

Application du modèle DKPR pour la cartographie de la vulnérabilité des eaux de surface à la contamination : cas du barrage 9 avril 1947 (Maroc septentrional)

Application of the DKPR Model for the mapping of the vulnerability of surface water to contamination: Case of the 9 April 1947 Dam (Northern Morocco)

Ismail Hilal, Jamal Eddine Stitou El Messari, Jesús Gabriel Moreno Navarro, Mohamed Reda Aoulad Mansour et Mohamed Hassani Zerrouk

Volume 31, numéro 1, 2018

Reçu le 6 juillet 2017, accepté le 15 novembre 2017

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1047054ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/1047054ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

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

ISSN

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Hilal, I., Stitou El Messari, J. E., Moreno Navarro, J. G., Aoulad Mansour, M. R. & Hassani Zerrouk, M. (2018). Application du modèle DKPR pour la cartographie de la vulnérabilité des eaux de surface à la contamination : cas du barrage 9 avril 1947 (Maroc septentrional). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 31(1), 75–86. <https://doi.org/10.7202/1047054ar>

Résumé de l'article

Dans ce travail, nous présentons une méthode d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité à la contamination des eaux du barrage 9 avril 1947 (Maroc). Ses eaux sont connues pour un fort taux de la pollution et une activité anthropique considérable, malgré qu'elles soient destinées à l'alimentation en eau potable de plus de 760 000 habitants. Pour ce faire, nous avons appliqué un modèle français qui a été nommé DKPR et qui comprend quatre facteurs : l'accessibilité du milieu aquatique (*D*), le fonctionnement hydrique du sol (*K*), la pente (*P*) et l'érosivité des pluies (*R*). La somme pondérée de ces facteurs, obtenue par le biais d'un logiciel SIG, nous a fourni un indice nommé V_r qui varie entre 0 à 4. À l'aide de cet indice, une carte de vulnérabilité à la contamination sur l'ensemble du bassin versant a été élaborée. Les zones présentant une moyenne ou faible vulnérabilité occupent respectivement 43 % et 38 % de la surface du bassin versant. Elles sont liées principalement au domaine forestier et agricole à moyenne et faible pente. Les zones à forte vulnérabilité occupent 14 % de la surface et sont liées aux secteurs anthropisés à forte pente. Les zones à très faible ou très forte vulnérabilité n'occupent que 4 % et 1 % respectivement de la surface du bassin versant. Les premières présentent les zones humides tandis que les secondes les terrains nus imperméables à forte pente.

APPLICATION DU MODÈLE DKPR POUR LA CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ DES EAUX DE SURFACE À LA CONTAMINATION : CAS DU BARRAGE 9 AVRIL 1947 (MAROC SEPTENTRIONAL)

*Application of the DKPR Model for the mapping of the vulnerability of surface water to contamination: Case of the 9 April 1947 Dam
(Northern Morocco)*

ISMAIL HILAL^{1*}, JAMAL EDDINE STITOU EL MESSARI¹, JESÙS GABRIEL MORENO NAVARRO², MOHAMED REDA
AOULAD MANSOUR³, MOHAMED HASSANI ZERROUK⁴

¹Équipe de Recherche en Géologie et Océanologie, Département de Géologie, Faculté des sciences, Université Abdelmalek
Essaadi, BP 2121, Tétouan, Maroc

²Département de géographie physique et d'analyse géographique régionale, Université de Séville, C/María de Padilla, BP 41004
Séville, Espagne

³Division de gestion durable des ressources en eau, Service qualité de l'eau, Agence du Bassin Hydraulique Loukkos, BP 616,
Tétouan, Maroc

⁴Laboratoire de Recherche et Développement en Sciences de l'Ingénieur, Faculté des Sciences et Techniques Al Hoceima,
Université Mohamed Premier, Maroc

Reçu le 6 juillet 2017, accepté le 15 novembre 2017

RÉSUMÉ

Dans ce travail, nous présentons une méthode d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité à la contamination des eaux du barrage 9 avril 1947 (Maroc). Ses eaux sont connues pour un fort taux de la pollution et une activité anthropique considérable, malgré qu'elles soient destinées à l'alimentation en eau potable de plus de 760 000 habitants. Pour ce faire, nous avons appliqué un modèle français qui a été nommé DKPR et qui comprend quatre facteurs : l'accessibilité du milieu aquatique (D), le fonctionnement hydrique du sol (K), la pente (P) et l'érosivité des pluies (R). La somme pondérée

de ces facteurs, obtenue par le biais d'un logiciel SIG, nous a fourni un indice nommé V_r qui varie entre 0 à 4. À l'aide de cet indice, une carte de vulnérabilité à la contamination sur l'ensemble du bassin versant a été élaborée. Les zones présentant une moyenne ou faible vulnérabilité occupent respectivement 43 % et 38 % de la surface du bassin versant. Elles sont liées principalement au domaine forestier et agricole à moyenne et faible pente. Les zones à forte vulnérabilité occupent 14 % de la surface et sont liées aux secteurs anthropisés à forte pente. Les zones à très faible ou très forte vulnérabilité n'occupent que 4 % et 1 % respectivement de la surface du bassin versant. Les

premières présentent les zones humides tandis que les secondes les terrains nus imperméables à forte pente.

Mots-clés : *barrage 9 avril 1947, nord du Maroc, hydrologie, modèle DKPR, SIG, vulnérabilité.*

ABSTRACT

In this work we present a method for assessing and mapping the vulnerability for water contamination around the 9 April 1947 dam in Morocco. These waters are subject to high levels of pollution and a significant anthropogenic activity, despite the fact that they are intended to supply drinking water for more than 760 000 people. To do this, we applied the DKPR Model, which includes four factors: accessibility of the aquatic environment (*D*), hydric functioning of the soil (*K*), slope (*P*) and susceptibility to rain erosion (*R*). The weighted sum of these factors, obtained with GIS software, gave us a vulnerability index named (*V_v*) and a ranking from 0 to 4. On the basis of this index, a vulnerability map was developed for contamination throughout the watershed. Areas with medium or low vulnerability occupy respectively 43% and 38% of the catchment area. They are mainly linked to the forest and agricultural domains with medium and low slopes. Areas of high vulnerability occupy 14% of the surface area and are linked to high-slope man-made areas. Areas with very low or very high vulnerability occupy only 4% and 1% of the surface of the watershed, respectively. The former correspond to wetlands whereas the latter are the impervious bare lands with steep slopes.

Key words: *9 April 1947 Dam, northern Morocco, hydrology, DKPR Model, GIS, vulnerability.*

1. INTRODUCTION

L'importance de l'eau en tant que ressource vitale et facteur de développement est mondialement reconnue. La protection de cette ressource nous amène à évaluer les paramètres qui jouent un rôle important dans l'écoulement des eaux superficielles. D'après BENTEKHCICI (2006), ces facteurs englobent les caractéristiques géologiques, géomorphologiques, hydrologiques, et climatiques. Au Maroc, plusieurs retenues de barrages connaissent des problèmes de dégradation de la qualité de l'eau dus essentiellement aux différentes sources de pollution. À cela s'ajoute le processus naturel d'érosion du sol apportant différents éléments qui peuvent être à l'origine de l'altération de la qualité de l'eau (EL GHACHTOUL *et al.*, 2005).

L'utilisation d'outils performants tels que les SIG et la télédétection sont nécessaires et utiles. Dans le cadre de cette étude, ils nous ont permis d'obtenir des informations numériques caractérisant le relief, la morphométrie, la pédologie et d'autres facteurs. L'objectif fondamental de cette étude est l'amélioration des connaissances nationales sur les ressources en eau et de leur protection et de fournir une base pour toute étude expérimentale ultérieure en matière de protection des ressources en eau de surface.

Le bassin versant du barrage 9 avril 1947 est situé dans le triangle Tanger, Tétouan et Ksar el Kbir, dans le rif occidental marocain, à 30 km au sud de la ville de Tanger et à 15 km à l'est de la ville d'Asilah (Figure 1). Il a une superficie de l'ordre de 216 km² et un périmètre de 79 km et collecte les eaux de précipitation dans la région de Dar Chaoui. Il présente une forme allongée (Tableau 1) et son altitude varie entre 10 m, au nord-est, au niveau de la base de la digue du barrage 9 avril 1947 et 1 021 m au sud-ouest, à Jbel Bghaghza. La capacité du barrage est de 300 millions de mètres cubes. Il est destiné à l'alimentation en eau potable des villes d'Asilah et de Tanger et à l'irrigation de périmètres agricoles situés en aval du barrage (HILAL *et al.*, 2016), mais l'érosion est un réel problème qui entraîne l'ensablement du lac et endommage les sols arables (DAMNATI *et al.*, 2013).

Du point de vue géologique, la lithologie montre globalement des terrains quaternaires, des dépôts de pente et un substrat d'âge mésocénozoïque constitué d'argiles et marnes de l'unité de Tanger, des flyschs numidiens et des flyschs de la nappe de Tala-Lakrah. Le sol est de texture essentiellement argileuse, sauf au niveau des grès numidiens où on trouve un lithosol et des sols ferrallitiques. Climatologiquement, la zone d'étude appartient à un climat méditerranéen avec deux saisons bien distinctes : une saison sèche et estivale entre le mois de mai et le mois d'octobre et une autre, fraîche et pluvieuse, de novembre jusqu'en avril. Le réseau hydrographique (Figure 2) est constitué d'un cours d'eau principal qui est l'oued Haricha et ses affluents comme l'oued Bahara, l'oued Dermilat et Khendeq Zoubia (HILAL *et al.*, 2017).

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Principe de la méthodologie élaborée

La méthodologie proposée pour étudier la vulnérabilité des eaux de surface est une méthode de cartographie élaborée par le Bureau de Recherches géologiques et minières (BRGM) en 2010 avec la collaboration de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne dans le but d'évaluer la vulnérabilité intrinsèque des captages prioritaires du bassin Adour Garonne, basée sur plusieurs

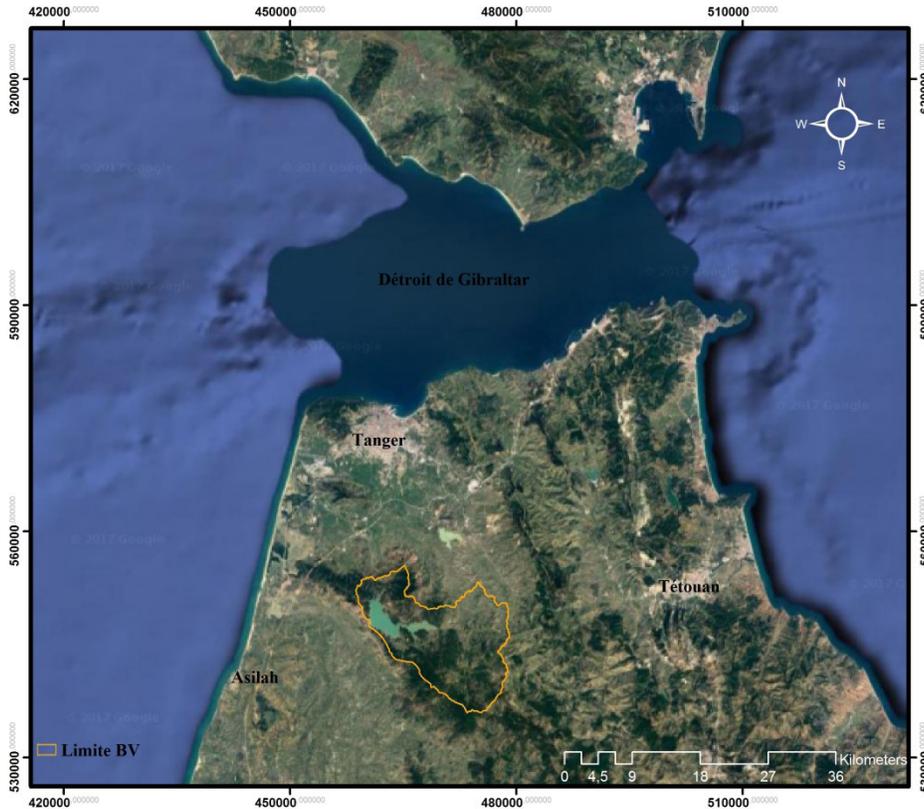


Figure 1. Localisation géographique de la zone d'étude.
Geographic location of the study area.

Tableau 1. Caractéristiques morphologiques du bassin versant.
Table 1. Morphological characteristics of the watershed.

Indice de compacité de Gravelius (KG)	Indice de compacité de Horton (KH)	Temps de concentration (TC)	Pente moyenne	Dénivelée spécifique (DS)
1,5	0,021	7 h 12 min	45 m·km ⁻¹	667,45 m

critères qui sont ensuite pondérés. L'objectif est de proposer un outil informatique simple et réaliste, compte tenu des délais impartis, de l'objectif de l'étude et des données disponibles.

De la même manière que pour la détermination de la vulnérabilité de captage pour les eaux souterraines, le principe retenu est le calcul de la vulnérabilité comme la somme pondérée de plusieurs paramètres classifiés :

$$V_r = \sum_{j=1}^{j=n} (W_j R_j) \quad (1)$$

où V_r est l'indice de vulnérabilité global d'une unité cartographique, W_j le facteur de pondération du paramètre j , R_j la classe du critère j et n le nombre de critères pris en compte.

Les critères retenus dans la méthodologie sont :

- L'accessibilité du milieu aquatique (D) : distance hydraulique de chaque point au cours d'eau le plus proche de son bassin topographique;
- Le fonctionnement hydrologique du sol et du sous-sol (K). Ce paramètre est fonction de l'indice de persistance du réseau IDPR, de l'occupation du sol (OS) et de l'indice de battance;
- La physiographie du bassin versant (P). Ce paramètre sera fonction de l'intensité des pentes (P_i) et des courbures des pentes (P_c);
- L'érosivité de la pluie (R), facteur influençant l'érosion hydrique.

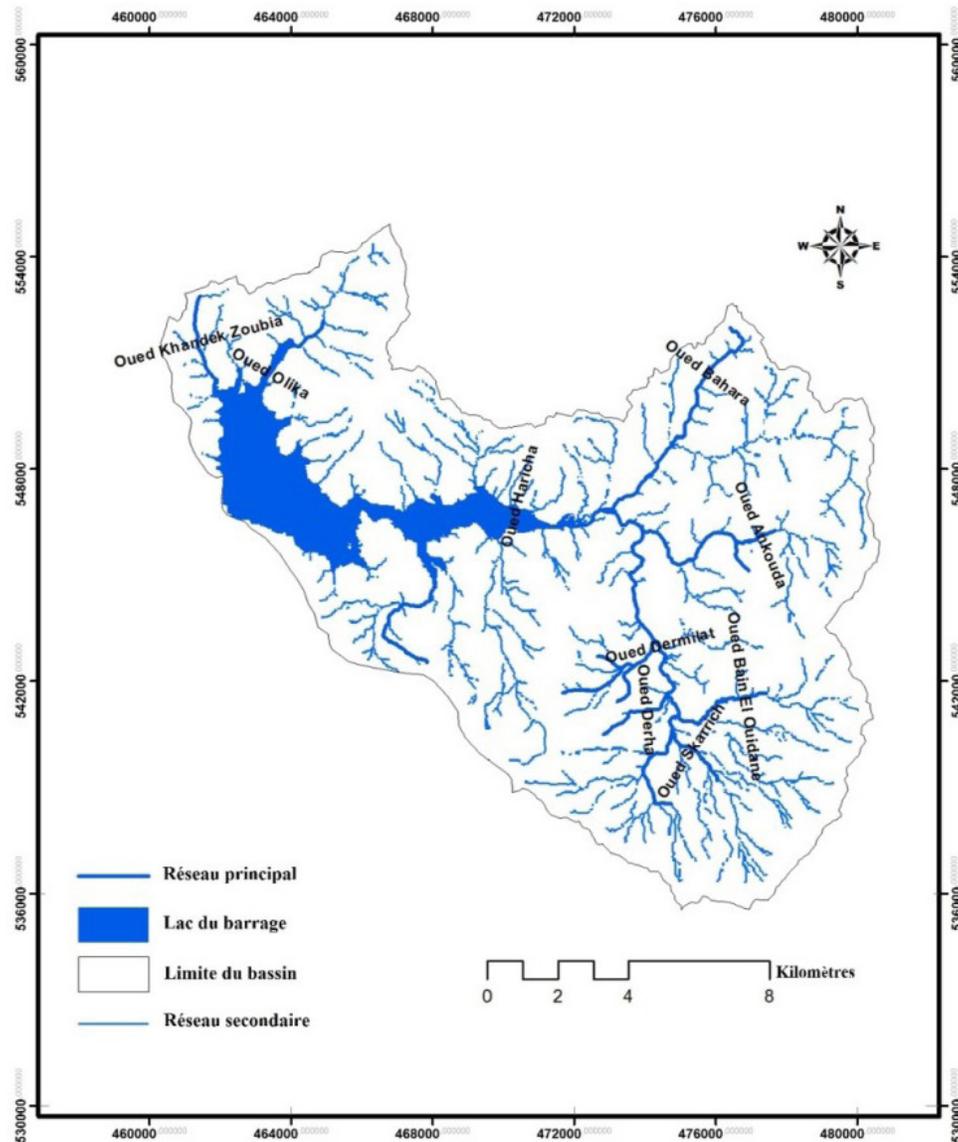


Figure 2. Réseau hydrographique du bassin versant.
Watershed hydrographic network.

2.2 Matériels et données

À l'échelle de notre travail, la base de données est constituée de :

- Cartes topographiques à l'échelle de 1:25 000 des régions de Dar Chaoui, El Menzla, Jbel Hbib, Bouamar, Bghaghza, Moulay abdessalam Ben Mchich, Bni Idder. Ces cartes ont été fournies par l'Agence nationale de la Conservation foncière du Cadastre et de la Cartographie (Service de cartographie).
- Images satellitaires Landsat 8, obtenues du service géologique des États-Unis (USGS-Glovis) en date de 14 août 2014 et projetées sur l'ellipsoïde de référence WGS 84.
- Image satellitaire Spot avec une résolution de 10 m, prise le 9 novembre 2005 sous la projection globale WGS 84.
- Image panchromatique avec une résolution de 2,5 m, prise le 9 novembre 2005 sous WGS 84.
- Modèle numérique du terrain (MNT) : extrait de la plateforme ASTER GDEM avec une résolution de 30 m et une projection (WGS 84).
- Carte géologique du Rif : à l'échelle de 1:500 000, fournie par le Ministère de l'Énergie et des Mines (Direction de la géologie).
- Carte d'occupation des sols : à l'échelle de 1:200 000, élaborée sur la base des principales catégories d'occupation des terres définies par le Centre régional d'Insémination artificielle (CRIA). Tout en se basant sur les observations du terrain lors des sorties et sur la photo-interprétation des images satellitaires à notre disposition.
- Données climatiques : des données des précipitations, des températures, des vents et de l'évapotranspiration au

niveau des stations situées sur le bassin versant, pour une période d'observation entre 2000 et 2014, fournies par l'Agence du Bassin hydraulique du Loukkos (ABHL).

- Carte pédologique des sols : la carte des sols utilisée dans l'étude est fournie par l'Institut national de la Recherche agronomique (INRA) à l'échelle de 1:200 000.

2.3 Méthodologie de cartographie

La méthode de cartographie est mise en œuvre selon cinq étapes principales :

- Reprojecter le MNT et l'image Landsat 8 en projection conique conforme de Lambert, zone 1, Maroc.
- Cartographie de chaque critère à l'échelle adaptée à la dimension du bassin versant. Chaque critère est subdivisé en cinq classes matérialisées par un indice compris entre 0 et 4. Cette étape de cartographie est réalisée à l'aide d'un logiciel de système d'information géographique (SIG) permettant la transformation du format vectoriel en format raster, à partir de données disponibles sous forme de cartes, d'observations et d'acquisition de données de terrain.
- Discrétisation des cartes : la taille de la maille est généralement de 30 x 30 m.
- Calcul des indices de vulnérabilité en chaque maille : l'indice de classe de chaque critère est multiplié par le facteur de pondération du critère considéré. Les valeurs obtenues pour chaque critère sont additionnées pour chaque maille afin d'obtenir les indices de vulnérabilité. Il s'agit donc d'une superposition des différentes cartes afin d'obtenir une carte finale de répartition de l'indice de vulnérabilité des ressources (V).
- Étape de reclassification : les valeurs calculées des indices sont ensuite subdivisées en cinq classes équidistantes traduisant la vulnérabilité relative du milieu.
- Étape de vérification : confrontation des cartes de vulnérabilité avec les données de terrain (données ponctuelles brutes avant interpolation) et les cartes de chaque critère indexé afin de vérifier qu'il n'y a pas d'incohérence flagrante.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Cartes thématiques

3.1.1 Accessibilité du milieu aquatique (D)

Pour l'élaboration de la carte de l'accessibilité du milieu aquatique, nous avons utilisé la fonction de zone tampon multiple pour le réseau hydrographique et sur des distances de 50, 100, 200, 500 m et supérieur à 500 m (Figure 3). À chaque

classe du *buffer* est associée une pondération qui est en relation avec la distance du réseau hydrographique (Tableau 2). D'après la répartition spatiale du facteur D , on remarque que la très faible classe présente 74 % de la superficie, suivie par la faible classe (13 %), la classe modérée (6 %), la classe élevée (4 %) et la classe très élevée avec 3 %.

3.1.2 Fonctionnement hydrique du sol et du sous-sol (K)

Ce facteur prend en considération les trois sous-paramètres, à savoir : l'indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR), l'indice de battance (IB) et l'occupation du sol (OS).

3.1.2.1 Indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR)

Cet indice a été créé en 2004 par le Bureau de Recherches géologiques et minières (BRGM) sur tout le territoire français et publié en 2010. Il se base essentiellement sur la capacité du sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface. Pour l'élaboration de ce paramètre, nous avons focalisé sur la carte géologique de notre bassin versant et avons défini la perméabilité pour chaque formation.

3.1.2.2 Occupation du sol (OS)

L'indice OS est déterminé à partir de l'image Landsat 8 après un traitement qui a été fait à la base de la fonction Iso Cluster Unsupervised Classification d'ArcGis, dans le but de convertir l'imagerie raster multicanal en une trame unique qui regroupe un certain nombre de classes. Les bandes spectrales utilisées sont : les bandes du visible (2, 3 et 4) et les bandes de l'infrarouge proche, moyen 1 et moyen 2 (5, 6 et 7).

3.1.2.3 Indice de battance (IB)

En zone tropicale comme en zone tempérée, la battance des pluies est indispensable pour préparer les matériaux avant le transport de ses constituants (destruction des mottes). En zone méditerranéenne, ce n'est pas indispensable, car la pente et l'énergie du ruissellement sont telles qu'elles sapent la masse du sol et entraînent à la fois des graviers et des mottes entières (ROOSE, 1991). On observe peu d'érosion sélective, mais plutôt des décapages, du ravinement, des glissements de terrain et des sapements de berge (ROOSE, 1991). En se référant à l'article de ROOSE (1991), nous avons décidé d'éliminer l'indice de battance (IB) de l'équation pour ajuster et adapter la méthodologie à notre zone d'étude.

3.1.2.4 Calcul du facteur K

Après avoir obtenu les sous-paramètres du facteur K , la relation suivante a servi à le calculer (Figure 4, Tableau 3) :

$$K = 0,5IDPR + 0,5OS \quad (2)$$

La classe 4 qui est supérieure à 3,2 est associée aux tissus urbains et aux argiles de l'unité de Tanger qui sont imperméables. La classe 3 qui oscille entre 2,4 et 3,19 appartient

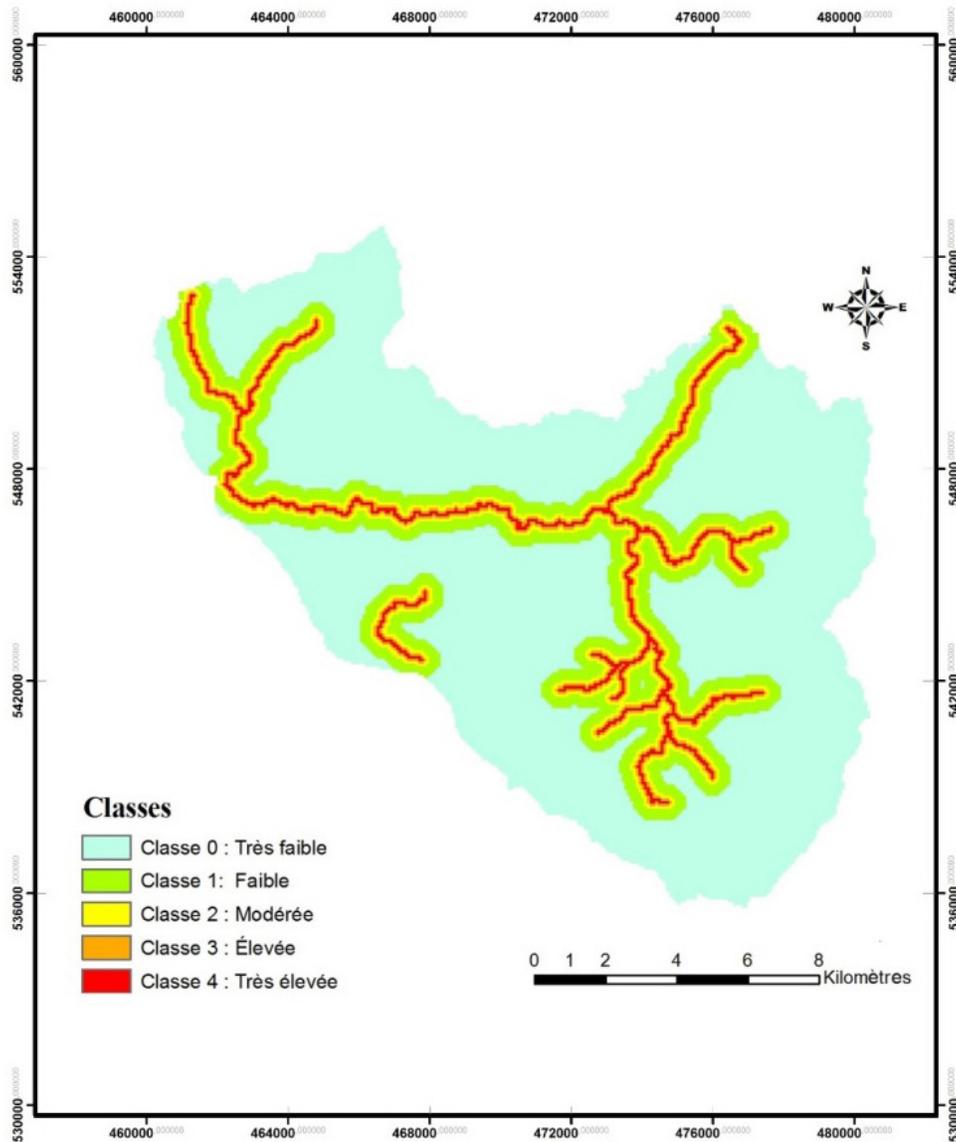


Figure 3. Vulnérabilité du paramètre D .
Vulnerability of parameter D .

Tableau 2. Classes du paramètre D .
Table 2. Classes of parameter D .

Classe	Valeurs de l'indice D (m)	Niveau de vulnérabilité
4	0-50	Très élevé
3	50-100	Élevé
2	100-200	Modéré
1	200-500	Faible
0	>500	Très faible

aux tissus urbains discontinus et aux pélites de l'unité Bni Ider. La classe 2 fait l'objet des terrains et des surfaces agricoles avec les grès du Numidien. La classe 1 qui prend les valeurs de 0,8 jusqu'à 1,59 est représentée par les espaces verts urbains et les colluvions du quaternaire. La classe 0 qui est inférieure à 0,79 est exclusivement réservée aux plans d'eau, aux forêts et aux parcs situés dans le bassin versant.

3.1.3 Physiographie du bassin versant (P)

Ce facteur prend en considération deux sous-paramètres : l'intensité des pentes (P_i) et la courbure des pentes (P_c). L'intensité des pentes (P_i) est dérivée à partir de notre modèle numérique de terrain (MNT) de 30 m et est fourni à partir de la plateforme ASTER GDEM via l'extension 3D Analyst du logiciel ArcGis; la courbure des pentes (P_c) est exportée

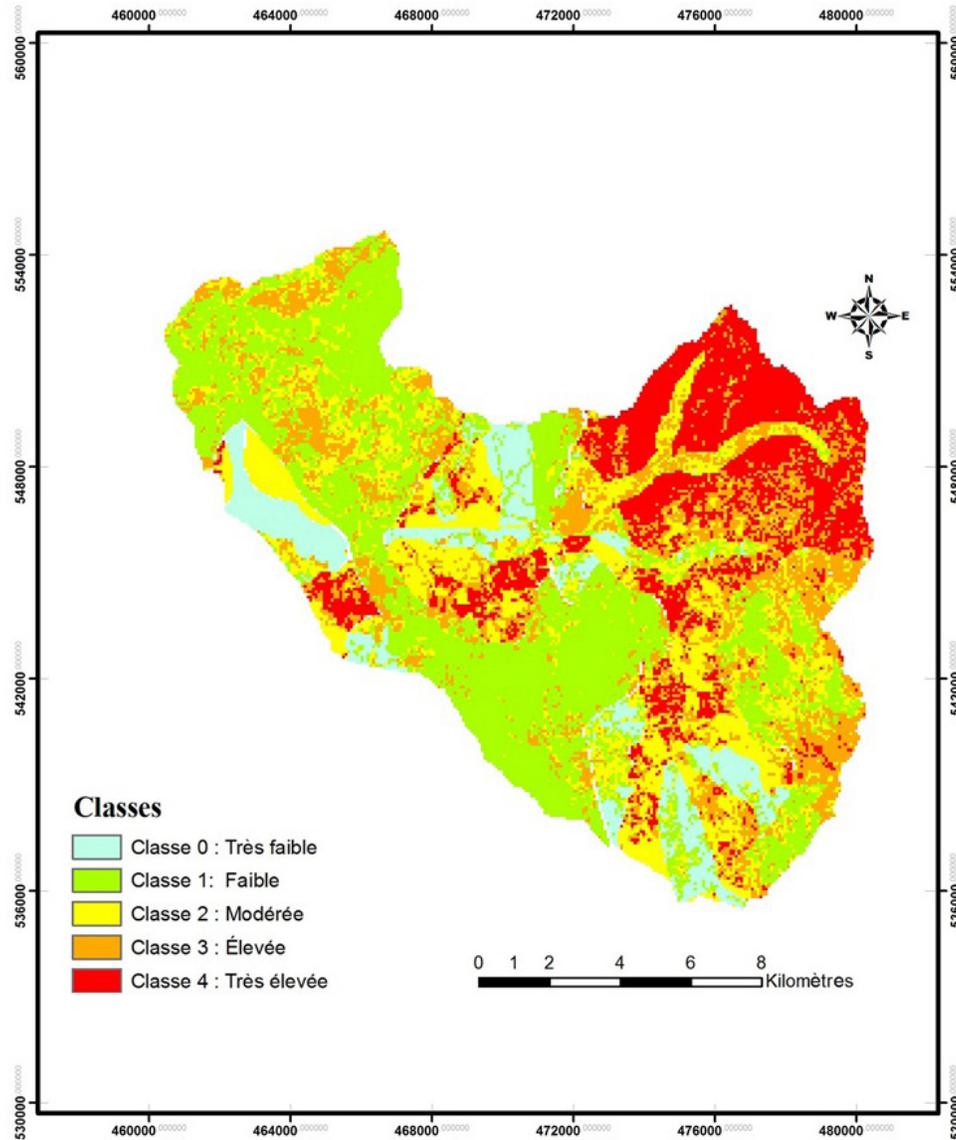


Figure 4. Vulnérabilité du paramètre K .
Vulnerability of parameter K .

Tableau 3. Classes du paramètre K (DOUAY et LARDIEG, 2010).

Table 3. Classes of parameter K (DOUAY and LARDIEG, 2010).

Classe	Valeurs de l'indice K	Niveau de vulnérabilité
4	3,2-4	Très élevé
3	2,4-3,19	Élevé
2	1,6-2,39	Modéré
1	0,8-1,59	Faible
0	0-0,79	Très faible

également à partir de l'outil Curvature de l'extension Spatial Analyst du logiciel ArcGis.

Pour le calcul du facteur P , la formule suivante a été utilisée :

$$P = 0,2P_c + 0,8P_i \quad (3)$$

À partir de l'observation de la carte (Figure 5, Tableau 4), on remarque que les fortes pentes qui appartiennent à la classe 4 sont situées principalement sur les lignes des crêtes, tandis que la classe très faible (0) représente la retenue de notre barrage. Les autres classes (1, 2 et 3) sont généralement dispersées au centre du bassin versant.

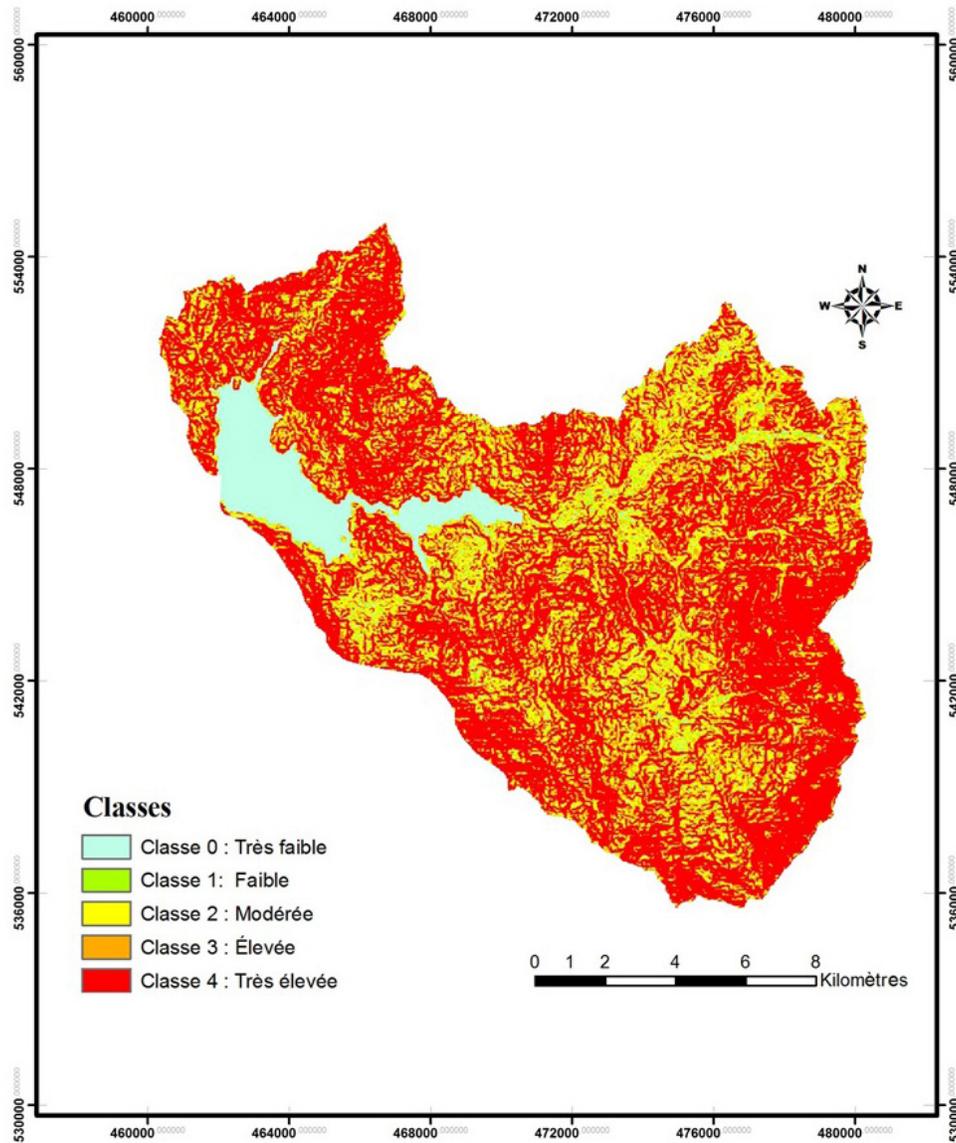


Figure 5. Vulnérabilité du paramètre P .
Vulnerability of parameter P .

Tableau 4. Classes du paramètre P (DOUAY et LARDIEG, 2010).

Table 4. Classes of parameter P (DOUAY and LARDIEG, 2010).

Classe	Valeurs de l'indice P	Niveau de vulnérabilité
4	3,2-4	Très élevé
3	2,4-3,19	Élevé
2	1,6-2,39	Modéré
1	0,8-1,59	Faible
0	0-0,79	Très faible

3.1.4 L'érosivité des pluies (R)

Pour le calcul de ce facteur, nous avons d'abord relevé les précipitations moyennes annuelles des stations installées sur le bassin versant (Figure 6, Tableau 5) au cours des dix dernières années (2004-2014). Ensuite, nous avons calculé l'indice de l'érosivité pour chaque station en appliquant la formule de Renard et Freimund (1994) :

$$R = 0,04830 P^{1,610} \quad (4)$$

Et finalement, nous avons interpolé l'érosivité calculée pour chaque station sur l'ensemble du bassin versant avec la classification présentée au tableau 6.



Figure 6. Localisation spatiale des stations pluviométriques.
Spatial location of rainfall stations.

Tableau 5. Coordonnées des différentes stations fournissant les informations.
Table 5. Coordinates of the different stations providing the information.

Stations	X	Y	Z (m)	Physiographie (P) (mm)	Érosivité (R)
Dar Chaoui	471 000	547 450	48	852,18	2 524
Barrage 9 avril 1947	460 250	551 720	37	820,27	2 373
Jbel Hbib	462 050	540 275	20	783,54	2 204
Tlata Bni Harchane	478 500	546 500	260	916,36	2 837

Tableau 6. Classes du paramètre P (DOUAY et LARDIEG, 2010).
Table 6. Classes of parameter P (DOUAY and LARDIEG, 2010).

Classe	Érosivité (R)	Niveau d'érosivité	Niveau de vulnérabilité
4	>5 000	Très forte	Très élevé
3	4 000-5 000	Forte	Élevé
2	3 000-4 000	Modérée	Modéré
1	2 000-3 000	Faible	Faible
0	0-2 000	Très faible	Très faible

D'après la carte de la figure 7, la seule classe observée est la classe faible qui oscille entre 2 000 et 3 000, ce qui veut dire que notre bassin versant connaît une faible érosivité issue des précipitations. Ces résultats peuvent être variables dans le temps parce qu'ils dépendent essentiellement de l'intensité des précipitations.

3.2 Carte de vulnérabilité à la contamination de la ressource (V)

L'indice de la vulnérabilité intrinsèque du milieu aquatique basé sur la méthodologie DKPR peut être calculé à partir des

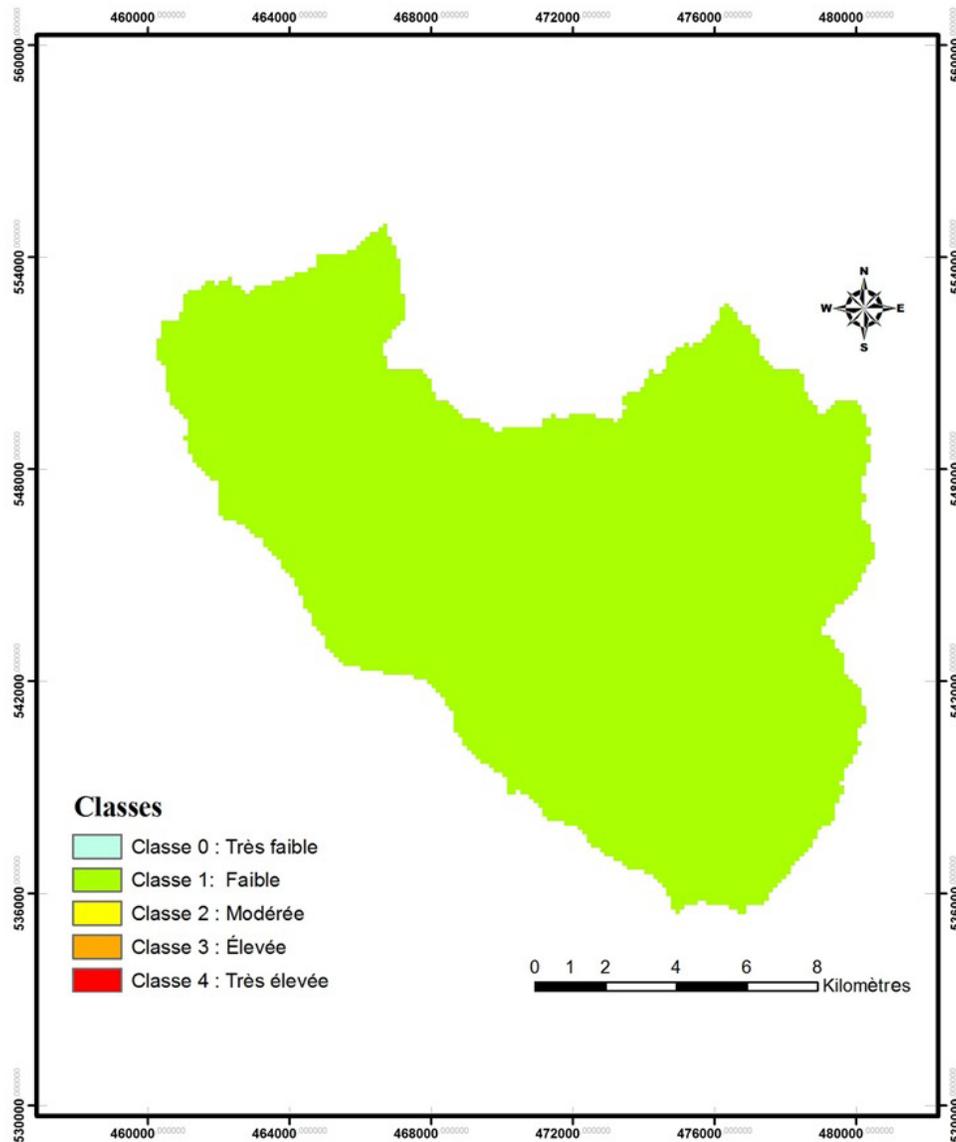


Figure 7. Vulnérabilité du paramètre R .
Vulnerability of parameter R

critères D , K , P et R , précédemment définis, en y appliquant des facteurs de pondération selon l'équation suivante :

$$V_r = 0,4D + 0,3K + 0,2P + 0,1R \quad (5)$$

Alors, à chaque pixel dans la carte de la vulnérabilité à la contamination (Figure 8) est associée une valeur déterminant son intensité. Le tableau 7 montre la classification relative à ces valeurs de vulnérabilité. D'après la carte de vulnérabilité obtenue, on remarque que la majeure partie est occupée par la vulnérabilité modérée (43 %) suivie par la faible vulnérabilité (38 %), alors que la forte vulnérabilité représente 14 % et la très forte 1 % de la superficie totale.

3.3 Discussion

Dans la carte finale de la vulnérabilité à la contamination des eaux (Figure 8), on remarque que :

- La très forte vulnérabilité est associée à la classe des pentes supérieures à 10° , aux distances inférieures de 50 m du réseau hydrographique et aux terrains nus imperméables du bassin versant.
- La forte vulnérabilité caractérise les pentes supérieures à 10° , les zones tampon situées entre 50 et 100 m du réseau hydrographique, le tissu rural discontinu et quelques périmètres d'irrigation.
- La vulnérabilité modérée est attribuée aux distances situées entre 100 et 200 m, aux surfaces agricoles et aux forêts clairsemées ainsi qu'à la classe de pentes qui oscillent entre 3° et 7° .

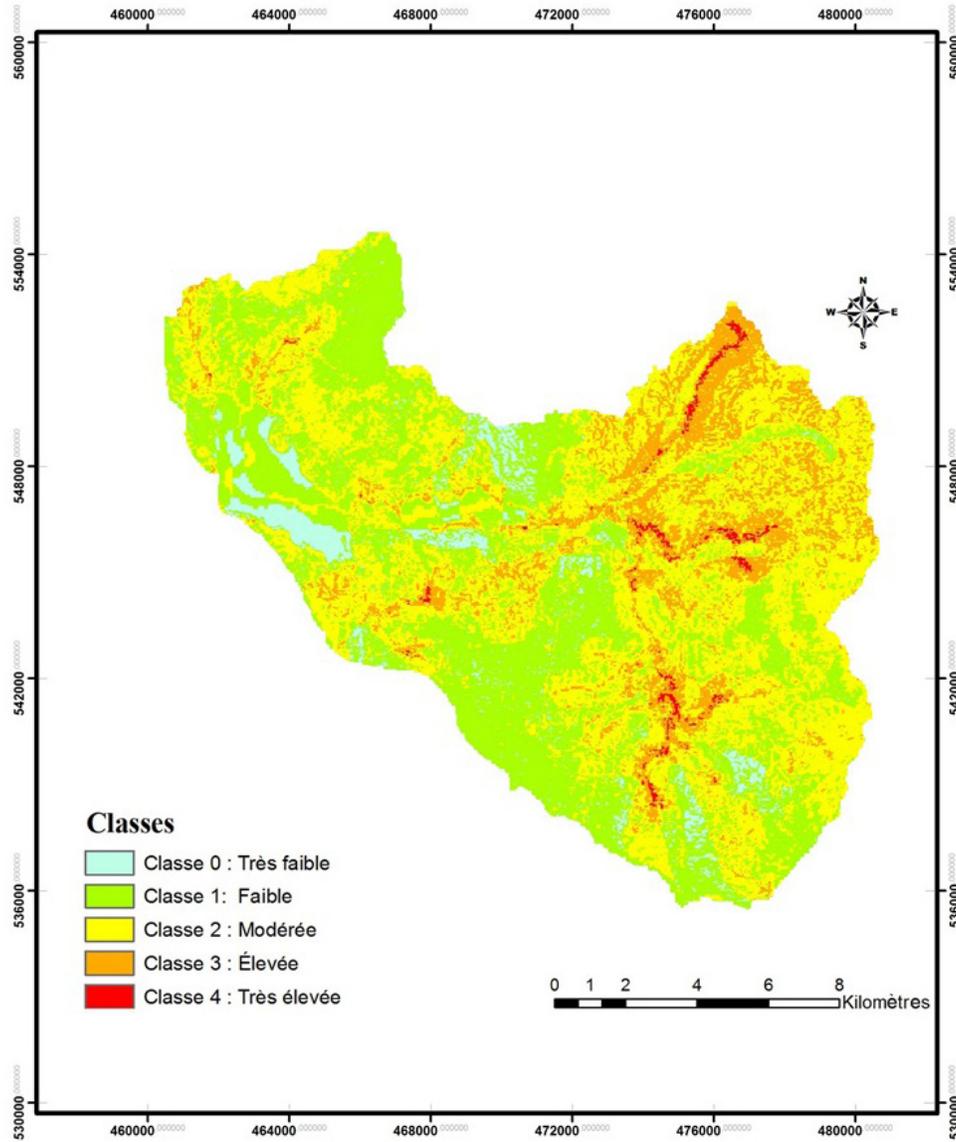


Figure 8. Vulnérabilité à la contamination de la ressource (V_r).
Vulnerability to contamination of the resource (V_r).

Tableau 7. Classes des indices de vulnérabilité de la ressource (V_r).

Table 7. Classes of resource vulnerability indices (V_r).

Classe	Valeurs de l'indice V_r	Niveau de vulnérabilité
4	3,2-4	Très élevé
3	2,4-3,19	Élevé
2	1,6-2,39	Modéré
1	0,8-1,59	Faible
0	0-0,79	Très faible

- La faible vulnérabilité est essentiellement associée aux zones à faible degré d'érosion, aux zones situées entre 200 et 500 m du réseau hydrographique, aux forêts denses (bocages) et aux pentes situées entre 1,5° et 3°.
- La très faible vulnérabilité caractérise les zones situées au-delà de 500 m du réseau hydrographique ayant des pentes inférieures à 1,5° et les zones humides situées dans le bassin versant.

Le sous-paramètre IDPR utilisé est un indice développé par le BRGM et il est propre à la France; dans notre cas, l'équivalent utilisé a été la perméabilité. De la même manière, l'indice de battance (IB) a été éliminé de l'équation en se référant à l'article de ROOSE (1991) qui disait que la battance des pluies n'influence pas le contexte méditerranéen parce qu'il y a la pente et l'énergie de ruissellement qui érodent et

transportent les particules; ceci dit, si on travaille dans un autre contexte, on devra l'insérer dans l'équation. Une validation par des contaminants manque à la méthodologie de cartographie appliquée, ce qui sera un point important à développer dans l'avenir.

4. CONCLUSION

La cartographie de la vulnérabilité des eaux superficielles est une méthodologie devenue impérative afin d'assurer la gestion qualitative des ressources en eau et la protection des captages d'eau potable. Elle apparaît donc nécessaire et incontournable, car elle permet d'identifier facilement les zones sensibles à des pollutions potentielles. Elle permet aussi d'orienter l'aménagement du territoire.

Au terme de ce travail, une solution informatisée pour la délimitation de la vulnérabilité des eaux de surface a été conçue et réalisée. Cette étude apparaît donc encourageante pour le développement futur de l'utilisation de la télédétection spatiale et des SIG pour l'étude et la gestion des ressources en eau destinée à l'alimentation en eau potable.

À titre de recommandations, nous proposons des mesures d'atténuation au niveau des zones les plus vulnérables, comme :

- L'installation des réseaux de contrôle à ces niveaux qui surveillent tout type de rejet d'une façon permanente.
- L'interdiction des rejets à effet toxique au niveau de tout le bassin versant.
- L'installation des filtres à l'aval de chaque réseau hydrographique qui mène vers la retenue.
- Le suivi et le contrôle de la qualité de l'eau doivent être complétés par l'établissement des mesures d'atténuation, qui vont assurer la préservation à long terme de la qualité des eaux.

REMERCIEMENTS

Dans le cadre de ce travail, nous remercions l'Agence du Bassin hydraulique Loukkos.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BENTEKHICI N. (2006). Utilisation d'un SIG pour l'évaluation des caractéristiques physiques d'un bassin versant et leurs influences sur l'écoulement des eaux (bassin versant d'Oued El Maleh, Nord-Ouest d'Algérie). *Conférence francophone ESRI*, 11 au 12 octobre 2006, Issy les Moulineaux, France.
- DAMNATI B., S. IBRAHIMI et O. RADAKOVITCH (2013). Quantifying erosion using ^{137}Cs and ^{210}Pb in cultivated soils in three Mediterranean watershed: Synthesis study from El Hachef, Raouz and Nakhla (North West Morocco). *J. Afr. Earth. Sci.*, 79, 50-57.
- DOUAY D. et E. LARDIEG (1992). *Délimitation des aires d'alimentation des captages prioritaires du bassin Adour-Garonne. Méthodologie de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des captages d'eau superficielle*. Agence de l'Eau Adour-Garonne, ANTEA - GINGER Environnement & Infrastructures - CALLIGEE, France, 28 p.
- EL GHACHTOUL Y., M. ALAOUI MHAMIDI et H. GABI (2005). Eutrophisation des eaux des retenues des barrages Smir et Sehla (Maroc) : causes, conséquences et consignes de gestion. *Rev. Sci. Eau.*, 18 (hors-série), 75-89.
- HILAL I., J.E. STITOU EL MESSARI, J.G. MORENO NAVARRO et M. DRAOUI (2017). Analysis of contamination hazard of surface water by the methodology of TECHNEAU: A case study from the dam 9 April 1947 in northern Morocco. *Arab. J. Geosci.*, 10 (8), 197.
- HILAL I., J.E. STITOU EL MESSARI, J.G. MORENO NAVARRO, M.R. AOULAD MANSOUR et M. DRAOUI (2016). Application de la méthodologie Cost620 pour la cartographie du danger à la contamination et l'établissement des zones de protection: cas des eaux superficielles du bassin versant El Hachef (Nord Maroc). *J. Water. Sci. Environ Tech.*, 1 (1), 15-20.
- RENARD K.G. et J.R. FREIMUND (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *J. hydrol.*, 157(1-4), 287-306.
- ROOSE E. (1991). Conservation des sols en zones méditerranéennes. Synthèse et proposition d'une nouvelle stratégie de lutte antiérosive : la GCES. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, 26 (2), 145-181.