

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

Mohamed SINAN et Rachid MASLOUHI, Maroc et Moumtaz RAZACK, France

Mots clés: Maroc, Marrakech, Haouz, SIG, Vulnérabilité, information géographique pour l'environnement.

RESUME

Une nouvelle méthodologie est proposée pour la caractérisation de la vulnérabilité et de la sensibilité à la pollution des nappes d'eau souterraine libres. Cette méthodologie constitue une amélioration de la méthode DRASTIC, universellement utilisée. La vulnérabilité à la pollution est basée uniquement sur les paramètres relatifs à la recharge, au sol (pente et nature) et à la zone non saturée (faciès et épaisseur) de l'aquifère. La sensibilité à la pollution est basée uniquement sur les paramètres propres à la zone saturée : vitesse de l'écoulement de et qualité de l'eau et productivité de la nappe. La vulnérabilité sensibilité (ou vulnérabilité globale) est basée sur les paramètres relatifs à la fois à la zone non saturée et à la zone saturée de l'aquifère.

Cette méthodologie a été appliquée au bassin du Haouz de Marrakech au Maroc renfermant l'une des plus importantes nappes du Maroc, qui s'étend sur environ 6000 km² d'extension. Les résultats ont montré que cette nappe est caractérisée par une vulnérabilité et sensibilité globalement moyenne à faible. Les champs captant d'eau potable (produisant environ 400 l/s) sont par contre situés dans des secteurs de moyenne à forte vulnérabilité et sensibilité à la pollution, leur protection par des périmètres de protection rapprochée et éloignée est recommandée dans les plus brefs délais.

L'application de la méthodologie développée a nécessité la mise en place d'un Système d'Information Géographique, avec les logiciels MapInfo et ArcView. Ce SIG, synthétisant une masse de données (géologiques, hydrogéologiques, géophysiques, etc.) considérable, constitue un véritable outil d'aide à la décision pour les gestionnaires des ressources en eau de la région du Haouz de Marrakech.

SUMMARY

A new methodology is proposed for the characterization of the vulnerability and sensitivity to pollution of unconfined groundwaters. This methodology constitutes an improvement of the widely used DRASTIC method. The vulnerability to pollution is based only on the parameters related to recharge, soil (slope and nature) and the unsaturated zone (facies and thickness). The sensitivity to pollution is based only on parameters suitable for the saturated

zone: groundwater velocity, water quality and aquifer productivity. The vulnerability-sensitivity (or global vulnerability) is based on parameters related to both the unsaturated and saturated zones.

This methodology was applied to the basin of Haouz of Marrakech in Morocco, containing one of the most important unconfined groundwaters in Morocco extending over 6000 km². The results showed that this aquifer is characterized by an average to weak global vulnerability. However the drinking water catchments (producing a discharge of about 400 l/s) are located in sectors with an average to strong vulnerability and sensitivity to pollution. The protection of these catchment fields, by close and remote perimeters, is recommended as soon as possible.

Application of this methodology required the development of a GIS, with the use of MapInfo and ArcView softwares. This GIS, synthesizing a considerable amount of data on the Haouz aquifer, constitutes a genuine tool for decision making for the water resources managers of the Haouz area.

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

Mohamed SINAN et Rachid MASLOUHI, Maroc et Moumtaz RAZACK

1. INTRODUCTION

La vulnérabilité à la pollution d'une nappe d'eau souterraine matérialise la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par une pollution. Cette pollution peut être engendrée par une source ponctuelle (ex. décharge, cimetière, rejet d'eau usée brute domestique ou industrielle, etc.), linéaire (pipeline, réseau d'eau usée, réseau de drainage agricole, etc) ou diffuse (engrais chimiques, pesticides, herbicides, épandage des eaux usées domestiques, etc.).

La vulnérabilité d'une nappe à la pollution est une notion relative, non mesurable et sans dimension. La précision de son évaluation dépend essentiellement de la nature, de la quantité et de la fiabilité des données utilisées. Sa caractérisation est basée généralement sur l'estimation d'un certain nombre de paramètres plus ou moins important, relatifs notamment à la couverture de la nappe (sol et zone non saturée) et à la zone saturée proprement dit.

La méthodologie proposée ici a la particularité de distinguer la vulnérabilité verticale d'une nappe vis à vis d'une pollution provenant de la surface du sol (basée uniquement sur les paramètres relatifs à la recharge, au sol et à la zone non saturée), de sa vulnérabilité horizontale (ou sensibilité) vis à vis d'une pollution ayant déjà atteint la nappe (basée uniquement sur seuls paramètres de la zone saturée de l'aquifère).

La vulnérabilité globale (ou vulnérabilité-sensibilité) d'un aquifère est la synthèse de ces deux types de vulnérabilité verticale et horizontale.

L'application de cette méthodologie ne peut être possible sans l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG), en raison de la masse très importante des données nécessaire, notamment dans le cas de nappes d'extension régionale.

Cette nouvelle méthodologie a été appliquée à la nappe du Haouz de Marrakech au Maroc, qui s'étend sur une superficie 6000 km² et dont les réserves sont estimées entre 7 et 9 milliards de m³ d'eau. Cette nappe joue un rôle capital pour le développement socio-économique de la région de Marrakech, premier pôle touristique du Maroc.

2. DESCRIPTION DE LA METHODE DRASTIC

Plus de 24 méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des nappes à la pollution sont recensées dans la littérature internationale (Civita, 1993). La méthode la plus utilisée actuellement dans le monde est celle définie par Aller et al en 1987, connue sous le nom de méthode DRASTIC.

C'est une méthode qui a été élaborée par L. Aller et al en 1987 et fait partie du groupe des méthodes d'évaluation (de la vulnérabilité des aquifères) pondérées, basées sur l'attribution d'une notation aux différents paramètres utilisés (variant généralement entre 1 et 10) et leurs groupement dans des classes différentes. Une pondération est également attribuée selon l'importance relative de chacun des paramètres utilisés.

La méthode DRASTIC est basée sur l'estimation de 7 paramètres relatifs à la recharge, au sol, à la zone non saturée et à la zone saturée de l'aquifère.

[D]: Profondeur de la surface de la nappe (ou *Depth*);

[R]: Recharge nette;

[A]: Nature lithologique de l'Aquifère;

[S]: Sol (granulométrie et faciès);

[T]: Topographie des terrains;

[I]: Impact de la zone non saturée (lithologie et épaisseur);

[C]: Conductivité hydraulique (perméabilité) de la zone saturée.

Le tableau 1 ci-après contient les poids attribués à chacun des paramètres ci-dessus. Les poids les plus élevés (5) sont attribués à la nature lithologique et à l'épaisseur de la zone non saturée. Les poids les plus faibles (1 et 2) sont attribués respectivement à la pente et à la nature lithologique du sol.

Tableau 1 : Poids attribués aux paramètres DRASTIC
(Aller et al, 1987)

Classe	Poids
Classe I	
- La profondeur de la nappe	5
- La nature lithologique de la zone non saturée	5
Classe II	
- La recharge	4
- La nature lithologique de la zone saturée	3
Classe III	
- La texture du sol	2
- La topographie	1

Une fois les différentes classes définies et leurs notes attribuées, la méthode détermine l'indice DRASTIC (I_d) qui permet de caractériser le degré de vulnérabilité d'un secteur donné de la nappe. La vulnérabilité est d'autant plus importante que l'indice (I_d) calculé est élevé. Cet indice est défini de la manière suivante:

$$I_d = (D_r \times D_w) + (R_r \times R_w) + (A_r \times A_w) + (S_r \times S_w) + (T_r \times T_w) + (I_r \times I_w) + (C_r \times C_w)$$

Avec:

D, R, A, S, T, I, C : représentent les paramètres DRASTIC définis précédemment
 r et w : représentent respectivement le poids et la note attribués à chaque paramètre DRASTIC

L'établissement de la carte de vulnérabilité d'une nappe à la pollution consiste à reporter dans l'espace les valeurs de l'indice DRASTIC (I_d) et leur regroupement dans cinq classes différentes.

2. PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE PROPOSEE POUR L'EVALUATION DE LA VULNERABILITE A LA POLLUTION D'UNE NAPPE D'EAU SOUTERRAINE

Contrairement à la méthode DRASTIC qui fait intervenir les paramètres relatifs à la fois à la recharge, à la zone non saturée et saturée d'un aquifère, la méthodologie que nous proposons ici est basée sur les seuls paramètres relatifs à la recharge, au sol (pente et nature lithologique) et à la zone non saturée (nature et épaisseur). En effet, nous considérons que seuls ces paramètres interviennent dans la transmission de la pollution vers la nappe à partir de la surface du sol.

Les mêmes poids, notes et classes que celles définies par la méthode DRASTIC, ont été attribués (dans la méthode proposée) aux paramètres utilisés. L'indice de vulnérabilité vertical I_v est calculé en faisant la somme des produits : note et poids de chaque paramètre pris en compte:

$$\text{Avec: } I_v = (R_r \times R_w) + (T_r \times T_w) + (S_r \times S_w) + (I_r \times I_w) + (D_r \times D_w)$$

R, T, S, I, D : représentent respectivement les paramètres pris en compte: recharge, pente du sol, nature du sol, nature de la zone non saturée et profondeur de la surface de la nappe.

r et w : représentent respectivement le poids et la note attribués à chaque paramètre pris en compte.

L'indice I_v peut varier entre les valeurs extrêmes suivantes : 27 (I_v minimum) et 166 (I_v maximum).

Cinq classes de vulnérabilité différentes ont été définies selon la valeur de l'indice I_v ; leurs limites s'établissent comme ci-dessous:

- $27 < I_v \leq 50$: Très faible vulnérabilité (couleur bleue)
- $50 < I_v \leq 80$: Faible vulnérabilité (couleur verte)
- $80 < I_v \leq 110$: Moyenne vulnérabilité (couleur jaune)
- $110 < I_v \leq 140$: Forte vulnérabilité (couleur orange)
- $140 < I_v \leq 166$: Très forte vulnérabilité (couleur rouge)

3. PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE PROPOSEE POUR L'EVALUATION DE LA SENSIBILITE A LA POLLUTION D'UNE NAPPE D'EAU SOUTERRAINE

La sensibilité d'une nappe à la pollution est une notion non mesurable dépendant des paramètres propres de la nappe, car elle est définie par rapport à une pollution qui a déjà atteint la nappe, à partir de la non saturée ou d'un ouvrage d'eau souterraine (puits, forage, etc).

Nous avons utilisé les trois paramètres suivants pour caractériser cette sensibilité à la pollution des nappes:

- Qualité de l'eau: plus cette qualité est importante, plus grande est la sensibilité à la pollution de la nappe;
- Productivité : plus la productivité est importante, plus grandes seront les conséquences socio-économiques de la pollution de l'eau;
- Vitesse de déplacement de l'eau : plus la vitesse est grande, plus vite se fera le déplacement de la pollution dans l'espace et donc la sensibilité à la pollution devient importante.

Une pondération a été attribuée à chacun des paramètres ci-dessus, basée essentiellement sur l'importance relative de chacun d'eux pour la caractérisation de la sensibilité d'une nappe à la pollution. *Ces poids sont de 5 pour la qualité globale de l'eau (étant donné l'importance de ce paramètre, notamment pour une eau destinée à l'alimentation en eau potable), 4 pour la productivité et 3 (identique au poids attribué par la méthode DRASTIC à la perméabilité de la nappe) pour la vitesse de l'eau de la nappe.*

3.1 Vitesse de l'eau souterraine (V_e)

$$V_e \text{ (m/s)} = \frac{K \times i}{n_e} \quad (*)$$

Avec :

K = coefficient de perméabilité de Darcy en m/s.

- i = gradient hydraulique calculé à partir de la carte piézométrique de la nappe.

(*) : La méthode DRASTIC utilise la perméabilité pour caractériser l'écoulement de l'eau dans la nappe. Ce paramètre n'est pas suffisant pour caractériser cet écoulement qui dépend de la vitesse effective de l'eau V_e ($V_e = K \times i / n_e$)

- n_e = porosité efficace de la nappe (vides occupés par l'eau gravitaire), équivalente au coefficient d'emmagasinement (S) des nappes libres.

Cinq classes de vitesse ont été définies auxquelles les notes suivantes ont été attribuées :

<i>Classe de vitesse effective (V_e) de l'eau souterraine en E-4 m/s</i>	<i>Note</i>
$V_e \geq 5$: 10
$3 \leq V_e < 4$: 7
$2 \leq V_e < 3$: 5

3.2 Qualité globale des eaux souterraines

Cette qualité devra être représentée par la potabilité de l'eau. En l'absence de mesures de ce paramètre (dont l'obtention est assez coûteuse) sur l'ensemble de l'étendue de la nappe, cette qualité peut être représentée par la conductivité électrique de l'eau, qui dépend uniquement de la concentration totale en sels dissous dans l'eau, dont la mesure est très facile.

Cinq classes de conductivité ont été définies auxquelles les notes suivantes ont été attribuées:

<i>Classe de conductivité (C) de l'eau souterraine en $\mu\text{s/cm}$</i>	<i>Note</i>
$C < 400$: 10
$400 \leq C < 1\ 300$: 8
$1\ 300 \leq C < 2\ 700$: 5
$2\ 700 \leq C < 3\ 000$: 3
$C \geq 3\ 000$: 1

3.3 Productivité de la nappe

Cette productivité peut être représentée par la transmissivité, par le débit des ouvrages ou par leurs débits spécifiques. Nous optons pour ce dernier paramètre, en raison d'une part de la disponibilité (généralement) de ses valeurs et d'autre part parce qu'il prend en compte la productivité du couple " nappe + ouvrage ", qui reflète mieux la réalité du terrain.

Cinq classes de débit-spécifique ont été définies, auxquelles les notes suivantes ont été attribuées:

Classe des débits spécifiques (Q/s en $l/s/m$)
des ouvrages captant la nappe

Note

$Q/s \geq 5.0$: 10
$2.0 \leq Q/s < 5.0$: 7
$0.5 \leq Q/s < 2.0$: 5
$0.0 \leq Q/s < 0.5$: 3
$Q/s = 0.0$: 0

Une fois les différentes classes définies et leurs notes attribuées, on calcule l'indice de sensibilité de la nappe à la pollution (I_s) en faisant la somme des produits de la note de chaque paramètre utilisé et de son poids:

$$I_s = (C_r \times C_w) + (P_r \times P_w) + (V_r \times V_w)$$

Avec:

C , P et V : représentent respectivement les paramètres : conductivité de l'eau, productivité de la nappe (ou débits spécifiques des ouvrages la captant) et vitesse de déplacement de l'eau dans la nappe

r et w : représentent respectivement le poids et la note attribués à chaque paramètre ci-dessus.

Les valeurs de l'indice I_s varient entre 20 (I_s minimal) et 120 (I_s maximal).

L'établissement de la carte de sensibilité d'une nappe à la pollution consiste à calculer et à reporter la répartition spatiale des valeurs de l'indice I_s ci-dessus et leur groupement dans cinq classes différentes.

- 20 < I_s ≤ 40 : Très faible sensibilité (couleur bleue)
- 40 < I_s ≤ 60 : Faible sensibilité (couleur verte)
- 60 < I_s ≤ 80 : Moyenne sensibilité (couleur jaune)
- 80 < I_s ≤ 100 : Forte sensibilité (couleur orange)
- 100 < I_s ≤ 120 : Très forte sensibilité (couleur rouge)

4. PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE PROPOSEE POUR L'EVALUATION DE LA VULNERABILITE-SENSIBILITE A LA POLLUTION D'UNE NAPPE A LA POLLUTION

La vulnérabilité- sensibilité (ou vulnérabilité globale) à la pollution d'une nappe est une notion qui intègre à la fois:

- la facilité avec laquelle la pollution peut transiter à travers le sol et la zone non saturée pour atteindre la surface de la nappe (ou vulnérabilité verticale);

- la vitesse de propagation horizontale de cette pollution dans la zone saturée et les conséquences socio-économiques engendrées par cette pollution des ressources en eau (ou sensibilité) de la nappe.

C'est donc une notion qui n'est pas mesurable et qui dépend à la fois des paramètres relatifs à la recharge, au sol, à la zone non saturée et à la zone saturée de l'aquifère.

L'obtention de l'indice (Ivs), de vulnérabilité- sensibilité à la pollution d'une nappe, se fait en faisant une simple sommation (à chaque point de la nappe) de la valeur de l'indice Iv de la vulnérabilité et de celle de l'indice Is de la sensibilité à la pollution. *Cet indice Ivs peut donc varier entre 47 (Ivs minimum) et 286 (Ivs maximum).*

Les valeurs obtenues de l'indice Ivs sont réparties dans 5 classes différentes, comme ci-dessous:

- 47 < Ivs ≤ 90 : Très faible vulnérabilité-sensibilité (couleur bleue)
- 90 < Ivs ≤ 140 : Faible vulnérabilité- sensibilité (couleur verte)
- 140 < Ivs ≤ 190 : Moyenne vulnérabilité-sensibilité (couleur jaune)
- 190 < Ivs ≤ 240 : Forte vulnérabilité-sensibilité (couleur orange)
- 240 < Ivs ≤ 286 : Très forte vulnérabilité-sensibilité (couleur rouge)

5. APPLICATION DE LA METHODOLOGIE DEVELOPEE A LA NAPPE DU HAOUZ DE MARRAKECH (MAROC)

5.1 Présentation de l'aquifère du Haouz de Marrakech

Le Haouz de Marrakech est une vaste plaine de 6 000 km² de superficie, située (fig. 1) au centre du Maroc, entre la chaîne du Haut Atlas au sud, les reliefs primaires des Jebilet au nord, les plateaux d'Essaouira - Chichaoua à l'ouest et les premiers versants du Moyen Atlas à l'est.

La plaine est traversée du sud vers le nord par plusieurs oueds drainant les reliefs du Haut Atlas et rejoignent l'oued Tensift (collecteur principal des eaux superficielles du bassin) au nord, dont l'écoulement se fait de l'est vers l'ouest avant de rejoindre l'océan atlantique.

Le Haouz de Marrakech est un bassin de sédimentation d'origine tectonique, dans lequel se sont accumulées au Tertiaire et au Quaternaire d'importantes formations détritiques, issues du démantèlement de la chaîne atlasique soulevée lors de l'orogénèse atlasique (Ferrandini et Le Marrec, 1982). Ces dépôts recouvrent les formations primaires, secondaires et tertiaires (affleurant au niveau du Haut Atlas), dont l'épaisseur diminue du sud (bordure atlantique) au nord, où affleurent les schistes primaires (chaînon des Jebilet).

Le principal réservoir d'eau souterraine du bassin du Haouz est contenu dans les dépôts alluvionnaires du Plio-quaternaire. L'ensemble repose sur un substratum imperméable

constitué essentiellement par des argiles et marnes du Miocène. La nappe est exploitée pour l'alimentation en eau potable de la ville de Marrakech et des autres centres avoisinants (environ 400 l/s), pour l'irrigation traditionnelle et pour l'alimentation en eau de quelques périmètres irrigués. Les prélèvements actuels de la nappe (AEP et agriculture) sont estimés à environ 400 millions de m³/an.

La profondeur de la surface de la nappe varie généralement entre 0 et 10 m au nord du bassin (le long de l'oued Tensift) et entre 40 et plus de 65 m le long de la bordure nord du Haut Atlas (sud du bassin). Dans la partie centrale, cette profondeur varie entre 20 et 40 m.

L'écoulement général de la nappe se fait du sud (bordure atlasique) vers le nord (l'oued Tensift), avec un fort gradient hydraulique (1.5 à 2 %) au niveau de la limite sud de la nappe.

La recharge de la nappe se fait essentiellement à partir de l'infiltration des eaux superficielles (au niveau des lits des cours d'eau atlasiques) et à partir du retour des eaux d'irrigation au niveau des périmètres irrigués (63 % du volume total de l'alimentation).

La productivité de la nappe varie entre moins de 0.5 l/s/m et plus de 5 l/s/m. Les secteurs les plus productifs de la nappe ($Q/s > 5$ l/s/m) sont situés notamment le long de l'axe central de la nappe et les moins productifs ($Q/s < 0.5$ l/s/m) sont situés principalement le long de ses bordures nord et sud. Les secteurs à productivité moyenne (Q/s compris entre 0.5 et 5 l/s/m) sont situés généralement entre ces deux secteurs.

Les vitesses des écoulements souterrains sont faibles, généralement inférieures à $1 \cdot 10^{-4}$ m/s (soit des déplacements inférieurs à 3.2 km/an). Les plus grandes vitesses ($\geq 5 \cdot 10^{-4}$ m/s, soit plus de 15 km/an) sont rares dans la nappe et sont localisées notamment le long de la bordure sud du Haouz oriental.

La qualité globale de l'eau de la nappe est généralement bonne dans la partie centrale et moyenne dans sa partie orientale (contenant un important périmètre irrigué). Cette qualité se dégrade au nord le long de l'oued Tensift en raison de la faible profondeur de la surface de la nappe (favorisant l'évaporation de l'eau et donc sa concentration en sels) et de l'épandage des eaux usées brutes de la ville de Marrakech.

5.2 Caractérisation de la vulnérabilité à la pollution de la nappe du Haouz de Marrakech

5.2.1 Préparation des données

Les cartes des différents paramètres pris en compte pour l'élaboration de la carte de vulnérabilité verticale à la pollution de la nappe du Haouz ont été rasterisées (création de grilles de valeurs) avec le logiciel ArcView (version 3.1) selon un maillage régulier de $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$. La grille résultante contient 842 pixels soit une superficie totale traitée de $3\,368 \text{ Km}^2$. Le calcul de l'indice de vulnérabilité I_v a donc nécessité plus de 8 000 opérations de calcul.

Ce travail n'aurait pas pu être effectué sans l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG) utilisant le mode raster.

5.2.2 Présentation de la carte de vulnérabilité verticale à la pollution de la nappe du Haouz de Marrakech

Les valeurs de l'indice de vulnérabilité (I_v) de la nappe du Haouz de Marrakech varient entre 36 et 146. Ces valeurs permettent de distinguer 5 zones différentes de vulnérabilité. *La vulnérabilité de la nappe à la pollution est globalement moyenne à faible.*

5.3 Caractérisation de la sensibilité à la pollution de l'aquifère du Haouz de Marrakech

5.3.1 Préparation des données

Les cartes des paramètres pris en compte, pour l'élaboration de la carte de sensibilité à la pollution de la nappe (qualité de l'eau, vitesse des écoulements souterrains et productivité de la nappe), ont été rasterisées avec le logiciel ArcView selon un maillage régulier de $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$. La grille résultante contient 845 pixels, soit une superficie totale traitée de $3\,380 \text{ km}^2$. Le calcul de l'indice de sensibilité I_s a donc nécessité plus de 5 070 opérations de calcul.

5.3.2 Présentation de la carte de sensibilité à la pollution de la nappe du Haouz de Marrakech

Les valeurs de l'indice de sensibilité (I_s) varient entre 20 et 83. Ces valeurs permettent de distinguer 5 classes différentes de sensibilité. Globalement *la nappe du Haouz est faiblement à moyennement sensible* à la pollution qui l'atteint. Cette faible sensibilité s'explique notamment par les vitesses généralement faibles de l'eau souterraine et par les productivités des ouvrages généralement faibles à moyennes.

5.4 Caractérisation de la vulnérabilité-sensibilité à la pollution de la nappe du Haouz de Marrakech

5.4.1 Préparation des données

Les valeurs de l'indice I_{vs} de la vulnérabilité-sensibilité à la pollution de la nappe du Haouz ont été calculées en faisant la somme des indices de vulnérabilité (I_v) et de sensibilité (I_s) à la pollution. Ces valeurs *varient entre 71 (I_{vs} minimum) et 204 (I_{vs} maximum)* ; la classe de très forte vulnérabilité-sensibilité est donc absente sur l'ensemble de l'étendue de la nappe du Haouz.

5.4.2 Présentation de la carte de vulnérabilité-sensibilité de la nappe du Haouz de Marrakech

La carte obtenue montre que *la nappe du Haouz est globalement de faible à moyenne vulnérabilité et sensibilité à la pollution*. Ceci s'explique par le caractère généralement faible à moyen de la vulnérabilité verticale de l'aquifère d'une part et de sa sensibilité d'autre part. La figure 2 comporte le croisement de la carte de la vulnérabilité-sensibilité de la nappe du Haouz avec celles des ouvrages d'AEP, des sources de pollution potentielle et de la piézométrie de la nappe relative à l'état d'octobre 1998. Cette figure carte montre que:

- *le champ captant de l'oued Issil est situé dans un secteur caractérisé par une vulnérabilité-sensibilité (ou vulnérabilité globale) à la pollution moyenne à forte, résultat d'une vulnérabilité globalement forte et d'une sensibilité globalement moyenne dans ce secteur de la nappe.*
- *Le champ captant de l'oued N'Fis est situé à proximité d'un secteur de moyenne vulnérabilité-sensibilité de la nappe.*

La présence de plusieurs sources potentielles de pollution à proximité de ces importants champs captants (zone industrielle, décharges brutes, périmètre irrigué) impose leur protection, dans les plus brefs délais, par des périmètres de protection rapprochée et éloignée.

6. CONCLUSION

Une nouvelle méthodologie a été proposée pour la caractérisation de la vulnérabilité globale à la pollution d'une nappe d'eau souterraine. Elle constitue une amélioration de la méthode DRASTIC universellement utilisée. Cette vulnérabilité globale est basée à la fois sur les paramètres relatifs à la recharge, au sol, à la zone non saturée et à la zone saturée de l'aquifère.

La caractérisation de la vulnérabilité verticale des nappes à la pollution (provenant de la surface du sol et traversant sa zone non saturée) est basée uniquement sur les paramètres relatifs à la recharge, au sol (pente et nature) et à la zone non saturée (faciès et épaisseur) de l'aquifère.

La caractérisation de la vulnérabilité des nappes au transfert horizontal de la pollution l'ayant atteinte (appelée aussi sensibilité à la pollution) est basée uniquement sur les paramètres relatifs à la zone saturée : vitesse des écoulements souterrains, qualité de l'eau et productivité de la nappe.

Cette méthodologie a été appliquée à la nappe du Haouz de Marrakech au Maroc, qui s'étend sur une superficie d'environ 6000 km², circulant dans des dépôts alluvionnaires du Plio-Quaternaire. Cette nappe joue un rôle capital dans le développement socio-économique de la région de Marrakech et pour l'alimentation en eau potable et industrielle. Elle est exploitée

par plusieurs dizaines de milliers d'ouvrages, captant un volume d'environ 400 millions de m³/an.

L'application de la méthodologie proposée a montré que cette nappe est caractérisée par une vulnérabilité verticale globalement moyenne à faible, par une sensibilité globalement faible à moyenne et par une vulnérabilité globale (vulnérabilité-sensibilité) faible à moyenne.

Ce travail a montré également l'apport capital fourni par les Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour l'élaboration des cartes de vulnérabilité et de sensibilité à la pollution des nappes d'eau souterraine, notamment celles d'extension régionale et disposant d'une masse de données considérable. Le SIG élaboré constitue également un outil performant et efficace d'aide à la décision pour les gestionnaires des ressources en eau de cette importante région du Maroc. Nous recommandons la généralisation des SIG et des cartes de vulnérabilité à l'ensemble des nappes importantes du Maroc.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aller L., Bennet T., Lehr J., Petty R., Hackett G., 1987. : DRASTIC : A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. *EPA-600/2-87-035*, 455 p.
- DGH., 1994. : Etat de la Qualité des Ressources en Eau dans la Région du Tensift- Année 1993-1994. 42 p, (inédit).
- DGH., 1988. : Etude du Plan Directeur Intégré d'Aménagement des Eaux des Bassins de Sebou, Bou Regreg, Oum Er Rbia et Tensift (S.B.OT). Mission IIIB. Hydrogéologie- Etudes des ressources en eau de la nappe du Haouz, 146 p, (inédit).
- IAH., 1994 .: Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. Volume n°16- Ed. de l'IAH, 131 p.
- Lallemand A., Barres A., 1994. : Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions. *BRGM-R37928*, 17 p, (inédit).
- Sinan M., sous-press. : Périmètres de protection des captages d'eau potable en milieu poreux. Guide de dimensionnement et de délimitation. *FAO et DGH*, 197 p.
- Sinan M., 2000. : Méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en eau des aquifères régionaux par la combinaison des SIG, de la géophysique et de la géostatistique. Application à l'aquifère du Haouz de Marrakech (Maroc). *Doctorat d'Etat. Univ. Mohamed V. Ecole Mohammadia d'Ingénieurs*, 372 p.
- Sinan M., Haddouchi B., Razack M., El Hebil A., 2000: Evaluation et gestion des ressources en eau souterraine des aquifères régionaux à l'aide des systèmes d'informations géographiques. Application à la nappe du Haouz de Marrakech- Maroc. *Journal Hydrogéologie, BRGM (France)*, n°4, pp. 89-100, 9 fig., 1 tabl.
- Sinan M., Trouillard J.M., 1993. : Utilisation de la cartographie multicritère pour l'étude de la vulnérabilité des aquifères. Application au sud du bassin hydrogéologique de l'Essonne. *BRGM R 37211, Orléans*, 42 p, (inédit).

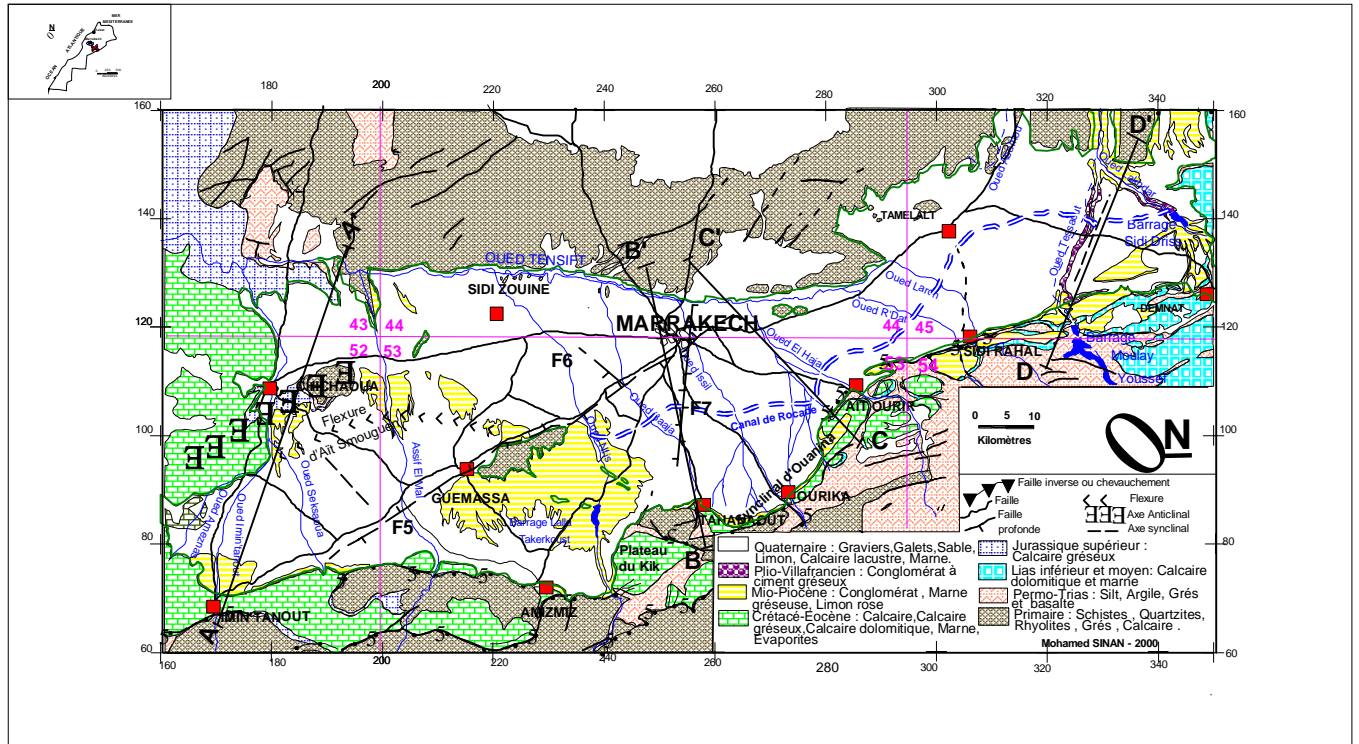


Fig. 1: Situation et contexte géologique du bassin du Haouz de Marrakech

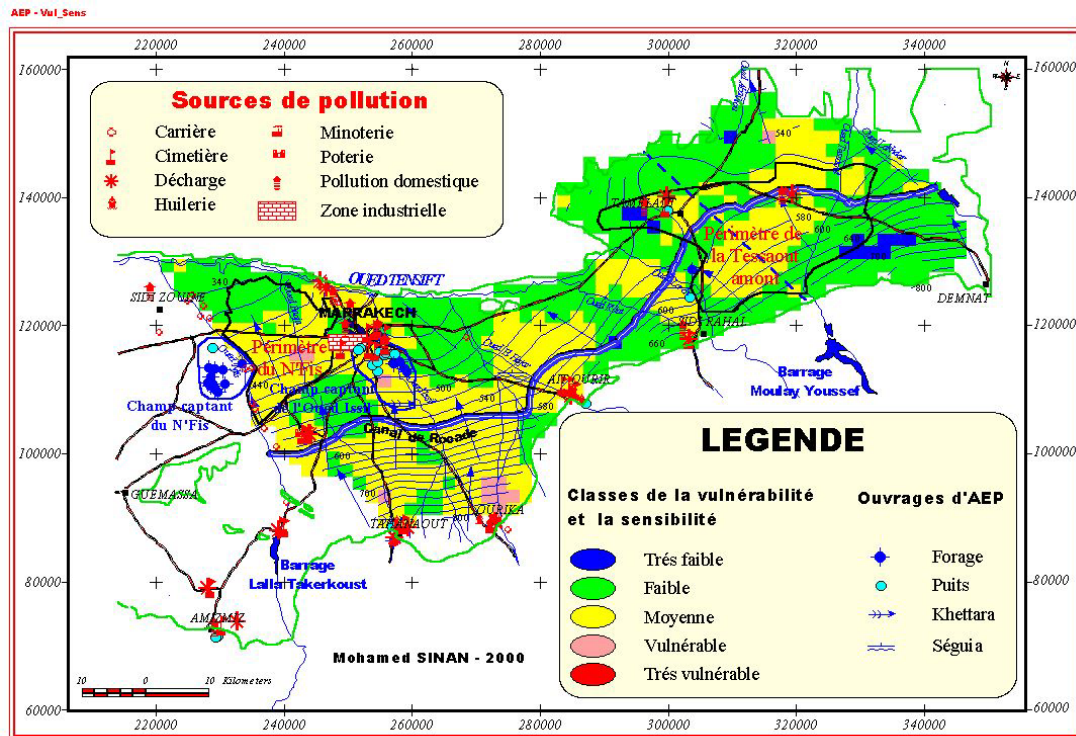


Figure 2: Vulnérabilité globale des ouvrages d'alimentation en eau potable captant la nappe du Haouz de Marrakech

CONTACTS

Mohamed SINAN, Professeur hydrogéologue
Ecole Hassania des Travaux Publics
Département Hydraulique
Route d'El Jadida Oasis, BP 8108
Casablanca
MAROC
Tel. + 212-61-40-03-35
Fax + 212-22-23-07-17
E_mail: sinan_mohamed@yahoo.fr
Web site: cerhydreau@ehp.ac.ma

Moumtaz Razack , Professeur hydrogéologue
Université de Poitiers, UMR HYDRASA, 40 Avenue du Recteur Pineau
86022 Poitiers Cedex
FRANCE
Tel. + 33 5 49 45 36 81
Fax + 33 5 49 45 42 41
E_mail: moumtaz.razack@hydrasa.univ-poitiers.fr

Rachid Maslouhi, Ingénieur SIG
Direction Générale de l'Hydraulique. Cellule SIG
Rue Hassan Ben Chekroune, Agdal
Rabat
MAROC
Tel. + 212 60 37 67 23
Fax + 212 37 67 43 70
E_mail: maslouhirachid@mtp.net.ma