HAL
open science

Evolution de la ressource en eau dans la vallée du Merguellil (Tunisie centrale)

C. Leduc, R. Calvez, R. Beji, Y. Nazoumou, G. Lacombe, C. Aouadi

To cite this version:

C. Leduc, R. Calvez, R. Beji, Y. Nazoumou, G. Lacombe, et al.. Evolution de la ressource en eau dans la vallée du Merguellil (Tunisie centrale). Séminaire sur la modernisation de l'agriculture irriguée, 2004, Rabat, Maroc. 10 p. cirad-00189516

HAL Id: cirad-00189516

https://hal.science/cirad-00189516

Submitted on 21 Nov 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Projet INCO-WADEMED
Actes du Séminaire
Modernisation de l'Agriculture Irriguée
Rabat, du 19 au 23 avril 2004

Evolution de la ressource en eau dans la vallée du Merguellil (Tunisie centrale)

C. Leduc[1], R. Calvez[2], R. Beji[3], Y. Nazoumou[1,2], G. Lacombe[1,2], C. Aouadi[1,2,4]

[1] *IRD, UMR (unité mixte de recherche) Hydrosciences Montpellier, BP 434, 1004 El Menzah 4, Tunis, Tunisie*
[2] *IRD, US (unite de service) DIVHA, BP 434, 1004 El Menzah 4, Tunis,Tunisie*
[3] *CRDA, Kairouan*
[4] *INAT, Sciences et techniques de l'eau, 43 av. C. Nicolle, Tunis, Tunisie*

E-mail : Christian.Leduc@ird.fr

Résumé - La plaine de Kairouan (Tunisie centrale) se trouve au débouché des trois grandes vallées du Zéroud, du Merguellil et du Nebhana. Dans ce contexte semi-aride (pluies moyennes entre 200 et 400 mm.an^{-1}), l'intensification de l'irrigation au cours des dernières décennies a suscité une forte croissance de la demande en eau. En même temps, différents aménagements affectent l'ensemble du fonctionnement hydrologique : multiples ouvrages de conservation des eaux et des sols, petits et moyens, d'une part, grands barrages de protection contre les crues sur les trois oueds majeurs d'autre part. La distribution de l'eau B la surface du bassin-versant et dans le sous-sol a donc considérablement évolué et change encore. Dans la plaine du Merguellil, à l'aval du barrage el Haouareb, la nappe alluviale quaternaire est devenue la seule ressource en eau disponible. Elle est actuellement exploitée sans réel contrôle, ce qui conduit à une baisse sensible de son niveau (de 0,25 à 1 m par an). Elle n'est plus alimentée comme en régime naturel par les crues de l'oued, désormais entièrement bloquées par le barrage. Elle ne reçoit plus que les apports des nappes latérales et le flux souterrain passant sous le barrage. L'avenir du développement agricole régional dépend de manière évidente de la maîtrise de la ressource souterraine et donc de sa bonne connaissance. Malgré de multiples mesures de terrain et études entreprises depuis plusieurs décennies, il reste encore de nombreuses incertitudes qui rendent le bilan actuel de la nappe très incertain, à la fois sur les flux entrants et sortants. La surexploitation est nette et générale et aucune solution alternative simple n'apparaît. Le risque d'augmentation à long terme de la minéralisation existe mais ce problème est moins grave et moins immédiat que la baisse piézométrique.

Mots clés : zone semi-aride, Tunisie, nappe, irrigation, surexploitation, échange surface-souterrain.

1 Contexte général

Dans le cadre de sa politique de mobilisation des ressources en eau, la Tunisie a entrepris de mobiliser 90 % des eaux de surface et 100 % des eaux souterraines. La construction d'un ensemble de barrages et de barrages collinaires interconnectés devrait contribuer à atteindre cet

objectif. Malgré ces mesures, le bilan entre l'offre et la demande est toujours déficitaire. En effet, la demande en eau croît sans cesse, en raison de l'augmentation de la population et du développement industriel, mais surtout de l'intensification de l'agriculture, principal consommateur d'eau (environ 80 %).

Le Centre de la Tunisie, malgré le climat semi-aride et la très forte variabilité des précipitations, représente la zone de plus fort développement agricole potentiel, entre le Nord déjà bien exploité et le Sud trop aride. A l'intérieur de cette région, la plaine de Kairouan (figure 1) dispose du plus important réservoir aquifère, atout essentiel pour compenser les fluctuations climatiques. Par ailleurs, des grands barrages ont été construits sur les principaux oueds (Zéroud, Merguellil et Nebhana) afin de lutter contre les crues les plus violentes dont les conséquences sont dramatiques, comme l'inondation de Kairouan en 1969, et également afin d'alimenter certains périmètres irrigués de la région. Plus récemment, les aménagements destinés à la conservation des eaux et des sols se sont multipliés dans l'ensemble du bassin-versant. Le fonctionnement hydrologique est donc bouleversé. L'importance socio-économique de la maîtrise des ressources en eau de la région est évidente.

Les problèmes de cette région (ressources variables et limitées, prélèvement croissant, faible contrôle de l'accès à l'eau, etc.) sont aussi rencontrés dans l'ensemble du Bassin méditerranéen. Le bassin du Merguellil peut être considéré comme un cas exemplaire.

Cette communication présente des résultats du programme franco-tunisien Mergusie (Merguellil : ressources, gestion et usages intégrés de l'eau), actuellement dans sa deuxième phase, qui vise la gestion intégrée de l'eau dans le bassin du Merguellil et associe l'Institut de recherche pour le développement (IRD, France, unité de service DIVHA et unité mixte de recherche Hydrosciences, Montpellier) et plusieurs partenaires tunisiens dont le Commissariat régional pour le développement agricole de Kairouan (CRDA), la Direction générale des ressources en eau (DGRE) du ministère de l'Agriculture et l'Institut national agronomique de Tunisie (INAT).

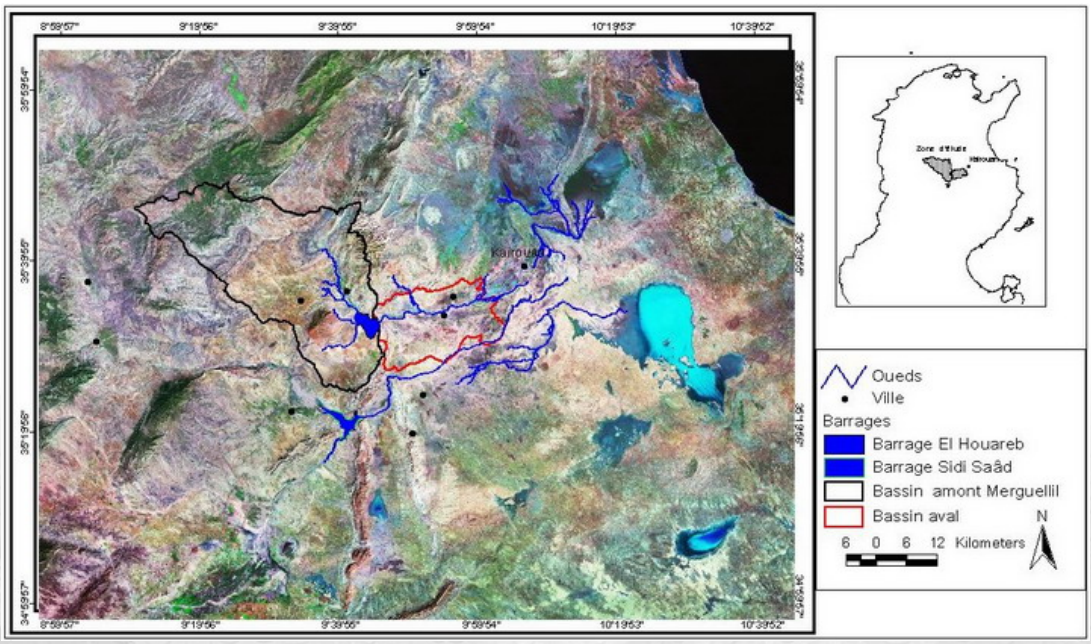

Fig. 1 – Le bassin du Merguellil est cerné de noir pour sa partie à l'amont du barrage El Haouareb, de rouge pour sa partie immédiatement à l'aval du barrage, sa partie terminale se confondant avec le reste de la plaine de Kairouan. Les *sebkhas*, aboutissement du Merguellil et du Zéroud (au sud du Merguellil), apparaissent en bleu très clair ou très foncé.

2 Etat des connaissances

Le Merguellil est l'un des trois grands oueds qui débouchent dans la plaine de Kairouan. Le bassin du Merguellil comporte une partie amont (1 200 km^2), relativement montagneuse, dont la topographie et l'occupation des sols sont très variées, et une partie aval, vaste plaine totalement exploitée par l'agriculture (figure 2). Entre les deux, le barrage d'El Haouareb, construit en 1989 sur une zone de faille karstifiée, retient toutes les eaux de l'oued. Le barrage a une capacité maximale de 90 millions de m^3, mais n'a jamais été totalement rempli : l'apport annuel moyen depuis 1989 a varié entre 5 et 37 millions de m^3 (moyenne de 17 millions de m^3, ce qui correspond à un ruissellement global du bassin amont entre 5 et 10 %). On estime actuellement que 25 % de l'eau arrivée au barrage s'évapore et que 63 % de l'eau recharge les nappes, le reste allant principalement à l'alimentation d'un périmètre situé juste à l'aval (Kingumbi, 1999[5]). Le bassin se trouve entre les isohyètes 200 et 400 mm/an, les pluies étant plus fortes dans le bassin amont que dans le bassin aval.

Trois systèmes aquifères différenciés existent à l'amont ; leurs échanges sont mal connus, tout comme les liens entre le réseau hydrographique et les nappes. A l'aval, une grande nappe phréatique est contenue dans les alluvions de la plaine. Cette série continentale a une granulométrie très variable verticalement et latéralement et s'épaissit de l'ouest vers l'est et dépasse presque partout 100 m d'épaisseur, elle est bien plus importante à l'aval. La nappe alluviale est également en communication avec d'autres nappes latérales, elle se prolonge avec une extension verticale et horizontale très réduite vers l'amont où elle peut échanger des flux avec les autres nappes de l'amont. L'infiltration des eaux de l'oued lors des crues était probablement la principale source d'alimentation de la nappe alluviale. Depuis la construction du barrage, cette recharge n'existe plus. Cette grande nappe alluviale de l'aval est désormais la seule alimentation possible pour l'irrigation à l'aval du barrage.

L'étude hydrogéologique de la plaine de Kairouan a démarré avant l'indépendance de la Tunisie. Dans les années 60, des mesures plus nombreuses ont permis d'approfondir les connaissances sur la nappe aboutissant à la première modélisation mathématique (Besbes, 1978[2]) et à la proposition d'un schéma des écoulements souterrains et à une première quantification des ressources. Ensuite, plusieurs études de réactualisation de ce modèle ont été réalisées, après la mise en eau des grands barrages de Sidi Saâd sur le Zéroud, et de El Haouareb sur le Merguellil. La dernière réactualisation importante est issue des travaux de Nazoumou (2002[7]). Cependant, entre 1975 et 2002, il n'y a pas eu de changement significatif dans les schématisations retenues dans la modélisation, seuls les chiffres de flux ont été légèrement actualisés.

Parallèlement à ces travaux portant sur la nappe quaternaire – dont l'importance est fondamentale pour la région à l'aval des barrages –, d'autres aspects du cycle hydrologique et d'autres zones du bassin versant ont été étudiées. La première phase du programme de recherche franco-tunisien " Mergusie " a accentué ces recherches. Le domaine couvert a aussi largement débordé des limites de l'hydrologie classique et pris en compte les usages de l'eau (Feuillette, 2001[4]).

Cependant, l'examen critique de la bibliographie, apparemment abondante, montre que de nombreuses lacunes subsistent, parfois même sur des questions fondamentales. La géométrie précise du réservoir alluvial aval est encore très mal connue, ce qui pèse fortement sur l'évaluation du stock et celle du renouvellement de la nappe mais aussi sur l'ampleur de la surexploitation actuelle. De même, le bilan des flux entrants et sortants ne peut être raisonnablement calé sur les estimations officielles des prélèvements, largement sous-estimés. Le biais induit dans la modélisation rend le calage peu fiable.

Des travaux portant sur la géochimie de cette nappe ont été réalisés et se poursuivent encore – par exemple par Ben Hamouda, 1997[1], notamment dans l'équipe de K. Zouari à l'ENI de Sfax–, mais leurs résultats n'ont pas encore été confrontés à ceux des études hydrodynamiques. L'amélioration des connaissances sur ces points fondamentaux ne sera probablement pas aisée

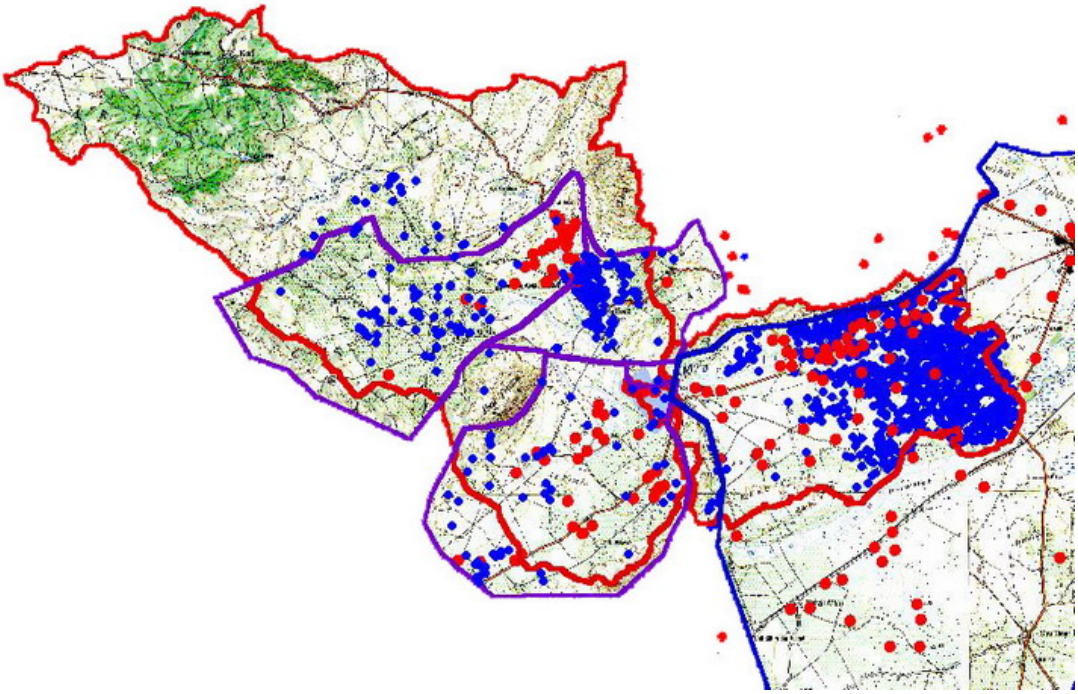

FIG. 2 – Bassin versant du Merguellil. Les traits rouges limitent le bassin amont et la partie étudiée immédiatement à l'aval du barrage, les traits mauves délimitent les trois aquifères présents à l'amont, les points bleus et rouges sont les puits et les forages exploitant les différentes nappes.

mais cette démarche est indispensable pour produire des modèles physiques fiables.

3 Fluctuations naturelles et impact de l'irrigation sur les ressources en eau

3.1 A l'amont

Dans la partie haute du bassin, les aménagements de conservation de l'eau et des sols couvrent déjà 25 % de la surface totale et cette proportion continue d'augmenter. On compte 38 lacs et 4 barrages collinaires d'un volume moyen de 1 million de m^3. Certains de ces ouvrages ont permis l'apparition d'une petite irrigation très localisée ; de nombreux aménagements ne sont pas encore exploités pour le développement agricole pour plusieurs raisons : insuffisance d'une ressource stable dans le temps, conditions physiques défavorables, manque de maîtrise technique de la population, difficultés foncières. La diminution plus ou moins rapide du volume stockable du fait de l'envasement des retenues est un autre frein à l'emploi de cette ressource. Ces nombreux aménagements de protection contre l'érosion modifient très sensiblement les écoulements de surface (Dridi, 2000[3]). On peut donc considérer que le développement de l'irrigation à l'amont est encore limité et que son impact réel sur le bilan des ressources en eau – eau de surface et eau souterraine – est plus faible que l'impact direct des aménagements , quelle que soit l'utilisation de l'eau stockée par ces derniers.

3.2 A l'aval

L'essentiel de l'utilisation de l'eau à des fins agricoles a lieu dans la partie aval du bassin, où l'on trouve une densité très forte d'ouvrages d'exploitation (figure 2) : on en dénombre plus de 1 000 dans la zone de notre étude qui ne couvre qu'une partie de la plaine de Kairouan.

La profondeur de la nappe alluviale varie le plus souvent entre 15 et 65 m. Les ouvrages de plus de 50 m de profondeur sont théoriquement interdits mais les contrôles sont rares et les sanctions exceptionnelles. On peut donc considérer la nappe comme étant en accès libre, de fait sinon de droit.

Un réseau d'observation piézométrique existe depuis 1966 et comporte des points mesurés épisodiquement et quelques rares enregistreurs automatiques du niveau de la nappe phréatique (figure 3). La densité spatiale et temporelle des mesures a sensiblement varié. Nous disposons malgré tout d'une information suffisante pour identifier les principaux processus en jeu. Nous avons sélectionné quelques sites qui présentent un intérêt important pour la compréhension des processus de recharge de la nappe.

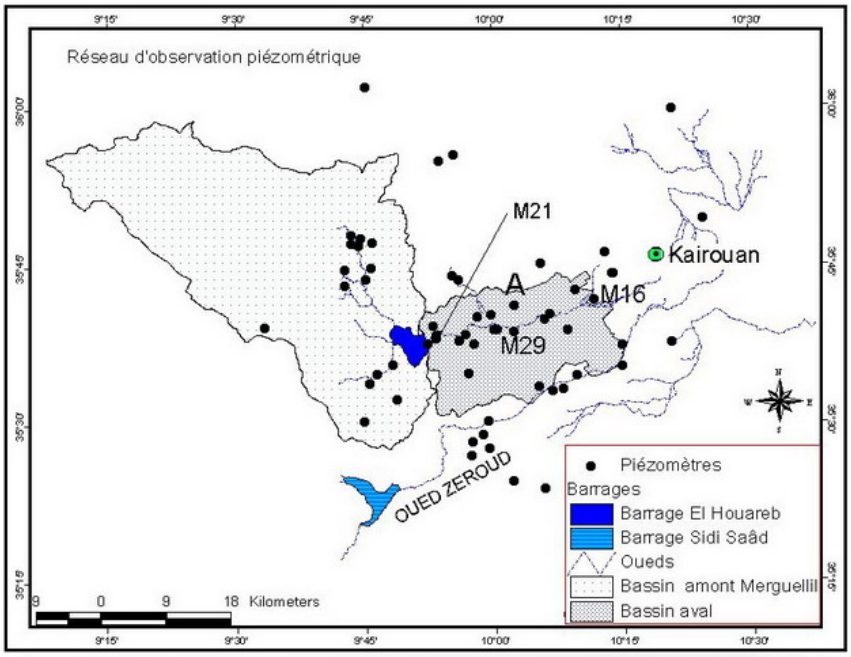

FIG. 3 – Réseau de surveillance piézométrique du bassin du Merguellil.

Le piézomètre M21 (figure 4) est situé juste à l'aval du barrage actuel. Lors des grandes crues de 1969, la nappe était montée de 10 m mais était rapidement retombée de 4 m. Le gain de cet épisode exceptionnel pour la nappe restait néanmoins très important. Les crues ultérieures, toujours en régime naturel, ont momentanément interrompu le mouvement de descente à long terme qui s'est poursuivi jusqu'en 1989, et atteint un niveau d'environ 1 m plus bas que celui de 1968. La construction du barrage en 1989 a modifié le fonctionnement de la nappe et a créé une charge hydraulique variable mais beaucoup plus forte à l'amont immédiat de ce point. La hausse piézométrique induite localement dépassa 6 m. Depuis 1994, le mouvement majeur est la baisse du niveau d'eau, provoquée par l'augmentation des pompages à l'aval, de 10 m en 10 ans.

La comparaison des forages M21 et M29 sur la période de 1994 à 2003 (figure 5) montre un amortissement des fluctuations d'amont en aval ; en effet la baisse auprès du forage M29 n'est

que de 6 m en 10 ans et les fluctuations y sont beaucoup plus lissées. Cette progression est logique puisque sur cette période, les deux causes majeures de fluctuation sont les niveaux du réservoir du barrage, à l'amont hydraulique, et l'augmentation des prélèvements, sur l'ensemble du domaine.

Les forages M16 et A, situés à l'aval des précédents et surtout plus près de la bordure nord de l'aquifère, ont des profils encore plus lissés (figure 6). La hausse de 1969 est inférieure à 2 m. Depuis, la baisse est lente mais continue et dépasse 6 m en 20 ans. La construction du barrage n'a pas eu d'effet sensible.

Fig. 4 – Variation piézométrique près du barrage El Haouareb de 1969 à 2002.

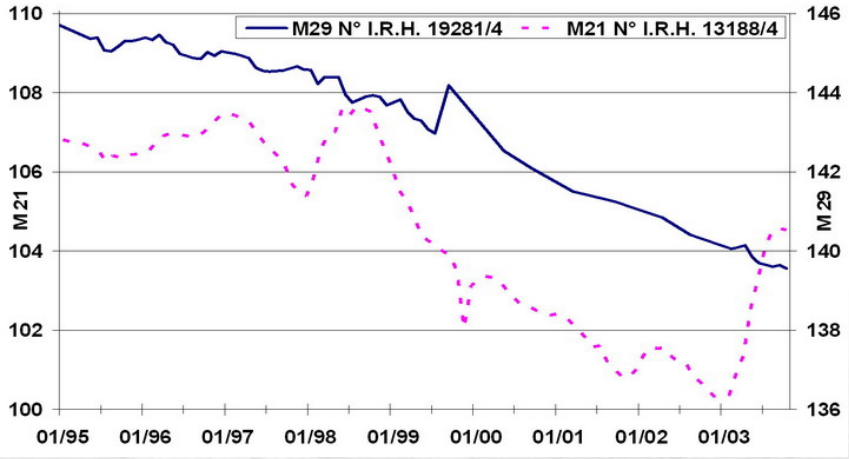

Fig. 5 – Variations comparées de la piézométrie auprès des forages M29 et M21 de 1995 à 2003.

4 Discussion et conclusion

Le développement des puits et des forages, dans des parcelles privées mais aussi à l'intérieur des périmètres publics, a sensiblement accru la pression sur la nappe alluviale. On assiste à une baisse généralisée du niveau piézométrique, de 0,25 à 1 m par an pour les deux dernières décennies (figure 7, pour la période 1978-1989). En faisant l'hypothèse d'une baisse moyenne de la nappe de 0,5 m/an et d'une porosité du matériau alluvial de 5 à 10 %, la lame d'eau réelle

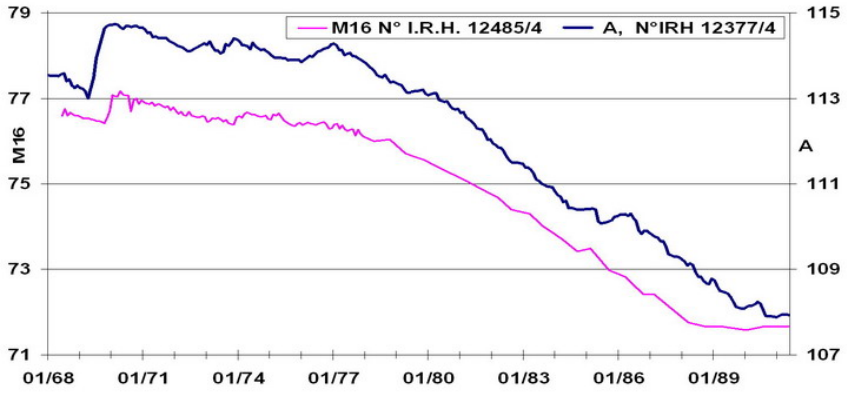

FIG. 6 – Variations comparées de la piézométrie auprès des forages M16 et A, au cours de la période 1968 à 1989.

perdue chaque année est de 25 à 50 mm. Ce déstockage, qui ne correspond qu'à une partie du prélèvement total dans la nappe pour l'irrigation volume, est modeste au regard des volumes habituellement consommés dans les périmètres irrigués mais correspond néanmoins à un net déséquilibre de la nappe.

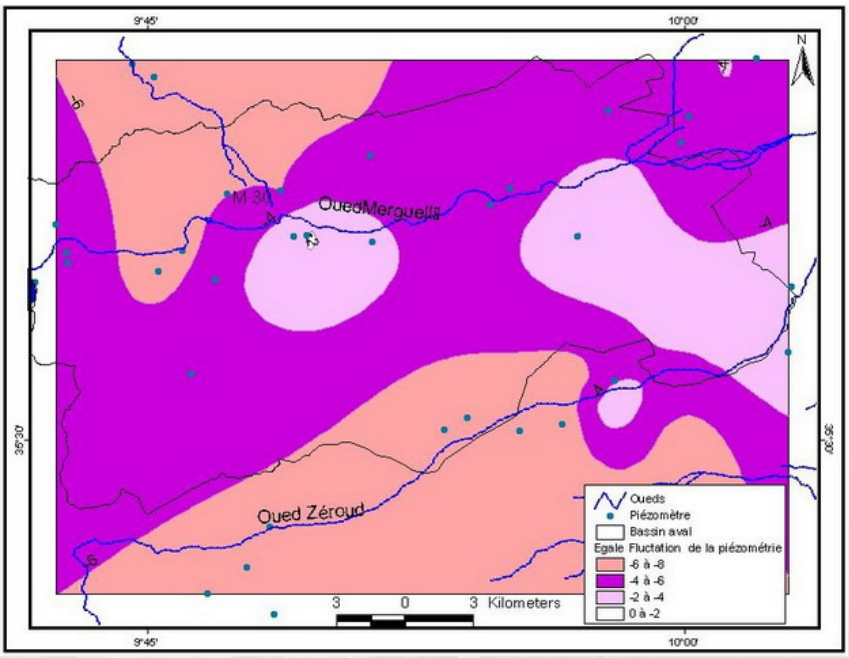

FIG. 7 – Carte de la baisse piézométrique entre mars 1978 et août 1989, illustrant l'impact des pompages sur la nappe.

Pour le moment, on n'a pas observé de retour de l'eau d'irrigation jusqu'à la nappe. Ceci s'explique à la fois par une épaisseur moyenne importante de la zone non saturée, où les durées de transit peuvent facilement se compter en décennies, et par un apport en eau très modéré. Ce retour peut être raisonnablement considéré comme négligeable ou nul.

Durant les dernières années, la dégradation de la pluviométrie est allée de pair avec l'augmentation du nombre de forages et l'a peut-être accentuée. Le retour très récent à une pluviométrie

plus normale permettra de mieux démêler les influences respectives des fluctuations climatiques et des pompages sur les ressources en eau souterraine. Les prélèvements pour l'irrigation et pour l'alimentation en eau potable semblent bien être les causes les plus importantes de l'évolution de la nappe.

La nappe alluviale du Merguellil est donc un système relativement simple, marqué par une nette surexploitation. Cette situation n'est pas tenable sur le long terme. Il faut donc envisager de diminuer les flux sortants et d'augmenter les flux entrants.

Les flux sortants sont d'abord les pompages pour l'irrigation. Les autorités en charge de la gestion de la nappe n'ont pour l'instant pas les moyens de limiter les pompages. Une restriction volontaire des irrigants est difficilement imaginable. Par ailleurs, la baisse régulière de la nappe interdira son accès aux seuls paysans qui ne disposeront pas de moyens financiers de creuser encore plus profondément leur puits et leur forage. Au vu des comportements actuels, ceci ne devrait toucher qu'une faible partie de la population agricole. L'autre flux sortant important est celui qui atteint les *sebkhas* à l'aval de Kairouan et permet l'équilibre de ces zones écologiquement singulières. L'augmentation des pompages réduira l'alimentation en eau de ce secteur ou même la tarira.

Les flux entrants sont d'abord constitués par les échanges avec les autres systèmes aquifères ; ces flux ne sont pas identifiés aujourd'hui. Ce sont également les apports d'eau de surface au barrage El Haouareb, qui s'infiltrent ensuite et atteignent l'aquifère alluvial de manière directe ou par le relais d'une autre nappe. Ils sont évidemment dépendants des variations climatiques et de l'aménagement de l'amont. La multiplication des ouvrages de conservation des eaux et des sols induira une diminution des écoulements arrivant au barrage, donc de la recharge des nappes et des volumes disponibles pour l'irrigation depuis l'aquifère alluvial.

Le transfert d'eau depuis un autre bassin apparaît comme la manière la plus évidente d'augmenter le volume d'eau de la région, avec toutefois le risque important en zone semi-aride qu'une même sécheresse affecte les régions qui fournissent et celle qui demandent de l'eau. Mais la gestion de la ressource peut aussi passer par une amélioration de son utilisation. Pour l'instant, il n'existe pas d'étude fiable permettant de dire si des lâchers contrôlés de l'eau du barrage s'infiltrant dans l'ancien lit de l'oued seraient plus ou moins efficaces en terme de recharge de nappe que la situation actuelle caractérisée par la perte par évaporation d'un volume important dans la retenue du barrage (Nazoumou et Besbes, 2000[8]). Une meilleure valorisation sociale et économique de l'eau pourrait constituer une autre solution, notamment par le choix de cultures moins exigeantes en eau, mais jusqu'à présent le passage au système d'irrigation au goutte-à-goutte semble s'être accompagné d'une augmentation des surfaces irriguées et non d'une diminution de la consommation d'eau. Une autre possibilité d'amélioration de l'utilisation de la ressource en eau reposerait sur une étude comparative, physique et socio-économique, des besoins et des gains de diverses productions en fonction de leur emplacement dans le bassin : des cultures dispersées à l'amont utilisant l'eau relativement diffuse et fortement variable dans le temps des retenues collinaires sont-elles plus intéressantes que des cultures implantées à l'aval, exploitant la ressource de la nappe alluviale, plus stable dans le temps et l'espace, mais dont l'eau a subi une ponction par l'évaporation de 25 % au moins pendant le transfert par le barrage ? Enfin, il faut rappeler que les différences de perception que les usagers ont des ressources souterraine ou superficielle peuvent largement influer sur leur comportement : ressource invisible, sans limite facilement identifiable d'un côté, ressource visible au stock facilement estimable de l'autre.

Le problème de l'évolution de la qualité des eaux doit être évoqué. La nappe alluviale à l'aval présente de fortes variations latérales et verticales de minéralisation qui peuvent s'expliquer par des variations lithologiques de l'aquifère, des origines et des vitesses de circulation différentes des eaux souterraines. L'exposition des eaux de surface à une évaporation intense augmente évidemment la minéralisation des eaux avant leur utilisation agricole (Montoroi *et al.,* 2002[6]). De plus, le lessivage de la zone non saturée pourra sensiblement augmenter la minéralisation de la

nappe par l'apport des intrants agricoles récemment épandus en excès et par les sels des eaux de pluie et de crue n'ayant pas atteint la nappe qui se sont accumulés depuis des siècles dans le sol. Cependant, ces deux causes d'accroissement de la minéralisation ne produiront probablement un effet sensible que sur une échelle de temps particulièrement longue. Le problème quantitatif est donc bien le plus urgent dans la vallée du Merguellil.

Au vu des nombreuses incertitudes pesant sur les différents termes du bilan de la nappe, il est évident que les estimations et les simulations proposées jusqu'à présent ont une valeur limitée et les indications ainsi fournies restent très générales. Une nouvelle modélisation numérique des écoulements souterrains sera entreprise. La reconstitution d'un état stable, c'est-à-dire celui existant avant le développement de l'irrigation et la réalisation du barrage, se heurte au nombre limité des données disponibles, pour la piézométrie et surtout pour les prélèvements. Le calage en régime transitoire doit ensuite traiter deux périodes distinctes : avant 1989, un régime encore naturel mais subissant la grande crue de 1969, et après 1989, un régime artificiel avec la présence du barrage et une forte croissance des pompages.

Comme dans tout modèle hydrogéologique, une même reconstitution piézométrique peut correspondre à plusieurs jeux de flux et de perméabilité, de plus fortes perméabilités impliquant des flux plus élevés. Il est donc indispensable de resserrer au maximum la gamme des flux possibles (les pompages par des enquêtes multiples, les flux naturels par critique croisée de l'hydrodynamique et de la géochimie) et la gamme des perméabilités (essais de pompage à l'échelle locale, propagation et atténuation des fluctuations piézométriques à plus grande échelle). La validation du modèle sur un état hydrologique très différent de celui ayant servi au calage est un très bon test de qualité. Des tests de sensibilité permettent d'apprécier la robustesse de l'ensemble et la fiabilité des résultats issus des différentes simulations.

Ce modèle physique discrétisé à l'origine en un nombre important de mailles doit ensuite être dégradé. Ceci consiste d'abord à découper l'ensemble de la zone en un nombre très réduit de sous-régions suffisamment homogènes du point de vue de leurs ressources, de leurs usages et de leur évolution telle que prévue par le modèle. Il faut ensuite schématiser le comportement de ces sous-régions par des règles simplifiées de fonctionnement interne et d'interactions entre régions, en gardant en tête une vision dynamique de l'anthropisation. Ce découpage et ces règles décrivant le milieu physique sont enfin introduits dans un modèle plus large reprenant les contraintes physiques et socio-économiques, véritable outil de gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle régionale.

Références bibliographiques

Références

[1] Ben Hamouda M.F., 1997. Utilisation des techniques nucléaires dans l'étude de la recharge artificielle des nappes. Contribution à l'étude de la nappe de Kairouan. DEA, INAT, Tunisie. 79 p.

[2] Besbes M., 1978. Estimation des apports aux nappes souterraines. Un modèle d'infiltration efficace. Thèse de doctorat, université Paris VI, Paris, France, 270 p.

[3] Dridi B., 2000. Impact des aménagements sur la disponibilité des eaux de surface dans le bassin versant de l'oued Merguellil (Tunisie centrale). Thèse de doctorat, université Louis Pasteur, Strasbourg, France. 194 p.

[4] Feuillette S., 2001. Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre : exploitation des interactions ressources-usages par les systèmes multi-agents. Application à la nappe de Kairouan, Tunisie centrale. Thèse de doctorat, université Montpellier II, Montpellier, France. 350 p.

[5] Kingumbi A., 1999. Bilan et modélisation du barrage El Haouareb. Mémoire DEA, ENIT, Tunis, Tunisie, 108 p.

[6] Montoroi J.P., Grünberger O., Nasri S., 2002. Groundwater geochemistry of a small reservoir catchment in Central Tunisia. Applied Geochemistry, 17 :1047-1060.

[7] Nazoumou Y., 2002. Impact des barrages sur la recharge des nappes en zone aride. Etude par modélisation numérique sur le cas de Kairouan (Tunisie centrale). Thèse de doctorat, ENIT, Tunisie, 221 p.

[8] Nazoumou Y., Besbes M., 2000. Modélisation des lâchers de barrage et recharge de la nappe de Kairouan (Tunisie). In : actes de séminaire " Hydrologie des régions méditerranéennes ", Montpellier, France, 11-13 octobre 2000. UNESCO PhI-V/ Documents techniques en hydrologie, 51, Paris, France. 283-295.