

Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : Application à la plaine du Gharb (Maroc) Cartography of the vulnerability to pollution of groundwater : Application to the Gharb's plain (Morocco)

Mina Amharref, Saadia Aassine, Abdes Samed Bernoussi et Ben Younes Haddouchi

Volume 20, numéro 2, 2007

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/015812ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/015812ar>

[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

Amharref, M., Aassine, S., Bernoussi, A. S. & Haddouchi, B. Y. (2007). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : Application à la plaine du Gharb (Maroc). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 20(2), 185–199. <https://doi.org/10.7202/015812ar>

Résumé de l'article

Dans ce travail nous présentons une méthode d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines. Pour cela, nous avons introduit un indice de vulnérabilité I_v en considérant trois paramètres caractérisant le transfert d'un polluant depuis la surface sol jusqu'à la nappe. Il s'agit du temps de transit T via la zone de couverture, le degré d'épuration C_p/C_p (le rapport de la concentration C_p de l'eau en polluant à l'arrivée au niveau de la nappe par rapport à la concentration initiale C_p de l'eau polluante) et le degré de recharge R'/R (rapport de la recharge efficace par rapport à la recharge potentielle). Cet indice représente la somme pondérée de l'effet de ces trois paramètres sur la vulnérabilité. Les paramètres temps de transit et degré d'épuration ont été approchés par l'intermédiaire des vitesses de filtration, du pouvoir épurateur et des épaisseurs caractérisant les différentes couches de la zone de couverture. Le degré de recharge est estimé par le bilan hydrique, tandis que les pondérateurs des trois paramètres ont été déterminés par des tests de sensibilité suivis d'analyses de régression linéaire multiple réalisées sur des puits témoins. Cette méthode a été appliquée à la plaine du Gharb (Maroc) connue pour son système hydraulique complexe et une intense activité agricole. Ainsi, une carte de vulnérabilité intrinsèque et des cartes thématiques ont été établies pour ladite plaine en utilisant un Système d'Information Géographique (SIG).

CARTOGRAPHIE DE LA VULNÉRABILITÉ À LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES : APPLICATION À LA PLAINE DU GHARB (MAROC)

Cartography of the vulnerability to pollution of groundwater : Application to the Gharb's plain (Morocco)

Mina Amharref¹, Saadia Aassiné², Abdes Samed Bernoussi¹ et Ben Younes Haddouchi³

¹Laboratoire MPPRN, Faculté des Sciences et Techniques, BP 416, Tanger Maroc

²Laboratoire LTS, Université de Perpignan, France

³École Mohammedia des Ingénieurs, Université Mohamed V, Rabat, Maroc

Reçu le 30 juin 2004, accepté le 8 septembre 2006

RÉSUMÉ

Dans ce travail nous présentons une méthode d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines. Pour cela, nous avons introduit un indice de vulnérabilité I_v en considérant trois paramètres caractérisant le transfert d'un polluant depuis la surface sol jusqu'à la nappe. Il s'agit du temps de transit T via la zone de couverture, le degré d'épuration C_p/C_p (le rapport de la concentration C_p de l'eau en polluant à l'arrivée au niveau de la nappe par rapport à la concentration initiale C_p de l'eau polluante) et le degré de recharge R'/R (rapport de la recharge efficace par rapport à la recharge potentielle). Cet indice représente la somme pondérée de l'effet de ces trois paramètres sur la vulnérabilité. Les paramètres temps de transit et degré d'épuration ont été approchés par l'intermédiaire des vitesses de filtration, du pouvoir épurateur et des épaisseurs caractérisant les différentes couches de la zone de couverture. Le degré de recharge est estimé par le bilan hydrique, tandis que les pondérateurs des trois paramètres ont été déterminés par des tests de sensibilité suivis d'analyses de régression linéaire multiple réalisées sur des puits témoins. Cette méthode a été appliquée à la plaine du Gharb (Maroc) connue pour son système hydraulique complexe et une intense activité agricole. Ainsi, une carte de

vulnérabilité intrinsèque et des cartes thématiques ont été établies pour ladite plaine en utilisant un Système d'Information Géographique (SIG).

Mots clefs : *Eau souterraine, pollution, vulnérabilité, cartographie, SIG, Gharb, Maroc.*

ABSTRACT

Here we present a method for the evaluation and mapping of groundwater vulnerability to pollution. For this purpose, we introduce a vulnerability index, I_v , as a linear function of three parameters: 1) time of transit, T , via the unsaturated zone, 2) degree of purge, C_p/C_p (the ratio of the pollutant concentration, C_p , reaching the water table and the initial pollutant concentration in the aquifer, C_p) and 3) the degree of recharge R'/R (the ratio of the effective recharge and the potential recharge). The vulnerability index thus takes into account the weighted sum of all three parameters, which characterize the transfer of a pollutant from the soil surface to the water table. In our study, the transit time and the degree of purge were estimated by the infiltration rate, purge

*Auteur pour correspondance :
Téléphone: 212 39 39 39 54/55
Télécopieur: 212 39 39 39 53
Courriel : ambarrefm@yahoo.fr
samed@univ-perp.fr

power and thickness, which characterize the various layers of the unsaturated zone. The degree of recharge was estimated by the water balance. The weighting coefficients of the above parameters were estimated by sensitivity tests and analyzed by linear regression using pilot wells. This method was applied to the Gharb plain in Morocco, known for its complex hydraulic system and intense agricultural activity. Intrinsic vulnerability and parametric maps were established for this area using a Geographical Information System.

Keyword: *Groundwater, pollution, vulnerability, mapping, GIS, Gharb, Morocco.*

1. INTRODUCTION

Les problèmes liés à la pollution des eaux souterraines constituent actuellement une source d'inquiétude qui requiert un intérêt universel. Cette pollution, générée par les activités anthropiques, peut, en atteignant des niveaux critiques, présenter un danger grave pour la santé publique. Pour la sauvegarde de ces ressources, il est nécessaire de prévoir des moyens de protection. Face aux difficultés liées aux techniques de dépollution et au coût de celles-ci, la protection impose en premier lieu des mesures préventives. Celles-ci passent par la cartographie des zones de l'aquifère susceptibles d'être atteintes par des polluants que l'on qualifiera de vulnérables. La notion de vulnérabilité des eaux souterraines a été initialement introduite par MARGAT dans les années soixante (ALBINET et MARGAT, 1970; MARGAT, 1968). Vu la complexité des mécanismes régissant le transfert d'un polluant, la multitude et la variabilité des facteurs mis en cause, diverses approches ont été proposées. Certains auteurs ont défini la vulnérabilité comme étant une propriété intrinsèque des aquifères. D'autres estiment qu'elle est liée aux propriétés spécifiques du contaminant. Cependant, d'autres auteurs l'associent

aux activités humaines et à la nature des sols (GOGU et DASSARGUES, 1998; LALLEMAND-BARRES, 1994; VRBA et ZAPOROZEC, 1994).

Dans ce travail nous présentons la cartographie de la vulnérabilité de la plaine du Gharb au Maroc à l'aide d'un indice I_v qui est fonction de trois paramètres intervenant dans le transfert du polluant : le temps de transit (T) d'un polluant dans la zone non saturée, le degré d'épuration (C_p/C_p) et le degré de recharge (R'/R). L'indice de vulnérabilité est défini comme étant la somme pondérée de l'effet de ces trois paramètres (AMHARREF *et al.*, 2001a; 2002).

2. INDICE DE VULNÉRABILITÉ ET CARTOGRAPHIE

2.1 Principe et méthodologie

La vulnérabilité des eaux souterraines est définie en partant d'une évaluation qualitative des mécanismes de transfert d'un polluant qui repose sur une conceptualisation multicouche du milieu traversé. Ce milieu est subdivisé en couches horizontales dans lesquelles des processus physiques, chimiques et biologiques ont lieu simultanément. La migration d'une substance polluante emprunte naturellement les zones suivantes (Figure 1) :

- la Zone de l'Interface Sol (ZIS), qui constitue le domaine des activités polluantes;
- la Zone Non Saturée (ZNS), qui est le domaine du transfert vertical;
- la Zone Saturée (ZS), qui est le lieu de la propagation et de la dilution de la pollution.

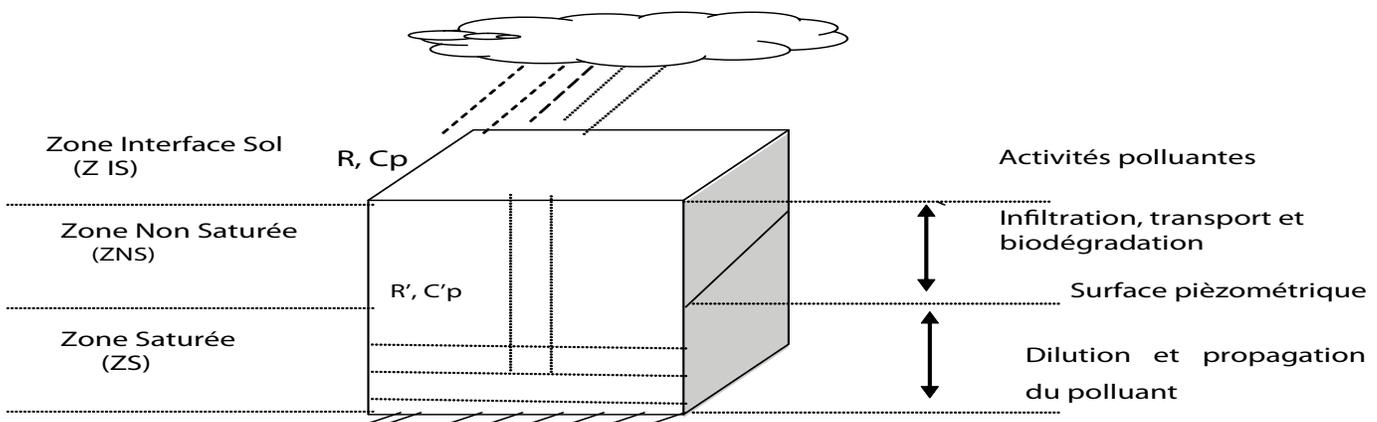


Figure 1. Schéma de la contamination des eaux souterraines.
Diagram of groundwater contamination.

La troisième zone (ZS) est caractérisée par un pouvoir de dilution et de transfert latéral. Les deux premières zones sont caractérisées par un pouvoir de recharge et d'épuration naturelles. Cette spécificité bien particulière leur confère le rôle d'un filtre naturel. Selon son degré de protection, cette couche de couverture (ZIS + ZNS) pourrait atténuer, voire empêcher totalement le contaminant d'atteindre la nappe. Avec cette optique, dans l'adaptation de cette méthode, nous n'avons pris en compte que les deux premières zones. La vulnérabilité (AMHARREF *et al.*, 2001a) est évaluée en partant d'un principe simple et communément admis qu'une zone est dite vulnérable si un produit polluant atteint la nappe en un temps très court et avec une concentration élevée (dépassant les limites de potabilité). Le degré de vulnérabilité est alors lié à la concentration C_p avec laquelle une eau chargée en polluant atteint la nappe et à son temps de transit T . Cette concentration C_p est influencée significativement par le pouvoir épurateur (M_d) de la couche traversée. Le temps de transit du polluant est lié à la vitesse de filtration dans la zone non saturée. Bien entendu et à l'exception des polluants jetés directement dans la nappe, la contamination ne pourrait avoir lieu que lorsqu'il y a recharge de la nappe par infiltration. Cette recharge R' constitue le vecteur de transport. Il s'agit donc de ne prendre en compte que les facteurs permettant de favoriser ou de ralentir l'infiltration vers la nappe d'une eau chargée en polluant (LALLEMAND-BARRES et ROUX, 1989). Nous retiendrons trois paramètres : le temps de transit, le degré d'épuration et le degré de recharge. La vulnérabilité est quantifiée par l'indice I_v (Indice de vulnérabilité) suivant :

$$I_v = \alpha \frac{1}{T} + \beta \frac{C_p}{C_p} + \gamma \frac{R'}{R} \quad (1)$$

où T est le temps de transit des eaux dans la zone non saturée qui dépend de la vitesse de filtration et par suite de la nature des couches traversées. Le facteur $1/T$ est supposé sans unité, car la valeur 1 représente l'unité de temps 1 jour qui pourra être modifiée en heures, en mois ou même en années, selon les cas étudiés;

C_p/C_p est le rapport de la concentration C_p de l'eau en polluant à l'arrivée au niveau de la nappe par rapport à la concentration initiale C_p de l'eau polluante. Il nous renseigne sur le taux de réduction de la pollution et dépend des caractéristiques du milieu traversé, en particulier du pouvoir épurateur (M_d) et de la nature du polluant;

R'/R est le degré de recharge, rapport de la recharge efficace R' par rapport à la recharge potentielle R . Il représente le degré d'alimentation de l'aquifère. La recharge potentielle R correspond notamment aux précipitations, dans le cas de la recharge diffuse, aux eaux d'irrigation en zones agricoles et aux débits des cours d'eau dans les zones des échanges préférentiels entre les eaux de surface et les eaux souterraines;

α , β et γ sont des coefficients pondérateurs positifs. Ils reflètent l'importance de l'effet de chacun des facteurs sur l'indice de vulnérabilité. Le choix de ces coefficients a été fait suite à des tests de sensibilité (voir paragraphe 2.3). La vulnérabilité est d'autant plus forte que l'indice I_v est plus élevé.

Pour des temps de transit supérieurs ou égaux à un jour, les valeurs de I_v normalisé ($I_v/I_v \text{ max}$) par rapport à l'indice maximum $I_v \text{ max}$ ($I_v \text{ max} = \alpha + \beta + \gamma$) se répartissent dans l'intervalle [0-1]. Toutefois, pour des temps de transit faibles (< 1 jour), l'indice I_v va être très élevé (≥ 1) montrant ainsi une extrême vulnérabilité. Cet indice permet donc la comparaison de la vulnérabilité d'une zone par rapport à une autre. En effet, une zone Z1 est dite plus vulnérable qu'une zone Z2 si l'indice de vulnérabilité I_{v1} est supérieur à l'indice I_{v2} (AMHARREF *et al.*, 2001b). Le choix des classes des degrés de vulnérabilité (faible, forte, très forte et extrême) est fait globalement par une analyse des temps de transit, du degré d'épuration et leur confrontation avec les données géologiques et hydrogéologiques de la zone.

L'indice de vulnérabilité dépend, en plus de la nature des couches traversées, des caractéristiques physico-chimiques du polluant. Cependant, nous pouvons élaborer des cartes de vulnérabilité intrinsèques en considérant les caractéristiques des polluants comme équivalentes à celles de l'eau qui représente l'élément le plus mobile et le plus persistant qui puisse exister (CRIVERT, 2003). Par contre, dans l'estimation de la vulnérabilité spécifique, on tient compte des caractéristiques spécifiques d'un contaminant donné ou d'un groupe de contaminants particulier.

Cette approche, appelée TCR, (le temps de transit T , la concentration C et la recharge R) est inspirée des approches antérieures, et en particulier des méthodes DRASTIC et REHSE (ALLER *et al.*, 1987; REHSE, 1977). Elle a l'avantage de considérer une combinaison linéaire de l'effet des trois paramètres pondérés qui, eux mêmes, dépendent de plusieurs facteurs liés au milieu physique (nature lithologique, épaisseur, pente, couvert végétal, etc.), au lieu d'une combinaison linéaire directe de ces différents facteurs. Aussi, la redondance de certains facteurs, signalée dans certaines méthodes, a été évitée dans l'approche proposée ici.

Le principe de la méthode consiste à approcher les trois paramètres T , C_p/C_p et R'/R pour pouvoir calculer et cartographier l'indice de vulnérabilité I_v en tout point de la zone d'étude. Cette cartographie se fait comme suit :

- L'acquisition des données nécessaires à l'évaluation des paramètres T et C_p/C_p . La nature lithologique et l'épaisseur des sous-couches, constituant la zone non saturée, couplées avec les données des vitesses de filtration (V_i) et des indices d'épuration (I_i) (Tableau 1), caractérisant chaque type de

Tableau 1. Indice d'épuration et vitesse de filtration des différents matériaux (REHSE, 1977).
Table 1. Purge index and infiltration rates of different rocks (REHSE, 1977).

Granulométrie	Matériaux	Indice d'épuration	Vitesse de filtration (m/j)
Roches ayant des propriétés d'adsorption	Humus, 5-10 % humus, 5-10 % argile	0,8	0,86
	Argile, limon argileux, sable très argileux, argile limoneuse,	0,5	0,003-0,025
	Silt argileux à silt, limon fin	0,4	0,16
	Silt, sable silteux, sable peu silteux et peu argileux, sable limoneux	0,22-0,33	0,54-4,32
Roches sableuses	Sable fin à moyen	0,17	8,23-10
	Sable moyen à grossier	0,1	19,2
	Sable grossier	0,07	27
	Gravier silteux, riche en sable et en argile	0,13	0,72
Gravier	Gravier peu silteux, beaucoup de sable	0,08	144
	Gravier fin à moyen riche en sable	0,04	201
	Gravier moyen à grossier, peu de sable	0,03	480
	Galets	0,02	4 320

matériau, permettent d'évaluer le temps de transit T à travers la zone non saturée et son degré d'épuration (C_p/C_p);

- L'évaluation des conditions de recharge et le calcul du degré de recharge, dans le cas de la recharge diffuse, par le bilan hydrique et/ou par l'intermédiaire des facteurs pente et occupation du sol;
- Le calcul de l'indice I_v par la relation 1.

Les valeurs calculées de l'indice sont réparties en classes de degrés de vulnérabilité dont les limites sont fixées en fonction des caractéristiques de la zone d'étude. Le calcul de l'indice de vulnérabilité et la cartographie des différents paramètres, sur toute la zone, ont été énormément facilités par l'utilisation d'un système d'information géographique (Arcview dans notre cas).

2.2 Évaluation des paramètres R/R , C_p/C_p et T

2.2.1 Le paramètre degré de recharge R/R

L'évaluation du degré de recharge (R/R) se fait en se basant sur l'identification des zones d'infiltration concentrée (zones d'alimentation privilégiée de la nappe par les eaux de surface, zones d'irrigation intensive) et l'appréciation des surfaces d'infiltration diffuse des précipitations. Cependant, la quantification de la recharge d'un aquifère n'est pas toujours simple; elle dépend aussi bien des caractéristiques du sol (nature, pente et couvert végétal) que de la distribution des précipitations dans le temps ainsi que d'autres variables climatiques (température et humidité). Il n'est donc pas

possible de donner un pourcentage absolu de la recharge (LERNER *et al.*, 1990). Cette recharge est d'autant plus difficile à évaluer dans les climats arides et semi-arides où les précipitations sont relativement rares et sporadiques et où les processus d'évaporation et d'évapotranspiration sont très importants. Toutefois, l'infiltration des précipitations prédomine particulièrement dans la recharge des nappes superficielles et elle peut être estimée par plusieurs méthodes dont le bilan hydrique est la plus couramment utilisée.

2.2.2 Le degré d'épuration C_p/C_p et le temps de transit T

La concentration C_p peut être calculée par résolution de l'équation de dispersion en milieu non saturé. Cependant, et pour rendre la méthode d'usage simple, nous pouvons, dans un premier temps, approcher le degré d'épuration (C_p/C_p) à l'aide du pouvoir épurateur M_d de la couche de couverture (BERNOUSSI et AMHARREF, 2003). En effet, nous pouvons considérer que :

$$C_p'/C_p = \begin{cases} 1 - M_d & \text{si } M_d < 1 \quad \text{cas de l'épuration partielle} \\ 0 & \text{si } M_d \geq 1 \quad \text{cas de l'épuration totale} \end{cases}$$

Le pouvoir épurateur M_d dépend de l'épaisseur et de la nature des matériaux traversés en condition non saturée. Il est calculé le long du trajet vertical (LALLEMAND-BARRES et ROUX, 1989; REHSE, 1977) par :

$$M_d = \sum_{i=1}^n h_i \cdot I_i \quad (2)$$

Md : pouvoir épurateur de la zone de couverture (REHSE, 1977);

hi : épaisseur de chaque sous-couche constituant la zone non saturée;

li : indice d'épuration défini par REHSE en fonction des paramètres physiques et hydrodynamiques pour différents types de matériaux en condition non saturée. Il est lié à la perméabilité et au pouvoir de rétention des constituants du matériau considéré;

n : le nombre de sous-couches constituant la zone non saturée.

Le temps de transit T d'un polluant depuis la surface sol jusqu'à la nappe dépend de plusieurs facteurs et la difficulté de l'estimation de ce paramètre ne réside pas seulement dans la multitude des facteurs mis en cause et la complexité de leur obtention, mais aussi dans le choix de la vitesse à considérer. En milieu poreux non saturé, cette vitesse s'exprime par l'équation de Richards et sa résolution donne la vitesse d'écoulement. Cependant, dans ce travail nous avons utilisé la vitesse moyenne de filtration (V_i) caractéristique des différents types de roche. Celle-ci est synthétisée dans le tableau 1 à partir d'études antérieures (MAXE et JOHANSSON, 1998; REHSE, 1977). Ainsi le temps de transit T_i , pour une couche donnée, pourra être calculé par : $T_i = h_i / V_i$, où h_i est l'épaisseur de la couche traversée. À la traversée de la zone non saturée, ce temps de transit T va être approché par :

$$T = \sum_{i=1}^n h_i / V_i \quad (3)$$

V_i : vitesse moyenne caractérisant chaque type de roche traversée par le produit polluant;

h_i : épaisseur de chaque sous-couche constituant la zone non saturée;

n : le nombre de sous-couches.

La protection de la nappe est d'autant meilleure que ce temps T est plus élevé.

2.3 Ajustement de la méthode : Test de sensibilité

Pour évaluer les valeurs des pondérateurs α , β et γ de l'indice de vulnérabilité I_v , nous avons procédé à des tests de sensibilité suivis d'analyses de régression linéaire multiples de l'indice I_v et des trois paramètres ($1/T$, $C'p/Cp$ et R'/R). Cette analyse est réalisée sur 12 puits témoins de la plaine du Gharb (Tableau 2) représentant des variations importantes des trois paramètres (temps de transit, degré d'épuration et degré de recharge). En plus de ces puits témoins, nous avons pris en compte un puits de référence (puits N° 1111 : puits fictif avec $T = 1$, $C'p/Cp = 1$ et $R'/R = 1$). Ces puits ont été ordonnés qualitativement selon une vulnérabilité croissante en se basant sur l'analyse du temps de transit T, du taux d'épuration $C'p/Cp$ et du degré de recharge en plus des données géologiques et hydrogéologiques.

Ce classement a été facilité par la détermination du signe de la variation de l'indice I_v pour deux puits consécutifs ($I_{v_{i+1}} - I_{v_i}$) et cela en ayant les pondérateurs inconnus. Toutefois, pour déterminer l'intervalle de variation des pondérateurs et de l'indice I_v , pour des temps de transit supérieurs ou égaux à un jour, nous avons considéré des indices normalisés (I_v/I_{vmax}) par rapport à l'indice maximum I_{vmax} ($I_{vmax} = \alpha + \beta + \gamma$). Ainsi, pour le puits de référence, on aura $I_v/I_{vmax} = 1$.

L'indice I_v normalisé varie donc entre 0 et 1 pour des temps de transit supérieurs ou égaux à un jour. Cependant, il sera évidemment supérieur à 1 dans des situations extrêmes correspondant à des temps de transit T inférieurs à un jour (vulnérabilité extrême).

Avec cette normalisation, nous pouvons en conséquence considérer que les pondérateurs normalisés α , β et γ varient dans l'intervalle [0-1] et que $\alpha + \beta + \gamma = 1$. Ainsi, et avec un pas de 0,1 pour chaque pondérateur, nous avons considéré toutes les combinaisons possibles de simulations de l'indice I_v . L'indice I_v , calculé pour chaque combinaison, nous a permis de classer les puits témoins et d'éliminer les combinaisons qui

Tableau 2. Données et classification des puits témoins.
Table 2. Data and classification of the pilot wells.

Numéro des puits	1697	1261	893	329	733	89	139	414	255	1819	1111	1817	1621
T	160	140	80	72	46,25	52	46,95	42,04	28,1	26	1	0,16	0,15
C'/C	0	0	0	0,29	0,3	0,41	0,46	0,55	0,61	0,68	1	0,84	0,72
R'/R	0,2	0,2	0,2	0,15	0,2	0,15	0,2	0,15	0,15	0,2	1	0,15	0,2
Classement par ordre de vulnérabilité	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

donnent des résultats aberrants (non conformes au classement qualitatif des puits témoins). La combinaison qui s'ajuste au mieux, au sens du critère des moindres carrés, à l'indice de vulnérabilité est donnée par :

$$I_v = 0,400. (1/T) + 0,428. (C_p/C_p) + 0,172. (R'/R).$$

Ce modèle décrit une relation très significative entre l'indice de vulnérabilité et les trois paramètres. Il montre que ce sont les facteurs degré d'épuration et temps de transit qui conditionnent le plus, et ce de manière quasi similaire, l'indice I_v et que la recharge l'influence moins. D'autre part, les valeurs approchées que nous avons affectées aux coefficients α , β et γ ($\alpha = \beta = 2$ et $\gamma = 1$) sont aussi cohérentes et judicieuses. En pratique, les coefficients de pondérations proposés sont des constantes applicables de manière générale. Par contre, les intervalles des degrés de vulnérabilité (faible, forte et très forte), pour des temps de transit supérieurs ou égaux à un jour, peuvent être raffinés en fonction des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de la zone étudiée. L'application de ce modèle à la plaine du Gharb donne des résultats qui concordent bien avec ceux des puits témoins.

3. APPLICATION À LA PLAINE DU GHARB (MAROC)

3.1 Description de la plaine du Gharb

La plaine du Gharb est située au nord-ouest du Maroc. Elle s'étend dans la basse vallée de l'oued Sebou sur une superficie de 3 000 km² (Figure 2). Elle est formée d'une épaisse série sédimentaire de dépôts très hétérogènes depuis les marnes du Miocène jusqu'aux limons du Quaternaire récent (Figure 3). Son climat passe de sub-humide à hiver tempéré en zone côtière et à semi-aride à hiver chaud à l'intérieur de la plaine. Les précipitations moyennes annuelles sont de 460 mm. Le drainage superficiel est assuré principalement par l'oued Sebou avec un apport de 6 milliards m³/an. La zone est à vocation agricole et a fait l'objet d'aménagements hydrauliques considérables et de mise en valeur agricole depuis 1933. Le mode d'irrigation le plus pratiqué est le gravitaire. Les fourrages, la canne à sucre et la betterave sont les cultures irriguées les plus fréquentes. La plaine renferme un système aquifère complexe constitué de deux principales nappes (Figure 4) superposées qui sont : la nappe phréatique au centre de la plaine et la nappe profonde qui affleure sur les pourtours sud et ouest et plonge au centre sous la nappe superficielle. L'aquifère profond, d'une épaisseur variant de 60 à 200 m, se trouve dans un complexe hétérogène du Plio-Villafranchien formé de sables, de grès, de calcarénites et de conglomérats. Il est doté de bonnes caractéristiques hydrodynamiques, dont la perméabilité

varie de 10^{-4} à $6,10^{-3}$ m/s et la transmissivité varie de $3 \cdot 10^{-4}$ à $1,5 \cdot 10^{-2}$ m²/s (DRPE, 1994; EL MANSOURI, 1999). L'aquifère supérieur, d'une puissance variant de 20 à 100 m, est formé de matériaux quaternaires hétérogènes d'argiles, de limons et de passages sableux et /ou sablo-limoneux. Il renferme une nappe libre localisée au centre de la plaine. Sa perméabilité est comprise entre 10^{-7} et $2 \cdot 10^{-5}$ m/s. La recharge de la nappe se fait principalement par l'infiltration des pluies et le retour des eaux d'irrigation. L'écoulement général est du sud-est vers le nord-ouest dans la partie sud de la plaine et devient sensiblement est-ouest dans les parties centre et ouest (Figure 4). La nappe se décharge essentiellement par évaporation et par drainage naturel par des oueds, et artificiel par des canaux. La ligne de partage des eaux qui jalonne par endroit le Sebou est à mettre en relation avec une zone d'alimentation privilégiée par cet oued.

3.2 Données relatives à la plaine du Gharb

3.2.1 La recharge

La recharge concentrée, prédominée par les retours d'irrigation, est estimée à 25 % (DRPE, 1994) et les échanges avec l'oued Sebou qui sont très localisés, en particulier dans la partie centre-ouest de la plaine. La recharge diffuse se fait par infiltration de 15 % des précipitations (estimée par le bilan hydrique). La plaine montre (Figure 5) un degré de recharge important sur l'ensemble de la région qui est à mettre en relation avec l'irrigation intensive que connaissent la plaine et les faibles pentes qui favorisent l'infiltration.

3.2.2 Le temps de transit et le taux d'épuration

La nature et l'épaisseur des différentes couches qui constituent la zone non saturée ont été déterminées essentiellement à partir des données fournies par l'Office de Mise en Valeur Agricole du Gharb (ORMVAG) et par la Direction des Travaux Publics. Il s'agit de données extraites des profils des puits réalisés au cours de l'étude pédologique (ORMVAG, 1996), de données des fiches de puits et de forages réalisés par la Direction de l'Hydraulique, et de données de suivi des piézomètres captant la nappe superficielle (Figure 2). L'épaisseur de la zone non saturée varie entre 0,7 m dans la partie nord et 10 m au centre et au sud-est de la plaine. L'utilisation de ces données, des indices d'épuration et des vitesses (Tableau 1) nous a permis de calculer le temps de transit et le degré d'épuration de la couche de couverture. La répartition du temps de transit et du degré d'épuration (Figure 6 et Figure 7) est à mettre en relation avec les épaisseurs et la nature des couches constituant la zone non saturée. Ces couches sont à dominance argileuse au nord et à l'ouest et

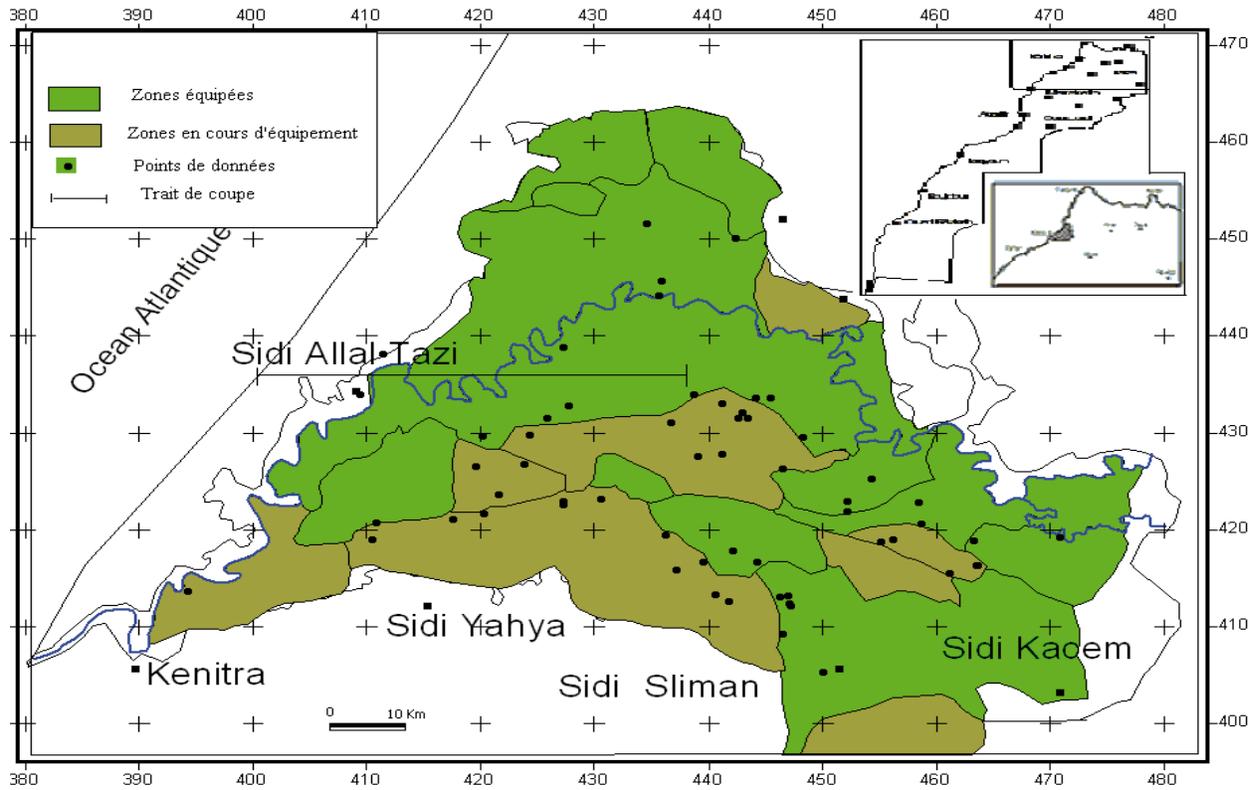


Figure 2. Carte de répartition des points de mesure et des zones irriguées.
Distribution of data points and irrigated areas.

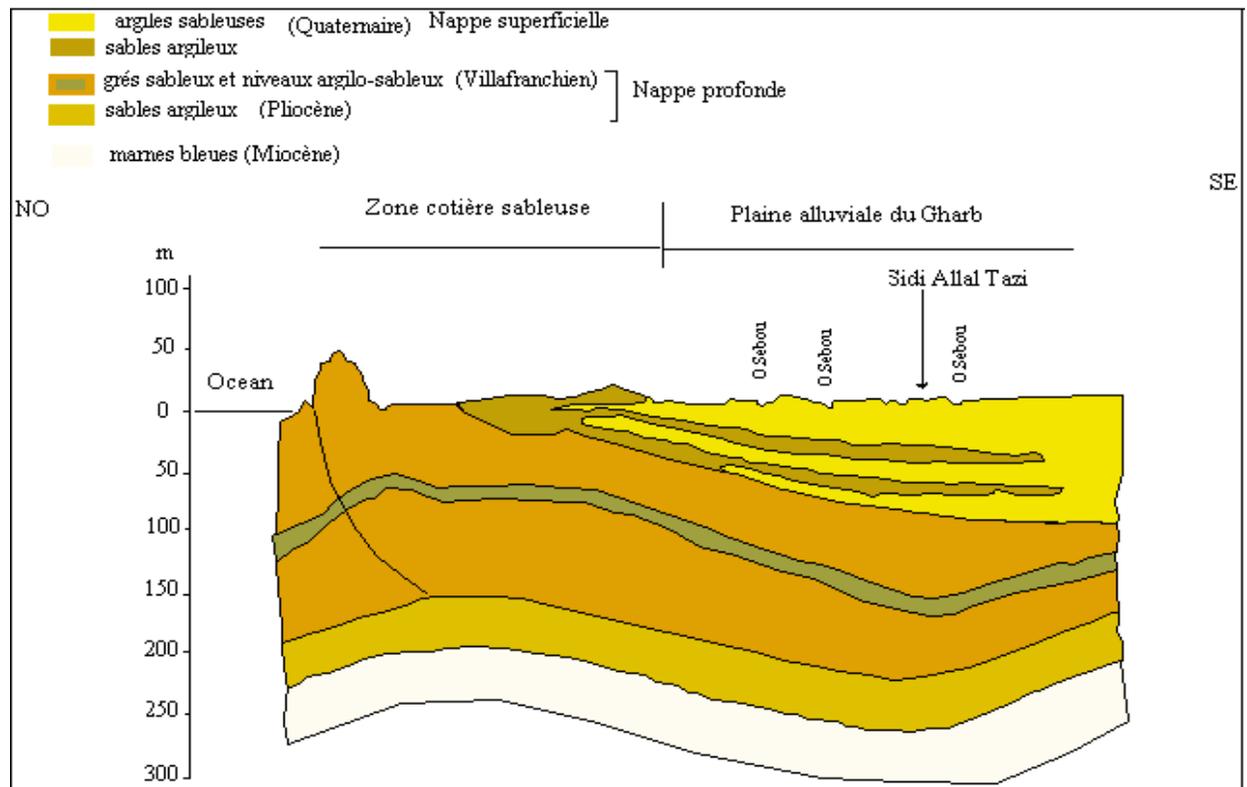


Figure 3. Coupe géologique NO-SE dans la plaine du Gharb (ORMVAG, 1996).
NW-SE geological section of the Gharb plain (ORMVAG, 1996).

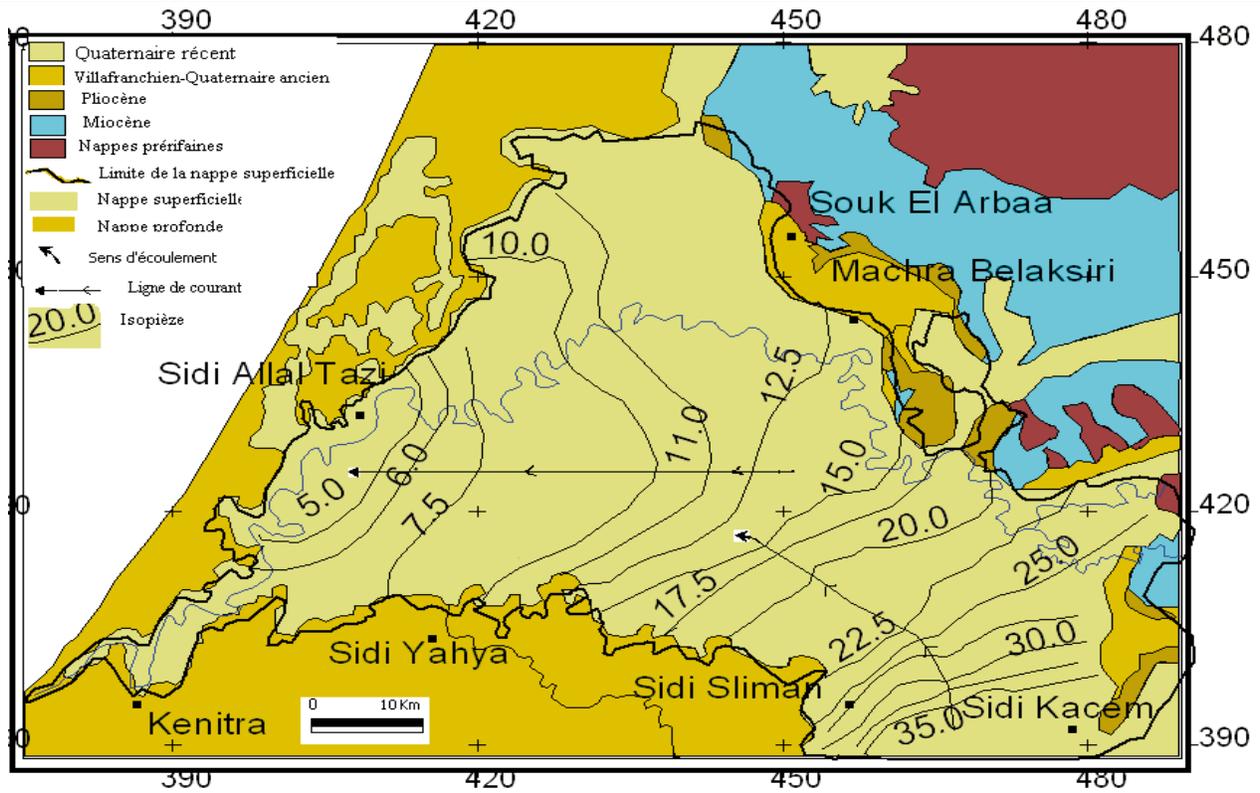


Figure 4. Carte piézométrique de la nappe superficielle du Gharb (1997).
Piezometric map of the Gharb shallow aquifer (1997).

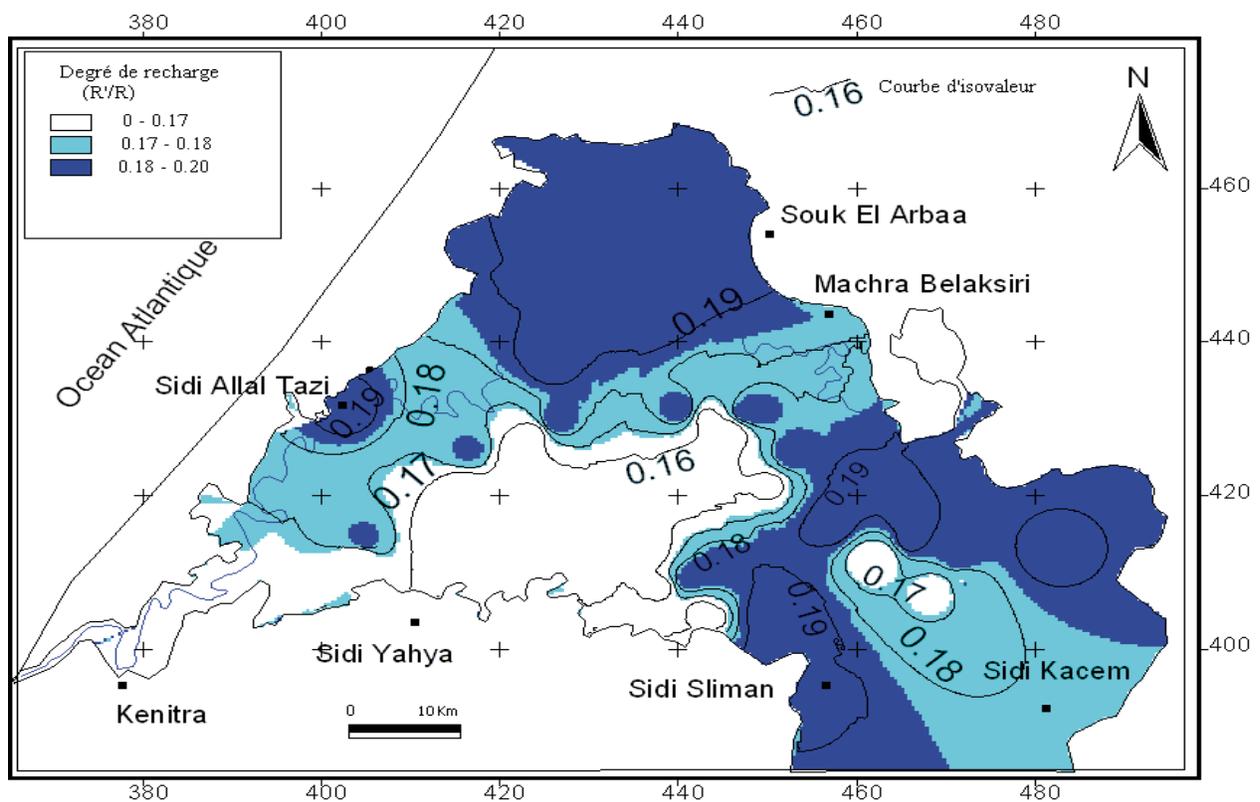


Figure 5. Carte de répartition du degré de recharge de la nappe superficielle du Gharb.
Distribution of the recharge intensity of the Gharb shallow aquifer.

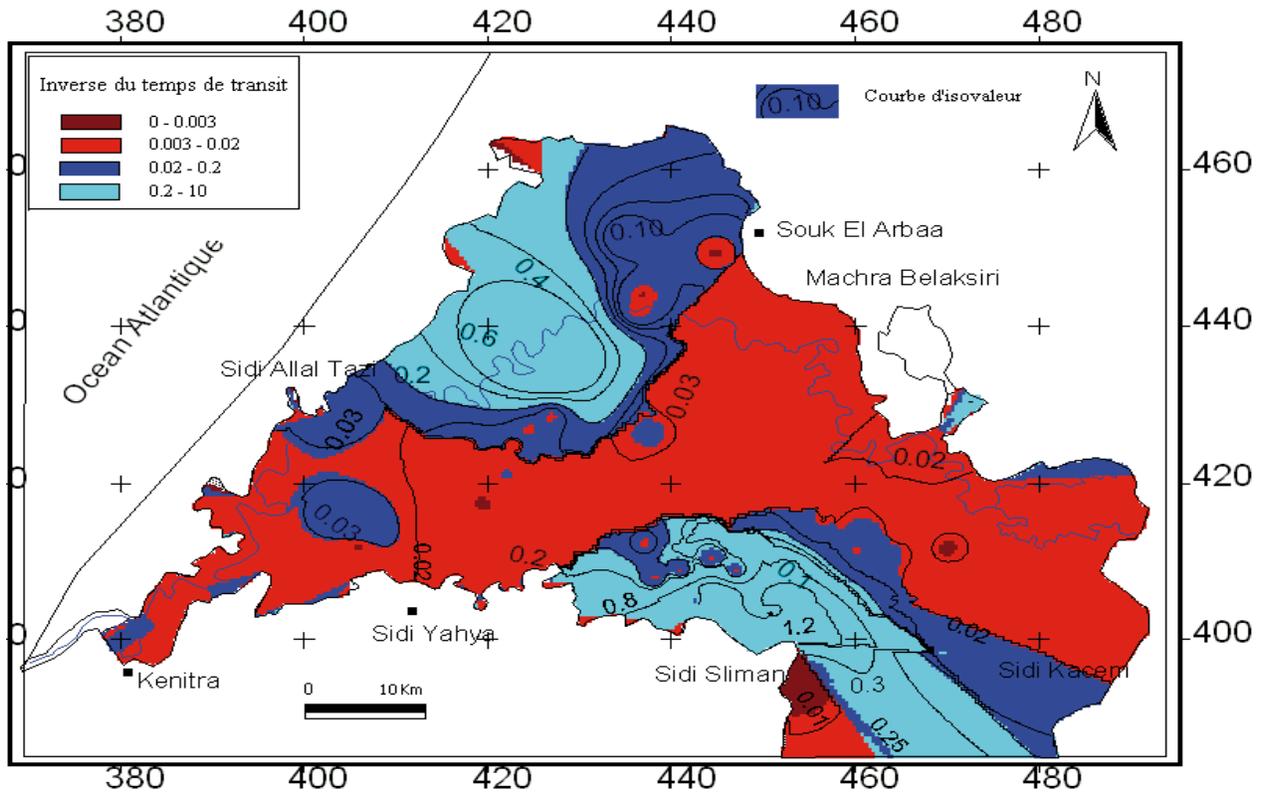


Figure 6. Carte de répartition de l'inverse du temps de transit à la nappe superficielle du Gharb.
Distribution of the inverse transit time of the Gharb shallow aquifer.

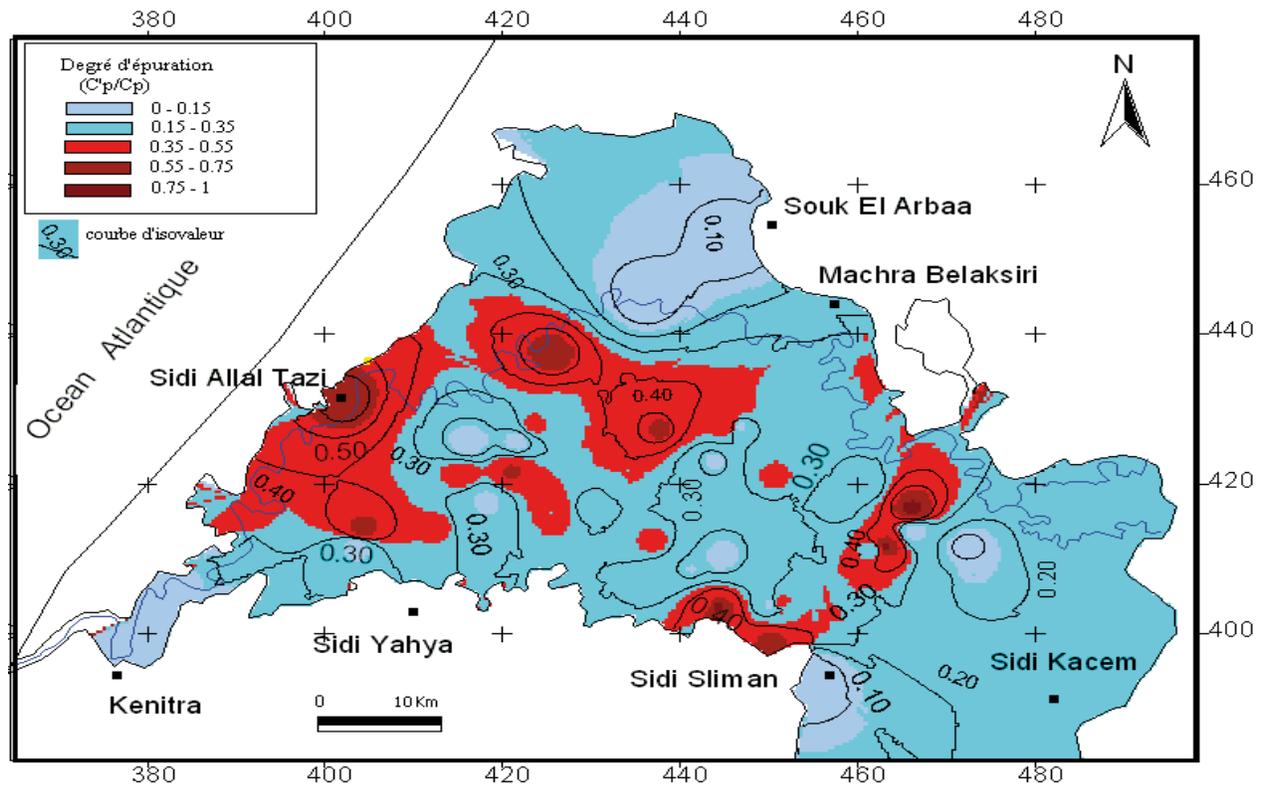


Figure 7. Carte de répartition du degré d'épuration de la nappe superficielle du Gharb.
Distribution of the degree of purge of the Gharb shallow aquifer.

présentent des intercalations sableuses au sud est. Elles ont aussi des épaisseurs faibles à l'ouest et au nord de la plaine.

3.3 Cartographie de la vulnérabilité et interprétation

Les valeurs de l'indice normalisé qui ont été calculées pour la plaine du Gharb par la relation 1 sont réparties en classes correspondant à une vulnérabilité faible ($0 < Iv < 0,15$), forte ($0,15 < Iv < 0,35$), très forte ($0,35 < Iv < 1$) et extrême ($Iv > 1$). Le choix de ces intervalles est basé sur une analyse des temps de transit et du degré d'épuration de tous les puits et leur confrontation avec les données géologiques et hydrogéologiques. La carte obtenue (Figure 8) montre en général une forte vulnérabilité au niveau des parties nord et centre qui est peut être liée à la faible épaisseur de la zone non saturée de l'aquifère. Les parties nord-est et sud-est de la plaine présentent une faible vulnérabilité qui pourrait s'expliquer en l'occurrence par la puissance de la zone de couverture. Les eaux souterraines y sont localement mieux protégées. Par contre, cette protection n'est pas assurée dans les zones nord-ouest (au nord Sidi Allal Tazi) et au nord de Sidi Sliman, présentant une vulnérabilité très forte à extrême localement. Cette situation est inquiétante, car cette dernière zone présente une densité élevée des puits captant la nappe phréatique et les utilisateurs de l'eau souterraine y sont nombreux. Par ailleurs, les zones à forte et à très forte vulnérabilité nécessitent un contrôle et une limitation des activités potentiellement polluantes, car ces zones sont, d'une part, susceptibles d'être polluées et, d'autre part,

les écoulements souterrains peuvent entraîner le polluant vers d'autres zones peu vulnérables. Des échanges sont aussi possibles entre les deux nappes et avec l'oued Sebou. Ces échanges sont probables, en particulier dans la partie centre-ouest (au nord-est de Sidi Allal Tazi) qui est une zone d'alimentation privilégiée de la nappe par l'oued. La situation est préoccupante sachant que l'oued Sebou est le collecteur principal des rejets des deux grandes villes de Fès et Meknès situées en amont de la plaine. Le problème atteint plus le milieu rural dont la population utilise directement l'eau souterraine sans aucun traitement préalable. Dans ces zones, des mesures préventives adéquates sont nécessaires afin de limiter les risques.

4. CONCLUSION

La cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines est une méthodologie qui est 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. Cependant, l'usage de ces cartes pour la limitation efficace de la protection des eaux souterraines doit tenir compte du contexte hydrodynamique de l'aquifère qui ne compromet pas inutilement la planification et la gestion du territoire. L'originalité de ce travail réside

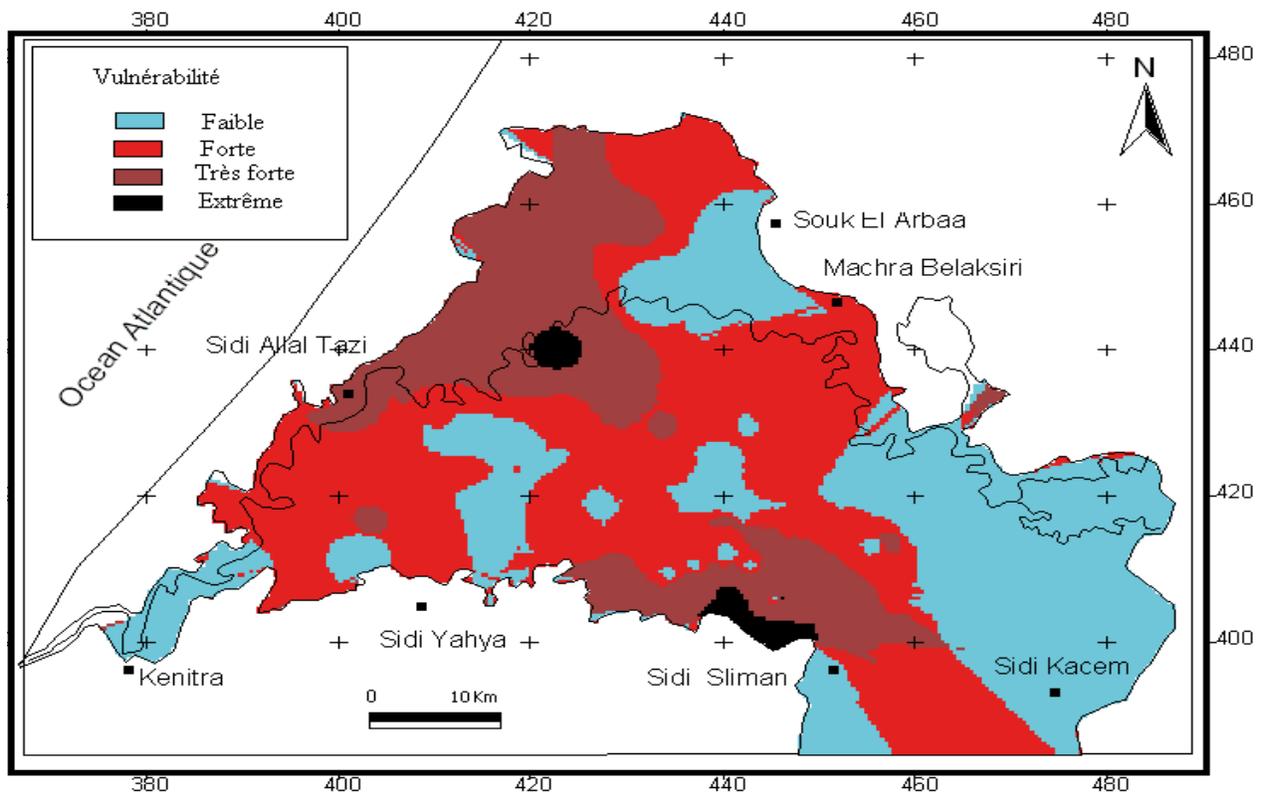


Figure 8. Carte de vulnérabilité intrinsèque de la nappe superficielle du Gharb.
Intrinsic vulnerability map of the Gharb shallow aquifer.

dans la réalisation d'une cartographie de la vulnérabilité de la plaine du Gharb qui, jusqu'à ce jour, n'avait pas été dressée, et cela en utilisant un indice de vulnérabilité récemment introduit (AMHARREF *et al.*, 2001a). D'autres études doivent être poursuivies afin d'élaborer des cartes plus précises et tenant compte d'un nombre important de données. Par ailleurs l'utilisation d'un système d'information géographique faciliterait la mise à jour de ces cartes.

REMERCIEMENT

Nous tenons à remercier M. Abdeloiahid El Moussaoui, professeur de statistiques à la Faculté des Sciences et Techniques à Tanger, pour son aide à la réalisation des tests de sensibilité.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLER L., T. BENNET, J.H. LEHR, R. PETTY ET G. HACKETT (1987). *DRASTIC: a standardized system to evaluate ground water pollution potential using hydrogeologic settings*. U.S EPA-600/2-87-035, 455 p.
- ALBINET M. et J. MARGAT (1970). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraines. *Bull. BRGM*, 2^e série, section III, 4, 3-22, Orléans.
- AMHARREF M., J. MANIA et B. HADDOUCHI (2001a). Adaptation of an evaluation vulnerability method to groundwater pollution. *Proc. of Salt Water Intrusion in Coastal Aquifer: Monitoring, Modeling, and Management*. Essaouira, Maroc, 23-25 avril. pp. 1-10; www.olemiss.edu/sciencenet/saltnet/swica1/swica1.html.
- AMHARREF M., J. MANIA et B. HADDOUCHI (2001b). Évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines. *1^{er} Colloque national d'hydrogéologie et environnement*, 26-28 avril, Fès, Maroc, p. 9.
- AMHARREF M., S. AASSINE et A. BERNOUSSI (2002). Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines : application au cas de la plaine du Gharb. *Proc. du Congrès international de mathématiques appliquées JANO7*, Tanger 17-19 avril. CD-Rom édité par la Faculté des Sciences et Techniques, Tanger, Maroc.
- BERNOUSSI A. et M. AMHARREF (2003). Étalabilité-vulnérabilité. *Ann. Univ. Craiova Ser. Math. Comp. Sci.*, 30, 53-62.
- CRIVERT (2003). *La cartographie régionale de la vulnérabilité des eaux souterraines : un outil pertinent d'aide à la prise de décision en matière d'aménagement du territoire*. Synthèse réalisée pour la Commission environnementale de stratégie Saint-Laurent par le groupe écologique CRIVER, 1-28. www.rocler.qc.ca/ziphs1/index.htm.
- DRPE (Direction de la Recherche et de la Planification des Eaux), (1994). *Étude du système aquifère du Gharb*. Rapport interne DRH, Rabat, Maroc, 65 p. + annexes.
- EL MANSOURI B. (1999). *Développement d'outils et concepts pour la gestion des eaux souterraines. Application à l'aquifère côtier du Gharb*. Thèse de doctorat Es Sciences, Université Ibn Tofail, Kenitra, Maroc, 172 p.
- ORMVAG (Office de Mise en Valeur Agricole du Gharb) (1996). *Étude pédologique de la plaine du Gharb au 1/20 000*. 4 rapports de 194 p. + 12 cartes. (Rapport interne ORMVAG. Kenitra, Maroc.
- GOGU R. et A. DASSARGUES (1998). A short review on groundwater vulnerability assessment. Basic statements for use in the framework of the cost 620 action. *Workshop, 18-20 mai, Université de Neuchâtel, Suisse*, pp. 1-19.
- LALLEMEND-BARRES A. (1994). *Normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions. Étude documentaire préliminaire*. R37928. BRGM, 1-17.
- LALLEMEND-BARRES A. et J.C. ROUX (1989). *Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine*. BRGM, Manuels et Méthode, 19, 1-224.
- LERNER D.N., A.S. ISSAR et I. SIMMERS (1990). Groundwater recharge. *IAH*, Vol. 8, 345 p.
- MARGAT J. (1968). *Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Base de la cartographie*, Doc. BRGM, 68 SGL 198 HYD. Orléans, France.
- MAXE L. et P.O JOHANSSON (1998). Assessing groundwater vulnerability using travel time and specific surface area indicators. *Hydol. J.*, 6, 441-449.
- REHSE W. (1977). Elimination und Abbaue von organische Fremdstoffen, pathogenen Keimen und virenin Lockergestein. *Z. Dt. Geol. Ges.*, 128, 319-329.
- VRBA J. et A. ZAPOROZEC (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability. *IAH*, Vol. 1, 131 p.

ANNEXE

TEST DE SENSIBILITÉ

Dans ce papier nous avons proposé un indice de vulnérabilité I_v qui est exprimé par : $I_v = \alpha \ 1/T + \beta \ C_p/C_p + \gamma \ R'/R$.

La difficulté de l'utilisation de cet indice réside dans le choix des pondérateurs α , β et γ , car on ne possède pas *a priori* de valeurs de I_v pour pouvoir utiliser les techniques de régression linéaire multiple. En effet, les données de terrain permettent de calculer T , par la suite $1/T$, C_p/C_p et R'/R . Toutefois, la détermination de α , β et γ nécessite la connaissance de l'indice I_v qu'on ne connaît pas *a priori*. Pour cela on a procédé de la manière suivante :

1. Évaluer des valeurs approchées de I_v pour certains puits témoins;
2. Déterminer des valeurs pour α , β et γ par application de la régression linéaire multiple en utilisant les valeurs de I_v calculées pour des puits témoins.

1. Évaluation de I_v pour des puits témoins

Pour déterminer une valeur approchée de I_v pour certains puits dits « témoins », on a procédé en quatre étapes :

Étape 1. Choix des puits témoins

À partir de l'analyse des données recueillies sur la plaine du Gharb, on a sélectionné 12 puits témoins (Tableau 1) représentant des variations importantes des différents paramètres (temps de transit, degré d'épuration et degré de recharge). En plus de ces puits témoins, on a considéré un puits de référence, puits N° 1111, qui est un puits fictif avec $T = 1$, $C_p/C_p = 1$ et $R'/R = 1$.

Étape 2. Classification qualitative de la vulnérabilité des puits témoins

En utilisant les données du tableau ci-dessous, les vitesses d'infiltration et les indices d'épuration caractérisant chaque matériau d'après REHSE (Tableau 1, voir papier), on a

Tableau 1. Caractéristiques et propriétés des puits témoins.

Table 1. Characteristics and properties of the pilot wells.

N° puits	X	Y	Épaisseur (m)	Lithologie
1697	446,240	412,640	0 – 0,10	Limon argileux
			0,10 – 0,90	Argile
			0,90 – 4,0	Limon argileux
1261	463,00	418,500	0 – 3,5	Argile
893	458,300	422,500	0 – 2,0	Argile limoneuse
329	424,00	426,400	0 – 0,12	Argile limoneuse
			0,12 – 1,30	Argile
			1,30 – 1,80	Limon argileux
733	452,00	421,50	0 – 1,00	Argile
89	426,00	431,200	1,00 – 2,0	limon
			0 – 0,20	Limon argileux
139	438,700	433,700	0,20 – 1,30	argile
			0 – 0,15	Limon fin
			0,15 – 0,45	Argile limoneuse
414	442,600	431,200	0,45 – 1,3	Argile
			0 – 0,50	Argile limoneuse
			0,50 – 0,75	Argile
			0,75 – 1,10	Sable
255	436,700	230,800	1,10 – 1,40	Argile
			0 – 0,12	Argile limoneuse
			0,12 – 0,70	Argile
			0,70 – 0,90	Sable limoneux
1819	409,800	433,700	0,90 – 1,15	Argile sableuse
			0 – 0,65	Argile
1817	441,700	412,200	0 – 0,50	Sable
			0,50 – 1,10	Argile sableuse
1621	446,400	408,760	0 – 4,0	sable

pu calculer les paramètres temps de transit (T) et le degré d'épuration ($C'p/Cp$) des puits témoins (Tableau 2).

En se basant sur ces données on a pu ordonner qualitativement les puits témoins selon leur vulnérabilité. Ce classement a été facilité par la détermination du signe de la variation de l'indice de vulnérabilité pour deux puits consécutifs en ayant les pondérateurs inconnus, $(Iv_{i+1} - Iv_i)$. Les résultats obtenus donnent le classement selon l'ordre donné dans le tableau 2 (le puits N° 1 est le moins vulnérable).

Étape 3. Analyse de l'effet de la variation des différents paramètres

À partir de ce classement on a effectué une première analyse de l'effet de la variation des différents paramètres ($1/T$, $C'p/Cp$ et R'/R) sur la vulnérabilité. Ainsi, il apparaît globalement que ce sont les paramètres $1/T$ et $C'p/Cp$ qui agissent le plus sur la vulnérabilité, alors que la recharge est de moindre effet.

Pour pouvoir déterminer l'intervalle de variation de Iv ($Iv = \alpha 1/T + \beta C'p/Cp + \gamma R'/R$), on a considéré des indices normalisés ($Iv/Ivmax$) par rapport à l'indice maximal $Ivmax$ ($Ivmax = \alpha + \beta + \gamma$). L'indice normalisé Iv varie donc entre 0 et 1 pour des temps de transit supérieurs ou égaux à un jour. Cependant, il sera évidemment supérieur à 1 dans des situations extrêmes correspondant à des temps de transit T inférieurs à un jour (vulnérabilité extrême). Ainsi, pour le puits de référence (puits N° 1111), on a $Iv/Ivmax = 1$.

Avec cette normalisation, on peut alors considérer que les pondérateurs normalisés α , β et γ varient dans l'intervalle $[0,1]$ et que $\alpha + \beta + \gamma = 1$. On a procédé ensuite à une série de simulations pour différentes valeurs de α , β et γ dans l'intervalle $[0,1]$ avec un pas de 0,1 pour chaque pondérateur. Le choix de 0,1 est fait à partir du classement qualitatif, car un pas de 0,01 signifierait que l'effet du paramètre en question est négligeable par rapport aux autres. Pour chaque combinaison et à l'aide de l'indice Iv calculé, on a classé les puits témoins et on a éliminé les combinaisons qui donnent des résultats aberrants (pas le même classement obtenu au tableau 2).

Les combinaisons retenues ont fait l'objet de comparaisons graphiques et on a remarqué que (voir courbes) :

1. Elles donnent graphiquement le même classement qualitatif;
2. Les proportions des valeurs de Iv varient d'une combinaison à une autre selon la classe de vulnérabilité (classe 1, notée S1, formée par les trois premiers puits (puits N° 1697, 1261 et 893), la classe 2, notée S2, formée par les huit puits suivants (329, 733, 89, 139, 414, 255 et 1819), et la classe 3, notée S3, formée par les deux derniers puits (1817 et 1621).

Les courbes « moyennes » qui se dégagent de l'ensemble des graphiques sont données par les combinaisons dont les pondérateurs varient autour de $0,4 \leq \alpha$, $\beta \leq 0,6$ et $0,1 \leq \gamma \leq 0,2$ (Figure 1, Figure 2 et Figure 3).

Tableau 2. Données et classification des puits témoins.
Table 2. Data and classification of the pilot wells.

N° puits	T	C'/C	R'/R	Ordre de vulnérabilité	Iv moyen
1697	160	0	0,2	1	0,037
1261	140	0	0,2	2	0,037
893	80	0	0,2	3	0,039
329	72	0,29	0,15	4	0,156
733	46,25	0,3	0,2	5	0,172
89	52	0,41	0,15	6	0,209
139	46,94	0,46	0,2	7	0,240
414	42,04	0,55	0,15	8	0,271
255	28,1	0,61	0,15	9	0,301
1819	26	0,68	0,2	10	0,341
1111	1	1	1	11	1,000
1817	0,16	0,84	0,15	12	2,886
1621	0,15	0,72	0,2	13	3,010

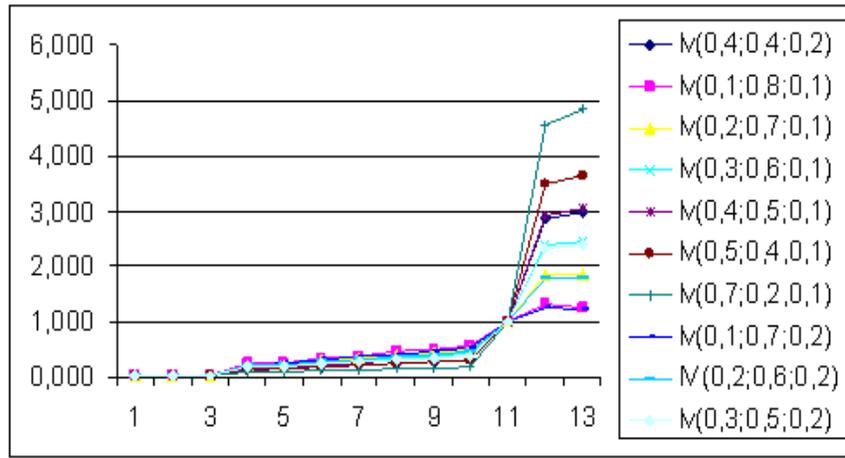


Figure 1. Courbes représentant I_v pour différentes combinaisons des coefficients de pondération dans l'intervalle [0-1] et avec un pas de 0,1.
Plots representing I_v for different combinations of weighing coefficients in the interval [0-1] with a step of 0.1.

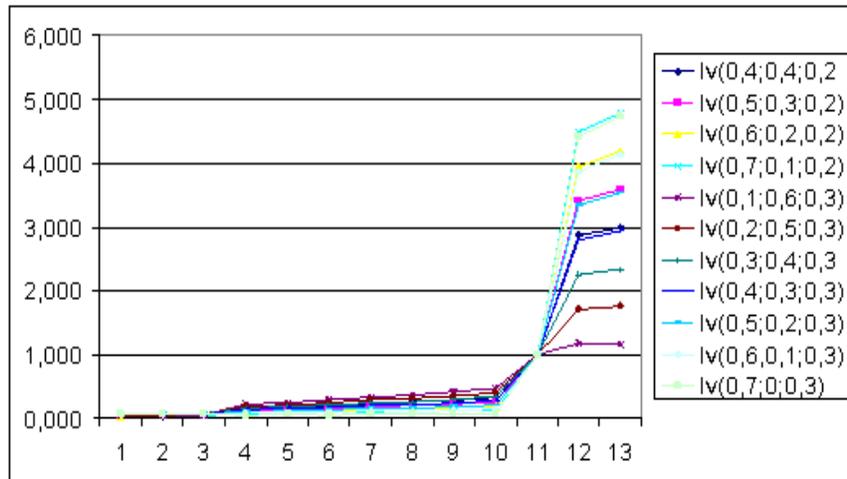


Figure 2. Courbes représentant I_v pour différentes combinaisons des coefficients de pondération dans l'intervalle [0-1] et avec un pas de 0,1.
Plots representing I_v for different combinations of weighing coefficients in the interval [0-1] with a step of 0.1.

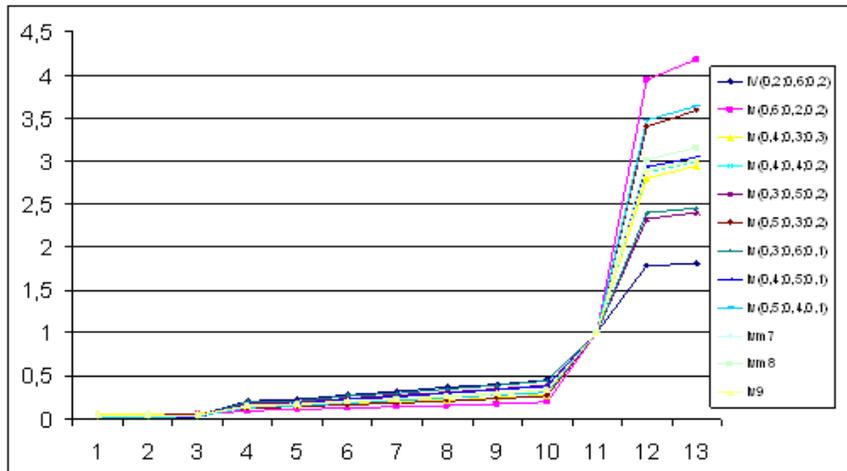


Figure 3. Représentation de I_v moyen pour différentes combinaisons.
Representation of I_v means for various combinations.

Étape 4. Estimation de l'indice I_v pour les puits témoins2. Évaluation de α , β et γ

On a remarqué que, d'une combinaison à une autre, il y a soit une surévaluation de l'indice I_v sur S3 et une sous-évaluation de I_v sur S1, soit l'inverse (de même que sur S2). Cela est dû au fait que les paramètres $1/T$, C_p/C_p et R'/R ne varient pas linéairement mais que la combinaison des effets de ces trois paramètres est linéaire. À cause de ces variations, antagonistes et compensatrices, et aussi pour avoir une valeur approchée de I_v avec une erreur minimale sur les trois paliers de variation de I_v (S1 U S2 U S3), on a envisagé une valeur moyenne de I_v qui est la moyenne des résultats obtenus par les combinaisons retenues, ce qui a permis d'avoir des valeurs approchées de I_v pour les puits témoins. Ces résultats sont donnés dans le tableau 2.

La figure 3 donne une représentation graphique de différentes combinaisons et de « I_v moyen ». I_{vm7} , I_{vm8} et I_{vm9} correspondent respectivement à une moyenne de 7, 8 et 9 combinaisons; nous avons considéré I_{vm7} .

En utilisant les valeurs de I_v obtenues pour les différents puits témoins, on a effectué une régression linéaire, via le logiciel StatGraphics 4.0, pour déterminer les valeurs de α , β et γ . Parmi les sorties, on a relevé les résultats apparaissant au tableau 3.

La meilleure combinaison linéaire (au sens du critère des moindres carrés) estimant l'indice de vulnérabilité en fonction des trois paramètres est donc approximativement :

$$I_{v_m} = 0,40 (1/T) + 0,43 (C_p/C_p) + 0,17 (R'/R)$$

Le modèle obtenu décrit une relation très significative entre l'indice de vulnérabilité et les trois paramètres. Il montre que ce sont les facteurs degré d'épuration et temps de transit qui conditionnent le plus, et ce, de manière quasi-similaire ($\alpha = 2,13$ et $\beta = 2,28$) l'indice I_v et que la recharge l'influence moins ($\gamma = 0,92$).

Tableau 3. Résultats de la régression linéaire multiple entre l'indice de vulnérabilité et les trois paramètres ($1/T$, C_p/C_p et R'/R).

Table 3. Results of the multiple linear regression between the vulnerability index and the three parameters ($1/T$, C_p/C_p et R'/R).

Variable dépendant : I_{v_m}					
Paramètre	Estimation	Erreur standard	Statistique de T	Valeur de P	
$1/T$	0,400066	0,000041071	9740,84	0,0000	
C_p/C_p	0,428486	0,000294461	1455,15	0,0000	
R'/R	0,171516	0,000409808	418,528	0,0000	

Analyse de variance					
Source	Somme des carrés	DF	Moindres carrés	Ratio de F	Valeur de P
Modèle	18,8289	3	6,27629	81129789,40	0,0000
Résiduel	7,73611E-7	10	7,73611E-8		
Total	18,8289	13			

R-carré = 100,0 pourcent

R-carré (ajusté pour d.f.) = 100,0 pourcent

Erreur standard de l'estimation = 0,000278139

Erreur moyenne absolue = 0,000191959

Statistique de Durbin-Watson = 1,81348

Intervalles de confiance de 95,0 % pour les estimations de coefficients				
Paramètre	Estimation	Erreur standard	Limite inférieure	Limite supérieure
$1/T$	0,400066	0,000041071	0,399975	0,400158
C_p/C_p	0,428486	0,000294461	0,42783	0,429142
R'/R	0,171516	0,000409808	0,170603	0,172429