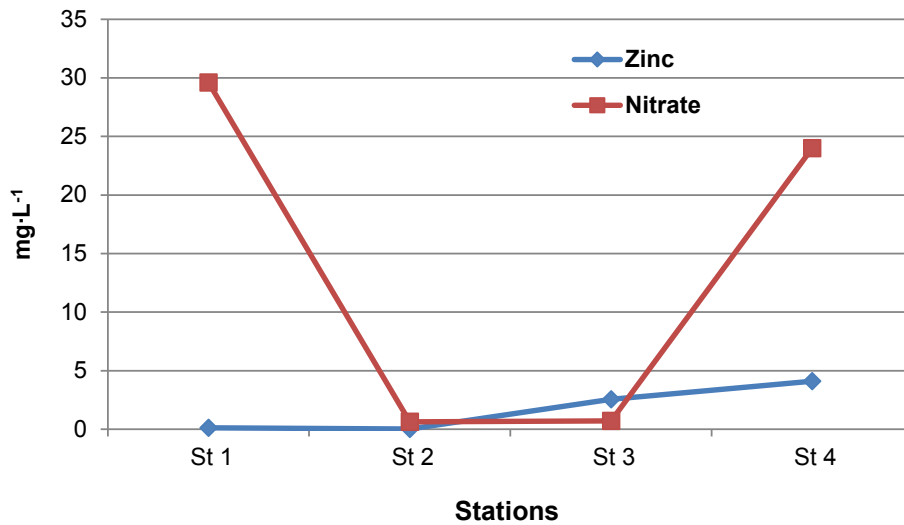


Figure 8. Graphe des valeurs de zinc et de nitrates pour les quatre stations analysées. *Graph of zinc and nitrate values at the four analysed stations.*

est devenue dangereuse, c'est une perte d'une ressource vitale et une perte économique.

Le rejet des eaux usées dans l'oued Mekerra provoque une forte pollution des eaux du barrage de Chorfa. Les analyses de la qualité des eaux du barrage réalisées par l'ANRH au mois de décembre 2016 montrent la forte dégradation organique des eaux utilisées pour l'alimentation en eau potable et pour l'irrigation. Le résidu sec est de $1\,940\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, l'oxygène dissous est $66,5\%$, le NH_4 est de $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, le nitrite est $0,22\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ et le phosphore représente $0,51\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Ces valeurs indiquent la pollution organique des eaux du barrage favorisant ainsi les phénomènes d'eutrophisation des eaux.

Face à tous ces risques de dégradation des eaux par les sources de pollution ponctuelle et diffuse dans la plaine de Sidi Bel Abbès, il est nécessaire de réaliser une étape du travail sur la préservation et la protection des ressources en eaux souterraines, et ce, par la cartographie de la vulnérabilité de la nappe alluviale à la pollution.

4.2 Cartographie de la vulnérabilité de la nappe alluviale à la pollution

De nombreuses méthodes de détermination de la vulnérabilité des eaux souterraines ont été développées dans le monde, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physique, chimique et biologique dans la zone noyée, à des méthodes de pondération entre différents critères affectant la vulnérabilité (GOGU et DASSARGUES, 2000; ALBINET et MARGAT, 1970). Parmi celles-ci, les méthodes dites de « cartographie à index avec pondération des critères » (*Point Count Systems Models*, PCSM) apparaissent les plus pertinentes vis-à-vis des réalités de terrain (GOGU et DASSARGUES, 2000).

Nous avons appliqué la méthode DRASTIC développée par l'association NWWA (National Water Well Association) conçue entre 1983 et 1987 (ZEROUALI et EL MESLOUHI, 1994). Elle est basée sur un système de notation numérique qui permet l'établissement des cartes de vulnérabilité (AL HALLAQ et ABU ELAISH, 2011), c'est la synthèse des connaissances lithologiques, pédologiques et hydrogéologiques d'une région (SMIDA *et al.*, 2010).

La particularité de cette méthode réside dans l'attention particulière qui est accordée aux sept paramètres physiographiques et hydrogéologiques (ES SAOUINI *et al.*, 2009, ROSEN 1994) qui sont : la profondeur du plan d'eau dans l'aquifère (D), la recharge nette (R), le type d'aquifère (A), le type de sol (S), la topographie (T), l'impact de la zone vadose (I) et la conductivité hydraulique (C) (Figure 9). À chaque

paramètre est assigné un poids d'une valeur comprise entre 1 et 5 (Tableau 2) et une cote de 1 à 10 (ALLER *et al.*, 1987).

Le paramètre profondeur de la nappe (D) a été établi à partir des relevés du niveau statique relatif aux forages et puits et aux piézomètres implantés dans la région. La méthode d'interpolation IDW (*Inverse Distance Weighting*) des mesures prises en décembre 2011 permet de réaliser un modèle numérique de profondeur. La variabilité spatiale de cette profondeur est classée en cinq classes allant de 4,5 à 50 m (MELLOUL *et al.*, 2009). La protection potentielle de l'aquifère augmente avec la profondeur de la nappe (SMIDA *et al.*, 2010).

La recharge nette annuelle (R) est la quantité d'eau atteignant la zone saturée sur une période donnée. Pour le calcul de la recharge, nous avons utilisé la méthode des équations de WILLIAMS et KISSEL (1991) qui dépend de la nature des formations géologiques et sur la base des données pluviométriques moyennes annuelles de 12 stations météorologiques (BENTEKHICI et SAAD, 2016; BENKESMIA *et al.*, 2017). La définition des classes de recharge (R) a été basée sur la notation accordée par LALLEMAND-BARRES (1994).

Le paramètre milieu aquifère (A) désigne la lithologie de l'aquifère et il intervient dans le piégeage des polluants. Son identification a été basée sur les logs et les coupes lithologiques des forages réalisés dans la zone d'étude et la carte hydrogéologique. L'analyse de ces données illustre que le matériau aquifère de la nappe alluviale de Sidi Bel Abbès est constitué essentiellement des alluvions (mélange limon, marne, argile, sable, conglomérats) et de marne et d'argile. Les caractéristiques du sol contrôlent les mouvements descendants des contaminants. En effet, la présence de matériaux fins (argiles, silts et limons) et de la matière organique dans le sol diminue la perméabilité intrinsèque, et retarde la migration des contaminants. Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des polluants est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande (SMIDA *et al.*, 2010). La carte de la nature des sols (S) est établie sur la base des travaux de FARAOUN et BENABDELI (2010).

Le paramètre topographie (T) représente les valeurs de la pente en degrés. Il traduit la capacité des eaux superficielles à introduire des agents polluants vers la nappe en influençant les taux d'infiltration et de ruissellement (MELLOUL *et al.*, 2009). Ce paramètre a été réalisé sur la base du traitement des données de télédétection (modèle numérique de terrain ASTER DEM).

La zone vadose ou la zone non saturée (I) correspond aux couches de terrain entre la surface topographique et la cote piézométrique maximale de la nappe. L'intérêt de cette

zone réside essentiellement dans sa perméabilité et sa capacité d'atténuation. Ce paramètre est obtenu par le traitement de la carte hydrogéologique réalisée par SOURISSEAU (1973). La zone non saturée en eau de la nappe alluviale de Sidi Bel Abbès est constituée de formations perméables. Par conséquent, le risque de pollution de cette nappe est élevé.

Et enfin, la conductivité hydraulique (C), qui est l'aptitude d'un aquifère à permettre le mouvement de l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique donné dont la direction diffère généralement de celle de l'écoulement. Ce paramètre est

étroitement lié à la granulométrie des formations lithologiques de l'aquifère, il peut ainsi être calculé directement à partir des mesures de terrain. Cette carte est évaluée par des résultats de l'interprétation des essais de pompages réalisés dans les forages. Nous nous sommes basés sur les données de YOUSFI (2008) et par la méthode d'interpolation IDW des valeurs de la conductivité hydraulique, nous avons réalisé un modèle numérique de ce paramètre.

Dans ce cas, l'indice DRASTIC résulte de la somme pondérée des indices partiels correspondant à chaque

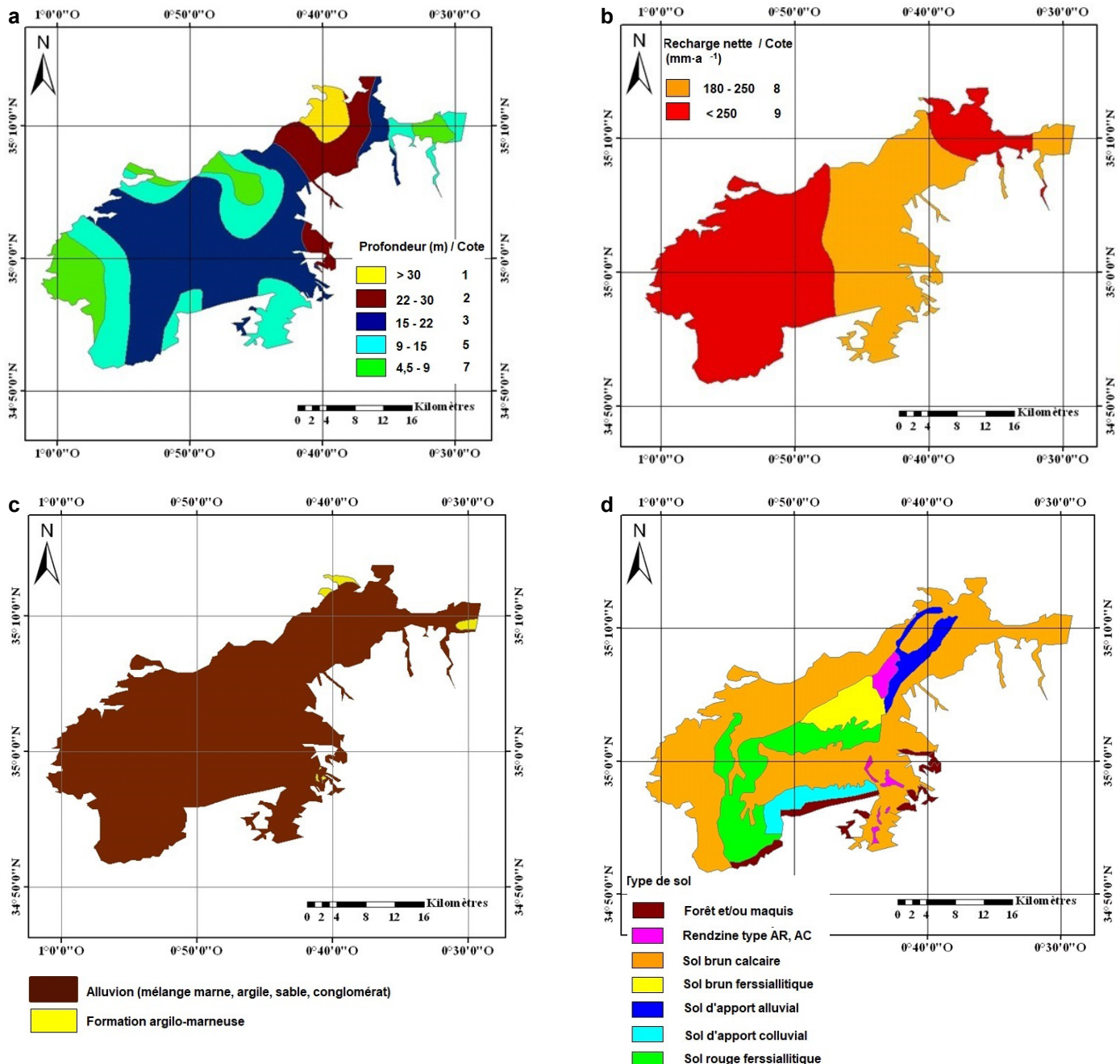


Figure 9. Cartes des paramètres et de l'indice DRASTIC : a) profondeur (D), b) recharge nette (R), c) type d'aquifère (A), d) type de sol (S). *DRASTIC parameter and index maps: a) depth (D), b) net recharge (R), c) aquifer type (A) d) soil type (S).*

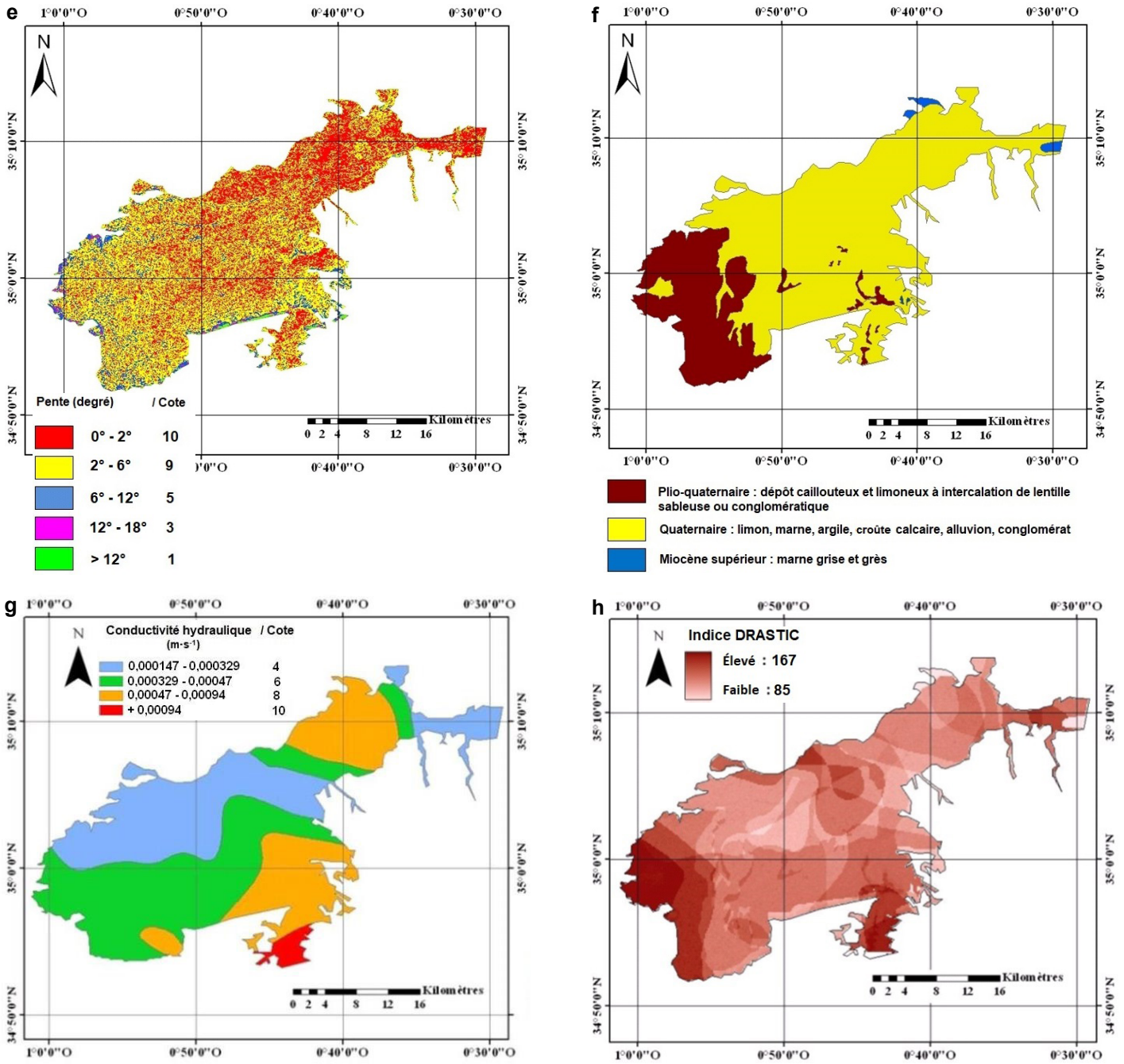


Figure 9 (suite).

Cartes des paramètres et de l'indice DRASTIC : e) pente (*T*), f) impact de la zone vadose (*I*), g) conductivité hydraulique (*C*), h) croisement des paramètres (indice DRASTIC).

(continued)

DRASTIC parameter and index maps: e) slope (T), f) impact of vadose area (I), g) hydraulic conductivity (C), h) pooling of the parameters (DRASTIC index).

Tableau 2. Poids des paramètres DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987).
 Table 2. Weight of DRASTIC parameters (ALLER *et al.*, 1987).

Symbole	Paramètre	Poids
<i>D</i>	Profondeur de la nappe	5
<i>R</i>	Recharge efficace	4
<i>A</i>	Milieu aquifère	3
<i>S</i>	Type de sol	2
<i>T</i>	Topographie	1
<i>I</i>	Impact de la zone vadose	5
<i>C</i>	Conductivité hydraulique	3

paramètre (Équation 1). Il représente la mesure du niveau de risque de contamination. Le risque augmente avec la valeur de l'indice (ALLER *et al.*, 1987, ZEROUALI et EL MESLOUHI, 1994). Il prend une valeur maximale de 167 (100 %) et une valeur minimale de 85 (0 %) (Figure 9). L'application de la classification d'ENGEL *et al.* (1996) (Tableau 3) a permis d'obtenir trois classes de vulnérabilité : faible, moyenne et élevée.

$$\text{Indice DRASTIC} \quad (1) \\ = (D_c D_p) + (R_c R_p) + (A_c A_p) + (S_c S_p) + (T_c T_p) + (I_c I_p) + (C_c C_p)$$

où c et p représentent respectivement la note et le poids attribués à chaque paramètre DRASTIC.

Trois degrés de vulnérabilité sont mis en évidence sur la carte de la vulnérabilité (Figure 10). Il s'agit de :

1. Classe de faible vulnérabilité. Elle occupe une faible superficie (0,71 %), expliquée par l'imperméabilité des formations lithologiques et la forte profondeur de la nappe.
2. Classe de moyenne vulnérabilité. Elle occupe 64,84 % de la superficie. Le degré moyen est lié à des profondeurs moyennes de l'aquifère (15 et 30 m) et à la nature lithologique perméable. La moyenne vulnérabilité est localisée au niveau de la cuvette de Sidi Bel Abbès, Lamtar, Hassi Zahana et Boukhanefis. La classe moyenne appartient à une catégorie de protection hydrogéologique incertaine des eaux souterraines.
3. Classe de vulnérabilité élevée, au sud-ouest de la nappe, représente 34,44 % de la superficie. Ce degré est lié à la faible profondeur de la nappe (de 4,5 à 15 m) et à la perméabilité des formations avec une pente faible. Ces zones nécessitent une attention particulière dans les futures décisions d'utilisation des terres. Dans cette classe, les pratiques actuelles de cultures influent grandement sur la qualité des eaux. Les décharges publiques de Ben Badis et Sidi Ali Ben Youb se trouvent dans des sites de forte vulnérabilité qui conduisent à des conséquences néfastes sur la qualité des eaux souterraines.

Les résultats obtenus par la carte de la vulnérabilité montrent que les eaux souterraines de la nappe alluviale de Sidi Bel Abbès ont une protection hydrogéologique incertaine. Dans ce cas, un suivi analytique régulier s'avère nécessaire ainsi que des contrôles des activités qui sont menées en surface. La stagnation et l'infiltration des eaux usées industrielles et urbaines non traitées déversées directement dans l'oued Mekerra constituent un facteur aggravant de la pollution chimique et bactériologique des eaux souterraines. Actuellement, la nappe est très chargée en nitrates.

Pour la validation de nos résultats, nous nous sommes basés sur la qualité des eaux. Plusieurs auteurs (ANANI, 2006;

Tableau 3. Degré de vulnérabilité selon les valeurs de l'indice DRASTIC (ENGEL *et al.*, 1996).

*Table 3. Degree of vulnerability according to the DRASTIC index values (ENGEL *et al.*, 1996).*

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	<101
Moyen	101-140
Élevé	140-200
Très élevé	>200

MOHAMED, 2001; ISABEL *et al.*, 1990; HAMZA *et al.*, 2007; DIBI *et al.*, 2007; SBARGOUD, 2013; SCHNEBELEN *et al.*, 2001) ont vérifié la validité de la méthode DRASTIC en se basant sur des données chimiques des eaux souterraines.

Des analyses physicochimiques ont été réalisées en mai 2015 au niveau des deux stations de surveillance des eaux souterraines (ANRH) correspondant à un forage localisé dans la zone de Sidi Lahcen et présentant une forte vulnérabilité à la pollution avec de faibles profondeurs de la nappe, ainsi qu'à un autre forage localisé dans la zone de Caid Belarbi (est de la nappe) et présentant une vulnérabilité moyenne à la pollution. Les résultats des analyses du premier forage donnent des teneurs très élevées en NO_3 (118 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) et importantes en SO_4 (291 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) et un résidu sec de 1 888 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, ces valeurs indiquent une mauvaise qualité des eaux. Les résultats des analyses du deuxième forage donnent des teneurs moyennes en NO_3 (30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) et en SO_4 (34 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). D'autres analyses ont été effectuées en février 2016 pour les eaux de la source d'Ain Skhona à Sidi Ali Ben Youb localisée dans la zone de forte vulnérabilité. Ces analyses donnent des valeurs de 26 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de NO_3 , 0,39 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de NH_4 et 710 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de résidu sec. En général, toutes les valeurs de ces analyses présentent des indicateurs de pollution et peuvent valider les résultats obtenus par l'application de la méthode DRASTIC.

La pollution des eaux souterraines de la zone de Sidi Lahcen est essentiellement d'origine agricole. La libéralisation du secteur agricole a facilité aux agriculteurs l'utilisation de produits chimiques pour le traitement des cultures (engrais et produits phytosanitaires) afin d'augmenter la production; notamment, les incitations financières introduites par les Programmes nationaux de développement agricole (PNDA) mis en œuvre par l'État. Les objectifs du PNDA convergent principalement vers la restructuration du territoire agricole et le développement qualitatif et quantitatif de la production par la relance de l'investissement agricole. L'infiltration et la stagnation des eaux usées déversées directement dans l'oued Mekerra constituent un facteur aggravant de pollution chimique et bactériologique des eaux souterraines. Actuellement, la nappe alluviale de Sidi Bel Abbès présente des eaux chargées de nitrates, à la limite de la potabilité.

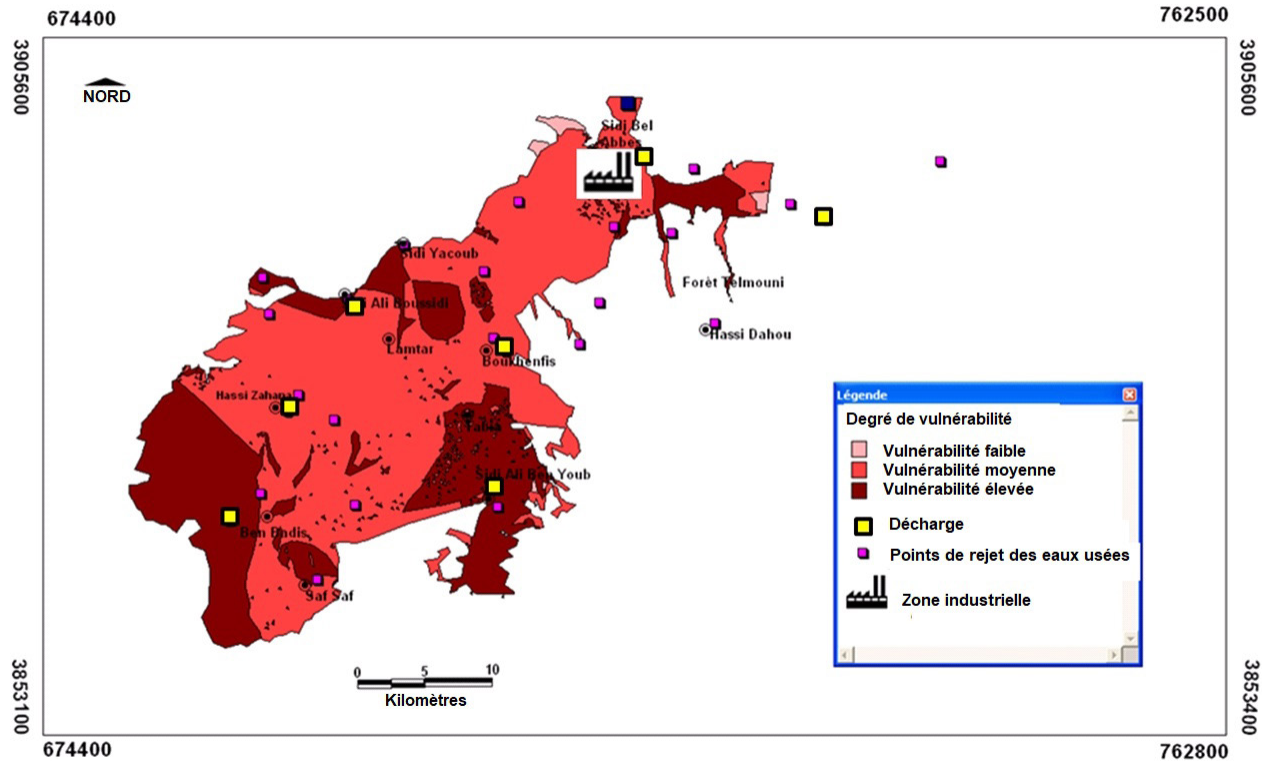


Figure 10. Carte des zones de vulnérabilité de la nappe et des sources de pollution.
Map of areas of groundwater vulnerability and pollution sources.

5. CONCLUSION

Les résultats obtenus lors de ce travail confirment que la télédétection par l'utilisation des images à haute et moyenne résolution et les SIG constituent des outils puissants d'analyse spatiale, permettant d'apporter une aide précieuse à l'analyse des problèmes de pollution des eaux. Le traitement des images Landsat 8 et la résolution offerte par l'imagerie ALSAT-2A sont performants pour :

- La réalisation des cartes d'occupation du sol, facteur de ruissellement et d'infiltration des polluants.
- La cartographie des zones de sources de pollution urbaines, agricoles et industrielles.
- L'identification du cheminement des rejets des eaux usées dans l'oued ainsi que l'évaluation de ses impacts.

L'industrie, les eaux usées urbaines, les décharges et la pollution agricole dans la plaine de Sidi Bel Abbès sont les sources principales de dégradation des eaux superficielles et souterraines, car elles engendrent tous types de pollution (huiles, produits chimiques, métaux lourds, détergents, matières organiques, bactéries). Malgré tous les efforts entrepris par les autorités concernées, le problème de pollution persiste toujours, d'où la nécessité de surveillance continue et des mesures sévères et inaltérables qui doivent être prises envers les pollueurs. L'assainissement dans la plaine constitue alors

une problématique cruciale. L'important volume des eaux usées rejeté sans traitement dans l'oued Mekerra conduit à une forte dégradation de la qualité de la nappe alluviale et de surface, notamment les eaux du barrage Chorfa. Pour une meilleure surveillance de la pollution des eaux, il convient de cartographier la vulnérabilité de la nappe alluviale. La carte de vulnérabilité réalisée en appliquant la méthode DRASTIC, donne un écart de variation qui permet de classer la vulnérabilité en trois classes : faible, moyenne et élevée. Le degré de vulnérabilité élevée représente 34,4 % de la surface. Le risque y est important, vu la présence de plusieurs sources de pollution dans la région de Sidi Bel Abbès. La classe dominante est la moyenne avec 64,84 % de la surface. La vulnérabilité de ces classes peut évoluer par les effets conjugués de l'homme.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont au directeur de l'Agence spatiale algérienne (ASAL) pour la disponibilité des données en images ALSAT-2A, l'Agence nationale des ressources hydriques (ANRH) pour leur aide à la collecte des données de la qualité des eaux, ainsi qu'aux réviseurs anonymes de la *Revue des Sciences de l'Eau* pour leurs remarques constructives qui ont permis d'améliorer la qualité de l'article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABTOUT L. (2013). *Étude hydrogéologique de la plaine de Sidi Bel Abbès : modélisation et protection de la ressource en eau*. Mémoire de magister, Univ. Sciences et Technologie Houari Boumediene, Algérie, 140 p.
- ALBINET M. et J. MARGAT (1970). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bulletin BRGM*, 2 (3-4), 13-22.
- ALLER L., T. BENNET, J.H. LEHR, R.J. PETTY et G. HACKETT (1987). *DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings*. US Environmental Protection Agency, EPA/600/2-87-036, États-Unis, 455 p.
- AL HALLAQ A. et B. ABU ELAISH (2011). Determination of groundwater vulnerability zones to contamination in Khanyounis Governorate, Gaza Strip, using the DRASTIC model within GIS. *Umm Al-Qura Univ. J. Social Sciences*, 4 (1), 55 p.
- ANANI A.T. (2006). *Évaluation et cartographie des zones vulnérables à la pollution des eaux souterraines au niveau du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) par les méthodes DRASTIC et GOD*. Mémoire de DEA, Univ. Cocody, Côte d'Ivoire, 71 p.
- BENSALEM M.B. (2008). *Contribution à l'étude de l'efficacité de l'épuration des eaux usées dans la ville de Sidi Bel Abbès*. Mémoire de magister, Univ. Djillali Liabes, Algérie, 120 p.
- BENTEKHICI N. et A. SAAD (2016). Cartographie de la vulnérabilité de la nappe à la pollution dans la plaine de Sidi Bel Abbès. Apport des données de télédétection et le SIG. *Bull. Sci. Géogr.*, 30, 42-52.
- BENKESMIA Y., N. BENTEKHICI et L.W. KEBIR (2017). Estimation and mapping of infiltration based on a multi criteria analysis. *Acta Geobalkanica*, 3-1, 27-33.
- BOULGHORBA N. (2006). *Protection de la ville de Skikda contre l'inondation - Essai de PPRI*. Mémoire de magister, Univ. Batna, Algérie, 179 p.
- CHOFGI A., A. YOUNSI, K. EL LHADI, J. MANIA et A. VERON (2006). Impact environnemental d'une décharge publique non contrôlé sur la population et les eaux souterraines : cas d'El Jadida, Maroc. *Actes du Colloque international de Bamako*, 12-16 juin 2006, Bamako, Mali. Secrétariat international francophone pour l'évaluation environnementale, Maroc, 13 p.
- DIBI B. D. INZA, K. KOFFI, N. SORO, K.J. KOUAME et I. SAVANE (2007). Évaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution en aquifère confiné selon la méthode DRASTIC : cas de la région d'Aboisso, Sud-est de La Côte d'Ivoire. *Eur. J. Sci. Res.*, 18 (3), 500-513.
- DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT DE SIDI BEL ABBÈS (2016). *Données sur l'environnement de la plaine de Sidi Bel Abbès*. Rapport No 20, Sidi Bel Abbès, Algérie, 120 p.
- DIRECTION DES SERVICES AGRICOLES DE SIDI BEL ABBÈS (2016). *L'agriculture dans la plaine de Sidi Bel Abbès*. Rapport No 3, Sidi Bel Abbès, Algérie, 23 p.
- DIRECTION DES SERVICES DE L'HYDRAULIQUE DE SIDI BEL ABBÈS (2016). *Étude sur les ressources en eaux dans la plaine de Sidi Bel Abbès*. Rapport No 23, Sidi Bel Abbès, Algérie, 55 p.
- ENGEL B., K. NAVULUR, B. COOPER et L. HAHN (1996). Estimating groundwater vulnerability to non-point source pollution from nitrates and pesticides on a regional scale. *Int. Assoc. Hydrol. Sci.*, 235, 521-526.
- ES SAOUINI H., M. AMHARREF et A.B. BERNOUSSI (2014). Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : statique ou dynamique ? Application à la nappe de R'Mel (Maroc). *IJJAS*, 6 (4), 929-940.
- FARAOUN F. et K. BENABDELI (2010). Cartographie et caractérisation physico-chimique des sols de la plaine de Sidi Bel Abbès (Algérie occidentale). *Afr. Sci.*, 6 (3), 18-26.
- GOGU R.C. et A. DASSARGUES (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environ. Geol.*, 39 (6), 549-559.
- HADDOUCHE A. (2011). *Étude comparative sur la vulnérabilité à la pollution des aquifères dans deux milieux contrastés : Mitidja Est et oued M'ya*. Mémoire de magister, Univ. Sciences et Technologie Houari Boumediene, Algérie, 124 p.
- HALLOUCHE B., M. BENYAHIA, K. MOUEDDENE et A. MAROK (2010). Apport de l'hydro géomorphologie dans la cartographie des zones inondables. Exemple de la plaine de Sidi Bel Abbès (Algérie Nord occidentale). *Sécheresse*, 21 (3), 219-224.

- HAMZA M., A. HAFEDH, A. FRANCE'S et R. RODRIGUEZ (2007). Validité de l'application des méthodes de vulnérabilité DRASTIC, SINTACS et SI à l'étude de la pollution par les nitrates dans la nappe phréatique de Metline-Ras Jebel-Raf Raf (Nord-Est tunisien). *CR Geosci.*, 339 (7), 493-505.
- ISABEL D., P. GELINAS et F. AUBRE (1990). Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines au Québec. *Rev. Sci. Eau*, 23 (3), 255-258.
- LALLEMAND-BARRES A. (1994). *Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions*. Bureau de recherches géologiques et minières, R37928, Orléans, France, 22 p.
- MOHAMED R.M. (2001). Évaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher, Nord-Est algérien, selon la méthode DRASTIC. *Sciences et changement planétaires. Sécheresse*, 12 (2), 95-101.
- MEDDI M., A. TALIA et C. MARTIN (2009). Évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie) *Physio-Géo*, 3-1, 61-84.
- MELLOUL A., M. BOUGHRIBA et M. BOUFAIDA (2009). Étude de la contamination des ressources en eaux souterraines et cartographie de la vulnérabilité d'un aquifère soumis au climat semi-aride méditerranéen : cas de la plaine côtière de Saïdia, Maroc. *Sécheresse*, 20 (2), 223-231.
- ROSEN L. (1994). A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions. *Groundwater*, 32 (2), 278-285.
- SBARGOUD S. (2013). Validité de l'application de la méthode de vulnérabilité DRASTIC à l'étude de la pollution par les nitrates dans la Mitidja (Nord d'Algérie). *Conférence GeoTunis*. 8-12 avril 2013, Tunis, Tunisie, 22 p.
- SCHNEBELEN N., J.P. PLATEL, Y. LENINDRE et D. BAUDRY (2001). *Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5. Opération sectorielle. Protection de la nappe de l'oligocène en région bordelaise. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution*. Bureau de recherches géologiques et minières, RP-51178-FR, France, 75 p.
- SMIDA H., C. ABDELLAOUI, M. ZAÏRI et H. BEN DHIA (2010). Cartographie des zones vulnérables à la pollution agricole par la méthode DRASTIC couplée à un système d'information géographique (SIG) : cas de la nappe phréatique de Chaffar (sud de Sfax, Tunisie). *Sécheresse*, 21 (2), 131-146.
- SOURISSEAU B. (1973). *Étude hydrogéologique de la nappe de Sidi Bel Abbès*. Rapport de la Direction des études de milieu et de la Recherche hydraulique, Algérie, 80 p.
- WILLIAMS J.R. et D.B. KISSEL (1991). Water percolation: an indicator of nitrogen-leaching potential. Dans : *Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability*. FOLLETT R.F., D.R. KEENEY et R.M. CRUSE (éd.), Soil Science Society of America, Madison, WI, États-Unis, Chap. 4, pp. 59-83.
- YOUSFI S. (2008). *Hydrodynamique et modélisation de la nappe alluviale de la plaine de Sidi Bel Abbes (Nord-ouest Algérien)*. Mémoire de magister, Univ. Abou Bakr Belkaid, Algérie, 91 p.
- ZEROUALI A. et M.R. EL MESLOUHI (1994). Élaboration de la vulnérabilité moyennant la méthode DRASTIC et le Système d'Information Géographique (SIG) (cas de la nappe de Souss-Chtouka). Dans : *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. VRBA J. et A. ZOPOROZEC (éd), IAH International Contributions to Hydrogeology, Vol. 16, H. Heise, Hanovre, Allemagne, pp. 94-99.