



**Utilisation des SIG pour la comparaison des méthodes
d'évaluation de la vulnérabilité des nappes à la pollution.**

Application à la nappe du Haouz de Marrakech (Maroc)

M. Mohamed Sinan: Ecole Hassania des Travaux Publics (Casablanca)

Mlle. Najoua Bouibrine: Direction Générale de l'Hydraulique (Rabat)

*Atelier international sur l'utilisation des techniques spatiales pour le
développement durable . (Rabat, 25-27 avril 2007)*



Plan de l'exposé

Introduction

1. Définition de la vulnérabilité des nappes à la pollution
2. Méthodes utilisées pour la caractérisation de la vulnérabilité à la pollution de la nappe du Haouz
3. Présentation de la zone d'étude: Nappe du Haouz de Marrakech
4. Élaboration de la carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe du Haouz de Marrakech (zone centrale) avec les quatre méthodes testées
5. Analyse comparative des résultats des quatre méthodes utilisées
6. Conclusion



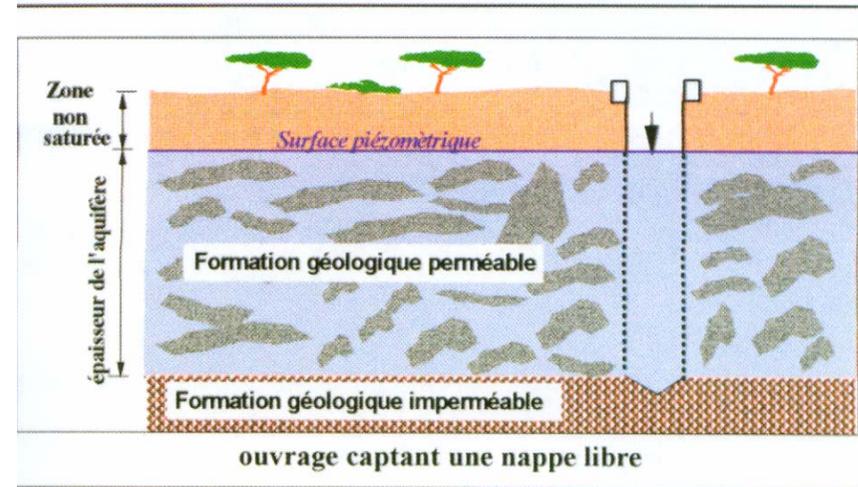
Introduction

La protection de la qualité des ressources en eau est devenue une des priorités au Maroc et dans plusieurs pays dans le monde, en raison de leur rareté et de la multiplication des sources de pollution: rejets d'eaux usées (brutes) industrielles, décharges brutes, engrais chimiques, etc.

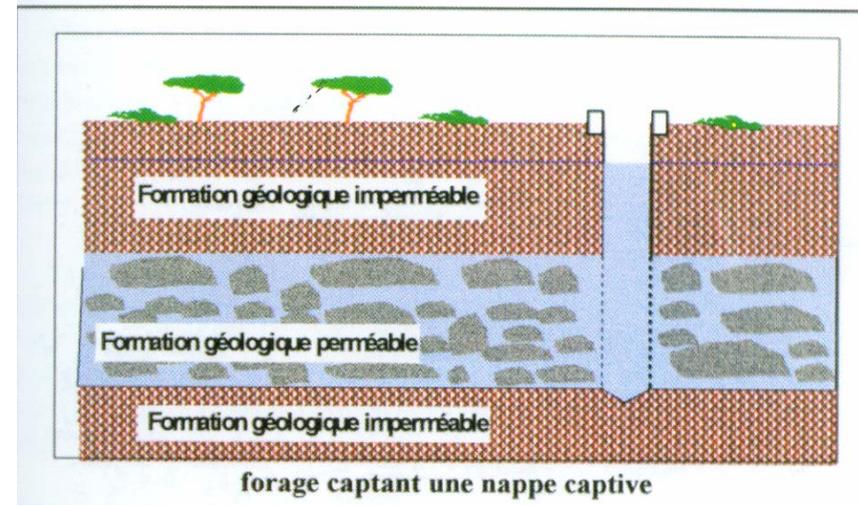
La protection des nappes d'eau souterraines nécessite au préalable la caractérisation du degré de leur vulnérabilité à la pollution.



Les nappes phréatiques (libres), proches du sol, sont très vulnérables à la pollution provenant de la surface du sol.



Les nappes profondes captives sont naturellement protégées par les formations imperméables qui les surmontent, et ne sont donc pas vulnérables à la pollution de surface.





Plusieurs méthodes (plus d'une vingtaine) de caractérisation de la vulnérabilité des nappes à la pollution sont citées dans la littérature internationale. Ces méthodes sont plus ou moins complexes et plus ou moins précises.

L'objet du présent travail de recherche est de comparer les résultats de quatre méthodes importantes utilisées au Maroc et dans le monde.

L'application de ces méthodes a été effectuée sur la nappe du Haouz de Marrakech, une des plus importantes nappes du Maroc.

Les résultats obtenus ont été comparés à l'évolution temporelle de la qualité des eaux de la nappe, mesurée au niveau de quelques piézomètres.

L'élaboration des cartes de vulnérabilité à la pollution a été effectuée avec le SIG ArcGIG.



1. Définition de la vulnérabilité des nappes à la pollution

La vulnérabilité d'une nappe traduit la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par une pollution provenant de la surface du sol.

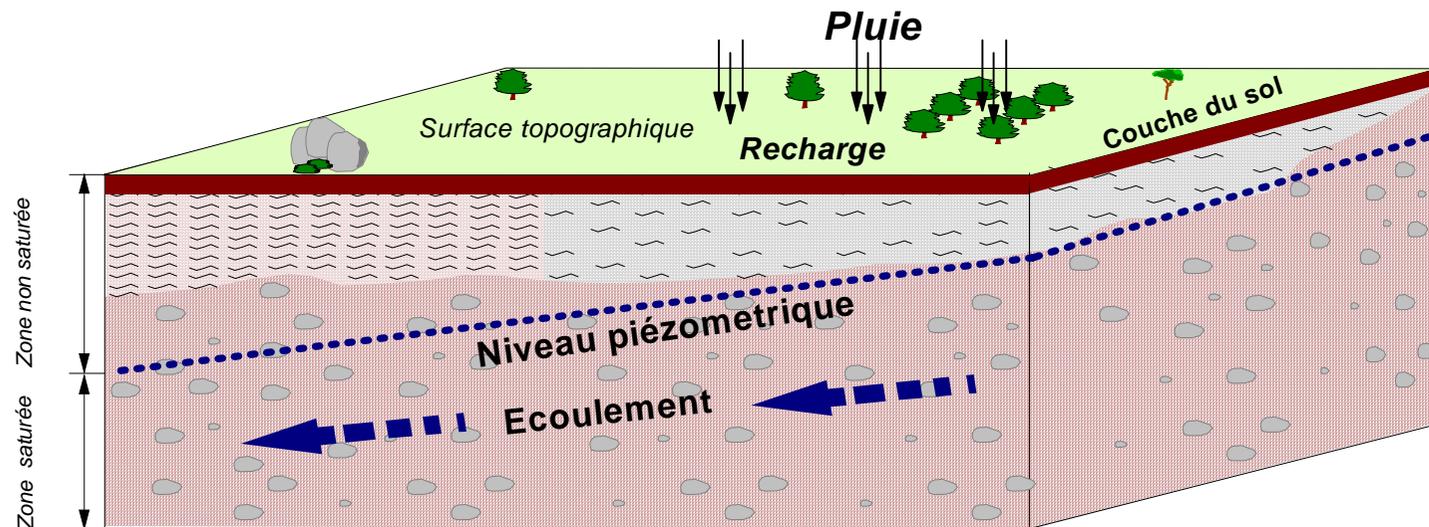
Plusieurs paramètres interviennent dans le transfert vertical de la pollution à partir de la surface du sol, notamment:

- ✓ *Recharge de la nappe (à partir des précipitations, cours d'eau, infiltration des eaux d'irrigation, etc);*
- ✓ *Nature et épaisseur du sol ;*
- ✓ *Caractéristiques (lithologie, perméabilité, etc) de la zone non saturée ;*
- ✓ *Profondeur de l'eau par rapport au sol;*
- ✓ *Etc.*



PARAMETRES INTERVENANT DANS L'EVALUATION DE LA VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES

Données principales





2. Méthodes utilisées pour la caractérisation de la vulnérabilité à la pollution de la nappe du Haouz

Quatre méthodes ont été comparées, ce sont les méthodes:

- *DRASTIC;*
- *DRASTIC modifiée;*
- *GOD;*
- *Minnesota.*



2.1. Méthode DRASTIC

C'est une des méthodes les plus utilisées dans le monde. Elle est basée sur les paramètres hydrogéologiques suivants:

- **D** : Profondeur de la nappe (Depth);
- **R** : Recharge de la nappe;
- **A** : Nature lithologique de l'Aquifère;
- **S** : Nature du Sol;
- **T** : Topographie;
- **I** : Impact de la zone non saturée;
- **C** : Conductivité hydraulique.

La méthode affecte une note variant entre 1 et 10 à chaque paramètre utilisé.



La méthode affecte également des poids différents (variant entre 1 et 5) pour les paramètres utilisés.

Paramètre	Poids
<i>[D] Profondeur de la nappe</i>	5
<i>[R] Recharge de la nappe</i>	4
<i>[A] Nature lithologique de l'Aquifère</i>	3
<i>[S] Nature du Sol</i>	2
<i>[T] Topographie</i>	1
<i>[I] Impact de la zone non saturée</i>	5
<i>[C] Conductivité hydraulique</i>	3



Calcul de l'indice de vulnérabilité DRASTIC:

$$IVD = (Dr \times Dw) + (Rr \times Rw) + (Ar \times Aw) + (Sr \times Sw) + (Tr \times Tw) + (Ir \times Iw) + (Cr \times Cw)$$

Avec :

- *D, R, A, S, T, I, C* : Les paramètres utilisés par la méthode DRASTIC ;
- *r, w* : Poids et note attribués à chaque paramètre utilisé.



2.2. Méthode DRASTIC modifiée

Cette méthode, que nous avons proposée, se base sur les paramètres DRASTIC, relatifs uniquement à la zone non saturée de la nappe.

En effet, seuls ces paramètres interviennent dans le transfert vertical de la pollution à partir de la surface du sol.

Les autres paramètres de la méthode DRASTIC (perméabilité et nature lithologique) n'interviennent pas dans ce transfert.



Paramètres utilisés par la méthode DRASTIC modifiée:

<i>Paramètres</i>	<i>Poids</i>
<i>[D] Profondeur de la nappe</i>	<i>5</i>
<i>[R] Recharge de la nappe</i>	<i>4</i>
<i>[S] Nature du Sol</i>	<i>2</i>
<i>[T] Topographie</i>	<i>1</i>
<i>[I] Impact de la zone non saturée</i>	<i>5</i>

Les mêmes notes et poids que ceux de la méthode DRASTIC sont considérés par cette méthode.

Calcul de l'indice de vulnérabilité:

$$IV.DModif = (Dr \times Dw) + (Rr \times Rw) + (Sr \times Sw) + (Tr \times Tw) + (Ir \times Iw)$$



2.3. Méthode GOD

Le mot GOD est un acronyme des paramètres suivants:

- **G** : Groundwater occurrence (type d'aquifère) ;
- **O** : Overall aquifer class (caractéristiques de l'aquifère en terme de lithologie et de porosité) ;
- **D** : Depth of water table (profondeur à la nappe).



Calcul de l'indice de vulnérabilité GOD:

$$Iv_{(GOD)} = C_A \times C_L \times C_D$$

Avec:

C_A = note du type d'Aquifère;

C_L = note de la Lithologie de la ZNS de l'aquifère;

C_D = note de la Profondeur (Depth) à la surface de la nappe.

Les notes utilisées pour chaque paramètre utilisé, varient entre 0 et 1.



Notes du type d'aquifère

Type d'aquifère	Note
Aucun aquifère	0
Aquifère confiné et artésien	0.1
Aquifère confiné et non artésien	0.2
Aquifère semi-confiné	0.3
Aquifère avec couverture de surface assez perméable	0.4- 0.6
Aquifère non confiné	0.7- 1



Notes de la lithologie de la ZNS

Nature lithologique	Note
Sol résiduel	0.4
Limon alluvial, argile, marne, calcaire fin	0.5
Sable éolien, siltite, tuf, roche ignée et métamorphique fracturée	0.6
Sable et gravier, grès, tuf	0.7
Gravier (colluvions)	0.8
Calcaire	0.9
Calcaire fracturé ou karstique	1



Notes de la profondeur de la nappe/sol

Profondeur (m)	0 – 2	2 – 5	5-10	10-20	20-50	50-100	> 100
Note	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4



2.4. Méthode du Département des Ressources Naturelles de Minnesota (USA)

La caractérisation de la vulnérabilité des nappes à la pollution est basée sur l'évaluation du temps nécessaire au transfert de la pollution dans la zone non saturée de l'aquifère.



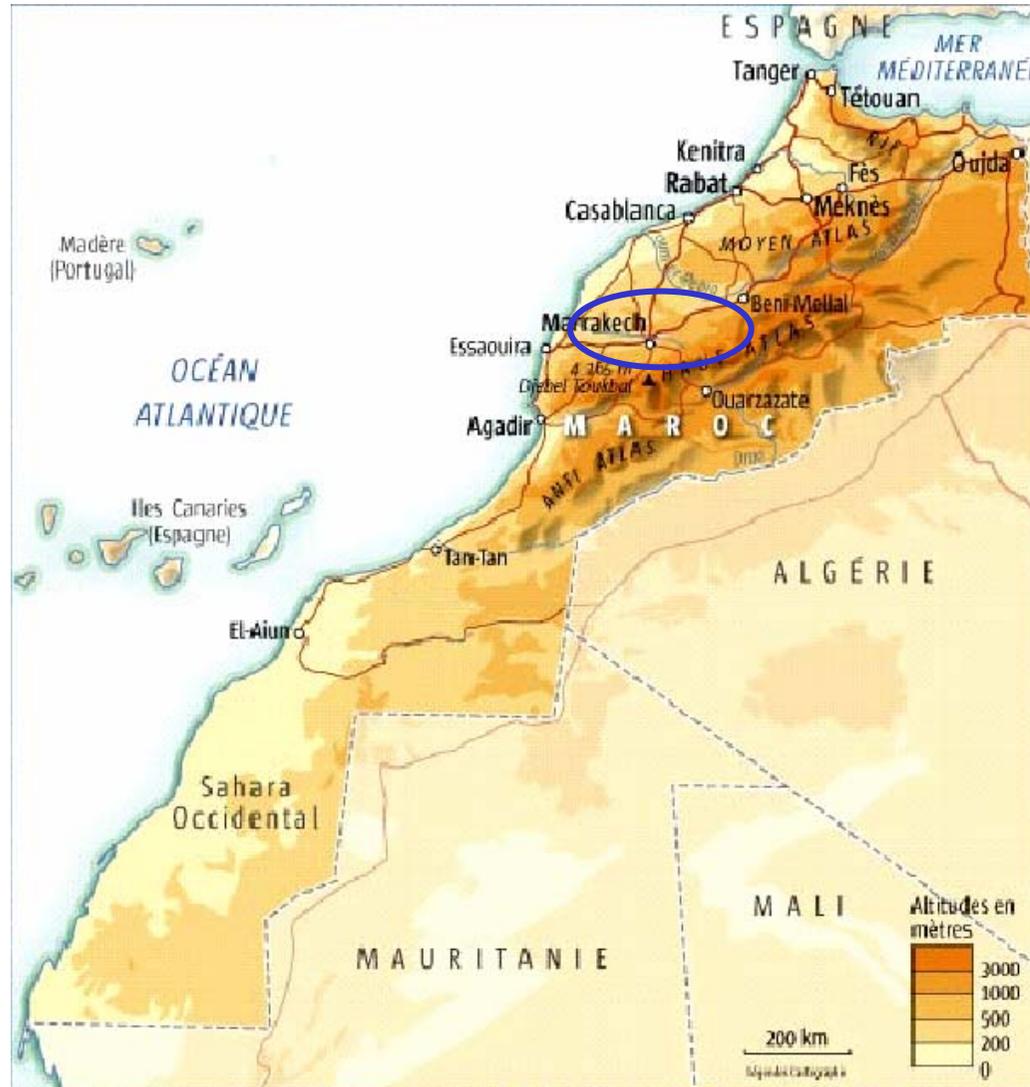
Classes de vulnérabilité des nappes à la pollution selon la méthode de Minnesota

Classe de vulnérabilité à la pollution	Temps de transfert vertical de la pollution dans la ZNS
Très élevée	Quelques heures à quelques semaines
Elevée	Quelques semaines à quelques années
Modérée	Quelques années à quelques dizaines d'années
Faible	Quelques dizaines d'années à un siècle
Très faible	Quelques siècles



3. Présentation de la zone d'étude:

Nappe du Haouz de Marrakech

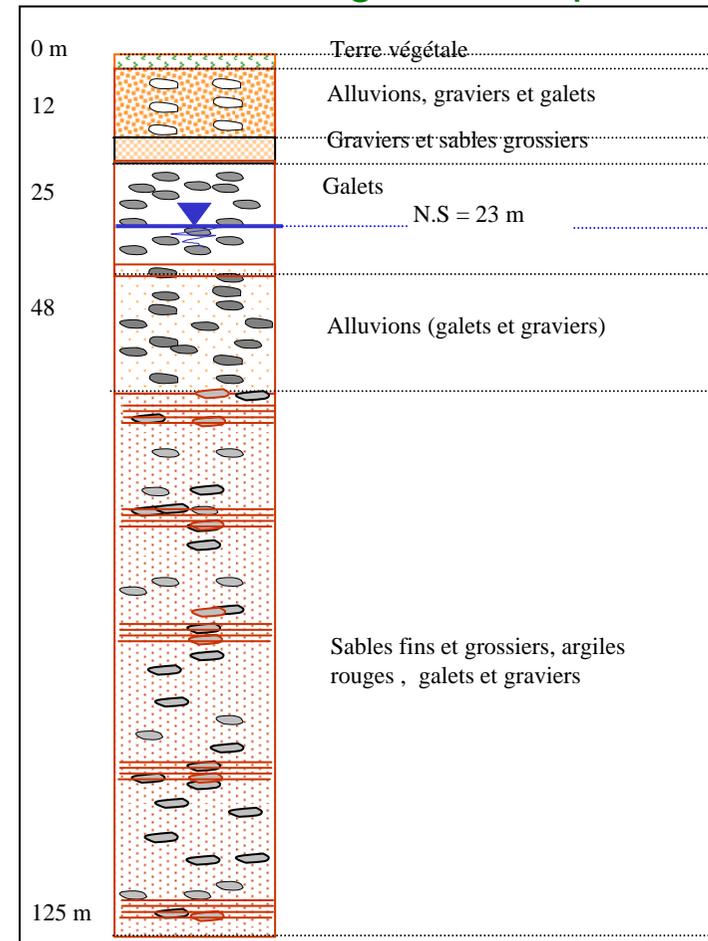




Nature lithologique de l'aquifère

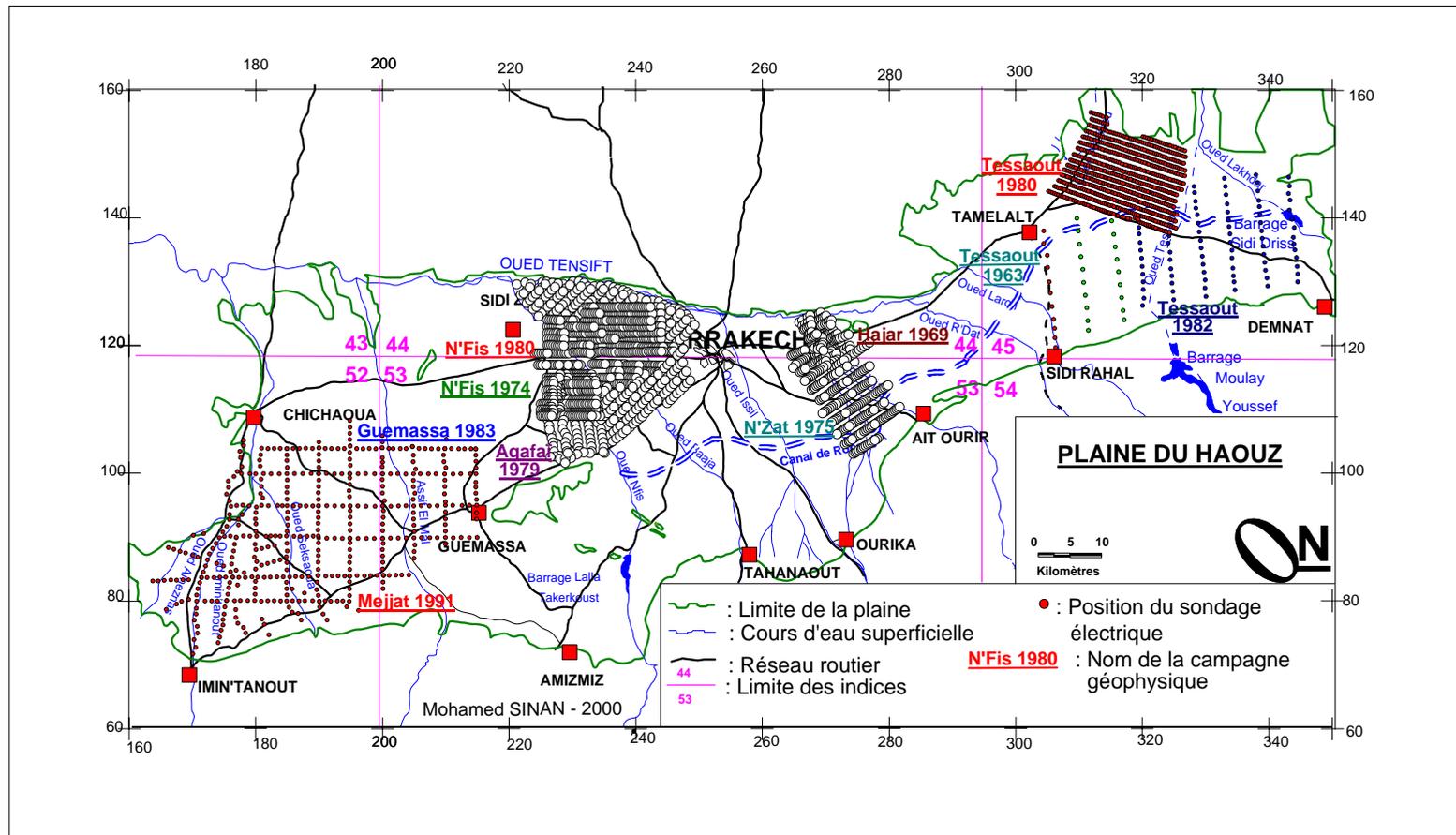
La nappe circule essentiellement dans des alluvions et conglomérats plio-quaternaires.

Coupe lithologique type des forages captant la nappe phréatique du Haouz (F. 2691/53)





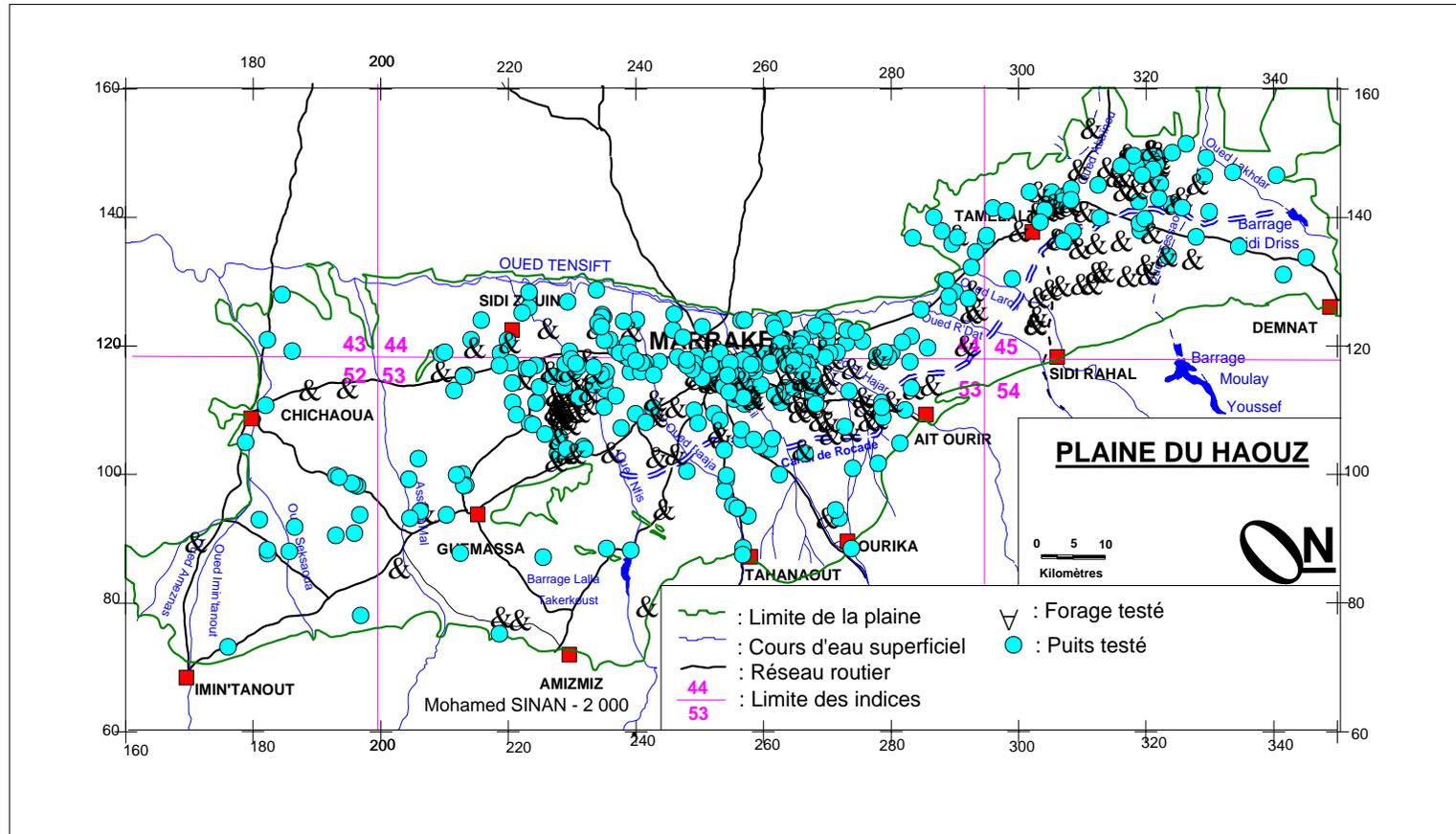
Données géophysiques
Environ 3 000 sondages électriques





Plus de 500 pompages d'essai

(détermination des paramètres hydrodynamiques de la nappe)

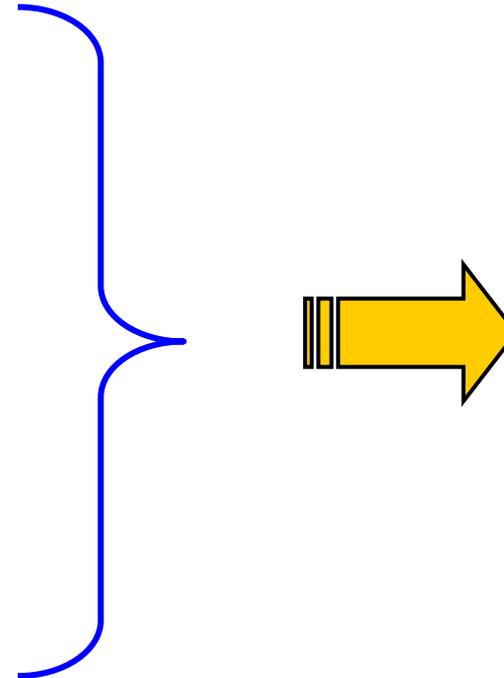


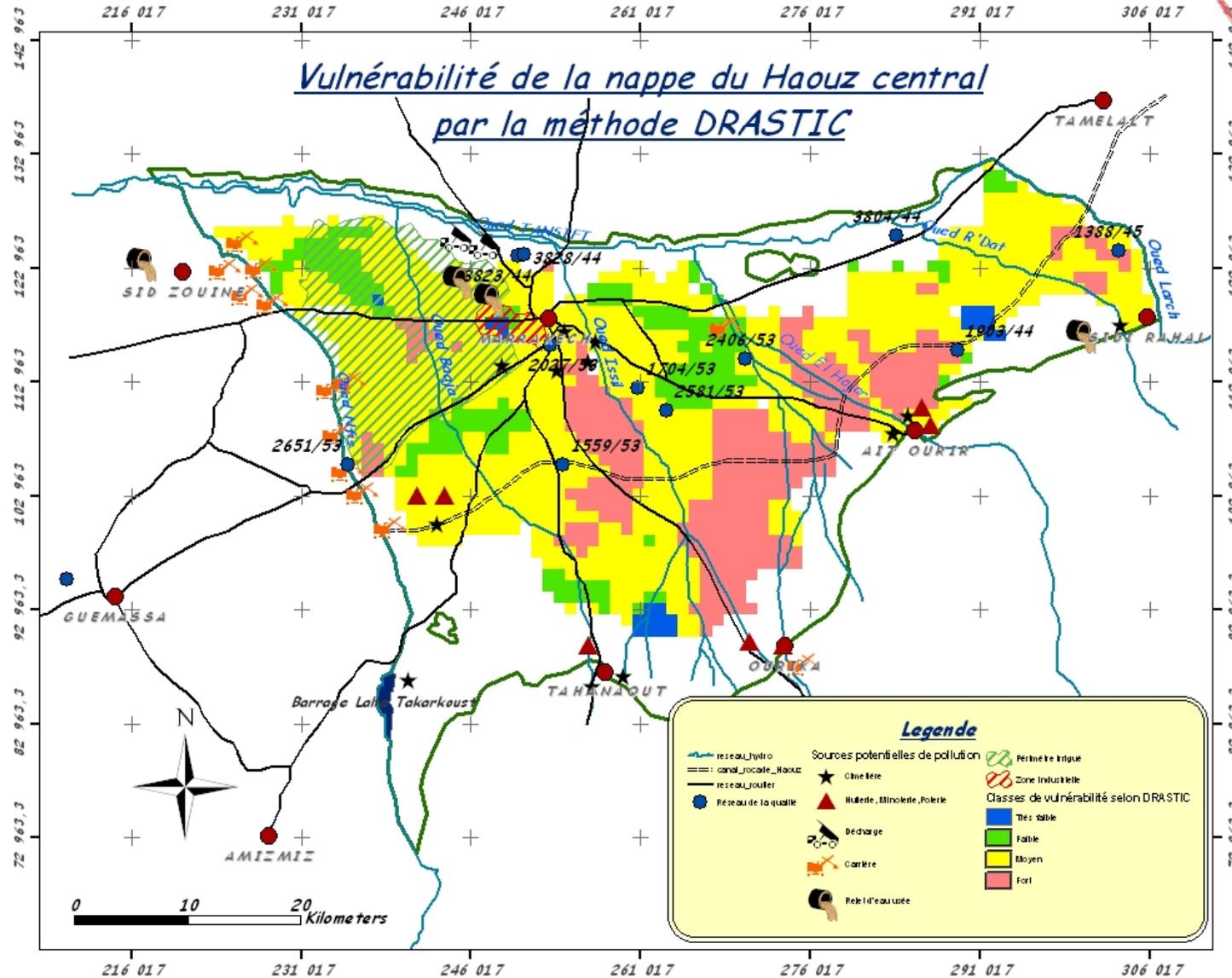
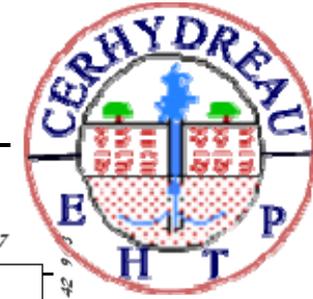


4. Elaboration de la carte de vulnérabilité à la pollution de la nappe du Haouz de Marrakech (zone centrale) avec les quatre méthodes testées

4.1. Méthode DRASTIC

- ✓ Profondeur de la nappe (Depth);
- ✓ Recharge ;
- ✓ Nature lithologique de l'Aquifère ;
- ✓ Nature du Sol ;
- ✓ Topographie ;
- ✓ Impact de la zone non saturée ;
- ✓ Conductivité.

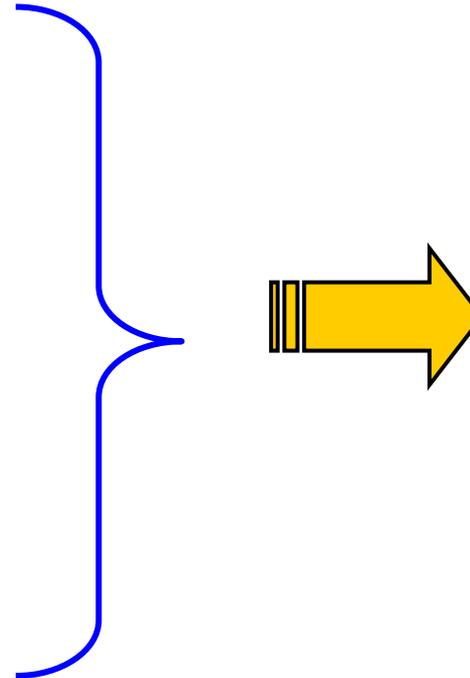


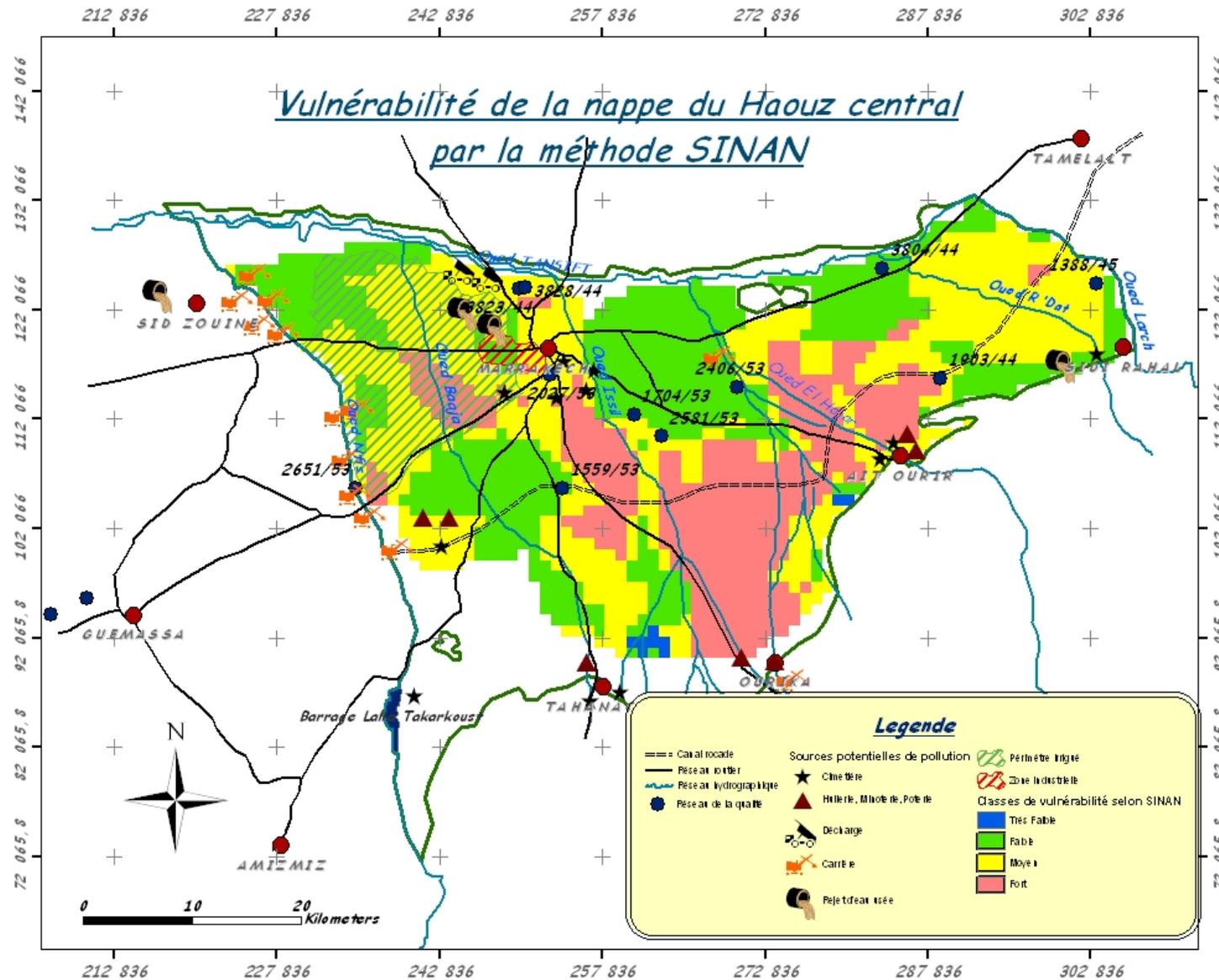




4.2. Méthode DRASTIC modifiée

- ✓ Profondeur de la nappe ;
- ✓ Recharge ;
- ✓ Nature du Sol ;
- ✓ Topographie ;
- ✓ Impact de la zone non saturée.

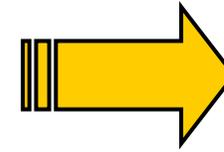


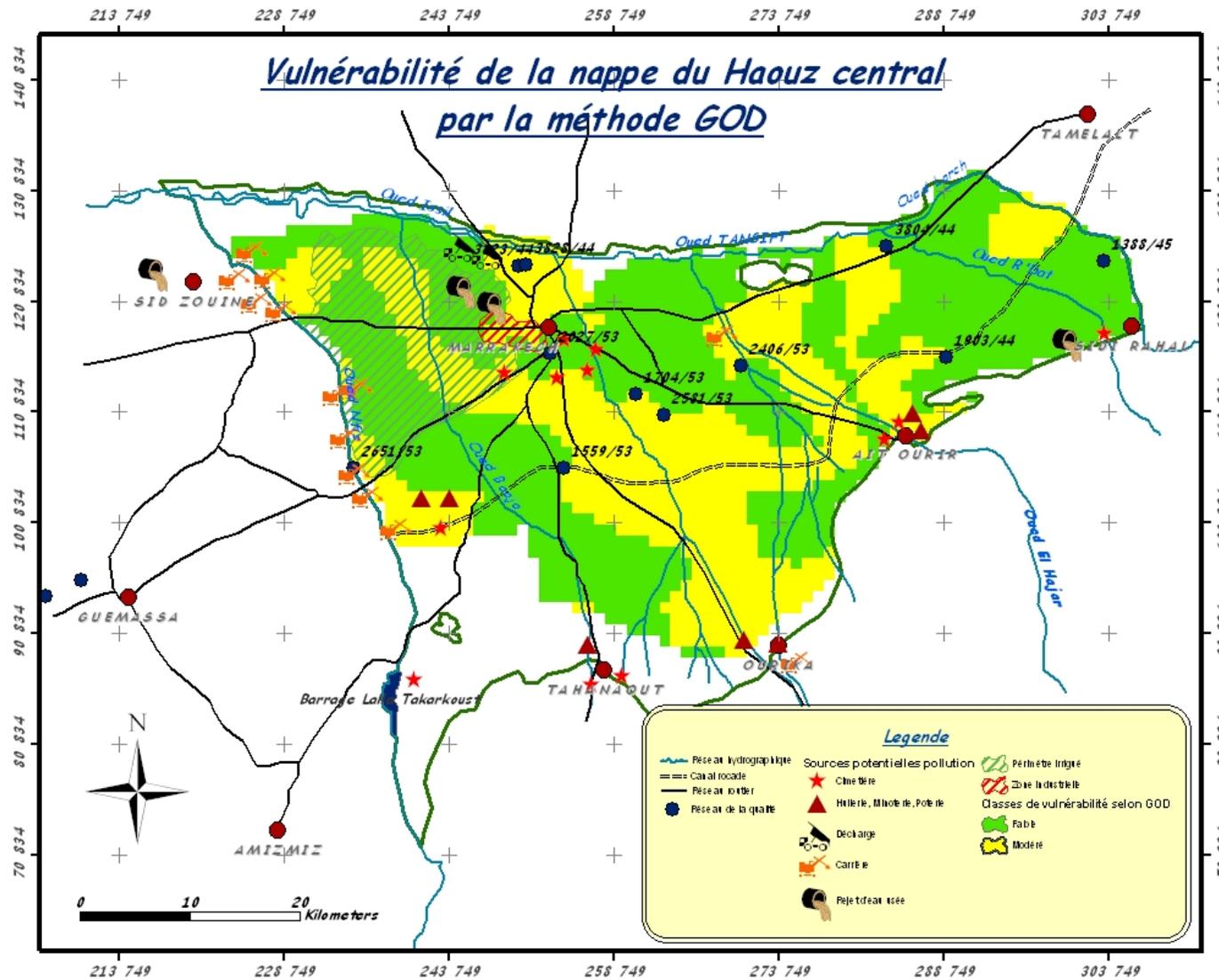




4.3. Méthode GOD

- ✓ Degré de confinement de l'Aquifère ;
- ✓ Lithologie de la zone non saturée
- ✓ Profondeur de la nappe par rapport au sol.

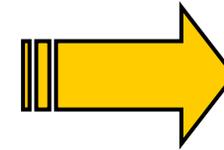


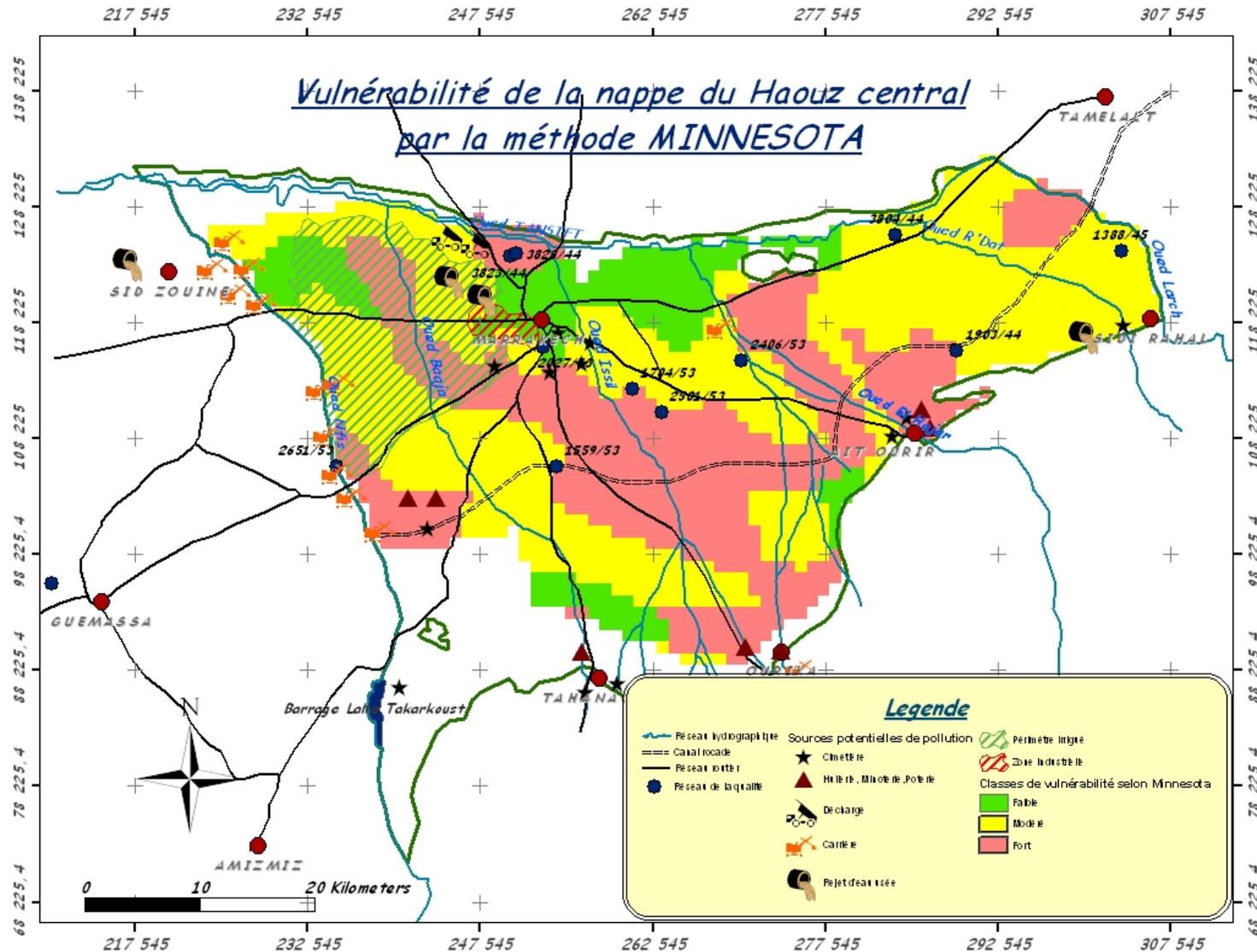




4.4. Méthode MINNESOTA

- ✓ La Perméabilité ;
- ✓ Lithologie de la zone non saturée ;
- ✓ L'Epaisseur de la zone non saturée.







5. Analyse comparative des résultats des quatre méthodes utilisées

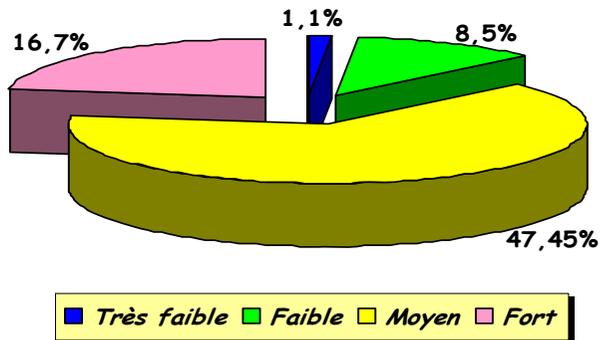
5.1. Superficie des différentes zones de vulnérabilité

Méthode	Degré de vulnérabilité									
	Très faible		Faible		Moyen		Fort		Très Fort	
	Superficie (en km ²)	%	Superficie (en km ²)	%	Superficie (en km ²)	%	Superficie (en km ²)	%	Superficie (en km ²)	%
<i>DRASTIC</i>	22	1,1	170	8,5	949	47,45	334	16,7	0	0
<i>DRASTIC modifiée</i>	9	0,45	626	31,3	750	37,5	443	22,15	0	0
<i>MINNESOTA</i>	0	0	241	12,05	971	48,55	684	34,2	0	0
<i>GOD</i>	0	0	1069	53,45	817	40,85	0	0	0	0

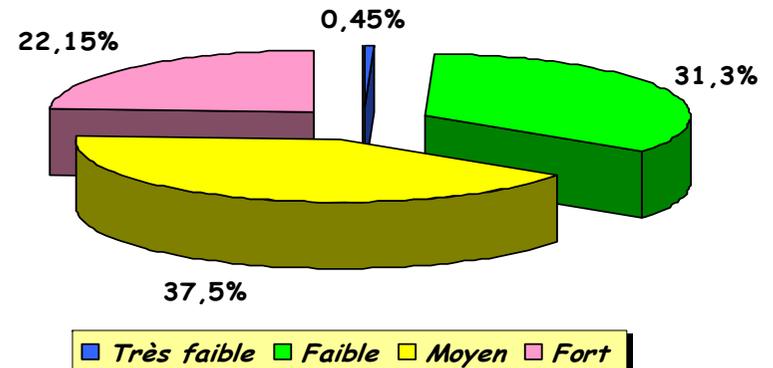


5.2. Distribution des degrés de vulnérabilité à la pollution

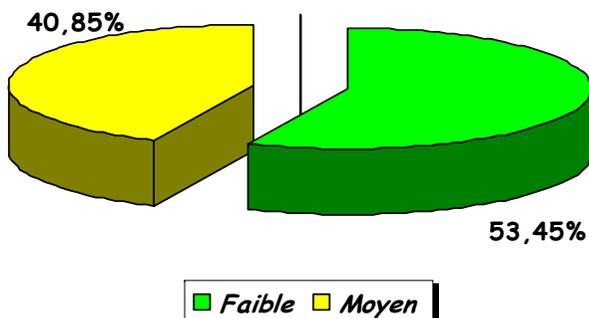
Distribution des degrés de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC (pourcentage en superficie)



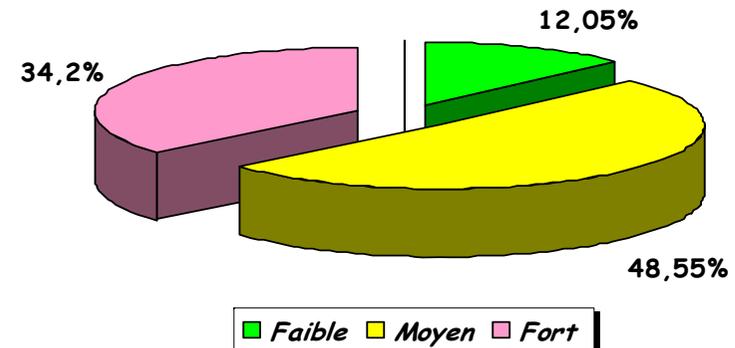
distribution des degrés de vulnérabilité selon la méthode SINAN (pourcentage en superficie)



Distribution des degrés de vulnérabilité selon la méthode GOD (pourcentage en superficie)



Distribution des degrés de vulnérabilité selon la méthode MINNESOTA (pourcentage en superficie)





5.3. Comparaison des cartes de vulnérabilité aux historiques de la qualité de l'eau de la nappe

Piézomètres utilisés

Désignation	X (m)	Y (m)	Emplacement	Sources de pollution les plus proches	
				Nature	Distance au piézomètre
3828/44	250 725	124 125	Nord Ouest de Marrakech	Décharge Rejet d'eau usée Périmètre irrigué	3,5 km 4,8 km 2,6 km
2027/55	253 025	116 150	Sud de Marrakech	Cimetière Zone industrielle	0,6 km 1,8 km
2651/53	235 100	105 750	Sur l'Oued N'fis	Carrière Périmètre irrigué	0,6 km 0,7 km
1704/53	260 750	112 500	Rive Est de l'Oued Issil	-	-
2406/53	270 300	114 950	Sur l'Oued Lhajar	Carrière	3 km



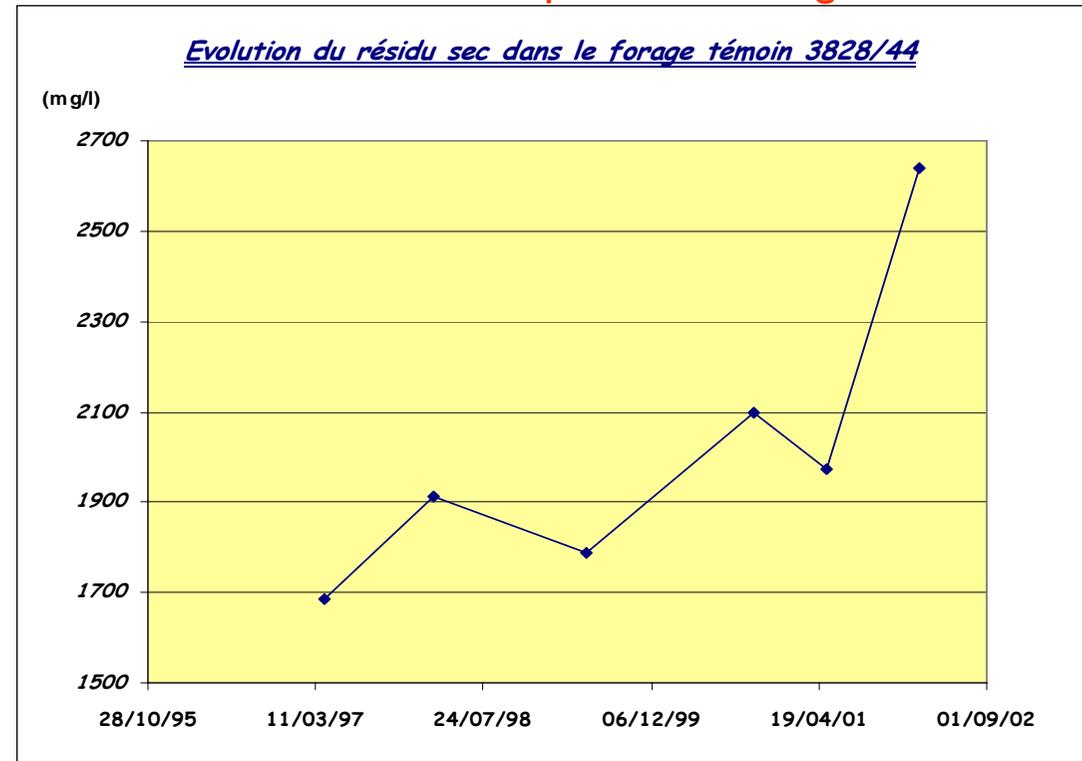
Forage 3828/44

Ce forage est situé dans le secteur Nord Ouest de Marrakech, caractérisé par la présence de décharges, de rejet d'eau usée brute et d'un périmètre irrigué.

- La qualité de l'eau est moyenne à mauvaise;
- Cette qualité se dégrade avec le temps.

Cette zone est considérée de :

- *Moyenne vulnérabilité par la méthode DRASTIC ;*
- *Moyenne à forte vulnérabilité par la méthode DRASTIC modifiée;*
- *Forte vulnérabilité par la méthode de MINNESOTA.*

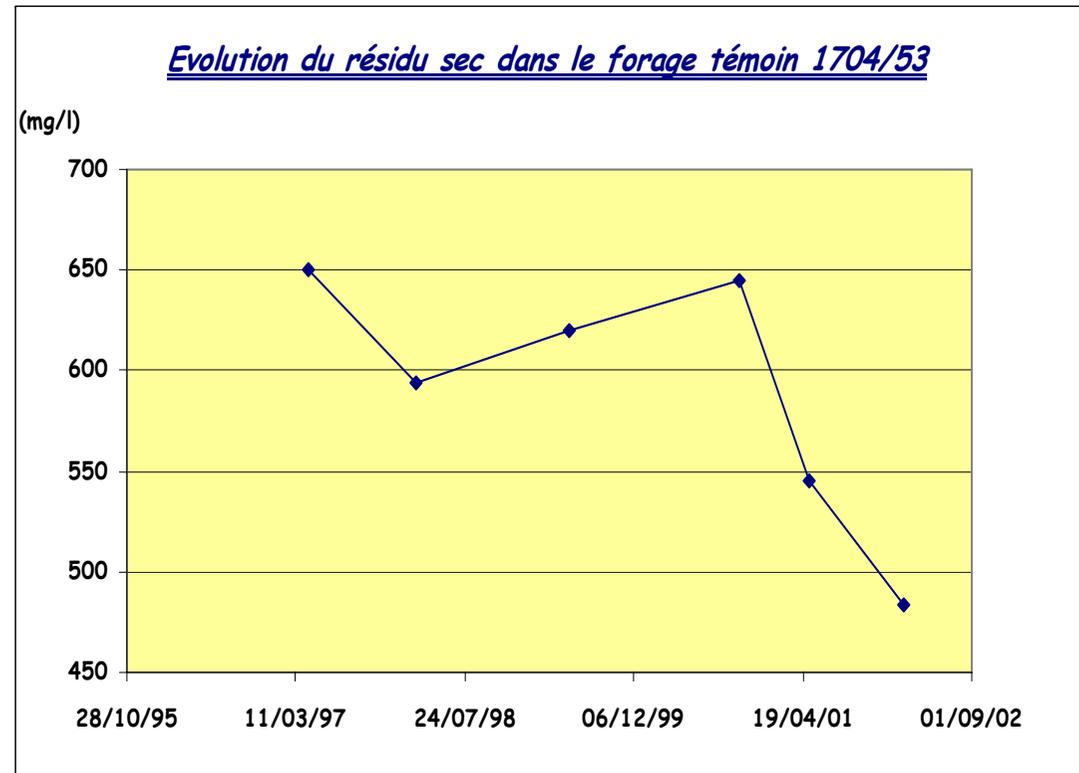




Forage 1704/53

Ce forage est situé à proximité de la rive Est de l'Oued Issil, dépourvue de sources de pollution.

- La qualité de l'eau est bonne;
- Cette qualité s'améliore avec le temps.



Cette zone est considérée de :

- Moyenne vulnérabilité par la méthode DRASTIC ;
- Faible vulnérabilité par la méthode DRASTIC modifiée ;
- Forte vulnérabilité par la méthode de MINNESOTA.



Synthèse des résultats obtenus

Forage	<i>Méthodes ayant donné la meilleure corrélation avec les résultats des analyses de la qualité des eaux de la nappe</i>		
	<i>DRASTIC</i>	<i>DRASTIC modifiée</i>	<i>MINNESOTA</i>
3828/44		✓	✓
2027/55	✓	✓	
2651/53		✓	✓
1704/53		✓	
2406/53	✓	✓	✓



6. Conclusion

- Les différentes cartes élaborées montrent que la nappe du Haouz central est globalement de moyenne à forte vulnérabilité à la pollution;
- Les zones de forte vulnérabilité sont situées principalement dans les secteurs sud-est et central de la nappe;
- Les méthodes DRASTIC modifiée et MINNESOTA (USA) sont celles qui caractérisent le mieux la vulnérabilité de la nappe du Haouz à la pollution.