

Article

« Analyse du réseau piézométrique national tunisien »

Feten Horriche et Mustapha Besbes

Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 19, n° 4, 2006, p. 347-363.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/014420ar>

DOI: 10.7202/014420ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

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

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

ANALYSE DU RÉSEAU PIÉZOMÉTRIQUE NATIONAL TUNISIEN

Analysis of the national piezometric network of Tunisia

Feten Horriche^{1*}, Mustapha Besbes²

^{1*}Centre de Recherches et des Technologies des Eaux, Laboratoire de Géochimie et Physico-chimie des Eaux, BP 273, Soliman 2020, Tunisie

²École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Laboratoire de Modélisation en Hydraulique et Environnement, Tunis, Tunisie

Reçu le 19 janvier 2004, accepté le 8 février 2006

RÉSUMÉ

L'observation régulière du niveau des eaux souterraines a débuté en Tunisie il y a plus de soixante ans. Depuis, le réseau piézométrique national, composé aujourd'hui de près de 3 700 points de surveillance (puits, forages et piézomètres), permet l'observation de 148 systèmes aquifères et comporte des séries de mesures parfois longues d'une cinquantaine d'années. Pour caractériser le réseau piézométrique national, deux types d'indicateurs sont définis : a) des indicateurs portant sur la qualité intrinsèque des réseaux existants; b) des indicateurs décrivant le besoin d'informations complémentaires et la nécessité de consolidation des réseaux. Les indicateurs de qualité sont liés à la densité spatiale, la durée de surveillance, le fonctionnement, la couverture du réseau par des piézomètres, le contrôle de l'exploitation et l'évolution temporelle du réseau. Les indicateurs de consolidation des réseaux sont relatifs à la variabilité piézométrique, au taux d'exploitation ou de surexploitation, aux ressources exploitables et aux superficies des systèmes aquifères. Se fondant sur ces indicateurs, la classification des systèmes aquifères surveillés met en évidence les nappes disposant de réseaux de meilleure qualité et celles nécessitant une consolidation de leur réseau. La synthèse globale des différents indicateurs a permis de dégager les systèmes aquifères nécessitant des actions prioritaires en matière de rationalisation des réseaux piézométriques. Les

résultats obtenus au terme de cette analyse concordent bien avec la situation actuelle observée sur le terrain.

Mots-clés : *aquifère; réseau piézométrique; indicateurs; qualité; rationalisation; Tunisie.*

SUMMARY

The regular observation of groundwater levels began in Tunisia more than sixty years ago. The national groundwater level network consists presently of almost 3,700 monitoring points (wells, boreholes and piezometers), monitoring 148 aquifers with some long-term series of about fifty years. To characterize the national piezometric network, two types of indicators were defined: a) indicators connected with the intrinsic quality of the existing networks, and b) indicators describing the need for additional information for network consolidation. Quality indicators relate to space density, monitoring duration, functioning, spatial coverage of the network by piezometers, exploitation control and temporal evolution of the network. Consolidation indicators relate to piezometric variation, exploitation or overexploitation rates, resources and aquifer area. Based on these indicators, the classification highlights aquifers having the best quality networks and those requiring a network consolidation. The

*Auteur pour correspondance :

Téléphone: 216 71 431122

Télécopieur: 216 71 430934

Courriel : faten.jarraya@certe.nrnt.tn ou

feten.horriche@gnet.tn et

mbf.besbes@gnet.tn

global synthesis highlights aquifers requiring priority actions in terms of rationalization of the piezometric network. The results obtained at the end of this analysis agree well with the present situation as observed in the field.

Key words: *aquifer; piezometric network; indicators; quality; rationalization; Tunisia.*

1. INTRODUCTION

Pour assurer une gestion durable des ressources en eaux souterraines, de nombreux réseaux de surveillance piézométrique ont été mis en place. Diverses méthodes ont été utilisées pour la conception de ces réseaux (COMPTE, 1994; HERRMANN *et al.*, 1990; LANDREAU, 1999; MANDEL, 1965; MARGAT, 1972; SOPHOCLEOUS *et al.*, 1982). Avec l'évolution des systèmes surveillés et les nouveaux besoins d'informations engendrés par ces changements, les réseaux ont dû notablement évoluer, et leur évaluation, devenue nécessaire, s'inscrit naturellement dans le cycle d'amélioration continue des outils de gestion de l'eau (Figure 1). Cette évaluation précède généralement l'optimisation des réseaux. Parmi les principaux travaux d'évaluation de réseaux, nous pouvons citer : DGRE, 1998; GANGOPADHYAY *et al.*, 2001; HORRICHE, 2003; HORRICHE, 2004; POINTET, 1982; SCHNEIDER, 1970; SMITH *et al.*, 1997; ZEBIDI, 1975. En 2000, la Communauté Européenne a établi une directive cadre sur la surveillance de l'état quantitatif et qualitatif des eaux souterraines à l'aide de réseaux (CE, 2000 et MONTLIVAUT, 2003). Par ailleurs, un cahier des charges sur l'évolution des réseaux de surveillance des eaux souterraines a été préparé en France (MEDD, 2003).

En Tunisie, la surveillance des niveaux piézométriques a débuté dans les années 50, mais la mise en place d'un véritable réseau piézométrique national n'a démarré que dans les années 70. Sur un total de 200 nappes phréatiques inventoriées et 280 nappes profondes (DGRE, 1998), seules 138 nappes phréatiques et 75 nappes profondes font l'objet d'une surveillance piézométrique régulière (HORRICHE, 2003). Depuis sa mise en place, le réseau piézométrique national a évolué en nombre et en composition. Pour effectuer l'étude et l'analyse de ce réseau, nous définissons des indicateurs quantitatifs qui permettent, au sein d'une grille unique, d'opérer une classification des systèmes aquifères du point de vue de la surveillance piézométrique, que ce soit en matière de qualité intrinsèque des réseaux d'observation, ou encore en matière de nécessité de consolidation de réseaux et de besoins d'informations complémentaires. Les indicateurs sont traditionnellement employés dans l'évaluation, le suivi et la prévision, car ils traduisent de façon synthétique une situation, une action et/ou leur évolution (OSS et CAR-PB/OMED, 1996). À titre de référence, la classification des systèmes aquifères adoptée par LANDREAU (1999) pour la mise en place d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux se fonde sur la définition des niveaux : i) d'importance de la ressource en matière d'usages et de fonctions; ii) de vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère; iii) de pollution potentielle.

L'objectif de la classification des nappes sur la base des indicateurs de qualité des réseaux doit permettre de distinguer entre les différents réseaux, pour faire émerger les réseaux au comportement satisfaisant, ceux dont le fonctionnement se trouve en adéquation avec les objectifs de la gestion des ressources en eau, et les réseaux présentant des dysfonctionnements, dont certains sont susceptibles d'altérer la qualité de l'information produite, et de porter ainsi préjudice à la prise de décision en connaissance de cause.

2. DONNÉES SUR LE RÉSEAU PIÉZOMÉTRIQUE NATIONAL

Le réseau piézométrique national, géré par la Direction Générale des Ressources en Eau - (DGRE), est constitué de piézomètres, puits de surface et accessoirement de forages non exploités. L'inventaire du réseau (HORRICHE, 2003) pour la période 1949-1996 indique 3 661 points de surveillance piézométrique des nappes (2 895 puits, 362 piézomètres, 404 forages) (Figure 2). En 1998, les nappes souterraines de Tunisie étaient exploitées par 73 500 points d'eau avec un volume annuel de l'ordre de $1\,645\,10^6\text{ m}^3$ (DGRE, 1998).

En rapportant le nombre des points du réseau de surveillance piézométrique à celui des points d'eau exploités, on peut définir un premier indicateur représentant la qualité du

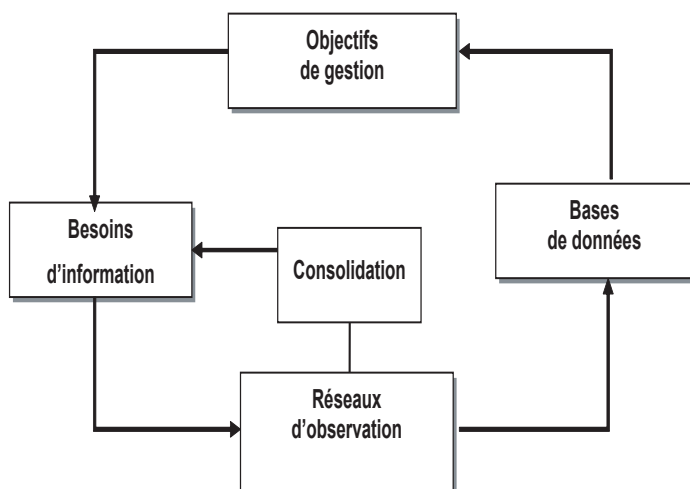


Figure 1 Cycle d'amélioration continue des outils de gestion de l'eau. *Continuous improvement cycle of the management tools of water.*

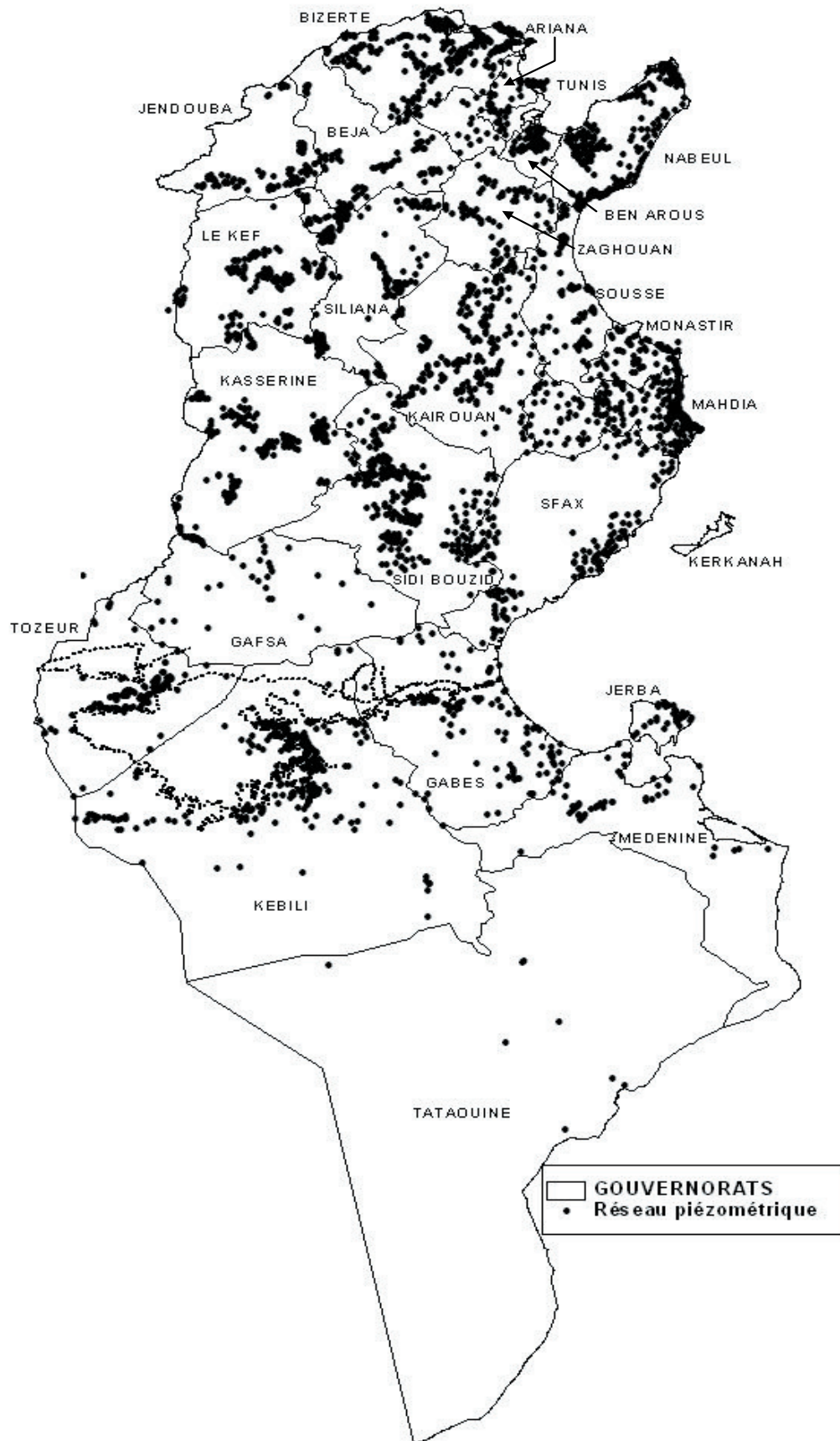


Figure 2 Réseau piézométrique national (1949 – 1996).
National piezometric network (1949 – 1996).

réseau : l'indice de « Densité de surveillance de l'exploitation ». Cet indice, qui vaut en moyenne 15 % sur l'ensemble des 148 systèmes aquifères surveillés en Tunisie (HORRICHE, 2004), constitue une première évaluation de la qualité de la surveillance piézométrique (Figure 3).

La mise en place de puits-témoins destinés à suivre l'évolution du niveau piézométrique a débuté, en Tunisie, dans les années cinquante. Elle se justifiait par l'exploitation relativement forte à laquelle étaient déjà soumises certaines nappes et par la volonté des hydrogéologues de l'époque d'observer également la variation naturelle des niveaux en vue d'une meilleure connaissance des systèmes aquifères

et notamment de leur régime d'alimentation. Le réseau piézométrique était alors constitué exclusivement de puits de surface exploités.

C'est seulement à la fin des années soixante, avec la généralisation des inventaires de puits de surface et la collecte systématique des données de prélèvements sur les nappes profondes, qu'un suivi systématique de la piézométrie a été mis en place, comportant notamment des piézomètres dédiés à cette fonction (BESBES, 1967; ZEBIDI, 1975). Le tableau 1 présente un aperçu des principales caractéristiques de l'ensemble des 148 systèmes aquifères de Tunisie faisant l'objet

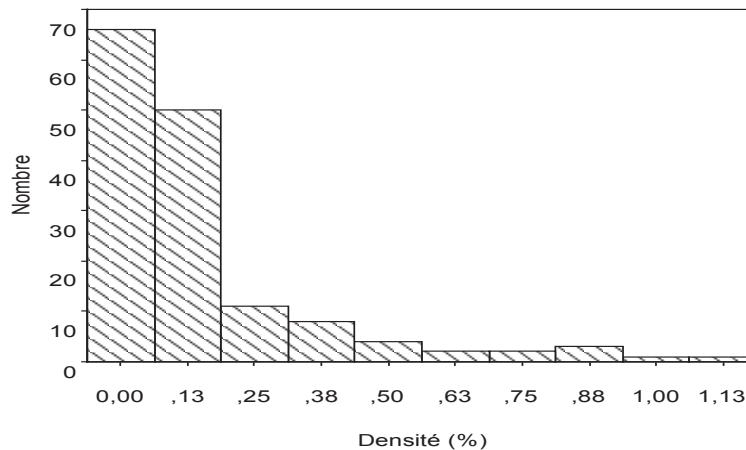


Figure 3 Histogramme de la densité des réseaux de surveillance piézométrique.
Histogram of the density of the piezometric monitoring networks.

Tableau 1 Caractéristiques générales des aquifères contrôlés par le réseau piézométrique national.
Table 1 General characteristics of the aquifers controlled by the national piezometric network.

Caractéristique des aquifères***	Unités	Total	Moyenne	Médiane	Écart-Type
Superficie du système aquifère	km ²	175 739	1 187	164	7 150
Ressources exploitables	10 ⁶ m ³ /an	1 758	12	3	37
Exploitation du système aquifère	10 ⁶ m ³ /an	1 645	11	2	41
Taux d'exploitation du système aquifère			0,90	0,80	0,65
Nombre de puits captant les nappes phréatiques		71 032	515	213	927
Nombre de forages captant les nappes profondes		2 545	35	12	65
Exploitation par puits	10 ⁶ m ³ /an	688	5	2	11
Exploitation par forages	10 ⁶ m ³ /an	957	13	2	55
Ressources attribuées aux nappes phréatiques	10 ⁶ m ³ /an	655	5	2	8
Ressources attribuées aux nappes profondes	10 ⁶ m ³ /an	1 103	15	3	51
Caractéristiques des réseaux***					
Nombre de puits du réseau		2 895	20	14	19
Nombre de piézomètres		362	2	0	5
Nombre de forages du réseau		404	3	0	20
Nombre total de points du réseau		3 661	25	15	30
Mise en service des réseaux			janv-81	avr-85	
Durée d'activité	années	2 392	16	12	11
Nombre total des mesures enregistrées		64 158	434	233	540
Couverture spatiale du réseau	km ² /point		38	9	142

*** Statistiques portant sur les 148 systèmes aquifères de Tunisie, arrêtées en 1996; comportant 138 nappes phréatiques et 75 nappes profondes.

d'un suivi piézométrique régulier, ainsi que les données de base caractérisant les 148 réseaux de surveillance correspondants.

3. MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DU RÉSEAU PIÉZOMÉTRIQUE

Pour l'analyse du réseau piézométrique, nous avons adopté une approche multicritère, la définition et la détermination d'un certain nombre d'indicateurs devant permettre de classer les nappes selon la qualité des réseaux existants et la nécessité de consolider certains de ces réseaux. Une première étape va porter sur la définition d'indicateurs adéquats. Une seconde étape consiste à affecter un poids à chacun des indicateurs choisis, de façon à pouvoir, par combinaison linéaire d'indicateurs, attribuer un niveau global de qualité à chaque système aquifère. L'étape suivante consiste à sélectionner les nappes disposant de réseaux de meilleure qualité et à les distinguer de celles nécessitant une consolidation de leur réseau piézométrique. On tentera enfin de dégager les systèmes pour lesquels l'action de renforcement du réseau piézométrique paraît présenter la plus haute priorité.

3.1 Indicateurs de qualité des réseaux existants

La définition d'indicateurs de qualité nécessite de procéder à une étape de caractérisation préalable. Parmi les grandeurs pouvant caractériser un réseau piézométrique, nous pouvons proposer :

- La densité spatiale : exprimée en nombre de points au km², elle permet de quantifier la répartition spatiale moyenne du réseau à l'échelle du domaine. Il n'existe aucune norme ni recommandation concernant ce paramètre. Des densités minimales ont certes été proposées par LANDREAU (1999), MEDD (2003) et SCHNEIDER (1970), mais on ne connaît pas encore de densité optimale citée dans la littérature. On devra donc attribuer la meilleure qualité au réseau présentant la densité la plus élevée. Ce n'est que dans une phase plus élaborée d'analyse que l'on pourrait éventuellement définir la densité la plus adéquate. La densité spatiale est définie par l'indicateur SPAT :

$$\text{SPAT} = \text{RESEAU} / \text{SUP} \quad (1)$$

où : RESEAU est le nombre de points de surveillance et SUP la superficie de l'aquifère en km².

- La durée de surveillance : c'est le nombre d'années pendant lesquelles le réseau a été actif. Plus longue est cette période, meilleure sera la connaissance globale de l'évolution du système. Le réseau le plus ancien ayant été mis en place en 1949, et notre base de données étant limitée à l'année 1996,

la durée maximale envisagée sera de 48 ans. L'indicateur TEMP, associé à la durée de surveillance DUREE est exprimé par le rapport entre cette dernière et la durée totale du réseau national (48 ans) :

$$\text{TEMP} = \text{DUREE} / 48 \quad (2)$$

- Le fonctionnement du réseau : les réseaux piézométriques tunisiens sont caractérisés par une fréquence de mesures souvent semestrielle (hautes-eaux et basses-eaux, en avril et en septembre). Le fonctionnement du réseau sera d'autant meilleur que les mesures seront réalisées d'une manière systématique pendant toute la durée de surveillance sans lacunes. L'indicateur de fonctionnement moyen FONCT représente le nombre de mesures MES effectuées sur tout le domaine intégré sur la durée totale, rapporté respectivement au nombre de points du réseau, à la durée de surveillance multipliée par deux, pour tenir compte de la fréquence semestrielle :

$$\text{FONCT} = \text{MES} / (\text{RESEAU} \cdot \text{DUREE} \cdot 2) \quad (3)$$

- La couverture par des piézomètres : les piézomètres sont les points de mesure les plus fiables. Plus le réseau comporte de piézomètres, meilleure sera sa qualité. L'indicateur associé PIEZO représente le rapport du nombre de piézomètres PIEZ ayant été en service au nombre total des points surveillés :

$$\text{PIEZO} = \text{PIEZ} / \text{RESEAU} \quad (4)$$

- Le contrôle de l'exploitation : c'est l'une des principales fonctions d'un réseau. Il peut être exprimé en rapportant le nombre des points surveillés au nombre des points d'eau exploités NEXP (puits et forages). C'est l'indice de densité présenté plus haut, le seul actuellement utilisé par la DGRE pour juger le réseau piézométrique. Il est exprimé par l'indicateur COUV, comme suit :

$$\text{COUV} = \text{RESEAU} / \text{NEXP} \quad (5)$$

- L'évolution du réseau : durant toute la période de surveillance, la composition du réseau peut varier soit par l'abandon de points, soit par l'intégration de nouveaux points. Une tendance vers la stabilisation, ou l'accroissement du nombre de points du réseau, représente la meilleure évolution. L'indicateur EVOL se déduit de la lecture des graphiques d'évolution de la composition du réseau (Figure 4). L'échelle de lecture peut être définie, du niveau le plus performant vers le moins performant, comme suit : a) évolution stable et nombre des points actifs supérieur à 50 % de la composition totale (score = 1); b) en augmentation et nombre des points actifs supérieur à 50 % de la composition totale (score = 0,8); c) en récession et nombre des points actifs supérieur à 50 % de la composition totale (score = 0,6);

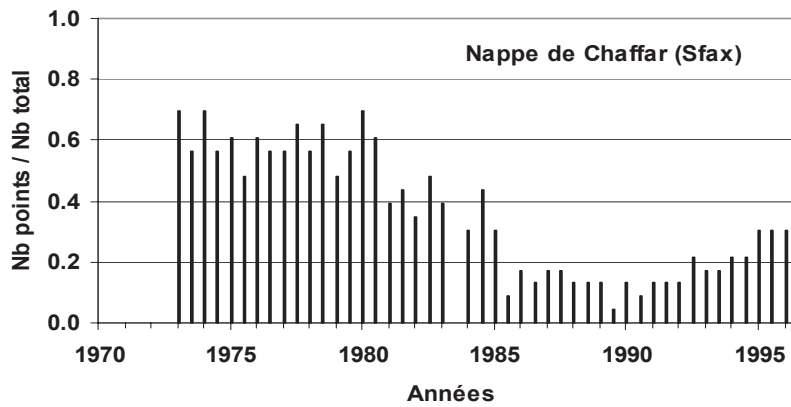


Figure 4 Exemple d'évolution de la composition du réseau piézométrique.
Example of evolution of the piezometric monitoring networks.

d) en augmentation et nombre des points actifs inférieur à 50 % de la composition totale (score = 0,4); e) stable et nombre des points actifs inférieur à 50 % de la composition totale (0,2); f) en récession et nombre des points actifs inférieur à 50 % de la composition totale (score = 0).

Indicateur Global de Qualité (IGQ)

Pour pouvoir calculer un indicateur global, nous avons d'abord homogénéisé les indicateurs partiels en les maximisant à 1. Faute de pouvoir définir une valeur objectif de la densité spatiale et de la couverture de l'exploitation, ces deux dernières ont été rapportées à leur valeur maximale déterminée sur l'ensemble du réseau national. Par la suite, des poids ont été attribués aux indicateurs selon : a) l'importance estimée de l'indicateur pour la qualité du réseau (Imp), b) le degré de fiabilité du calcul de l'indicateur (incertitude de calcul), qui est lié aux valeurs estimées des données utilisées ou à la méthode de calcul (Fia). L'analyse a permis de procéder à un classement de ces indicateurs comme suit :

1) La densité spatiale d'un réseau de mesure est un indicateur important. Il serait certes intéressant que l'on arrive à en définir la valeur optimale du fait qu'elle informe sur la disponibilité d'une information piézométrique à l'échelle de l'étendue de la nappe. Cela n'a pas été possible et nous n'avons pas trouvé, dans la littérature, de références à la densité spatiale d'un réseau piézométrique. Le fait d'avoir attribué la valeur objectif à la densité maximale calculée pour l'ensemble des nappes de l'échantillon étudié diminue l'objectivité de cet indicateur. Nous considérons donc qu'il est important (Imp = 1), mais que son mode de calcul n'est pas parfaitement fiable (Fia = 0,8).

2) La durée de surveillance est un bon indicateur de la longueur du suivi de la nappe. C'est un indicateur objectif et fiable

(Fia = 1), avec toutefois un niveau d'importance juste supérieur à la moyenne pour décrire la qualité actuelle du réseau (Imp = 0,6).

3) Le fonctionnement du réseau indique si le réseau a été surveillé systématiquement selon la fréquence prédéfinie. Il montre si le réseau est bien entretenu et bien suivi. Cet indicateur est très important (Imp = 1) et très fiable (Fia = 1).

4) La couverture d'un réseau par des piézomètres est importante pour la qualité du réseau, tant il est vrai que les piézomètres sont plus fiables que les puits et les forages. Nous avons adopté (Imp = 0,5), et (Fia = 1).

5) Le rapport du nombre des points du réseau aux points d'exploitation représente une importance juste au-delà de la moyenne (Imp = 0,6). Par ailleurs, les inventaires des points exploités ne sont pas toujours exhaustifs, surtout en ce qui concerne les puits. Ce qui fait que cet indicateur n'est pas toujours fiable (Fia = 0,5).

6) L'évolution de la composition du réseau peut être un indicateur de stabilité du réseau à l'échelle temporelle. Toutefois, on ne peut pas juger dans quel sens il est optimum puisque la composition optimale n'est pas connue. On peut donc le considérer comme étant un indicateur avec une importance moyenne pour la qualité du réseau (Imp = 0,5) et dont la fiabilité du calcul est moyenne (Fia = 0,5).

Suite à cela, et en pondérant les six indicateurs par les deux critères Imp et Fia, un score global a pu être déterminé. Les indicateurs ont été classés selon ce score après quoi des poids, fonction de ce score, ont été affectés comme indiqué ci-après (Tableau 2).

L'indicateur global de qualité doit renseigner sur la qualité générale du réseau en se fondant sur les six indicateurs

Tableau 2 Classement des indicateurs de qualité d'un réseau piézométrique.
Table 2 Classification of piezometric network indicators of the quality.

Indicateur de qualité		Score			Classement	Poids
N°	Indicateur	Imp	Fia	Moyenne		
1	SPAT	1	0,8	0,9	2	1,4
2	TEMP	0,6	1	0,8	3	1,2
3	FONCT	1	1	1	1	1,6
4	PIEZO	0,5	1	0,75	4	0,8
5	COUV	0,6	0,5	0,55	5	0,6
6	EVOL	0,5	0,5	0,5	6	0,4

primaires définis plus haut. En prenant en considération les poids attribués à chacun de ces indicateurs, l'indicateur global peut être défini par l'expression suivante :

$$IGQ = (1,6 \text{ FONCT} + 1,4 \text{ SPAT} + 1,2 \text{ TEMP} + 0,8 \text{ PIEZO} + 0,6 \text{ COUV} + 0,4 \text{ EVOL}) / 6 \quad (6)$$

3.2 Indicateurs de consolidation d'un réseau piézométrique

Il ne suffit pas de savoir décrire le niveau de qualité d'un réseau piézométrique existant, encore faudrait-il être en mesure de savoir si ce réseau nécessite ou non d'être consolidé. L'un des objectifs principaux d'un réseau piézométrique est le suivi du bilan en eau du système aquifère qu'il contrôle. Ceci est d'autant plus vrai que le système considéré se trouve soumis à de fortes pressions ou à d'intenses sollicitations : baisses piézométriques continues; dépassement des ressources exploitables; ressources stratégiques. Les indicateurs les plus accessibles de l'état de vulnérabilité quantitative de la ressource sont :

- La variation des niveaux piézométriques, que ce soit évidemment en matière d'abaissement, ou même de remontées traduisant d'éventuels excès d'eau.
- Le taux d'exploitation de la ressource, qui rapporte le débit de prélèvements au débit des ressources exploitables.

Mais le renforcement des réseaux ne concerne pas uniquement les systèmes fragiles. En effet, des systèmes aquifères qui ne sont pas encore fortement sollicités peuvent présenter un grand intérêt à être mieux surveillés s'ils représentent des ressources stratégiques. À ce niveau d'analyse, deux indicateurs supplémentaires peuvent être adjoints pour compléter la définition d'une « demande » potentielle de renforcement d'un réseau. Ils décrivent l'importance intrinsèque d'une nappe souterraine :

- Le niveau des ressources exploitables, qui traduit l'importance et la durabilité du système.
- L'étendue du système, qui traduit l'importance du gisement et l'intérêt stratégique des réserves.

À partir de là, quatre indicateurs de consolidation d'un réseau piézométrique ont pu être définis comme suit :

- 1) La variation piézométrique annuelle moyenne (VAR) : elle se déduit de la courbe de synthèse de l'évolution piézométrique moyenne de la nappe. Elle s'exprime en m/an. Pour être représentatif d'une tendance précise, cet indicateur doit être déterminé sur une durée minimale de plusieurs années. Nous avons choisi de nous limiter aux nappes dont la durée de surveillance est supérieure ou égale à 10 ans, période en deçà de laquelle une variabilité ne serait pas significative (voir Figure 9). Si l'on se réfère à l'échantillon des réseaux tunisiens (148 systèmes), près de 40 % des nappes se trouveraient exclues d'une telle caractérisation (Figure 5).
- 2) Les ressources exploitables (RESS) : c'est un indicateur lié à l'importance de la nappe au plan national. Plus les ressources sont importantes, plus grand est le besoin d'une surveillance piézométrique renforcée. Cet indicateur est exprimé en [m³/an].
- 3) Le taux d'exploitation des ressources (TEXP) : rapport du débit d'exploitation aux ressources exploitables de la nappe. Une nappe est dite surexploitée lorsque cet indicateur est supérieur à 1, le prélèvement du complément se faisant au détriment des réserves de la nappe.
- 4) La superficie de la nappe (SUP) : par analogie aux ressources, c'est un indicateur caractérisant l'importance du système aquifère. Il est exprimé en [km²].

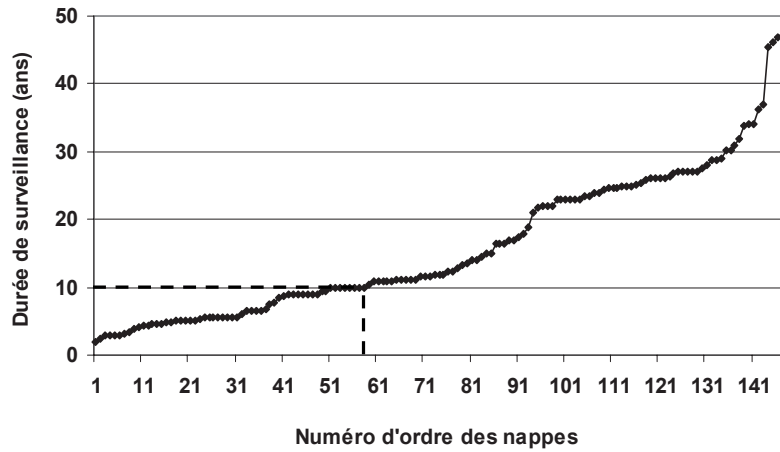


Figure 5 Durées d'activité des réseaux piézométriques tunisiens, classées en années.
Activity durations of Tunisian piezometric networks, classified by years.

Indicateur Global de Consolidation (IGC) d'un réseau

Pour le calcul de l'indicateur global de consolidation du réseau, nous utilisons la même méthode que celle adoptée pour l'indicateur global de qualité : normalisation par rapport aux valeurs maximales puis classement des indicateurs selon deux critères, celui lié à l'importance relative et celui lié à l'objectivité et la fiabilité des méthodes de détermination.

- La variation piézométrique est l'indicateur le plus représentatif de l'état de la nappe. C'est un indicateur de vulnérabilité évident, calculé sur une longue période (supérieure à 10 ans), considéré comme l'indicateur le plus important et qui caractérise au mieux la nécessité d'une consolidation du réseau (Imp = 1). C'est par ailleurs un indicateur objectif et fiable (Fia = 1).
- Le taux d'exploitation est certes un indicateur très important (Imp = 1), mais sa détermination n'est pas très fiable, car il résulte du quotient de deux grandeurs (débits de

prélèvements, ressources exploitables) dont la connaissance n'est pas réputée bonne (Fia = 0,5).

- Les indicateurs liés aux ressources et à la superficie de la nappe sont deux indicateurs de gestion stratégique des ressources en eau. Ils peuvent être considérés très importants en matière de demande de renforcement de réseaux (Imp = 1) mais leur détermination précise n'est jamais très aisée, que ce soit par rapport au concept même de ressource exploitable ou par rapport au concept de superficie « utile » d'un système aquifère. Nous proposons Fia = 0,7.

En conséquence de quoi les quatre indicateurs ont été classés et pondérés tels que rapportés au tableau 3.

L'indicateur global de consolidation d'un réseau piézométrique peut alors être déterminé par l'expression suivante :

$$IGC = (1,5 \text{ VAR} + 0,5 \text{ TEXP} + \text{RESS} + \text{SUP}) / 4 \quad (7)$$

Tableau 3 Classement des indicateurs de consolidation d'un réseau piézométrique.
Table 3 Classification of piezometric network indicators of the consolidation.

Indicateur de consolidation de réseau			Score		Classement	Poids
N°	Indicateur	Imp	Fia	Moyenne		
1	VAR	1	1	1	1	1,5
2	TEXP	1	0,5	0,75	4	0,5
3	RESS	1	0,7	0,85	2	1,0
4	SUP	1	0,7	0,85	2	1,0

4. APPLICATION AU RÉSEAU PIÉZOMÉTRIQUE NATIONAL

Appliquée aux 148 nappes suivies par le réseau piézométrique national, la méthodologie précédente fournit deux matrices : la matrice « Nappes / Indicateurs de qualité », et la matrice « Nappes / Indicateurs de consolidation de réseau ».

4.1 Évaluation de la qualité des réseaux

L'objectif de la définition d'indicateurs de qualité consiste à pouvoir quantifier les performances d'un réseau de surveillance donné au sein d'une échelle de valeurs qui est l'échelle de variation de l'indicateur considéré.

Dans un souci d'opérer sur une information piézométrique présentant les meilleures garanties au plan de l'intégration spatio-temporelle, des filtres quantitatifs ont tout d'abord

été appliqués. Ainsi, et par référence à la durée que l'on peut admettre en pratique en climat semi-aride comme minimum significatif d'une variation interannuelle, les réseaux présentant une durée de vie inférieure à dix ans n'ont pas été classés. Cette dernière catégorie représente 59 nappes, soit 40 % de l'ensemble des nappes observées. De même, les réseaux qui comportent moins de dix points d'observation n'ont pas été pris en compte; cette condition représentant 31 nappes, soit 21 % de l'ensemble des nappes souterraines surveillées. La réunion des deux conditions précédentes représente un total de 69 nappes : 47 % de la population des 148 nappes du réseau tunisien se trouve donc d'emblée éliminée du classement qualité. En pratique, les deux conditions qui précèdent sont aussi des indicateurs de qualité d'information, mais avec un effet de seuil.

La liste des premières nappes sélectionnées selon les six indicateurs primaires et selon l'indicateur global, classées selon la valeur de l'indice IGQ, est présentée au tableau 4.

Tableau 4 Les 22 premiers réseaux classés selon l'indice IGQ.
Table 4 The first 22 networks classified according to IGQ index.

Nappe	SUP	Surveillance piézométrique							Indicateurs de qualité						IGQ
		Puits	Piez	For	RESEAU	DEB	DUREE	MES	1 SPAT	2 TEMP	3 FONCT	4 PIEZO	5 COUV	6 EVOL	
Underflow o. Siliiana	24		13		13	1970	26	309	0,31	0,55	0,45	1,00	0,80	1,00	0,58
Mornag	223	43	14		57	1950	47	2446	0,14	0,98	0,46	0,25	0,03	1,00	0,45
Grombalia	392	62	21		83	1949	48	3696	0,12	1,00	0,46	0,25	0,01	1,00	0,45
Ras Jebel	30	42			42	1980	17	549	0,80	0,35	0,39	0,00	0,06	1,00	0,43
Zouarine	105	18			18	1963	34	896	0,10	0,71	0,74	0,00	0,04	1,00	0,43
El Haouaria	226	38	2		40	1972	25	1618	0,10	0,52	0,82	0,05	0,01	1,00	0,42
Bled Abida	109	10	3		13	1968	29	470	0,07	0,60	0,63	0,23	0,05	1,00	0,41
O. Chafrou	260	15			15	1971	26	634	0,03	0,54	0,81	0,00	0,03	1,00	0,40
Tazoghrene	104	18			18	1972	24	664	0,10	0,51	0,75	0,00	0,02	1,00	0,39
Côte Orient.	425	39	2		41	1972	25	1505	0,05	0,52	0,74	0,05	0,01	1,00	0,39
A.Bou Mourra	151	8	9		17	1970	27	584	0,06	0,56	0,64	0,53	0,09	1,00	0,38
Smindja	164	11			11	1982	15	279	0,04	0,30	0,87	0,00	0,05	1,00	0,37
Bou arada	140	21	4	2	27	1986	11	432	0,11	0,22	0,76	0,15	0,25	0,80	0,37
Ghardimaou	176	22	3		25	1985	12	428	0,08	0,24	0,74	0,12	0,11	1,00	0,36
Gabes Nord	343	17			17	1986	11	321	0,03	0,23	0,86	0,00	0,06	1,00	0,35
Plaine Kairouan	2020	37	38		75	1966	31	1780	0,02	0,65	0,38	0,51	0,02	0,60	0,35
Djeffara	8871	2	25	23	50	1961	36	296	0,00	0,75	0,16	0,50	0,19	0,80	0,33
Haffouz-Bou Hafna	223	3	10		13	1970	27	204	0,03	0,56	0,29	0,77	0,03	0,20	0,32
Gabes Sud	641	36			36	1986	11	557	0,03	0,23	0,70	0,00	0,03	1,00	0,31
Comp. Terminal Conti.	52158			223	223	1950	47	1185	0,00	0,98	0,11	0,00	0,55	0,20	0,30
Intercalaire	69819			48	48	1951	46	130	0,00	0,96	0,06	0,00	0,34	0,20	0,26
Gafsa Nord	1351	102	13	98	213	1951	45	1473	0,09	0,95	0,08	0,06	0,08	0,00	0,25

SUP : superficie en km²; Puits : nbre de puits; Piez : nbre de piézomètres; For : Nbre de forages; RESEAU : nbre total de points du réseau;

DEB : début de la série; DUREE : longueur de la série en années; MES : nbre total de mesures enregistrées.

4.2 Évaluation des besoins en information piézométrique

À l'intérieur du grand cercle de qualité des outils de gestion de l'eau (Figure 1), apparaît un cercle plus circonscrit, qui décrit la relation interactive existant entre la phase de conception et d'observation des réseaux, et celle de la manifestation de besoins supplémentaires en informations piézométriques, qui équivaut le plus souvent à une nécessité de consolidation de réseaux.

Une fois que l'on a déterminé les valeurs des indicateurs primaires et celles de l'indicateur global de consolidation IGC, il devient possible de classer les différentes nappes selon la grille de ces indicateurs. Seules par ailleurs ont été retenues les nappes possédant une durée d'observation supérieure ou égale à dix ans et dont le réseau est composé de dix points d'observation au minimum.

La liste des premières nappes sélectionnées selon les quatre indicateurs primaires et selon l'indicateur global, classées selon la valeur de l'indice IGC, est présentée en tableau 5.

4.3 Synthèse des résultats

Une fois définis et calculés les indicateurs primaires et globaux, que ce soit en matière de qualité de réseau ou en matière de besoins en informations supplémentaires, il apparaît opportun de porter un diagnostic général sur les résultats obtenus en vue d'identifier les nappes souterraines pour lesquelles une action de rationalisation des réseaux serait prioritaire.

En premier lieu, on peut analyser la relation qui existe entre les deux indicateurs globaux (IGQ, IGC). Par la suite, un indicateur global de synthèse est calculé à partir des deux premiers indicateurs globaux. Partant de 148 nappes surveillées, cette étude ne peut toutefois porter que sur les 93 aquifères pour lesquels nous disposons simultanément des deux indicateurs globaux. Pour faciliter les comparaisons, les deux indicateurs globaux IGQ et IGC ont été normalisés en les divisant par leurs valeurs maximales, soit respectivement 0,58 et 0,64. Ainsi, l'indicateur global de qualité (IGQ) normalisé varie entre 0,29 et 1 avec une moyenne $\overline{IGQ} = 0,56$, alors

Tableau 5 Les 15 premiers réseaux classés selon l'indice IGC.
Table 5 The first 15 networks classified according to IGC index.

Nappe	1	2	3	4	IGC
	VAR	TEXP	RESS	SUP	
Continental intercalaire	0,74	0,35	0,28	1,00	0,64
Complexe Terminal	0,33	0,57	1,00	0,75	0,63
Underflow Oued Siliana	1,00	0,56	0,00	0,00	0,45
Sisseb El Alam	0,51	0,60	0,07	0,01	0,28
Djeffara	0,12	0,37	0,41	0,13	0,23
Grombalia	0,17	0,92	0,15	0,01	0,22
Hajeb Djelma	0,32	0,45	0,11	0,01	0,21
Haffouz-Bou Hafna Cherchira	0,34	0,43	0,05	0,00	0,20
El Haouaria	0,14	0,89	0,10	0,00	0,19
Côte Orientale du Cap Bon	0,21	0,47	0,14	0,01	0,18
Plaine de Kairouan	0,15	0,45	0,14	0,03	0,15
Smar	0,00	0,99	0,00	0,00	0,12
Mahdia Ksour Essaf	0,00	0,90	0,01	0,01	0,12
Gafsa Nord	0,00	0,52	0,11	0,02	0,10
Bir Ali Ouedrane	0,00	0,28	0,01	0,02	0,04

que le IGC normalisé varie entre 0,01 et 1 avec une moyenne $\overline{IGC} = 0,15$.

4.3.1 Relations entre indicateurs

En reportant graphiquement l'indicateur global de consolidation en fonction de l'indicateur global de qualité (Figure 6), on peut identifier quatre groupes de nappes en se référant aux valeurs moyennes de chacun des indicateurs :

Groupe 1 $IGC < \overline{IGC}$ et $IGQ < \overline{IGQ}$: ce groupe représente les nappes qui ne nécessitent pas de consolidation de leurs réseaux et dont les réseaux ne sont pas de bonne qualité. Ce sont les aquifères qui ne présentent pas d'intérêt immédiat du point de vue du gestionnaire [faibles ressources, faibles dimensions, et/ou faible vulnérabilité]. On compte dans ce groupe 29 nappes, soit 31 % de l'ensemble étudié.

Groupe 2 $IGC < \overline{IGC}$ et $IGQ > \overline{IGQ}$: ce groupe représente les nappes dotées d'un réseau de bonne qualité sans pour autant présenter, dans l'immédiat, des besoins particulièrement élevés en information piézométrique. Ce groupe renseigne sur le niveau d'anticipation du gestionnaire. Si le degré de vulnérabilité du système venait à atteindre un niveau critique, les informations seraient là pour guider la prise de décision. On compte dans ce groupe 38 nappes, soit 41 % de l'ensemble étudié.

Groupe 3 $IGC > \overline{IGC}$ et $IGQ > \overline{IGQ}$: c'est le groupe des nappes qui présentent un besoin élevé d'information piézométrique, la nécessité d'un réseau consolidé, et qui bénéficie d'ores et déjà d'un réseau de surveillance de très bonne

qualité. C'est la situation la plus avantageuse. On compte dans ce groupe uniquement 12 nappes, soit 13 % de l'ensemble.

Groupe 4 $IGC > \overline{IGC}$ et $IGQ < \overline{IGQ}$: ce groupe rassemble les nappes qui nécessitent un grand volume d'informations, un réseau de surveillance consolidé, mais dont les réseaux piézométriques sont de mauvaise qualité. C'est la situation la plus défavorable, celle qui exige une intervention énergique et la mise en service de réseaux de surveillance adaptés. On compte dans ce groupe 14 nappes, soit 15 % de l'ensemble.

4.3.2 Indicateur Global de Synthèse

L'analyse précédente a permis de proposer une description du niveau de qualité des réseaux existants vis-à-vis du besoin en informations piézométriques et en réseaux consolidés. Sur la seule base de cette description, il est difficile d'opérer une classification des priorités en vue de décider de projets de rationalisation orientés vers les divers réseaux du système national. C'est la raison pour laquelle nous avons calculé un Indicateur Global de Synthèse IGS défini ainsi :

$$IGS = IGC / IGQ \quad (8)$$

Cet indicateur est d'autant plus élevé que le besoin d'informations est nécessaire et que la qualité du réseau actuel est mauvaise. La classification de l'ensemble des systèmes aquifères selon cet indicateur de synthèse permet de mettre notamment en évidence les nappes souterraines nécessitant les actions les plus prioritaires en matière de rationalisation des réseaux de surveillance. Le tableau 6 présente les dix premières d'entre elles.

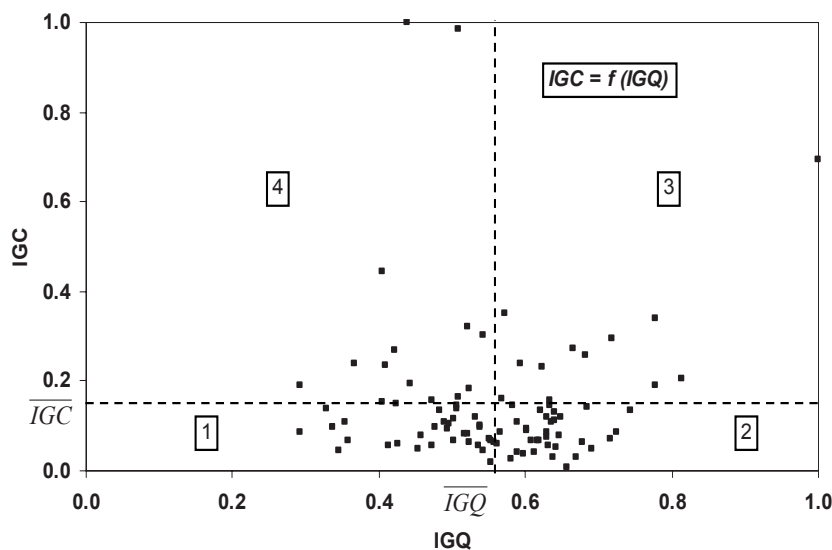


Figure 6 Relation entre les deux indicateurs globaux.
Relationship between the two global indicators.

Tableau 6 Les 10 premières nappes nécessitant une rationalisation de réseau.
Table 6 The first 10 aquifers requiring a rationalization of network.

Nappe	IGQ	IGC	IGS
Continental intercalaire	0,44	1,00	2,28
Complexe Terminal	0,51	0,99	1,94
Sisseb El Alam	0,40	0,44	1,09
Underflow oued Siliana	1,00	0,69	0,69
Skhira	0,29	0,19	0,65
Djebeniana	0,37	0,24	0,65
Sidi bouzid	0,42	0,27	0,63
Hajeb Djelma	0,52	0,32	0,62
Djeffara	0,57	0,35	0,61
Chaffar	0,41	0,23	0,57

5. DISCUSSION DE LA MÉTHODOLOGIE ET DES RÉSULTATS

La méthode d'analyse des réseaux piézométriques que nous venons d'exposer, bien qu'applicable, et la démonstration en a été faite sur le réseau national tunisien, demeure encore perfectible et critiquable à bien des égards, notamment en ce qui concerne le choix des indicateurs et l'expression même de certains d'entre eux.

5.1 Choix des indicateurs

Les différents indicateurs que nous avons utilisés, aussi bien pour caractériser la qualité d'un réseau piézométrique que les besoins d'informations, se fondent essentiellement sur l'expérience cinquantenaire et particulière de la DGRE en matière de surveillance des nappes. Ce caractère empirique va préserver un certain nombre de degrés de liberté aussi bien dans l'expression que dans le choix des indicateurs. Ainsi, par exemple, l'indicateur de fonctionnement FONCT est toujours sous-estimé car la DUREE appliquée (figurant au dénominateur) est la durée maximale de tous les points du réseau. Il pourrait être sensiblement amélioré si l'on calculait des indicateurs de fonctionnement ponctuels, rapportés à la durée effective de chaque point : l'indicateur global de fonctionnement de l'ensemble du réseau serait la moyenne des valeurs calculées en chaque point.

Autre exemple : l'indicateur d'évolution de la composition du réseau EVOL est déduit de la lecture des graphiques d'évolution. Il résulte d'une appréciation visuelle et sa reformulation est

souhaitable et envisageable. Quant aux valeurs calculées du taux d'exploitation TEXP, elles n'ont pas toujours été en conformité avec le sens des variations piézométriques enregistrées : il est vrai que cet indicateur cumule deux grandeurs, l'exploitation effective et la ressource exploitable, dont la connaissance n'est pas toujours réputée bonne.

Par ailleurs, d'autres indicateurs de qualité pourraient être introduits et contribuer à mieux qualifier encore le niveau de qualité. Si l'on considère que l'un des objectifs d'un réseau piézométrique est de durer encore le plus longtemps possible, on peut imaginer que la « durabilité » des points de mesure, définie comme leur aptitude à la poursuite de la surveillance, puisse constituer un excellent indicateur.

5.2 Distribution statistique des indicateurs

L'analyse statistique des indicateurs, aussi bien des indicateurs de qualité du réseau que des indicateurs de besoin d'information piézométrique et de consolidation, autorise les observations suivantes :

- L'ordre de grandeur des six indicateurs primaires de qualité (Tableau 7) est très variable. Les moyennes calculées sont de l'ordre de 0,1 pour SPAT, PIEZO et COUV; de 0,3 pour TEMP; 0,6 pour FONCT; et 0,7 pour EVOL. Les indicateurs primaires ayant les valeurs les plus élevées auront un poids plus fort au sein de l'indicateur global.
- Nous avons cherché à savoir si certains indicateurs primaires de qualité étaient fortement corrélés pour détecter les redondances. L'analyse des corrélations entre indicateurs (Tableau 8) montre des coefficients de corrélation relativement élevés pour les couples TEMP/FONCT et FONCT/EVOL.

Tableau 7 Analyse statistique descriptive des indicateurs de qualité.
Table 7 Descriptive statistical analysis of quality indicators.

Indicateurs de qualité	N	Médiane	Moyenne	Écart-type
SPAT	142	0,06	0,10	0,14
TEMP	148	0,25	0,34	0,22
FONCT	148	0,62	0,60	0,22
PEZO	148	0,00	0,11	0,19
COUV	148	0,06	0,13	0,18
EVOL	148	1,00	0,74	0,37

Tableau 8 Corrélations entre indicateurs de qualité.
Table 8 Correlations between quality indicators.

Coefficient de Corrélation de Pearson	SPAT	TEMP	FONCT	PEZO	COUV	EVOL
SPAT	1,00	-0,05	-0,04	-0,08	0,04	0,11
TEMP	-0,05	1,0	-0,55	0,13	-0,16	-0,34
FONCT	-0,04	-0,55	1,00	-0,06	-0,02	0,60
PEZO	-0,08	0,13	-0,06	1,00	0,11	-0,13
COUV	0,04	-0,17	-0,02	0,11	1,00	0,08
EVOL	0,11	-0,34	0,60	-0,13	0,09	1,00

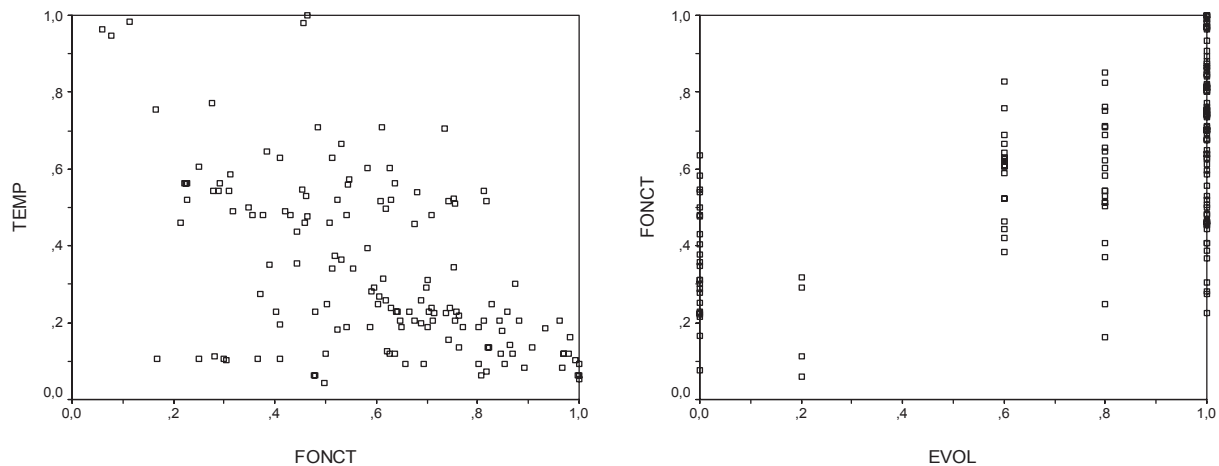


Figure 7 Relation entre les indicateurs primaires de qualité.
Relationship between primary indicators of quality.

La corrélation entre FONCT et TEMP est due à la durée de surveillance qui est un facteur commun. En ce qui concerne les corrélations EVOL/FONCT et EVOL/TEMP, elles constituent un artefact dû à la prédominance des valeurs de EVOL égales à 1 (Figure 7).

- La définition des divers poids affectés aux indicateurs primaires pour le calcul de la formule globale de qualité résulte du bon sens et de l'expérience pratique. Cette procédure présente une part d'arbitraire non négligeable. L'affectation de coefficients

différents entraîne évidemment un classement différent des nappes selon ce critère et une liste de priorités différente proposée au décideur. C'est la multiplicité des applications à d'autres systèmes qui pourra permettre d'affiner et de mieux justifier le choix des pondérations.

- La distribution de l'Indicateur Global de Qualité normalisé (Figure 8), suit une loi normale avec les caractéristiques statistiques suivantes :

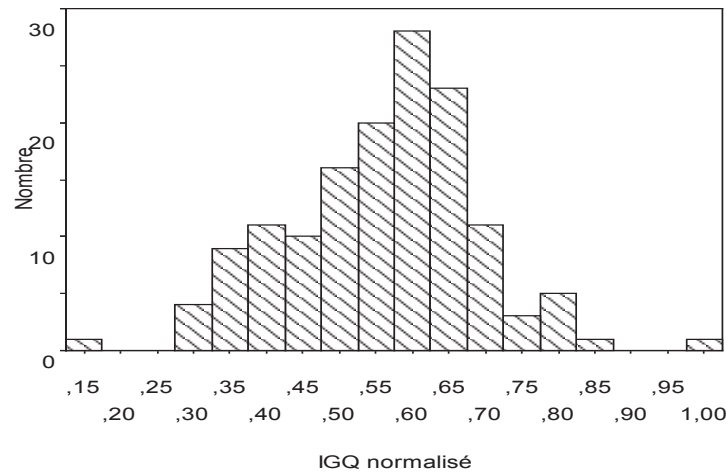


Figure 8 Histogramme de l'Indicateur Global de Qualité.
Histogram of the Global Indicator of Quality.

Moyenne : 0,56; Médiane : 0,57; Écart-type : 0,13.

- La définition de l'indicateur VAR sur la base de la variation piézométrique moyenne annuelle durant toute la période de surveillance de la nappe ne permet pas de faire ressortir les variations à une échelle plus courte comme c'est le cas sur la figure 9 (BESBES, 1978; ENNABLI, 1980; HORRICHE, 2003; SCHOELLER, 1938) qui montre une stabilité à long

terme alors que la baisse a atteint 4 m/an durant la période 1937-1948.

- L'analyse statistique de la distribution des quatre indicateurs primaires de consolidation de réseau (Tableau 9) indique pour RESS, SUP et VAR, des moyennes très faibles en raison de l'incidence des valeurs exceptionnelles des grandes nappes du sud tunisien.

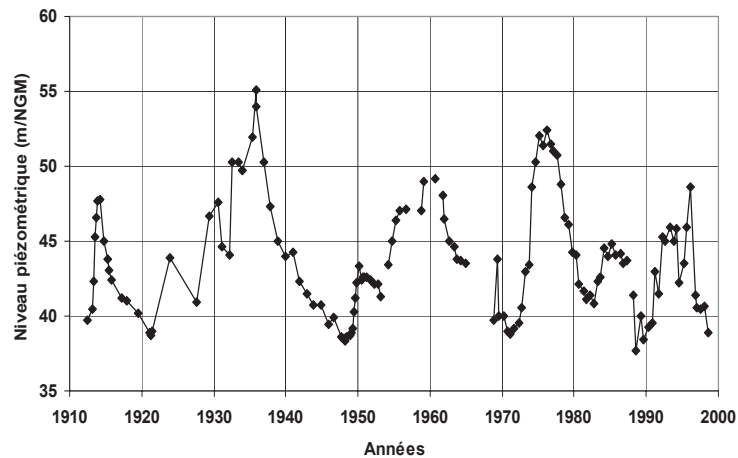


Figure 9 Variation piézométrique sur le puits de Crétéville.
Piezometric variation in the Crétéville well.

Tableau 9 Analyse statistique descriptive des indicateurs de consolidation de réseau.
Table 9 Descriptive statistical analysis of consolidation indicators.

Indicateurs de consolidation	N	Médiane	Moyenne	Écart-type
VAR	99	0,00	0,06	0,15
TEXP	140	0,38	0,40	0,22
RESS	148	0,01	0,03	0,09
SUP	143	0,00	0,02	0,10

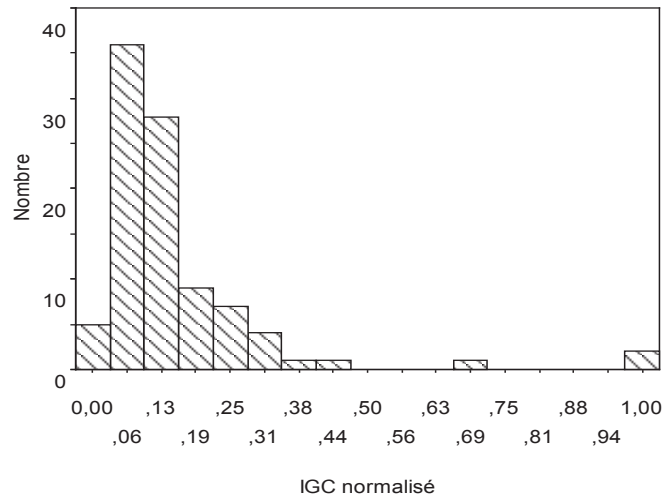


Figure 10 Histogramme de l'Indicateur Global de Consolidation de réseau.
Histogram of the global indicator of network consolidation.

Tableau 10 Corrélation entre indicateur global et indicateurs primaires de consolidation des réseaux.
Table 10 Correlation between global indicator and primary indicators of network consolidation.

Coefficient de Corrélation de Pearson	VAR	TEXP	RESS	SUP
IGC	0,84	0,36	0,72	0,78

- Les caractéristiques statistiques de l'Indicateur Global de Consolidation de réseau normalisé sont comme suit (Figure 10) :

Moyenne : 0,15; Médiane : 0,10; Écart-type : 0,16.

- L'analyse de la corrélation entre l'indicateur global de besoin et les indicateurs primaires (Tableau 10) montre qu'elle est forte pour les trois indicateurs VAR, RESS et SUP. Toutefois, cette forte corrélation n'est pas significative pour RESS et SUP du fait qu'elle est influencée par les fortes valeurs des trois nappes du sud tunisien, d'une part, et par le poids élevé qui a été affecté à VAR, d'autre part.

En définitive, la critique que l'on peut apporter au calcul de l'indicateur global peut se résumer en deux points, la validité des poids affectés à chacun des indicateurs primaires et la possible corrélation entre ces derniers. En ce qui concerne le choix des pondérations, on peut penser que la multiplicité des applications peut contribuer à mieux les cerner. Quant à la corrélation observée entre les différents indicateurs primaires, elle pourrait être surmontée en considérant des groupes homogènes de nappes.

6. CONCLUSION

L'approche multicritère utilisée est basée sur la définition d'indicateurs de qualité et d'indicateurs de consolidation de réseau. Dans la formulation des indicateurs intrinsèques, ainsi que pour le calcul d'indicateurs globaux, un certain nombre d'hypothèses ont dû être adoptées. Puis les indicateurs ont été classés selon leur importance, leur niveau d'objectivité et la fiabilité de leur méthode de détermination.

L'application au réseau piézométrique national tunisien a d'abord permis de classer les nappes selon la qualité de leurs réseaux. En second lieu, nous avons pu classer les systèmes aquifères selon les besoins en consolidation des réseaux. Les principaux résultats obtenus concordent bien avec la situation observée sur le terrain. Ainsi, le classement des deux grandes nappes du Complexe Terminal et du Continental Intercalaire confirme bien les recommandations de l'étude du Système Aquifère du Sahara Septentrional (OSS, 2003) en vue d'une rationalisation du réseau de surveillance de ce système. Le troisième système du classement général se trouve être la nappe de Sisseb el Alem, dont le réseau présente un très fort besoin de

rationalisation. Cette nappe est depuis de nombreuses années l'objet d'une surexploitation manifeste et d'une baisse continue de sa piézométrie.

Bien que son application au réseau piézométrique national ait pu être confortée par des résultats conformes à la réalité observée sur le terrain, la méthode d'analyse développée ici demeure perfectible et critiquable à bien des égards, notamment en ce qui concerne le choix des indicateurs et l'expression même de certains de ces indicateurs. La multiplicité des applications sur plusieurs réseaux piézométriques pourra contribuer à mieux appréhender et à définir sans doute avec plus de précision les différents indicateurs caractérisant la surveillance piézométrique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BESBES M., 1967. Note sur l'étude hydrogéologique de la plaine de Kairouan. Recommandations. Bureau de l'Inventaire et des Recherches Hydrauliques, Tunisie, 3 p.
- BESBES M., 1978. L'estimation des apports aux nappes souterraines. Un modèle régional d'infiltration efficace. Thèse de Doctorat d'état, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, 270 p.
- CE, 2000. Journal Officiel des Communautés Européennes L 327 du 22.12.2000, 72 p.
- COMPTE J.P., 1994. Suivi piézométrique des eaux souterraines. Approche méthodologique. Critères de définition des réseaux de mesure. Rapport R38217, BRGM, France, 38 p.
- DGRE, 1998. Réseau National de Surveillance Piézométrique de Tunisie, Direction Générale des Ressources en Eau, Tunisie, 426 p.
- ENNABLI M., 1980. Étude hydrogéologique des aquifères du Nord-Est de la Tunisie pour une gestion intégrée des ressources en eau. Thèse de Doctorat d'État, Université de Paris, France, 570 p.
- GANGOPADHYAY S., DAS GUPTA A. et M.H. NACHABE, 2001. Evaluation of ground water monitoring network by principal component analysis. *Ground Water*, 39, 181-191.
- HERRMANN L., EYRICH A., MÜLER G. et G. SCHREIBER, 1990. Methodological principles for groundwater monitoring in the German Democratic Republic. *IAHS Publ.*, 173, 121-130.
- HORRICHE F., 2003. Indicateurs de qualité du réseau piézométrique national. DGRE, Tunisie, 106 p.
- HORRICHE F., 2004. Contribution à l'analyse et à la rationalisation des réseaux piézométriques. Thèse de Doctorat, Université Tunis El Manar, ENIT, Tunisie, 254 p.
- LANDREAU A., 1999. Réseau national de bassin Loire-Bretagne. Étude de définition du réseau. Rapport de fin de phase 1. Rapport BRGM R 40482, France, 95 p.
- MANDEL S., 1965. La planification des réseaux d'observation hydrogéologiques et l'emploi des instruments. *Hydrogéol.*, 8, 25-39.
- MARGAT J., 1972. Évaluation des ressources hydrauliques. Méthode d'implantation d'un réseau piézométrique général. Rapport 72 SGN 126 AME, BRGM, France, 54 p.
- MEDD, 2003. Cahier des charges pour l'évolution des réseaux de surveillance des eaux souterraines en France. Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, France, 117 p.
- MONTLIVAUT P., 2003. Comment mettre en œuvre concrètement la directive cadre sur l'eau dans le domaine des eaux souterraines. *Houil. Blanc.*, 2, 83-84.
- OSS (Observatoire du Sahara et du Sahel) et CAR-PB/OMED (Centre d'Activités Régionales du Plan Bleu / Observatoire Méditerranéen pour l'Environnement et le Développement), 1996. Les indicateurs d'économie de l'eau. Ressources et utilisations. Document de réflexion. 61 p.
- OSS, 2003. Système aquifère du Sahara Septentrional. Rapport de synthèse, Observatoire du Sahara et du Sahel, 125 p.
- POINTET T., 1982. Les réseaux piézométriques et la situation des ressources en eaux souterraines en France. Communication présentée dans la 4^e conférence internationale sur la planification et la gestion des eaux du 10 au 12 mai 1982, Marseille, France. Commission Européenne de la Planification des Eaux (CEMPE).
- SCHNEIDER J.L., 1970. Organisation du contrôle du régime des nappes souterraines par des réseaux piézométriques en divers pays. Rapport 70 SGN 352 HYD, BRGM, France, 32 p.

SCHOELLER H., 1938. L'abaissement du niveau d'eau dans les puits de Khélidia en 1938. Tunisie, 6 p.

SMITH R.A., SCHWARZ G.E. et R.B. ALEXANDER, 1997. Regional interpretation of water-quality monitoring data. *Water Resour. Res.*, 33, 2781-2798.

SOPHOCLEOUS M., PASCHETTO E. et R.A. OLEA, 1982. Groundwater network design for Northwest Kansas, using the theory of regionalized variables. *Ground water*, 20, 48-58.

ZEBIDI H., 1975. Réseau national de piézomètres. Division des Ressources en Eau, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 8 p.