

Rabattement des nappes et équité d'accès aux eaux souterraines : Analyse comparative des catégories d'exploitations agricoles dans le centre de la Tunisie

Hacib El Amami^{1,*}, Jean Robert Kompany² et Charles Muanda³

¹ Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts, Université de Carthage, Tunis, Tunisie

² Institut National Agronomique de Tunisie, Université de Carthage, Tunis, Tunisie

³ Institut National des Bâtiments et Travaux Publics, Kinshasa, République Démocratique du Congo

Résumé – La surexploitation des nappes génère un coût économique et environnemental qui se traduit par la diminution de la disponibilité de l'eau et l'augmentation de son coût de pompage. Les études portant sur la distribution de ces coûts à travers les types d'exploitations et leur impact sur l'équité d'accès aux eaux souterraines demeurent limitées en Tunisie. À travers l'élaboration d'indicateurs par le modèle de programmation mathématique appliqué à des exploitations types, ce travail a montré que les coûts résultant de la surexploitation des nappes sont inégalement répartis. Les petites exploitations, disposant de moins de 3 ha, sont les plus affectées. Elles encourrent des coûts de pompage de 1,25 à 1,5 fois plus élevés que les exploitations disposant d'une superficie beaucoup plus large. Le ratio bénéfice-coût de l'irrigation est également le plus faible dans cette catégorie, suggérant la non-rentabilité de l'irrigation dans un futur proche. Ce travail a révélé que l'accès économique à l'eau souterraine est désormais tributaire de la dotation de deux facteurs clés : le capital foncier et le capital financier. Les exploitations disposant de moyens fonciers et financiers vont continuer à profiter des eaux souterraines, tandis que les petites exploitations risquent d'en perdre rapidement l'accès, se trouvant ainsi exclues de leur part de cette ressource collective. Afin de préserver l'égalité d'accès pour toutes les catégories d'exploitations, et de prévenir une accentuation de la dégradation de la nappe, une politique robuste de gouvernance devrait être mise en place, avec une implication plus forte des usagers locaux et de l'administration agricole régionale.

Mots clés : eau souterraine / coût de pompage / petites exploitations / accès / équité

Abstract – **Acquifers depletion and equity of access to groundwater: Comparative study at farm class level in Tunisia.** The overexploitation of groundwater generates economic and environmental costs which result in the reduction of the availability of water and the increase in pumping costs. Studies on the distribution of these costs across categories of farms and their impact on equity of access to groundwater remain limited in Tunisia. Through the development of indicators, this paper seeks to analyze the economic aspects of irrigation and identify the key factors governing economic access to this resource. The results show that the costs resulting from the overexploitation of groundwater are unevenly distributed. The small farms, with less than 3ha, are the most affected. Overall, they incur pumping costs 1.6 times higher than farms with a much larger area. The benefit-cost ratio of irrigation is the lowest in this category, suggesting the non-profitability of irrigation in the near future. The access to groundwater becomes strongly dependent on the endowment of two key factors: land capital and financial capital. Farmers with land and financial resources will continue to benefit from groundwater, while small farmers will be likely forced to abandon their legitimate share in these common resources and totally loose access. In order to preserve equality of chances for all categories of farms and to guarantee the sustainability of the production system in these areas, there is an urgent need to implement significant policy reforms in order to better organize and control groundwater withdrawal, by involving more local users with the assistance of the regional agriculture administration.

Keywords: groundwater / pumping cost / small farms / access / equity

*Auteur de correspondance : hacib.amami@gmail.com

1 Introduction

Durant les quatre dernières décennies, les eaux souterraines sont devenues la principale source d'eau pour l'irrigation en Tunisie. Sur un total de 430 000 ha, les eaux souterraines assurent l'alimentation de 225 000 ha, soit 55 % de la superficie totale irriguée, contre 45 % pour les eaux de surface (MARHP, 2019). L'existence d'un potentiel presque intact disponible à une faible profondeur (10–30 m) ne nécessitant pas beaucoup d'investissement, ainsi que le rapport favorable des prix des produits et des intrants, ont fait que cette ressource a constitué la source d'irrigation de plusieurs dizaines de milliers d'hectares. Ce développement s'est reposé en grande partie sur des investissements privés, bien que le gouvernement, avant la mise en place du Programme d'ajustement structurel (1986), ait facilité ce développement en accordant de petits crédits et ait subventionné divers intrants tels que les semences, les engrais, les produits de traitement, le carburant, etc. Dans la région de Sidi Bouzid, à titre d'exemple, les périmètres privés irrigués à partir des puits de surface et/ou de forages profonds représentent 85 % de la superficie irriguée régionale (MARHP, 2021). Plus particulièrement dans les régions du Centre, où les eaux de surface sont à la fois rares et aléatoires, les eaux souterraines ont transformé les économies rurales en permettant la diversification des cultures et l'accroissement de leur productivité, l'amélioration des revenus des agriculteurs et la création d'emplois pour des dizaines de milliers d'ouvriers agricoles. Sur ce point, elles peuvent être considérées comme étant un exemple de succès de la politique d'amélioration du bien-être social et de développement régional.

Cependant, ce développement rapide de l'irrigation a été effectué aux dépens de la durabilité des eaux souterraines. Les rapports établis par le ministère de l'Agriculture font apparaître une baisse généralisée et continue du niveau des nappes. De 1990 à 2010, l'exploitation a évolué d'une façon continue avec une augmentation de 200 millions de m³ tous les cinq ans. Entre 2010 et 2015, cette augmentation a doublé passant ainsi à 400 millions de m³ (Khanfir, 2017). Le taux d'exploitation des nappes profondes est passé de 119 % en 2015 à 133 % en 2020 (MARHP, 2021). Celui des nappes phréatiques est de 119 %. Dans les régions du Centre, où les nappes phréatiques sont les plus sollicitées, le taux de prélèvement a atteint 139 % en 2020.

Dans la théorie économique, les eaux souterraines sont considérées comme un exemple typique de « ressources communes » (Shah, 2014 ; Sears *et al.*, 2021). Gérées sous le régime de l'accès libre, cela aboutit à une allocation inefficace et à un rabatement ou un épuisement rapide des nappes (Reddy, 2005 ; Shah, 2014). Ce statut de « ressource commune », a poussé plusieurs pays à instaurer diverses politiques et instruments de régulation afin d'en assurer une meilleure exploitation (Shah, 2014). En Tunisie, le Code des eaux stipule que toutes les ressources en eau font partie du domaine public hydraulique. En ce qui concerne les ressources souterraines, le code autorise le libre accès pour les nappes phréatiques situées à une profondeur de moins de 50 m. Cela signifie que tout propriétaire de la terre dans une zone déterminée, sauf pour celles considérées comme zones de sauvegarde, peut accéder librement à la nappe phréatique et extraire de l'eau autant qu'il le désire, sans restriction. Le prix

de l'eau se résume dans ce cas au coût de son exhaure et aucun autre coût n'est imposé à l'utilisateur individuel. Les nappes profondes font l'objet d'une autorisation préalable qui fixe le débit du prélèvement autorisé contre le paiement d'une redevance symbolique (Gafrej, 2017). Toutefois, en l'absence d'un contrôle rigoureux, cette réglementation n'a pas empêché une exploitation intensive de ces nappes comme l'indiquent les rapports du ministère de l'Agriculture (MARHP, 2021).

Face au rabatement des nappes, les agriculteurs du Centre de la Tunisie réagissent par l'approfondissement de leurs puits pour capter des niveaux plus profonds de la nappe (Feuillette, 2001 ; Elloumi, 2016). D'après nos enquêtes, ils sont même amenés, dans certains cas, à acquérir des pompes plus puissantes, accentuant ainsi les coûts. Ces opérations sont exigeantes en capitaux financiers et pourraient conduire à l'exclusion de certaines catégories d'agriculteurs dépourvues de moyens financiers suffisants. Cela est d'autant plus inquiétant qu'en Tunisie, les petits agriculteurs sont quasiment exclus de l'accès aux crédits. Selon Jouili *et al.* (2013), la part des exploitants ayant obtenu un crédit, entre 2004 et 2005, s'élève à 36 % pour les exploitants de plus de 100 ha alors qu'elle ne dépasse pas 4 % pour les exploitations de moins de 5 ha. Depuis 2005, la situation n'a pas fondamentalement changé. L'octroi de subventions exige la présentation de divers documents et de garanties que les petits et moyens agriculteurs ne peuvent pas fournir pour plusieurs raisons, telles que la complexité de leur situation foncière ou un surendettement préexistant auprès des banques et des commerçants. C'est là le premier indicateur de l'inégalité des chances d'accès aux eaux souterraines. Le deuxième indicateur réside dans le coût économique de plus en plus élevé de l'accès à ces eaux. En effet, même si les petites et moyennes exploitations arrivent à disposer d'un financement, le coût de pompage du mètre cube d'eau et l'investissement additionnel par hectare sont beaucoup plus élevés pour elles, compte-tenu de la superficie limitée qu'elles irriguent, que ceux observés dans les exploitations irriguant une superficie plus grande.

Dans les zones arides du Centre, l'eau d'irrigation représente l'un des constituants les plus importants du coût de production. Dès lors, nous avançons l'hypothèse qu'au fur et à mesure que la nappe se rabat, le coût de l'irrigation augmente, affectant la rentabilité des cultures irriguées dans les petites et moyennes exploitations, qui deviendraient alors économiquement moins efficaces et risqueraient fort de se trouver exclues de la sphère de production. Cela s'explique en partie par le fait que les prix de marché des produits se fixent par les mécanismes de l'offre et de la demande, indépendamment du coût de production différencié observé dans chaque catégorie d'exploitation. Seules les exploitations les plus performantes pourraient rester dans la course.

De nombreux travaux empiriques effectués au plan international, dont la majorité en Inde et au Pakistan, ont souligné les graves conséquences de la surexploitation des nappes sur l'équité de l'accès à l'eau souterraine en fonction des différentes couches sociales d'agriculteurs (Reddy, 2005 ; Anantha et Raju, 2008 ; Sharif et Ashok, 2011 ; Mahin et Ashok, 2011). Dans notre travail, l'équité se réfère à l'égalité des chances entre les différents types d'exploitations en matière d'accès à cette ressource collective (Cai, 2008). C'est un aspect vital de l'économie des eaux souterraines, comme le soulignent Diwakara et Chandrakanth (2007), car cela va

sélectionner les types d'agriculteurs qui pourront continuer à bénéficier des eaux souterraines dans un contexte de rabattement continu. Au Maroc, [Ameur *et al.* \(2017\)](#) ont montré que, par manque de moyens financiers, de nombreux agriculteurs ne peuvent plus accéder à l'eau souterraine, amplifiant ainsi les inégalités socio-économiques entre les exploitations dans le monde rural marocain. En Algérie, [Amichi *et al.* \(2012\)](#) ont abouti à des résultats similaires, constatant que l'accès aux eaux souterraines est devenu un facteur majeur d'augmentation de la différenciation socio-économique, puisque l'accès devient limité à un nombre réduit d'agriculteurs, en raison de leurs disponibilités en capital foncier et financier.

En Tunisie, et malgré leur importance, les questions relatives aux implications sociales et économiques du rabattement des nappes restent peu étudiées au niveau des exploitations agricoles. Les travaux effectués dans ce domaine ont porté plutôt sur l'évaluation des instruments de la gouvernance des eaux souterraines ([Frija *et al.*, 2014](#); [Frija *et al.*, 2016a](#); [Abdelhafidh et Bachta, 2016](#)) ou sur les politiques de gestion des eaux souterraines ([Soula *et al.*, 2023](#)). Certains travaux réalisés dans la région de Sidi Bouzid ont fait apparaître qu'à travers le « marché foncier », les agriculteurs les mieux dotés financièrement et en capital social ont accaparé la part la plus importante des eaux souterraines, excluant ainsi les exploitants les moins dotés de l'irrigation et les conduisant donc à retourner à l'agriculture pluviale ([Kahouli et Elloumi, 2015](#); [Fautras, 2016](#); [Gharbi et Elloumi, 2023](#)).

Le présent travail représente, à notre connaissance, la première tentative d'analyser quantitativement le coût économique et social résultant de la surexploitation des nappes et plus particulièrement son incidence sur l'accès à la ressource pour les différentes catégories d'exploitations. Précisément, il cherche à : (a) déterminer des indicateurs économiques de l'accès à l'eau souterraine selon les différents types d'exploitations ; (b) quantifier l'impact du rabattement sur le revenu de chaque type ; et (c) en déduire les types d'exploitations qui pourraient continuer d'exploiter la nappe de celles qui pourraient en être exclues.

2 Méthodologie

2.1 Zone d'étude

Le cadre géographique de cette étude est la zone de Kharrouba-El Maloussy, qui fait partie de la délégation de Menzel Bouzaïne, située dans le Gouvernorat de Sidi-Bouzid, au centre de la Tunisie ([Fig.1](#)). La zone se classe dans l'étage bioclimatique aride supérieur avec un hiver froid et un été chaud et sec. Cette aridité a entraîné un recours de plus en plus généralisé à l'irrigation. Le nombre de puits a plus que quintuplé, passant de 130 puits en 1980 à près de 1350 puits actuellement, de sorte que cette zone regroupe plus de 40 % (soit 2000 ha) de la superficie irriguée totale de la délégation ([MARHP, 2021](#)). La zone connaît la plus grande concentration de puits de la région, et leur densité peut aller jusqu'à 20 puits/km² ([Daoud et Trauma, 2000](#)). Cette concentration s'explique par la disponibilité de l'eau souterraine, sa bonne qualité chimique, ainsi que sa faible profondeur de captage, de l'ordre de 15 m au début des années 1980. Actuellement, la nappe est

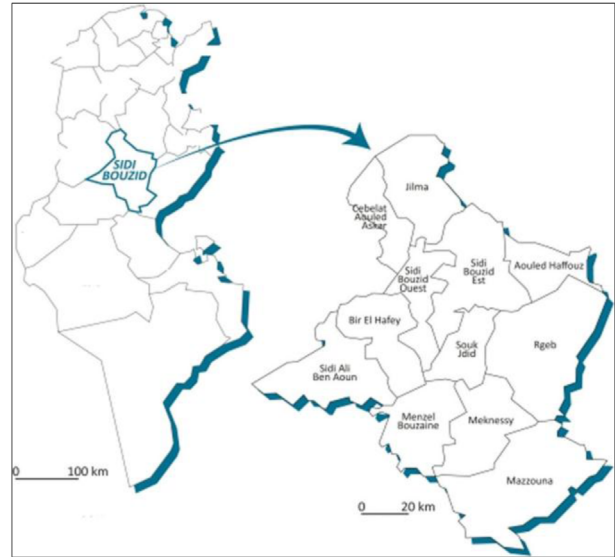


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude.

Fig. 1. Localization of the study area.

captée à un niveau variant de 40 à 45 m selon les endroits, soit un rabattement de 20 à 25 m en 40 ans.

Le potentiel annuel renouvelable pour la nappe phréatique est estimé à 4 millions de m³, alors que 8,84 millions de m³ sont actuellement utilisés ; soit un taux de surexploitation de 212 % ([Hemdi, 2022](#)). Pour la nappe profonde, ce potentiel est estimé à 11,1 millions de m³, alors que 16,6 millions de m³ sont actuellement utilisés ; soit un taux de surexploitation de 150 %. Il faut signaler que la distinction entre « nappes phréatiques » et « nappes profondes » n'est qu'artificielle, puisque les études hydro-géologiques réalisées sur la nappe de Meknessy, qui alimente la zone d'étude, montrent que celle-ci est constituée plutôt d'aquifères multi-couches qui communiquent ([Bouri *et al.*, 2007](#); [Chenini et Ben Mamou, 2009](#)). Dès lors, tout prélèvement effectué, que ce soit à partir des couches phréatiques ou profondes, affecte l'état général de la nappe. Le réseau de surveillance piézométrique de la [DGRE \(2014\)](#) montre un rabattement moyen de 0,5 m/an et un rabattement de 0,8 m par an lors des années sèches. Nos enquêtes de terrain nous ont permis de constater des rabattements allant au-delà de cette valeur, qui peuvent atteindre 2 m/an par endroit. Les agriculteurs sont donc périodiquement amenés à forer à nouveau leurs puits pour capter des niveaux plus profonds de la nappe. L'opération consiste d'abord à creuser davantage le puits lui-même, puis à forer au fond en introduisant un tube de 6 à 7 m pour capter des niveaux plus profonds.

Selon les interviews avec les agriculteurs, le coût total de l'approfondissement, intégrant la main-d'œuvre et tous les équipements nécessaires, varie de 3000 DT à 4000 DT (900 à 1200 €) selon les endroits. Les orientations de production diffèrent selon la taille de l'exploitation. Les petites exploitations, dont la superficie irriguée ne dépasse pas 2 à 3 ha, se basent sur la pratique du maraîchage, principalement l'oignon, le petit pois et la fève pour le maraîchage d'hiver, et le piment pour le maraîchage d'été. Compte tenu de la limitation de la superficie, ces cultures sont généralement pratiquées en intercalaire avec les oliviers. Le débit des puits

de surface ne dépasse pas 2 à 3 L/s. La catégorie des exploitations moyennes se base sur l'association du maraîchage, des céréales irriguées et des arbres fruitiers. La superficie exploitée varie généralement entre 7 et 10 ha. La troisième catégorie d'agriculteurs, qui a commencé à se développer dès le début des années 2000, exploite une superficie qui dépasse souvent 20 à 30 ha et est orientée exclusivement vers l'arboriculture en hyper-intensif : oliviers, amandiers, pêchers et vignes. Ces exploitations sont irriguées généralement par 2 ou 3 puits de surface. Voyant que l'eau débitée par les puits est insuffisante pour satisfaire l'irrigation dans un système intensif, certains agriculteurs ont commencé à créer des forages profonds. Ce captage de la nappe profonde pour l'irrigation intensive a exacerbé le rabattement du niveau de la nappe phréatique (1 à 2 m/an), exploitée depuis des dizaines d'années par les petites exploitations de la zone. La frange des exploitants de la catégorie 3, irriguant à partir de forages profonds, n'est pas prise en considération dans le cadre de ce travail, car ils utilisent une technologie d'extraction de l'eau différente de celle utilisée par les autres agriculteurs (puits de surface), de sorte que la comparaison n'aurait pas de sens.

2.2 Le modèle d'optimisation

L'impact du rabattement des nappes sur l'équité d'accès à ces ressources et sur le revenu économique de différentes classes d'agriculteurs a été simulé dans un modèle de programmation mathématique (Hazell et Norton, 1986; McCarl et Spreen, 2011). Le modèle intègre des informations sur le coût d'investissement et d'approfondissement des puits, le prix de l'énergie et la profondeur de pompage avec les pratiques agricoles actuelles, pour déterminer l'impact potentiel du rabattement sur les choix cultureux et les revenus des agriculteurs, ainsi que sur le coût de pompage de l'eau et son prix fictif, appelé également « *shadow price* », qui traduit sa rareté économique au fur et à mesure que la profondeur de pompage augmente. La simulation a été effectuée à des niveaux de profondeur allant de 40 m (niveau actuel) jusqu'à 50 m. En effet, selon Chenini et Ben Mamou (2009), l'épaisseur de la première couche de la nappe (dite phréatique), ne dépasse pas 50 à 60 m. La deuxième couche, dite profonde, est captée à partir de 120 à 150 m. Une exploitation type, dite « représentative » de chacune des 3 catégories d'exploitations, a été sélectionnée pour la modélisation, sur un horizon de planification de 6 ans, à l'aide de la technique de programmation mathématique. L'exploitation « représentative » est définie par la moyenne des caractéristiques physiques et économiques observées dans la classe des exploitations qu'elle représente. Ces caractéristiques concernent les choix de cultures, les pratiques culturales, les ressources de production disponibles (eau, terre, capital financier, main-d'œuvre, etc.), les coûts de production et les revenus obtenus. Ainsi, le modèle reproduit l'environnement physique et économique de production de chaque catégorie d'exploitations.

La fonction objectif (ou fonction économique) a été définie comme suit (Eq. (1)) :

$$\text{Max}Z = \sum_{j=1}^{j=n} P_j \times R_j \times Y_j - \sum_{j=1}^{j=n} C_{tw} \times W_j \times Y_j - \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} \beta_i \times D_{ij} \times Y_j \quad (1)$$

Où :

Z est le revenu de l'agriculteur, P_j est le prix du kilo ou de la tonne de la culture « j », R_j est le rendement moyen par hectare de la culture « j », Y_j est le niveau de la culture « j », exprimé en hectares, C_{tw} est le coût de pompage de l'eau relatif à l'année « t », W_j représente l'eau pompée utilisée par la culture « j », D_{ij} est le niveau de l'intrant « i », autre que l'eau, utilisé par la culture « j », il implique l'engrais, les semences, la main-d'œuvre, etc. ; β_i est le prix de l'intrant « i ».

La fonction objectif a été maximisée sous un ensemble de contraintes (Eq. (2)), incluant notamment des limites sur la disponibilité de la terre et les autres facteurs de production (par exemple, la main-d'œuvre, le capital financier, etc.) :

$$\sum_{j=1}^{j=n} a_{ij} Y_j \leq B_i \quad (2)$$

Où : a_{ij} est la matrice des coefficients techniques, elle représente la quantité de ressource (i) nécessaire pour produire une unité de l'activité Y_j , B_i la disponibilité totale de la ressource « i ».

Le coût de pompage de l'eau dépend principalement de la profondeur du puits, du prix de l'énergie et du coût d'investissement et d'approfondissement périodique. Il dépend aussi de la taille de la superficie irriguée et du volume total pompé durant toute la campagne agricole. Il se compose généralement de deux parties : le coût du capital et le coût opérationnel (Wichelns, 2010 ; Alam, 2016). Le coût du capital comprend le coût d'approfondissement du puits tandis que le coût opérationnel comprend le prix de l'énergie (électricité dans notre cas) utilisée pour le pompage.

Calcul du coût du capital

L'investissement de l'approfondissement périodique du puits a été amorti comme suit (Eq. (3)) :

$$A_{ap} = \frac{(C_{ap} \times (1+i)^n \times i)}{(1+i)^n - 1} \quad (3)$$

Avec : A_{ap} l'amortissement de l'investissement de l'approfondissement du puits ; C_{ap} est le coût de l'approfondissement, il englobe tous les coûts engagés dans cette opération (équipement, accessoires, main-d'œuvre, etc.) ; n : la durée de vie de l'approfondissement, égale à 2 ans selon la majorité des agriculteurs interrogés ; « i » le taux d'actualisation, égal à 6 %.

Calcul du coût opérationnel du pompage de l'eau

Dans le cas de ce travail, le coût opérationnel se résume au coût de l'énergie utilisée. L'équation (4) définit le coût de pompage de l'eau au cours d'une période donnée (C_c), exprimé selon la formule proposée par Rogers et Alam (1999). Elle est

formulée comme suit :

$$C_e = \mu \times (h_0 + \Delta h_t) \times \delta + / V_t \quad (4)$$

Ce coût varie en fonction du prix de l'énergie (μ) et de la profondeur du puits ($h_0 + \Delta h_t$), mesurée en mètres, comme étant la distance entre la surface du sol et le niveau statique de la nappe. Le paramètre Δh_t représente le rabattement additionnel observé au cours de l'année « t ». Le coefficient μ représente le prix de l'unité d'électricité (Kw h), h_0 la profondeur initiale du puits en mètres en prenant l'année 2022 comme année de base, et δ l'énergie nécessaire pour soulever une unité d'eau (1 m^3) d'une unité de distance (1 m). Ce coefficient (δ) est défini par : $\delta = (\gamma \times \rho \times g) / 1000$; dans laquelle γ est l'efficacité de la pompe (prise égale à 75 %), ρ est la densité de l'eau (1000 kg/m^3) et g est l'accélération de la pesanteur ($9,8 \text{ m/s}^{-2}$). Le coefficient Δh_t représente le rabattement de la nappe au cours de l'année « t »; il a été collecté auprès des services techniques du Commissariat régional au développement agricole (CRDA) et correspond au rabattement annuel observé dans la zone d'étude.

Le coût total du mètre cube d'eau est ainsi calculé comme étant la somme de son coût opérationnel, exprimé en termes d'énergie utilisée, et de l'amortissement du capital investi dans l'approfondissement périodique du puits. Il est formulé comme suit (Eq. (5)) :

$$C_t = \frac{[\mu \times (h_0 + \Delta h_t) \times \delta + A_{\text{app}}]}{V_t} \quad (5)$$

Où V_t , représente le volume d'eau total pompé durant toute l'année.

Cette équation a été intégrée dans le modèle pour ajuster le coût de pompage de l'eau à chaque période de l'horizon de planification et refléter ainsi son augmentation, résultant directement de l'accroissement de la profondeur de pompage.

Ratio Avantage/Coût

L'irrigation par les eaux souterraines n'est rentable que lorsque les avantages procurés par chaque mètre cube pompé dépassent les coûts engagés pour le produire (Robinson, 2002 ; Alam, 2016). De tels coûts et avantages peuvent varier considérablement d'un endroit à l'autre et d'une catégorie d'exploitation à une autre en fonction des spécificités des conditions locales et des dotations des exploitations (Srivastava *et al.*, 2017). Pour évaluer la viabilité économique de l'irrigation dans un contexte de rabattement continu de la nappe, le ratio avantage/coût (RAC) a été calculé pour chaque catégorie d'exploitation. Il est formulé comme suit :

$$RAC = \frac{SP}{C_t}$$

Où : SP représente le prix fictif de l'eau (*Shadow-Price*) ; ce prix fictif est généré par la solution du modèle de programmation mathématique pour chaque niveau de profondeur de pompage ; C_t représente le coût total (capital et opérationnel) de pompage de l'eau.

Si le ratio « RAC » est supérieur à 1, cela signifie que l'irrigation est rentable puisque chaque mètre cube d'eau pompé apporte plus de bénéfices qu'il ne coûte. S'il est

inférieur à 1, cela veut dire que le coût de pompage l'emporte sur les bénéfices qui en découlent.

2.3 Choix de l'échantillon et collecte des données

Un échantillon de 96 exploitations réparties dans la zone d'étude et représentant les différents types d'exploitations a été choisi au cours de la campagne 2019-2020. Tous les agriculteurs interrogés irriguent à partir de puits de surface dont la profondeur varie, selon les endroits, de 35 à 45 m. Des interviews individuelles ont été effectuées auprès des agriculteurs et ont porté, entre autres, sur les stratégies qu'ils développent pour faire face au rabattement de la nappe. Le questionnaire permet également d'extraire des informations détaillées sur le coût de l'investissement initial dans le puits et les installations hydrauliques, la fréquence de l'approfondissement et les coûts correspondants, incluant la main-d'œuvre et tous les équipements nécessaires. Les intrants utilisés pour chaque culture à différents stades de production et leurs coûts ont aussi été collectés. Les informations recueillies ont été analysées dans une première étape en utilisant la statistique descriptive. Dans une deuxième étape, elles ont été utilisées comme intrant pour alimenter le modèle d'optimisation économique, développé pour une exploitation représentative de chaque type d'exploitations.

3 Résultats

3.1 Fréquence élevée de l'approfondissement des puits

Les résultats des enquêtes ont montré que la réaction des agriculteurs à la baisse du niveau de la nappe dans la zone d'étude était très individualiste et consistait à s'y adapter plutôt qu'à essayer d'inverser la tendance. En effet, la tendance générale observée chez tous les agriculteurs est de choisir l'option que Berahmani *et al.* (2012) qualifient de « chasse à l'eau », où les agriculteurs sont amenés à approfondir régulièrement leurs puits à une fréquence qui varie selon les endroits. La Figure 2, qui montre la fréquence des approfondissements pour les agriculteurs interrogés, fait apparaître à quel point l'eau souterraine devient rare dans la zone d'étude. En effet, près de deux agriculteurs sur trois parmi les agriculteurs interviewés déclarent avoir recours à l'approfondissement périodique des puits tous les 2 ans, contre 5 % seulement qui n'ont recours à cette opération qu'une fois tous les 4 ans, alors que 20 % sont même amenés à le faire annuellement.

Comme conséquence de cet approfondissement périodique, le coût de pompage de l'eau et la rentabilité de l'irrigation sont affectés. Toutefois, l'amplitude de cet impact diffère selon les types d'exploitations, particulièrement en fonction de leurs dotations foncières et financières, comme le montrent les développements suivants.

3.2 Équité d'accès aux eaux souterraines

L'équité a été examinée à travers l'élaboration d'un indicateur nommé : « indicateur d'accès économique ». Il indique le coût annuel de pompage de l'eau selon les types d'exploitations. Quoique ce coût augmente au fil des années

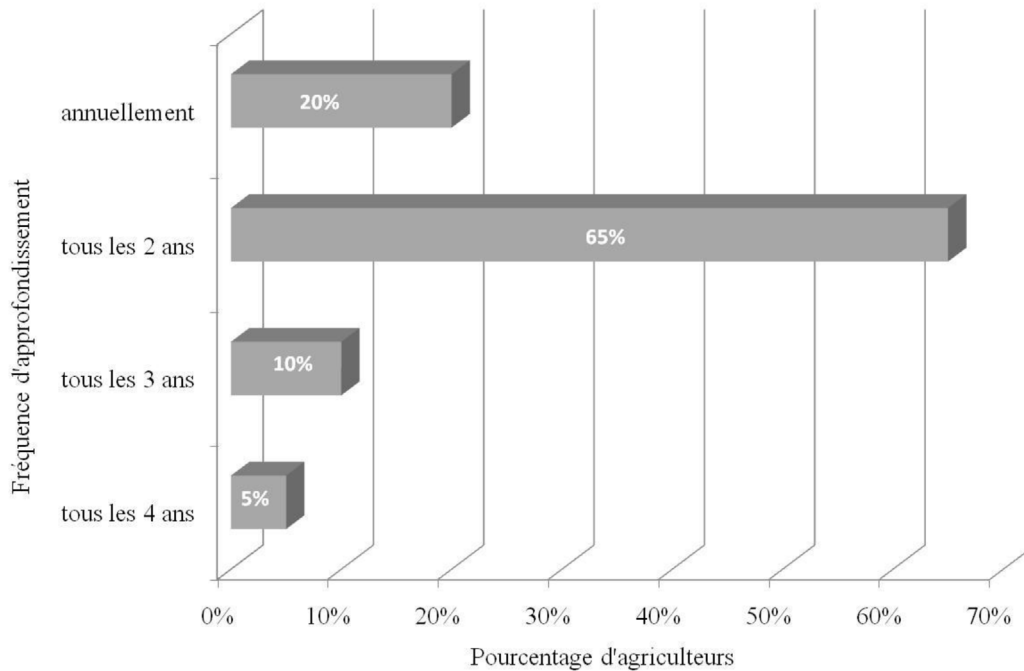


Fig. 2. Fréquence d'approfondissement des puits.
Fig. 2. Frequencies of wells deepening.

Tableau 1. Évolution des indicateurs d'accès économique aux eaux souterraines selon les catégories d'exploitations (Unité: DT/m³ pompé – 1 DT = 0,3 €).

Table 1. Evolution of economic access indicators to groundwater according to farms classes.

Catégories	Indicateurs	Profondeur de pompage simulée sur 6 ans (m)					
		40 ^a	42	44	46	48	50
Petites exploitations 2 ha	Coût énergie (1)	0,35	0,365	0,383	0,4	0,42	0,433
	Amortissement annuel (2)	0,125	0,15	0,165	0,198	0,238	0,355
	Coût total (1) + (2)	0,475	0,515	0,548	0,598	0,658	0,788
Moyennes exploitations 7 ha	Coût énergie (1)	0,35	0,365	0,383	0,4	0,42	0,433
	Amortissement annuel (2)	0,028	0,035	0,045	0,052	0,065	0,072
	Coût total (1) + (2)	0,378	0,4	0,428	0,452	0,485	0,505
Larges exploitations 15 ha	Coût énergie (1)	0,35	0,365	0,383	0,4	0,42	0,433
	Amortissement annuel (2)	0,01	0,012	0,015	0,025	0,03	0,035
	Coût total (1) + (2)	0,36	0,377	0,398	0,425	0,45	0,468

^a Profondeur de pompage en 2022.

pour toutes les catégories, comme le montre le [Tableau 1](#), son taux d'augmentation est néanmoins beaucoup plus élevé dans les petites exploitations que dans celles ayant une plus large superficie. Dans le cas d'une profondeur de pompage de 40 m, le coût annuel du mètre cube le plus élevé est observé dans les petites exploitations avec 0,445 DT/m³ (0,13 €) soit respectivement 1,26 et 1,35 fois plus élevé que celui des exploitations moyennes et de celles de plus large superficie. Au bout de 6 ans, soit pour une profondeur de 50 m, cette différence se creuse encore : il devient 1,56 et 1,68 fois plus élevé que celui observé dans les autres catégories. Cette inégalité du coût de l'irrigation entre les différents types d'exploitations est principalement due au différentiel de dotation en capital foncier. En effet, les petits agriculteurs doivent supporter un

coût d'investissement semblable à celui des grands agriculteurs, mais les grands agriculteurs ont la possibilité d'irriguer plus de superficie compte tenu de la grande taille de leur exploitation, bénéficiant ainsi des avantages de l'économie d'échelle.

Il en résulte que le coût diminue au fur et à mesure que la superficie augmente. Les plus grandes exploitations irriguent donc avec une eau moins chère que les petites exploitations, de sorte que l'accès à cette ressource est de plus en plus en faveur de cette catégorie d'agriculteurs. L'augmentation du coût de pompage, résultant directement de l'investissement additionnel (main-d'œuvre et équipements) pour l'approfondissement périodique des puits et de la consommation d'énergie, pourrait obliger les petits agriculteurs à renoncer à l'irrigation et par

Tableau 2. Évolution du ratio avantage-coût du mètre cube d'eau en fonction de la profondeur, selon les catégories d'exploitations.
Table 2. Evolution of the benefit-cost ratio per cubic meter of water depending on the pumping depth, according to farms classes.

Catégories d'exploitations	Profondeur de pompage simulée sur 6 ans (m)					
	40 ¹	42	44	46	48	50
Petites exploitations	1,119	1,038	0,962	0,893	0,829	0,767
Exploitations moyennes	1,465	1,358	1,262	1,171	1,118	0,985
Exploitations « larges »	1,603	1,585	1,502	1,465	1,394	1,302

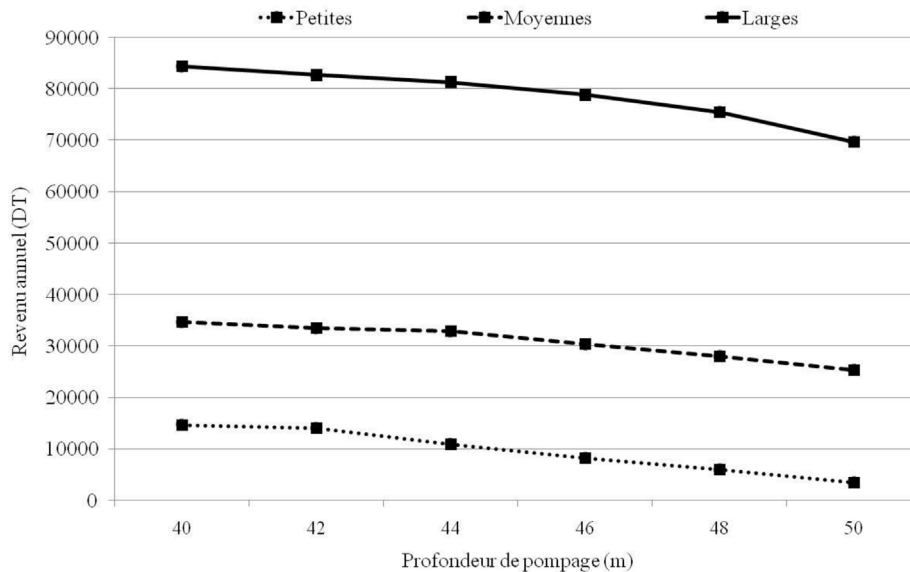


Fig. 3. Impact différentiel du rabattement additionnel de la nappe sur le revenu des catégories d'exploitations agricoles.
Fig. 3. Differential impact of the additional groundwater depletion on farms classes incomes.

conséquent à abandonner leur part légitime de cette ressource commune, amplifiant ainsi les inégalités déjà répandues dans la société rurale tunisienne. Les eaux souterraines seraient ainsi de plus en plus accaparées par une petite minorité d'agriculteurs en raison de leurs disponibilités en terre et en capital financier.

Le ratio avantage-coût (RAC) du mètre cube d'eau pompé, simulé pour une période de 6 ans pour les trois types d'exploitations, le confirme (Tab. 2). Ce tableau montre qu'au fur et à mesure de l'augmentation de la profondeur de pompage, le ratio avantage-coût diminue dans les trois types d'exploitations, mais d'une façon très inégalement répartie. En effet, c'est dans les petites exploitations que la diminution de ce ratio est la plus importante : il devient inférieur à 1 (0,956) à partir d'une profondeur de pompage de 44 m, soit au bout de 4 ans, signifiant ainsi qu'à partir de ce niveau de profondeur, l'irrigation devient non rentable pour cette catégorie d'exploitations.

Par contre, à ce niveau de profondeur, ce ratio demeure nettement supérieur à 1 (ratio = 1,5) pour les exploitations de plus grande superficie (> 20–30 ha), indiquant ainsi que ces exploitations pourraient continuer d'irriguer leurs terres et de jouir de leur part des ressources communes, à court et à moyen terme. Même au-delà d'une profondeur de pompage de 50 m, l'irrigation demeure toujours une opération rentable pour ces exploitations, puisque la valeur nette de la production dégagée

par un mètre cube d'eau est bien supérieure à son coût de pompage, ce qui n'est pas le cas pour les petites exploitations.

3.3 Impact différentiel sur le revenu

Outre les coûts directs indiqués précédemment, le rabattement de la nappe entraînerait également des coûts indirects pour les agriculteurs, représentés par la diminution des revenus en raison du déclin de la superficie irriguée et des changements dans les choix culturaux. La Figure 3 présente les résultats de simulation de l'impact du rabattement additionnel de la nappe sur les revenus selon la taille de l'exploitation. La pente négative des trois courbes indique que le revenu économique décline au fur et à mesure que la profondeur de pompage augmente – en d'autres termes, au fur et à mesure que le coût de pompage du mètre cube d'eau augmente. Toutefois, l'allure de la pente diffère selon les types d'exploitations.

Dans le cas des petites exploitations, la courbe présente deux phases distinctes : dans la première phase, l'allure de la pente est lisse et paraît semblable à celle des autres courbes. Durant cette phase, et dans le but de maximiser le revenu, le modèle propose des ajustements du programme optimum de production. Ces ajustements concernent à la fois la composition des cultures et la superficie totale irriguée, en optant pour les cultures qui assurent la meilleure valorisation de l'eau. Cela s'accompagne d'une transition des cultures estivales vers des

cultures d'hiver, moins consommatrices en eau mais aussi rémunératrices en termes de marges brutes obtenues par hectare. L'ajustement concerne aussi l'adoption de l'irrigation déficitaire (c'est-à-dire uniquement lors des stades de croissance les plus sensibles à la sécheresse) au lieu de l'irrigation à tous les stades de la culture. Par contre, au-delà d'une profondeur de pompage de 44 m, ces ajustements ne sont pas suffisants pour contrecarrer l'effet de l'accroissement du coût de pompage, car la pente négative de la courbe de revenu devient plus forte. Le modèle propose de réduire la surface irriguée, affectant ainsi fortement les revenus économiques espérés. Dans le cas de ce travail, ce seuil correspond à un niveau de pompage de 44 m. La chute des revenus entre la situation initiale (profondeur 40 m) et la fin de l'horizon (50 m) est de 76 %. L'irrigation ne serait dans ce cas plus une source de revenu pour cette catégorie d'agriculteurs et on assisterait à un abandon de cette activité.

Dans le cas des exploitations plus grandes (moyenne 15 ha), la chute des revenus entre les deux périodes n'est que 17 %. Pour les exploitations de taille moyenne, elle est de 27 %.

Ce graphique a une implication considérable : il montre que, bien que les petites exploitations soient les plus affectées à court terme, le rabatement impactera l'économie de tous les types d'exploitations dans le futur ; d'où l'intérêt de tous les agriculteurs d'œuvrer ensemble pour assurer une gestion sociale efficace de cette ressource collective.

4 Discussion

Nos résultats montrent que le coût résultant de la surexploitation des eaux souterraines est inégalement réparti entre les types d'exploitations. Les grands agriculteurs sont beaucoup moins touchés que les petits et moyens agriculteurs. Par conséquent, on s'attend à ce que les grands agriculteurs continuent de profiter de leur part des ressources en eaux souterraines car ils sont en mesure de remédier à la baisse de la nappe phréatique en approfondissant leurs puits à un coût plus faible. Les petits agriculteurs possédant moins de 3 ha seraient dans une situation assez vulnérable. La réalisation d'un forage apparaît clairement au-delà de leurs capacités financières. En effet, le coût de création d'un forage, sur une profondeur de 150 m, est au minimum de 20 000 DT (+/- 6000 €), auquel il faut ajouter 10 000 DT (+/- 3000 €) pour l'achat de la pompe et des autres équipements nécessaires, sans compter les frais de branchement au réseau électrique ou à défaut l'installation de panneaux photovoltaïques dont le coût minimum varie de 20 000 à 30 000 DT (+/- 6000 à 9000 €).

Outre les contraintes financières auxquelles font face les petites et moyennes exploitations, la législation en vigueur ne garantit pas l'équité d'accès aux eaux souterraines à toutes les couches sociales d'agriculteurs, mais favorise plutôt les agriculteurs disposant d'une grande superficie. En effet, selon le Code des eaux, la création d'un forage pour le captage des eaux à une profondeur dépassant 50 m est soumise à un ensemble de conditions, parmi lesquelles la possession d'une superficie minimale de 7 ha dans un seul lot.

Cette inégalité croissante de l'accès à l'eau d'irrigation a commencé à amorcer un processus de différenciation sociale qui aboutira en définitive à une accentuation de la pauvreté

pour les agriculteurs les plus fragiles. L'eau souterraine, dans le centre de la Tunisie, devient ainsi de plus en plus « l'amie du puissant », selon la terminologie de [Bédoucha \(1987\)](#). D'ailleurs, dans la localité de Kharrouba en particulier, on assiste à la genèse d'ébauches de « marchés de l'eau » où des agriculteurs, dont certains non originaires de la région, disposant de forages profonds, commencent à vendre l'eau d'irrigation, à raison de 10 à 15 DT par heure, aux petits agriculteurs avoisinants pour irriguer les oliviers, le blé et l'orge, qui ne nécessitent pas d'irrigations fréquentes. Dès lors, d'un statut de co-proprétaires de la ressource, ces petits agriculteurs se sont transformés en simple « acheteurs » d'eau, et ils doivent donc maintenant acheter leur part de la nappe, part à laquelle ils ont été forcés de renoncer, faute de moyens financiers et du fait de la législation contraignante (Code des eaux).

Afin de pouvoir continuer, du moins à court terme, à extraire l'eau souterraine et ainsi conserver leur part de cette précieuse ressource, les petits et moyens agriculteurs devraient opter pour des solutions collectives pour contrecarrer l'augmentation du coût de pompage de l'eau qui menace la durabilité économique de leurs exploitations. Une alternative innovante consisterait à s'équiper d'un forage collectif en réunissant quelques agriculteurs voisins, afin que tous les coûts d'investissement soient partagés par les copropriétaires. Le coût de pompage de l'eau serait amplement réduit. La planification de l'irrigation se ferait dans ce cas selon des règles précises définies par les copropriétaires. Ce type d'action a été mis en œuvre dans certains endroits, en Inde et au Pakistan, par les petits agriculteurs ne pouvant affronter individuellement le coût d'investissement, particulièrement élevé, d'un forage privé à l'échelle de leurs exploitations ([Sharma et Sharma, 2006](#) ; [Shah, 2014](#)). Selon [Sharma et Sharma \(2006\)](#), l'installation de puits coopératifs permet d'économiser sur l'investissement et conduit à une gestion plus efficace des ressources dans les zones où la rareté de l'eau devient sévère. Parallèlement, les petits et moyens agriculteurs devraient introduire de la flexibilité dans les choix cultureux et la gestion de l'irrigation, en abandonnant les cultures à haute valeur ajoutée, mais nécessitant beaucoup d'eau, au profit de cultures plus tolérantes au déficit hydrique. L'introduction de l'olivier, conduit en régime d'irrigation déficitaire, est prometteuse et elle devrait être encouragée pour être adoptée par les petits agriculteurs dans un contexte d'épuisement des eaux souterraines. Cette culture a connu une augmentation spectaculaire de prix sur le marché au cours des dernières années, ce qui en fait l'une des cultures les plus rentables. De plus, l'olivier est bien connu comme l'une des cultures les plus résistantes à la sécheresse dans la région.

Les résultats obtenus dans ce travail sont en concordance avec ceux obtenus par de nombreuses autres études menées dans d'autres pays. [Ameur *et al.* \(2017\)](#) ont montré que, dans le cas de la plaine du Saïss au Maroc, les exploitations bien dotées en capital foncier et financier ont profité des eaux souterraines par le biais d'un usage intensif, tandis que les effets de leur surexploitation ont provoqué la marginalisation des petites exploitations. Selon ces auteurs, cela conduirait à l'exclusion des petites exploitations familiales qui peuvent ainsi quitter l'irrigation à partir des eaux souterraines beaucoup plus pauvres qu'elles n'y sont entrées. Dans leurs travaux sur l'économie de l'irrigation dans les zones semi-arides du sud de

l'Inde, Fischer *et al.* (2022) ont montré que, quoique l'irrigation réduise la pauvreté, elle engendre aussi des fragilités, notamment pour les petites exploitations pauvres, dont la situation a été particulièrement aggravée par le rabattement de la nappe au cours des deux dernières décennies. Srivastava *et al.* (2017) ont montré que les petites exploitations du Punjab (Inde), disposant de propriété foncière limitée, souffrent 2 à 3 fois plus du rabattement de la nappe, en terme de coût, que celles dotées de propriétés foncières plus grandes.

Nos résultats montrent que la surexploitation des nappes, résultant de la défaillance des politiques de gouvernance, est à l'origine de la genèse d'un accès différentiel à cette ressource. Dans le but de préserver l'équité de l'accès à la ressource et de maintenir la viabilité économique des systèmes de production irrigués, une réglementation sociale basée sur l'intervention combinée du planificateur (l'État) et des usagers locaux serait la plus indiquée. L'expérience de nombreux pays a montré que les politiques de régulation des ressources collectives basées sur la mise en œuvre d'une multitude d'instruments, plutôt que d'un seul, ont les plus grandes chances de réussir (Kemper, 2007 ; Shah, 2014). L'implication des usagers locaux est d'autant plus justifiée que, si le rythme actuel de la surexploitation continue, toutes les catégories sociales d'agriculteurs seraient touchées à moyen terme. La durabilité des systèmes de production irrigués et la compétitivité des cultures seraient fortement menacées. Dans un tel contexte, il serait alors dans l'intérêt économique de toutes les catégories d'agriculteurs d'assurer une gestion collective de cette ressource, de façon à limiter les prélèvements pour freiner le rabattement de la nappe. L'expérience de la nappe de Bsissi Oued El Akarit dans le Sud Tunisien (Frija *et al.*, 2016b), où la gestion de l'eau souterraine est assurée par un comité élu parmi les agriculteurs, le GDA (Groupement de développement agricole), et assisté par le CRDA (Commissariat régional au développement agricole), constitue un exemple de succès qui pourrait peut-être être extrapolé à des zones similaires.

5 Conclusions

Cette étude a montré que l'utilisation non durable des eaux souterraines a entraîné des pertes économiques importantes pour les agriculteurs, matérialisées par des investissements supplémentaires dans l'irrigation, une augmentation du coût de pompage et une réduction des revenus. Toutefois, l'amplitude de cet impact est inégalement répartie. En effet, c'est dans les petites exploitations que le coût d'accès aux eaux souterraines est déjà le plus élevé, et augmentera le plus dans les années à venir. En conséquence, cette catégorie d'exploitations risque de perdre rapidement l'accès aux eaux souterraines, amplifiant ainsi encore les inégalités dans la société rurale tunisienne. Compte tenu de l'état avancé du rabattement des nappes, l'intervention des pouvoirs publics ne peut seule contrecarrer cette tendance, et la politique mise en œuvre, basée à la fois sur l'intervention directe (autorisations, interdictions, etc.) et l'incitation économique (subventions pour les équipements d'économie de l'eau) a déjà montré ses limites. Une réforme importante de la politique agricole est donc nécessaire pour empêcher une dégradation accentuée des eaux souterraines du pays et préserver l'équité d'accès à ces ressources. En plus de la mise en œuvre des instruments habituels, nous suggérons

une implication collective des usagers locaux, pour assurer, avec les services régionaux de développement, un contrôle efficace des prélèvements d'eau souterraine. Au-delà de cette politique, et puisqu'actuellement le secteur agricole constitue la principale source de revenus et d'emplois pour la population locale, le Gouvernement devrait aussi œuvrer à la création d'autres opportunités économiques dans ces régions, afin d'alléger la pression sur les ressources en eaux souterraines causée par l'extension horizontale et verticale de l'agriculture irriguée.

Références

- Abdelhafidh H, Bachta MS. 2016. Groundwater pricing for farms and Water Users Associations sustainability. *Arabian Journal of Geosciences* 9: 525. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2553-0>.
- Alam MF. 2016. Evaluating the benefit-cost ratio of groundwater abstraction for additional irrigation water on global scale. Stockholm (Sweden): KTH Royal Institute of Technology, Division of land and water resources engineering, 96 p.
- Ameur F, Kuper M, Lejars C, Dugué P. 2017. Prosper, survive or exit: Contrasted fortunes of farmers in the groundwater economy in the Saïss plain (Morocco). *Agricultural Water Management* 191: 207–217.
- Amichi H, Bouarfâ S, Kuper M, Ducourtieux O, Imache I, Fusillier JL, *et al.* 2012. How does unequal access to groundwater contribute to marginalization of small farmers? The case of public lands in Algeria. *Irrigation and Drainage* 61(1): 34–44. <https://doi.org/10.1002/ird.1660>.
- Anantha KH, Raju KV. 2008. Groundwater over-exploitation, costs and adoption measures in central dry zone of Karnataka. Bangalore (India): Institute for Social and Economic Change, working paper 202, 32 p.
- Bédoucha G. 1987. L'eau, l'amie du puissant : une communauté oasienne du Sud tunisien. Paris (France): Archives contemporaines, 441 p.
- Berahmani A, Faysse N, Errahj M, Gafsi M. 2012. Chasing water: Diverging farmer's strategies to cope with the groundwater crisis in the coastal Chaouia region in Morocco. *Irrigation and Drainage* 6(5): 673–681. <https://doi.org/10.1002/ird.1673>.
- Bouri S, Gasmi M, Jaouadi M, Souissi I, Lahlou Mimi A, Ben Dhia H. 2007. Étude intégrée des données de surface et de subsurface pour la prospection des bassins hydrogéothermiques : cas du bassin de Maknassy (Tunisie centrale). *Hydrological Sciences Journal* 52(6): 1298–1315. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.6.1298>.
- Cai X. 2008. Water stress, water transfer and social equity in Northern China: Implications for policy reforms. *Journal of Environmental Management* 87 (1): 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.12.046>.
- Chenini I, Ben Mamou A. 2009. Hydrochimie et caractérisation qualitative des ressources en eaux d'un système aquifère multicouche en zone aride : application au bassin de Maknassy (Tunisie centrale). *Sécheresse* 20(2): 217–222. <https://doi.org/10.1684/sec.2009.0180>.
- Daoud A, Trauma J. 2000. Rehabilitation of damaged lands in southern-central Tunisia: a case study of the southeastern side of Melloussi Djebel. *Sécheresse* 12(2): 111–120.
- DGRE. 2014. Annuaire piézométrique de la Tunisie. Tunisie: Ministère de l'Agriculture et des Ressources hydrauliques, 329 p.
- Divakara H, Chandrakanth MG. 2007. Beating negative externality through groundwater recharge in India: a resource economic analysis. *Environment and Development Economics* 12: 271–296. <https://doi.org/10.1017/S1355770X06003500>.
- Elloumi M. 2016. La gouvernance des eaux souterraines en Tunisie. IWMI Project Report N°7 «Groundwater Governance in the Arab World», 121 p.
- Fautras M. 2016. La terre entre racines, épargnes et spéculations. Appropriations foncières et recompositions de l'espace rural à Regueb (Tunisie). Thèse en Géographie. France: Université Paris Ouest Nanterre La Défense, 541 p.
- Feuillet S. 2001. Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre : exploration des interactions ressources-usages par les systèmes multi-agents :

- application à la nappe de Kairouan, Tunisie Centrale. Thèse. France: Université de Montpellier II, 350 p.
- Fischer C, Aubron C, Trouvé A, Sekhar M, Ruiz L. 2022. Groundwater irrigation reduces overall poverty but increases socioeconomic vulnerability in a semiarid region of southern India. *Scientific Reports* 12: 8850. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12814-0>.
- Frija A, Chebil A, Stijn S, Faysse N. 2014. A critical assessment of groundwater governance in Tunisia. *Water Policy* 16(2): 358–373. <https://doi.org/10.2166/wp.2013.038>.
- Frija A, Dhehibi B, Chebil A, Willholth KG. 2016a. Performance evaluation of ground water management instruments: The case of irrigation sector in Tunisia. *Groundwater for Sustainable Development* 1(1-2): 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2015.12.001>.
- Frija I, Frija A, Marlet S, Leghrissi H, Faysse N. 2016b. Gestion de l'usage d'une nappe par un groupement d'agriculteurs : l'expérience de Bsissi Oued El Akarit en Tunisie. *Alternatives Rurales* 4: 12.
- Gafrej R. 2017. Gouvernance de l'eau en Tunisie. Étude du cas du gouvernorat de Kasserine. *International Alert*, 74 p.
- Gharbi I, Elloumi M. 2023. L'agriculture irriguée en Tunisie : politiques hydrauliques et politiques de régulation foncière. *Cahiers Agricultures* 32: 17. <https://doi.org/10.1051/cagri/2023010>.
- Hazell PBR, Norton RD. 1986. *Mathematical Programming for Economic Analysis in Agriculture*. New York (USA): Mac Millan Publishing Company, 399 p.
- Hemdi M. 2022. Situation des ressources en eau dans le Gouvernorat de Sidi Bouzid. Regional seminar on: «The adoption of smart irrigation technologies in scheduling irrigation in water limited areas», 6-8 juin, Tunisia.
- Jouili M, Kahouli I, Elloumi M. 2013. Libéralisation de l'accès aux ressources hydrauliques et processus d'exclusion au niveau du gouvernorat de Sidi Bouzid. *Études Rurales* 192: 117–134. <https://doi.org/10.4000/etudesrurales.9929>.
- Kahouli I, Elloumi M. 2015. Libéralisation de l'accès à l'eau, tenures foncières et dynamique agraire: le cas de la délégation du Regueb dans le Gouvernorat de Sidi Bouzid. In : Vianey G, Requier-Desjardins M, Paoli JC, eds. *Accaparement, action publique, stratégies individuelles et ressources naturelles : regards croisés sur la course aux terres et à l'eau en contextes méditerranéens*. Montpellier (France): *Options Méditerranéennes*. Série B. Études et Recherches 72. pp. 177–188.
- Kemper KE. 2007. Instruments and institutions for groundwater management. In : Giordano M, Villholth JG. *The agricultural groundwater revolution: Opportunities and threats to development*. Wallingford (UK) / Colombo (Sri Lanka): CABI / IWMI, pp. 153–172.
- Khanfir R. 2017. Le stress hydrique en Tunisie. In : *La Méditerranée face à la raréfaction des ressources en eau*. Center of Mediterranean and International Studies, Konrad-Adenauer-Stiftung, 103 p.
- Mahin S, Ashok KR. 2011. Impact of groundwater over-draft on farm income and efficiency in crop production. *Agricultural Economics Research Review* 24: 291–300.
- MARHP. 2019. Répartition des superficies irriguées selon la source d'eau, 2017-2018, Tunisie, 213 p.
- MARHP. 2021. Rapport annuel du secteur de l'eau-année 2020, Tunisie, 282 p.
- McCarl AB, Spreen TH. 2011. *Applied Mathematical Programming Using Algebraic Systems*. College Station (TX, USA): Texas A&M University, 567 p.
- Sears L, Lin Lawell CYC, Torres G, Walter MT. 2021. Managing common pool resources: Lessons from groundwater resource extraction in California. Working paper, USA: Cornell University, 50 p.
- Shah T. 2014. *Groundwater Governance and Irrigated Agriculture*. Tec Background papers N°19. Stockholm (Sweden): Elanders eds, 71 p.
- Sharif M, Ashok KR. 2011. Impact of Groundwater Over-draft on Farm Income and Efficiency in Crop Production. *Agricultural Economics Research Review* 24: 291–300.
- Sharma P, Sharma RC. 2006. Factors determining farmer's decision for buying irrigation water: Study in groundwater market in Rajasthan. *Agricultural Economics Research Review* 19: 39–56.
- Soula R, Chebil A, Majdoub R, Crespo D, Albiac J, Kahil T. 2023. Evaluation of the Impact of Groundwater Management Policies Under Climate and Economic Changes in Tunisia. *Water Economics and Policy* 9(1): 2340005. <https://doi.org/10.1142/S2382624X23400052>.
- Srivastava SK, Ramesh C, Singh J, Kaur AP, Jain R, Kingsly I, *et al.* 2017. Revisiting groundwater depletion and its implications on farm economics in Punjab, India. *Current Science* 113(3): 422–429.
- Reddy VR. 2005. Costs of resource depletion externalities: a study of groundwater overexploitation in Andhra Pradesh, India. *Environment and Development Economics* 10: 533–556. <https://doi.org/10.1017/S1355770X05002329>.
- Robinson DW. 2002. Construction and operation cost of groundwater pumps for irrigation in the Riverine plain. Clayton (Australia): CSIRO Land and Water, 36 p.
- Rogers DH, Alam M. 1999. Comparing irrigation energy costs. *Irrigation Management Series MF-2360*, Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service, 8 p.
- Wichelns D. 2010. *Agricultural Water Pricing: United States*. In : *Sustainable Management of Water Resources in Agriculture*. Paris (France): OECD Publishing, 27 p. <https://doi.org/10.1787/9789264083578-16-en>.

Citation de l'article : El Amami H, Kompany JR, Muanda C. 2024. Rabattement des nappes et équité d'accès aux eaux souterraines : Analyse comparative des catégories d'exploitations agricoles dans le centre de la Tunisie. *Cah. Agric.* 33: 13. <https://doi.org/10.1051/cagri/2024008>