

# Utilisation des instruments économiques pour réduire l'épuisement des eaux souterraines dans le contexte du changement climatique : cas de l'aquifère de Mahdia-Ksour Essef en Tunisie

Rania Soula<sup>1,\*</sup> , Ali Chebil<sup>2</sup>, Rajouene Majdoub<sup>1</sup>, Taher Kahil<sup>3</sup> et José Albiac<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Institut Supérieur Agronomique de Chott Mariem, Université de Sousse, Tunisie

<sup>2</sup> Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF), Tunis, Tunisie

<sup>3</sup> Institut International d'Analyse des Systèmes Appliqués (IIASA), Laxenbourg, Autriche

<sup>4</sup> Centre de Recherche et de Technologie Agroalimentaire d'Aragon, Saragosse, Espagne

**Résumé** – La gestion durable des aquifères dans les régions arides et semi-arides est cruciale pour assurer la durabilité socio-environnementale. La régulation des prélèvements d'eau souterraine peut être réalisée à travers plusieurs instruments. La modélisation hydro-économique fournit des perspectives pour l'analyse de l'efficacité de ces instruments en vue d'une gestion efficace des ressources en eau. En effet, ces modèles offrent aux décideurs des informations importantes qui peuvent les aider à optimiser leurs décisions en matière d'allocation de l'eau. Cette étude évalue l'impact des instruments économiques tels que les quotas, la taxe environnementale et le système quota-taxe, sur la durabilité de l'aquifère Mahdia-Ksour Essef ainsi que sur l'économie locale, tout en intégrant les projections climatiques futures grâce à la modélisation hydro-économique. En explorant divers scénarios de gestion de l'eau, l'étude fournit des recommandations pour améliorer l'allocation des ressources. Les politiques de quotas, ajustés en fonction de la recharge naturelle, ainsi que les taxes et le système quota-taxe sont examinés et comparés au scénario de statu quo. Les résultats montrent que les politiques basées sur les quotas permettent une reconstitution plus rapide de l'aquifère et génèrent des revenus totaux après taxes supérieurs à ceux avant taxes. Par exemple, sous le scénario de changement climatique le plus pessimiste, le quota de préservation de la ressource en eau pour les générations futures pourrait augmenter le niveau de l'aquifère à la fin de la période de simulation de 1,69 m. Ces politiques pourraient influencer les revenus agricoles, en favorisant des cultures plus rentables et résilientes à la sécheresse, telles que les olives et les amandes. Cette étude souligne l'efficacité des modèles hydro-économiques en tant qu'approches pour évaluer la gestion des eaux souterraines. Ainsi, elle oriente les décideurs vers des choix stratégiques favorisant la durabilité et l'efficacité, particulièrement dans un contexte de changement climatique et de surexploitation des ressources en eau.

**Mots clés** : surexploitation / modélisation hydro-économiques / quota-taxe / changement climatique / Mahdia

**Abstract** – **Economic instruments for reducing groundwater depletion in the context of climate change: Case of Mahdia Ksour Essef aquifer in Tunisia.** Sustainable management of aquifers in arid and semi-arid regions is crucial to ensure socio-environmental sustainability. Groundwater extraction regulation can be implemented through various instruments. Hydro-economic modeling methods offer significant insights which help to evaluate these instruments for effective groundwater regulation. Nonetheless, regulators can leverage the information generated by hydro-economic models to enhance their decision-making processes related to water allocation. This study evaluates the impact of water management instruments such as quotas, environmental taxes, and the quota-tax system on the sustainability of the Mahdia-Ksour Essef aquifer and the local economy, while also considering future climate projections, using hydro-economic modeling. By exploring various water management scenarios, the study offers strategic insights for enhancing resource allocation. The policies of quotas, adjusted according to natural recharge, as well as taxes and combined policies (quota-tax system) are examined and compared to the Business As

\*Auteur correspondant : [raniaso1@hotmail.fr](mailto:raniaso1@hotmail.fr)

Usual (BAU) scenario. The results show that policies based on quotas (only quotas and quota-taxes) allow for a faster replenishment of the aquifer and generate total revenues after taxes that are higher than those before taxes. For example, under the most pessimistic climate change scenario, a preservation quota for future generations could increase the actual aquifer level by 1.69 meters at the end of the simulation period. These policies could influence agricultural revenue by promoting more profitable and drought-resistant crops, such as olives and almonds. This study highlights the effectiveness of hydro-economic models as optimal approaches for evaluating groundwater management. Thus, it contributes to guiding policymakers toward strategic choices that promote sustainability and efficiency, particularly in the complex context of climate change and groundwater resource overexploitation.

**Keywords:** overexploitation / hydro-economic modelling / quota-tax / climate change / Mahdia

## 1 Introduction

L'utilisation des eaux souterraines pour l'agriculture représente une part significative des besoins en eau à l'échelle mondiale, atteignant environ 70 % (Siebert *et al.*, 2010). Toutefois, dans les régions arides et semi-arides, les aquifères superficiels, essentiels à l'irrigation agricole, subissent une pression croissante en raison de la demande accrue en eau, des pratiques agricoles intensives et d'une régulation insuffisante (Petit, 2004). Cette surexploitation engendre des impacts environnementaux graves, tels que la baisse des niveaux d'eau, l'intrusion d'eau salée et la dégradation des écosystèmes aquatiques (Rodríguez-Estrella, 2012 ; Mammadova et Negri, 2024). Il est donc crucial d'adopter des instruments de gestion efficaces, pour promouvoir une utilisation plus durable des ressources en eau (Montginoul *et al.*, 2016).

À l'échelle internationale, la surexploitation des nappes phréatiques a des effets environnementaux significatifs, nécessitant des stratégies de gestion adaptées. En Inde, l'État a utilisé le prix de l'électricité comme levier indirect en limitant l'accès gratuit à l'électricité pour les agriculteurs pratiquant l'irrigation durant la saison sèche (Aubriot, 2006). Aux États-Unis, au Colorado, une taxe marginale sur l'utilisation de l'eau souterraine est envisagée pour réduire la surconsommation, en alignant les coûts marginaux externes supportés par les utilisateurs (Duke *et al.*, 2020). Les effets des taxes environnementales ont également été étudiés dans divers aquifères, notamment en Californie (MacEwan *et al.*, 2017), en Espagne (Kahil *et al.*, 2015) et en Tunisie (Soula *et al.*, 2023). En Chine, les prélèvements sont régulés par des quotas et des compteurs d'eau intelligents, bien que leur efficacité soit influencée par les régulations institutionnelles et les conditions sociétales des agriculteurs (Aarnoudse et Bluemling, 2017). En Espagne, la combinaison de quotas et de taxes a montré des résultats positifs, générant des valeurs plus élevées de bien-être social total par rapport à des instruments individuels (Esteban et Dinar, 2013). D'autres instruments efficaces incluent les contrats de nappes au Maroc, qui clarifient les droits et responsabilités des parties prenantes (Del Vecchio, 2020), et les marchés de l'eau, qui facilitent l'échange de droits de prélèvement entre utilisateurs pour améliorer la gestion des ressources (Safari *et al.*, 2023).

La littérature propose plusieurs approches pour remédier à la surexploitation des nappes phréatiques, telles que les marchés de l'eau, les contrats de nappes, les quotas de prélèvement, et les taxes sur l'extraction de l'eau, ainsi que leur combinaison (Molle et Closas, 2019). L'efficacité de ces instruments dépend de leur rigueur d'application, de leur

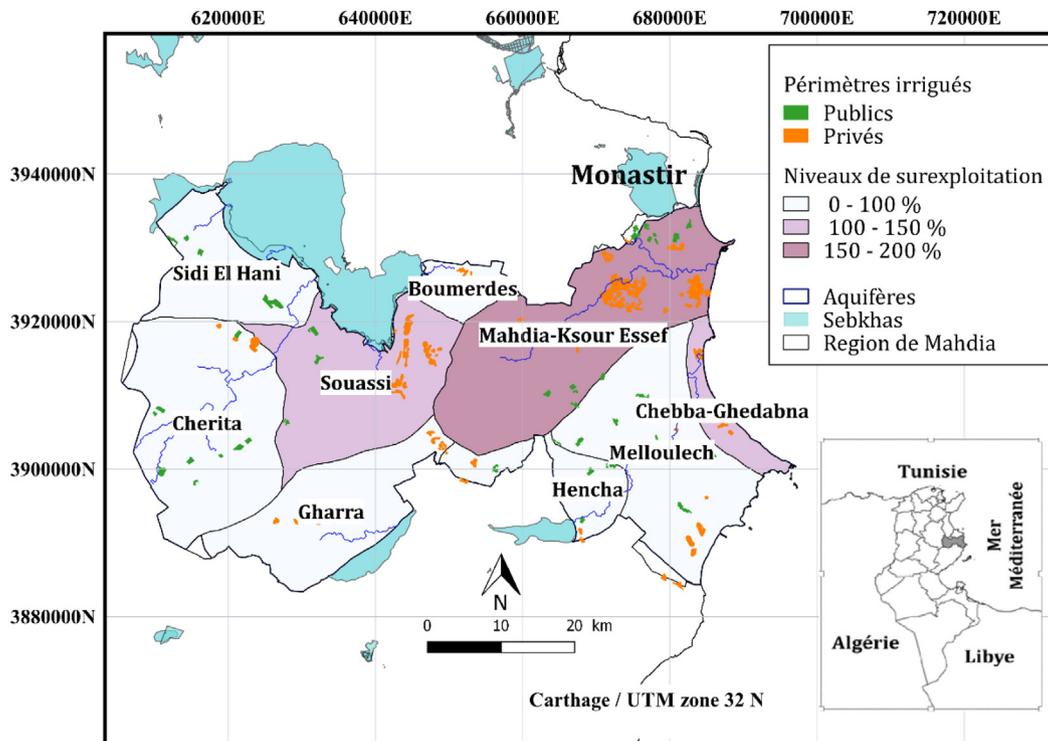
flexibilité spatiale et temporelle, et de l'intégration des agents économiques concernés (Mitter et Schmid, 2021). Elle varie également en fonction des contextes hydrologiques, des hétérogénéités spatiales, des technologies agricoles et des impacts du changement climatique (CC), qui peuvent différer d'une région à l'autre (Cai *et al.*, 2015).

En Tunisie, l'exploitation des nappes phréatiques a atteint 903 Mm<sup>3</sup> en 2015, dépassant largement les réserves estimées à 746 Mm<sup>3</sup> par an, ce qui accroît les risques d'intrusion d'eau saumâtre dans les zones côtières (Ayadi, 2017 ; Onagri, 2021). Les nappes phréatiques sont principalement utilisées pour l'irrigation dans le pays (Hamdane, 2014). La surexploitation de ces nappes est particulièrement préoccupante dans la région de Mahdia, qui fait face à une grave pénurie d'eau. Cette situation est aggravée par une forte croissance démographique et une population rurale élevée (INS, 2014). Les nappes phréatiques de Mahdia, souvent considérées comme des ressources communes, souffrent d'une tragédie des biens communs en raison d'une gestion collective insuffisante (Soula *et al.*, 2021).

Dans la région de Mahdia, les Groupements de développement agricole (GDA) sont responsables de la gestion des périmètres publics irrigués, couvrant 2916 hectares. Ces périmètres dépendent principalement des eaux des barrages, tels que celui de Nabhana, et des nappes profondes. En revanche, les périmètres privés irrigués, représentant 4530 hectares, exploitent principalement les nappes phréatiques (AFA, 2010). Les agriculteurs de ces périmètres privés ne bénéficient pas du soutien des GDA et se procurent leur eau principalement par des puits de surface. Ces périmètres se caractérisent par une intensification élevée des cultures, incluant principalement l'arboriculture, notamment les oliviers, et des cultures maraîchères sous serre. Cette intensification contribue à la surexploitation des nappes phréatiques et à la salinisation des sols.

Il est donc crucial de réévaluer et de renforcer les politiques existantes, en intégrant des stratégies adaptées aux défis climatiques (Delorit et Block, 2020 ; Yang *et al.*, 2020), afin d'améliorer la gestion durable des ressources en eau souterraine et de répondre aux défis croissants auxquels la Tunisie est confrontée (Abdelmalek et Nouiri, 2020).

Dans ce contexte, l'instauration de quotas et de taxes pourrait offrir des solutions efficaces pour assurer une gestion durable des aquifères surexploités. Cette étude vise à évaluer l'efficacité des instruments politiques, tels que les quotas et les taxes ainsi que leur combinaison, dans la gestion de la surexploitation de l'aquifère phréatique Mahdia-Ksour Essef, en tenant compte les défis posés par le changement climatique, notamment sous le scénario le plus pessimiste, dit "RCP 8,5", du 5<sup>e</sup> rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur



**Fig. 1.** Localisation de l'aquifère phréatique Mahdia-Ksour Essef.  
**Fig. 1.** Localization of the Mahdia-Ksour Essef shallow aquifer.

l'évolution du climat (GIEC) (ONERC, 2015 ; INM, 2021). En définissant des scénarios spécifiques et en comparant leurs impacts sur les revenus avant et après taxes, les niveaux de nappe et le stockage de l'aquifère sur une période de 50 ans, cette recherche, à travers une approche de modélisation hydro-économique (HE), cherche à déterminer la politique la plus efficace sous le scénario climatique envisagé, afin de réduire la surexploitation de l'aquifère et d'améliorer la gestion des ressources en eau pour les générations futures.

## 2 Méthodologie

### 2.1 Cadre d'application : l'aquifère phréatique de Mahdia

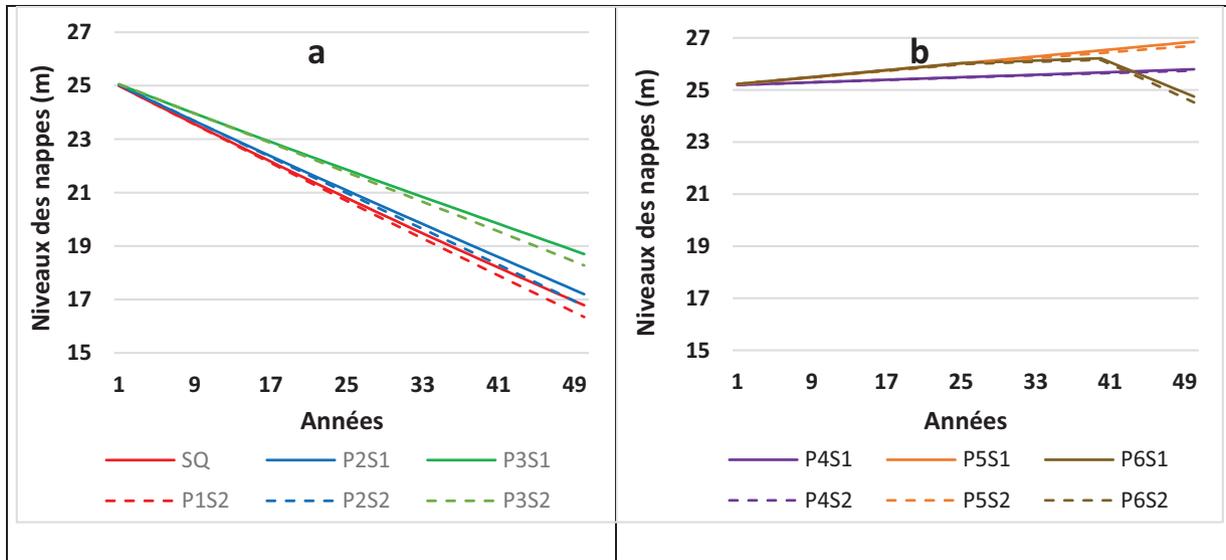
La région de Mahdia, située au centre-est de la Tunisie, est caractérisée par un climat semi-aride. L'aquifère phréatique Mahdia-Ksour Essef, couvrant une superficie de 611 km<sup>2</sup>, joue un rôle crucial dans l'économie locale. L'irrigation, qui dépend essentiellement des eaux souterraines, constitue l'activité économique principale de la région. L'aquifère « Mahdia-Ksour Essef » a été surexploité à hauteur de 191 % en 2016 en raison de l'utilisation excessive de l'eau pour l'irrigation (CRDA, 2017) (Fig. 1). Le nombre de puits de surface a doublé en l'espace de 20 ans, passant de 1016 en 1985 à 2078 puits en 2015 (CRDA, 2018). Le système de culture pratiqué repose essentiellement sur l'arboriculture (oléiculture) et les cultures maraîchères. L'aquifère phréatique est principalement rechargé par les précipitations. Cependant, la recharge des eaux souterraines par les précipitations est susceptible de diminuer avec le temps en raison des changements climatiques (Besbes et Chahed, 2023). La recharge artificielle est une autre solution pour rétablir le niveau

de la nappe. Cependant, seulement 19 % des eaux usées traitées sont réutilisées pour la recharge artificielle des nappes. Les eaux souterraines se caractérisent par leur forte salinité, qui a augmenté dans certaines zones côtières et près des sebkhas en raison des intrusions marines.

### 2.2 Programmes d'optimisation

Le modèle hydro-économique développé dans cette étude intègre des données sur les cultures, leurs systèmes d'irrigation, les revenus des agriculteurs, les coûts de production des cultures, les coûts de pompage, ainsi que la dynamique de l'aquifère (voir matériel supplémentaire Tab. S1). Ce modèle permet d'évaluer les impacts de différentes politiques, notamment sous les effets du changement climatique (réduction de la recharge sous le scénario RCP 8,5, voir matériel supplémentaire Équation S7), sur le stock de l'aquifère, l'allocation de l'eau pour l'irrigation des cultures, les revenus avant taxes des agriculteurs et les revenus après taxes. Les scénarios sont élaborés et comparés à la gestion actuelle de l'aquifère de Mahdia-Ksour Essef (Statu Quo 'SQ'). Le modèle identifie les extractions optimales pour chaque culture et pour chaque scénario, en tenant compte des contraintes de disponibilité des terres et de l'eau.

Dans la gestion actuelle de l'aquifère de Mahdia-Ksour Essef 'SQ', la surface irriguée par le système d'irrigation goutte-à-goutte durant la première année de la simulation est de 1040 hectares, ce qui représente 64 % de la surface totale irriguée (1620 ha), tandis que la surface irriguée par le système d'irrigation de surface est de 580 hectares (36 % de la surface totale). Ces valeurs sont issues de l'enquête sur les périmètres irrigués privés élaborée par l'Agence foncière



**Fig. 2.** Les niveaux de nappe sous les différents scénarios. (a) accès libre à l’aquifère (P1) et taxes (P2 : taxe de prélèvement d’eau, P3 : taxe environnementale) sous les scénarios climatiques (S1 : conditions normales, S2 : RCP 8,5), (b) quotas (P4 : quota pour éviter la surexploitation de la nappe, P5 : quota de préservation de la nappe pour les générations futures) et système quota-taxe (P6 : quotas et taxe environnementale) sous les scénarios climatiques.

**Fig. 2.** Water table levels under different scenarios. (a) open access (P1) and taxes (P2: water abstraction tax, P3: environmental tax) under climate scenarios (S1: normal conditions, S2: RCP 8.5), (b) quotas (P4: overexploitation prevention quota, P5: preservation quota for future generations) and the quota-tax system (P6: combined quotas and environmental tax) under climate scenarios.

agricole (AFA) en 2010 (AFA, 2010). L’ensemble des cultures (oliviers, pêcheurs, amandiers, fourrages, céréales, légumes) définit six groupes de cultures dans la région étudiée. Ces cultures sont irriguées à l’aide de systèmes d’irrigation (surface et goutte-à-goutte), et la période de planification s’étend sur un horizon de 50 ans.

Sous la politique de libre accès, l’agriculteur optimise sa demande d’eau  $W(t)$  pour maximiser son revenu total avant taxes ( $\Pi_{AG}$ , voir matériel supplémentaire Éq. S1) sous les contraintes de dynamique de l’aquifère et de superficie de culture total (voir matériel supplémentaire Éq. S6), ainsi que sous la contrainte de la théorie économique qui suggère que dans des conditions de marché libre, la productivité marginale de l’eau devrait être égale au coût marginal de l’eau (voir matériel supplémentaire Annexe 1).

Sous la politique de taxe partielle, l’agriculteur choisit le niveau d’eau d’irrigation  $W(t)$  qui maximise son revenu total avant taxe environnementale ( $\Pi_{CP}$ , voir matériel supplémentaire Éq. S2), en réduisant les coûts d’opportunité  $C_{pw}(t)$  (voir matériel supplémentaire Éq. S2.2) de son revenu avant taxes, sous les mêmes contraintes de dynamique de l’aquifère et de superficie de culture.

Sous la politique de taxe environnementale, l’agriculteur choisit le niveau d’eau d’irrigation  $W(t)$  qui maximise son revenu total après taxes ( $\Pi_{CT}$ , voir matériel supplémentaire Éq. S3), en réduisant les coûts externes  $D(t)$  (voir matériel supplémentaire Éq. S3.2) liés aux dommages environnementaux et les coûts d’opportunité  $C_{pw}(t)$  (voir matériel supplémentaire Éq. S2.2) de son revenu total avant taxes, sous les mêmes contraintes.

Sous la politique de quotas, l’agriculteur doit prélever une quantité annuelle d’eau  $W(t)$  inférieure à celle fixée par l’État (Quota (t), voir matériel supplémentaire Éq. S4) ;

il maximise son revenu total avant taxes sous cette nouvelle contrainte.

Sous la politique de système quota-taxe, l’agriculteur doit limiter son prélèvement annuel d’eau  $W(t)$  à une quantité fixée par l’État (Quota, voir matériel supplémentaire Éq. S5) pendant les 40 premières années. En cas de dépassement de ce quota, une taxe environnementale est appliquée.

### 3 Résultats

#### 3.1 Impact des instruments économiques sur la durabilité de l’aquifère

Le modèle hydro-économique a été résolu pour étudier l’impact potentiel de 12 scénarios sur l’hydrologie de la nappe et l’économie des agriculteurs. Le scénario ‘SQ’ correspond à l’accès libre à la nappe ; dans ce cas, le pompage est illimité et les agriculteurs maximisent leurs revenus avant taxes. Les niveaux annuels totaux de la nappe phréatique « Mahdia Ksour Essef » décroissent de 8,66 m, soit 0,16 m/an à partir du niveau initial  $h_0=25$  m, et les extractions d’eau sont maximales (Fig. 2). Le volume de stockage de l’aquifère pendant toute la période de simulation, mesuré comme la différence entre la recharge annuelle cumulée, le retour à la nappe, et la quantité d’eau pompée pour l’irrigation, révèle des variations significatives sous différents scénarios de gestion. Sous la politique de libre accès dans des conditions normales (‘P1S1’ ou ‘SQ’), le volume de stockage est de  $-256,77 \text{ Mm}^3$ . La mise en œuvre de la taxe de prélèvement d’eau ‘P2’ permet une amélioration du stock de 4,9%, tandis que la taxe environnementale ‘P3’ conduit à une augmentation de 22,8% par rapport au ‘SQ’. Les politiques de quota pour éviter la surexploitation de la nappe ‘P4’ et de quota de préservation de la nappe pour les

générations futures 'P5' offrent des réductions substantielles du déficit, avec des augmentations respectives de 107,3 % et 119,8 %, indiquant une inversion significative de la tendance à la déplétion. Cette récupération du stock est due aux réductions significatives des prélèvements et aux flux positifs résultant du retour d'eau provenant du système d'irrigation. La combinaison de quotas et de taxe environnementale 'P6' réduit également le déficit de 94,6 % (Tab. 1).

Sous les scénarios de changement climatique, les politiques de taxe, de quota, ainsi que le système quota-taxe montrent des diminutions des stocks par rapport aux conditions normales. Par exemple, le système quota-taxe 'P6' réduit la surexploitation de 92,4 %, entraînant une diminution de 2,2 % du stock sous le scénario RCP 8,5.

Les Figures 3c et 3d démontrent que les politiques de taxes et de quotas contribuent à réduire les extractions annuelles d'eau par rapport au 'SQ', avec les extractions les plus faibles observées sous le scénario de quota de préservation de la nappe pour les générations futures en présence de changement climatique. La Figure 2a illustre les niveaux de nappe sous les politiques de taxes par rapport au 'SQ'. Sous la taxe de prélèvement d'eau 'P2', les niveaux de nappe diminuent progressivement de 0,15 m/an, entraînant une diminution totale de 8,24 m au cours de la période de simulation. La taxe environnementale 'P3' induit une diminution de 0,12 m/an, soit une diminution totale de 6,73 m. Malgré ces baisses, les niveaux de nappe sous les politiques de taxe restent supérieurs à ceux observés sous le 'SQ'. En présence de conditions de changement climatique, les politiques de taxe continuent de maintenir des niveaux de nappe plus élevés que ceux du 'SQ', soulignant leur efficacité relative dans un contexte de stress hydrique accru.

La Figure 2b montre l'impact des politiques de quotas sur les niveaux de nappe. Les politiques de quotas non seulement réduisent le pompage et protègent la nappe contre la surexploitation, mais augmentent également le niveau initial de la nappe ( $H_0 = 25$  m). Sous les conditions normales, le quota pour éviter la surexploitation 'P4', les niveaux de nappe augmentent de 0,79 m, tandis que sous le quota de préservation pour les générations futures 'P5', l'augmentation atteint 1,8 m au cours des cinq décennies de simulation. En revanche, la politique du système quota-taxe 'P6' indique une diminution plus modeste du niveau de nappe de 0,46 m.

Les effets du changement climatique entraînent des réductions significatives des niveaux de nappe de chaque politique par rapport aux conditions normales : les diminutions sont de 2,62 % sous 'P1S2', de 2,50 % sous 'P2S2', de 2,30 % sous 'P3S2', de 0,196 % sous 'P4S2', de 0,608 % sous 'P5S2', et de 0,9 % sous 'P6S2'. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité relative des politiques de quota 'P5' et de système quota-taxe 'P6' pour atténuer les effets négatifs du changement climatique sur les niveaux de nappe.

### 3.2 Impact des instruments économiques sur les revenus des agriculteurs et les superficies des cultures

Les résultats obtenus indiquent que la réduction du pompage par le biais des taxes, des quotas, et du couplage de ces deux instruments, entraîne des changements dans les choix des cultures et la taille de la superficie irriguée, se

traduisant par une diminution des revenus annuels des agriculteurs par rapport au 'SQ'. La Figure 4 montre qu'avec les politiques de taxes sur le prélèvement d'eau et de taxes environnementales, les revenus annuels avant taxes deviennent plus élevés que ceux obtenus sous le 'SQ' après trois décennies de simulation. Sous les politiques de taxe, les revenus annuels après taxes sont légèrement inférieurs aux revenus annuels avant taxes (Fig. 4f).

La Figure 4g montre qu'avec les politiques de quotas, les revenus annuels avant taxes des agriculteurs diminuent considérablement, mais restent stables au fil du temps par rapport à ceux obtenus sous le 'SQ'. En revanche, contrairement aux taxes, les politiques de quotas permettent d'obtenir des revenus annuels après taxes légèrement supérieurs aux revenus annuels avant taxes (Fig. 4h). La politique de système quota-taxe génère également des revenus annuels après taxes supérieurs aux revenus annuels avant taxes pendant les 40 premières années de simulation, c'est-à-dire lors de l'application des quotas, et des revenus annuels après taxes inférieurs aux revenus annuels avant taxes pendant la dernière décennie, lorsque la taxe environnementale est appliquée. Les figures montrent également que le changement climatique a un impact négatif sur les revenus annuels avant et après taxes dans tous les scénarios de simulation.

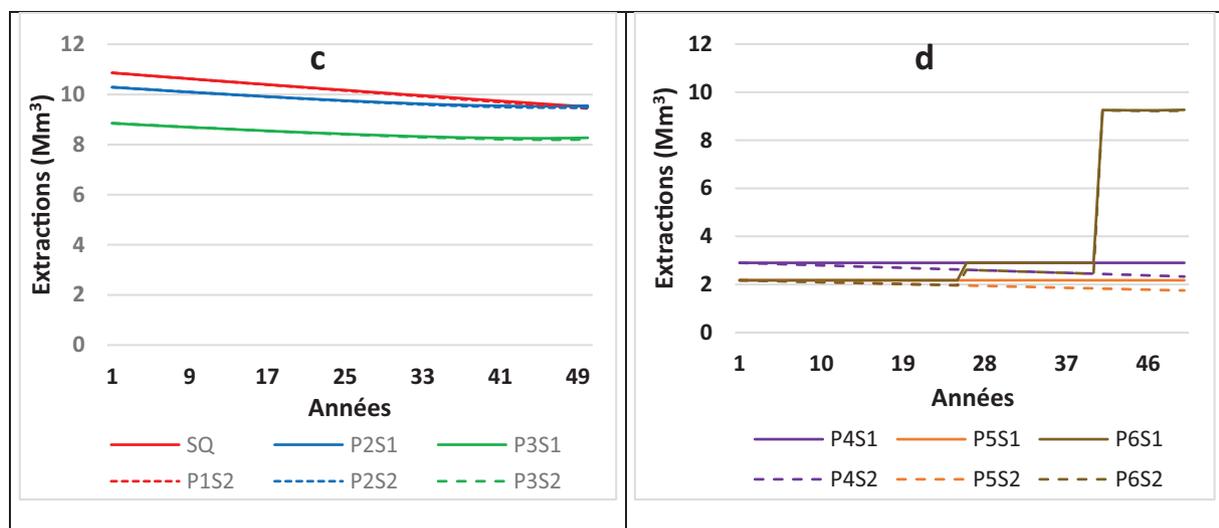
L'analyse des revenus totaux (somme des revenus annuels actualisés et calculés sur toute la période de simulation) avant et après taxes sous différentes politiques de gestion de l'aquifère Mahdia-Ksour Essef révèle des tendances significatives (Tab. 1). Dans des conditions normales, les politiques de taxes, telles que la taxe de prélèvement d'eau ('P2S1') et la taxe environnementale ('P3S1'), conduisent à une augmentation du revenu total après taxes et à une diminution de revenu total avant taxe par rapport au 'SQ'. Par exemple, la taxe environnementale 'P3S1' génère un revenu total avant taxes de 73,06 millions TND, ce qui représente une diminution de 0,6 % par rapport au 'SQ' (73,50 millions TND). En revanche, le revenu total après taxes sous cette politique atteint 68,73 millions TND, enregistrant une augmentation de 1,35 % par rapport au 'SQ' (67,81 millions TND).

En contraste, les politiques de quotas, telles que le quota visant à éviter la surexploitation 'P4S1' et le quota de préservation pour les générations futures 'P5S1', affichent des revenus totaux après taxes supérieurs aux revenus totaux avant taxes, avec des valeurs respectives de 47,83 et 41,53 millions TND pour les revenus totaux après taxes, contre 47,43 et 40,44 millions TND pour les revenus totaux avant taxes. De même, la politique du système quota-taxe 'P6S1' génère un revenu total après taxes supérieur au revenu total avant taxes (43,62 contre 42,87 millions TND), dépassant ainsi les revenus totaux avant et après taxes obtenus sous le quota de préservation pour les générations futures 'P5S1'. Les résultats soulignent également l'efficacité des politiques basées sur les quotas, même dans le scénario climatique pessimiste (S2 : RCP 8,5), qui assurent la durabilité des ressources à long terme et la génération de revenus après taxes supérieurs à ceux avant taxes, comme le montre le Tableau 1.

Les principales cultures observées au cours de la première année de simulation de la politique 'SQ' sont les légumes irrigués par goutte-à-goutte, représentant 33 % de la superficie totale, suivis par les oliviers également irrigués par goutte-à-goutte, avec 24 % de la superficie totale. Les céréales et les

**Tableau 1.** Étude de performance des politiques de gestion de l'eau pour la nappe phréatique de Mahdia-Ksour Essef sous conditions normales et scénario RCP 8,5.  
**Table 1.** Performance assessment of groundwater management policies for the Mahdia-Ksour Essef shallow aquifer under normal conditions and the RCP 8.5 scenario.

Scénarios	Niveau de nappe à la fin de la période de simulation (m)	Variation de stock de l'aquifère pendant toute la période de simulation (Mm <sup>3</sup> )	Superficie irriguée pendant toute la période de simulation (1000 ha)	Revenu total avant taxes (million TND)	Revenu total après taxes (million TND)
<b>Politiques sous conditions normales (CN)</b>					
P1S1 (SQ, CN)	16,78	-256,77	76,72	73,50	67,81
P2S1 (Taxe de prélèvement d'eau, CN)	17,19	-244,19	74,497	73,56	68,22
P3S1 (Taxe environnementale, CN)	18,70	-198,20	66,324	73,06	68,73
P4S1 (Quota pour éviter la surexploitation de la nappe, CN)	25,79	18,65	37,344	47,43	47,834
P5S1 (Quota de préservation de la nappe pour les générations futures, CN)	<b>26,85</b>	51,04	32,940	<b>40,44</b>	<b>41,53</b>
P6S1 (système quota-taxe, CN)	24,74	-13,80	41,91	42,87	43,620
<b>Politiques sous RCP 8,5</b>					
P1S2 (libre accès sous RCP 8,5)	16,34	-270,15	76,576	73,45	67,60
P2S2 (Taxe de prélèvement d'eau sous RCP 8,5)	16,76	-257,68	74,363	73,53	68,02
P3S2 (Taxe environnementale sous RCP 8,5)	18,27	-211,69	66,190	73,02	68,53
P4S2 (Quota pour éviter la surexploitation de la nappe sous RCP 8,5)	25,74	17,13	35,618	45,99	46,37
P5S2 (Quota de préservation de la nappe pour les générations futures sous RCP 8,5)	<b>26,69</b>	46,35	31,645	<b>39,17</b>	<b>40,20</b>
P6S2 (système quota-taxe sous RCP 8,5)	24,52	-20,54	40,88	41,72	42,40



**Fig. 3.** Les extractions sous les différents scénarios. (c) accès libre à l'aquifère (P1) et taxes (P2: taxe de prélèvement d'eau, P3: taxe environnementale) sous les scénarios climatiques (S1: conditions normales, S2: RCP 8.5), (d) quotas (P4: quota pour éviter la surexploitation de la nappe, P5: quota de préservation de la nappe pour les générations futures) et système quota-taxe (P6: quotas et taxe environnementale) sous les scénarios climatiques.

**Fig. 3.** Groundwater extractions under different scenarios. (c) open access (P1) and taxes (P2: water abstraction tax, P3: environmental tax) under climate scenarios (S1: normal conditions, S2: RCP 8.5), (d) quotas (P4: overexploitation prevention quota, P5: preservation quota for future generations) and the quota-tax system (P6: combined quotas and environmental tax) under climate scenarios.

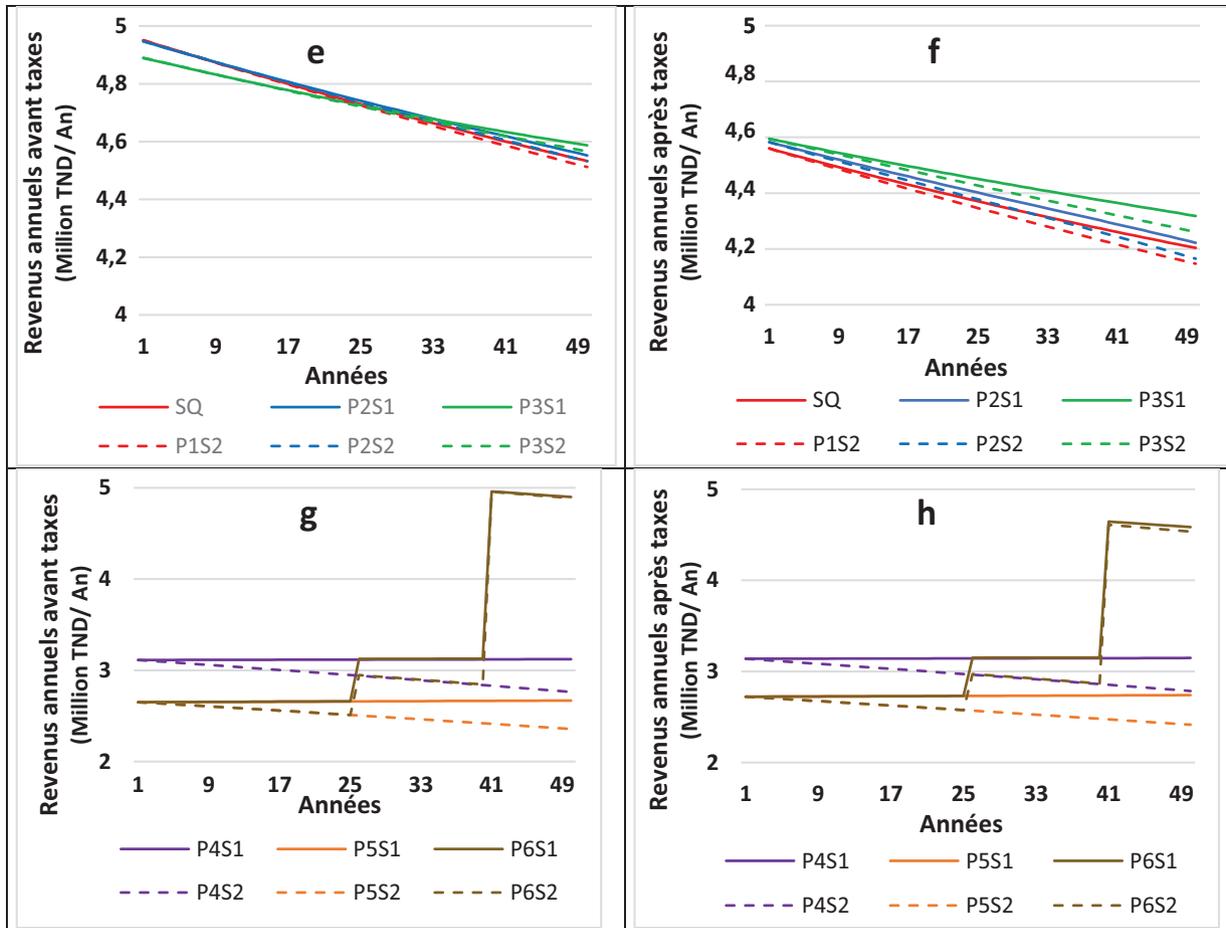
fourrages, irrigués par irrigation superficielle, ne couvrent que 15 % de la superficie totale. Sous le scénario 'SQ' ou 'P1S1', la superficie totale initiale de 1620 ha a diminué de 10 % à la fin de la période de simulation, principalement en raison de la réduction des superficies de fourrages (de 51 %) et de céréales (de 45 %), tout en maintenant la même répartition des cultures au cours des cinq décennies. La superficie totale irriguée pendant toute la période de simulation est de 76 720 ha. Sous le scénario de libre accès en conditions de changement climatique 'P1S2', la superficie totale irriguée a diminué de 0,2 %, montrant ainsi l'effet négatif de la sécheresse sur les superficies irriguées (Tab. 1).

Sous la politique de taxe de prélèvement d'eau, qui intègre les coûts d'opportunité, les résultats montrent que les superficies totales irriguées diminuent de 2,8 % sous le scénario 'P2S1' (conditions normales) et de 3,06 % sous le scénario 'P2S2' (changement climatique) par rapport au 'SQ' (Tab. 1). Malgré cette légère diminution, principalement due à la réduction des superficies des fourrages et des céréales irriguées par irrigation superficielle, toutes les cultures observées au cours de l'année initiale sont maintenues dans les choix productifs optimaux annuels des agriculteurs. Sous la politique de taxe environnementale, qui intègre les coûts d'opportunité et les coûts externes, les superficies totales irriguées diminuent de 13,5 % sous le scénario 'P3S1' (conditions normales) et de 13,7 % sous le scénario 'P3S2' (changement climatique) par rapport au 'SQ' (voir Tab. 1). Les résultats de la simulation montrent une réduction des superficies consacrées aux céréales et aux fourrages irrigués par irrigation superficielle dans les conditions normales (scénario 'P3S1'). Sous les conditions de changement climatique (scénario 'P3S2'), ces cultures disparaissent complètement des choix de cultures optimaux à la dernière décennie de la simulation. En revanche, les superficies dédiées

aux oliviers, aux légumes, aux amandiers et aux pêchers restent présentes dans la combinaison optimale des cultures.

Sous la politique de quota, les résultats montrent la disparition des cultures maraîchères (légumes) irriguées par irrigation superficielle. En revanche, les oliviers, amandiers, pêchers et légumes irrigués par goutte-à-goutte constituent les principales cultures proposées par la solution optimale. Sous le scénario 'P4S1', qui réduit le pompage au niveau de la recharge naturelle constante, la superficie irriguée totale pendant la période de simulation a été réduite de 48,75 % par rapport au 'SQ'. Sous le scénario 'P5S1', qui réduit le pompage à 75 % de la recharge naturelle constante, la superficie irriguée totale pendant la période de simulation a été réduite de 57,02 % par rapport au 'SQ'. Ces résultats suggèrent un conflit significatif entre la préservation de la nappe pour les générations futures et le maintien de l'économie de l'aquifère 'Mahdia-Ksour Essef'. La comparaison entre les scénarios de quotas sous changement climatique et sous conditions normales montre que la superficie irriguée totale diminue de 5,13 % sous le scénario 'P4S2' par rapport au scénario 'P4S1', et de 1,72 % sous le scénario 'P5S2' par rapport au scénario 'P5S1'. Les oliviers conservent la part la plus importante de la production, représentant 53 % de la superficie irriguée en début de période et 51 % en fin de période de simulation.

Les résultats de la politique de système quota-taxe sous les conditions normales, désignée 'P6S1', montrent que la superficie irriguée totale diminue de 45,5 % par rapport au 'SQ' (voir Tab. 1). Les superficies annuelles irriguées augmentent progressivement d'une période à une autre: au cours des 25 premières années, cette superficie atteint 659 hectares par an, puis croît pour atteindre 747 hectares par an entre 25 et 40 ans, pour finalement atteindre 1425 hectares par an à la fin de la période d'analyse. Durant



**Fig. 4.** Les revenus annuels avant taxes (e,g) et après taxes (f,h) sous les différents scénarios : accès libre à l’aquifère (P1), taxes (P2 : taxe de prélèvement d’eau, P3 : taxe environnementale), quotas (P4 : quota pour éviter la surexploitation de la nappe, P5 : quota de préservation de la nappe pour les générations futures) et système quota-taxe (P6 : quotas et taxe environnementale) sous les scénarios climatiques (S1 : conditions normales, S2 : RCP 8,5).

**Fig. 4.** Annual revenues before taxes (e,g) and after taxes (f,h) under different scenarios: open access (P1), taxes (P2: water abstraction tax, P3: environmental tax), quotas (P4: overexploitation prevention quota, P5: preservation quota for future generations), and the quota-tax system (P6: combined quotas and environmental tax) under climate scenarios (S1: normal conditions, S2: RCP 8.5).

les 40 premières années, les oliviers irrigués par goutte-à-goutte demeurent la culture prédominante, occupant 300 hectares (45 % de la superficie irriguée) au cours des 25 premières années, et 310 hectares (42 %) entre 25 et 40 ans. Les cultures maraîchères, également irriguées par goutte-à-goutte, suivent en importance, avec 120 hectares (19 %) durant les 25 premières années et 180 hectares (35 %) entre 25 et 40 ans. Cependant, au cours de la dernière décennie, en raison de l’application de la taxe, les cultures maraîchères irriguées par goutte-à-goutte deviennent les principales cultures, s’étendant sur 490 hectares (37 % de la superficie irriguée), tandis que les oliviers représentent 390 hectares (27 % de la superficie irriguée). Les pêcheurs irrigués par goutte-à-goutte et les amandiers irrigués par irrigation de surface occupent respectivement 12,5 % et 13,5 % de la superficie irriguée durant les 40 premières années. Ces proportions diminuent ensuite pour atteindre 6,88 % et 6,94 % au cours de la dernière décennie. Les oliviers irrigués par irrigation de surface représentent 9,2 % de la superficie irriguée pendant les

40 premières années de simulation. Cette proportion diminue pour atteindre 6,8 % à la fin de la période de simulation. Les cultures maraîchères irriguées par irrigation de surface, ainsi que les céréales et les fourrages irrigués par goutte-à-goutte, disparaissent du système au cours des 40 premières années. Toutefois, à la fin de la période de simulation, elles représentent respectivement 8 %, 5 % et 3 % de la superficie irriguée.

Les résultats de la politique de système quota-taxe et taxes sous RCP 8,5, dénommé ‘P6S2’, révèle une réduction de la superficie totale irriguée de 46,82 % par rapport au ‘SQ’ (voir Tab. 1). La répartition des cultures reste identique à celle observée dans les conditions normales. Pendant les 40 premières années, les oliviers irrigués par goutte-à-goutte dominant avec 45 % de la superficie irriguée, suivis des cultures maraîchères irriguées par goutte-à-goutte à hauteur de 19 %. Les amandiers irrigués par irrigation de surface et les pêcheurs irrigués par goutte-à-goutte occupent respectivement 13,5 % et 12,5 %, tandis que les oliviers irrigués par irrigation de surface représentent 9 %. Dans la dernière décennie, les

cultures maraîchères irriguées par goutte-à-goutte deviennent prédominantes.

## 4 Discussion

Les résultats indiquent que les instruments économiques peuvent instaurer la durabilité dynamique de l'aquifère en augmentant les niveaux de la nappe phréatique, mais ils entraînent une diminution des revenus des agriculteurs. Cela soulève un conflit entre la croissance de l'économie régionale et la préservation des réserves en eaux souterraines (Pereau, 2020). Les politiques de taxes soulignent l'importance d'inclure le coût d'opportunité 'P2', mais surtout les coûts externes 'P3' dans la maximisation du revenu total après taxes, principalement sous les conditions du changement climatique, afin de maintenir la durabilité de l'aquifère « Mahdia-Ksour Essef ». En effet, sous ces politiques de taxes, les niveaux de nappe annuels diminuent avec le temps, mais restent toujours supérieurs au 'SQ'. De plus, les revenus avant taxes diminuent au cours des trois premières décennies pour augmenter dans la dernière décennie de simulation. Autrement dit, les agriculteurs peuvent compenser les pertes subies au cours des trois premières décennies suite à la diminution des extractions en utilisant des combinaisons optimales de cultures. Cependant, les résultats montrent que l'impact du coût d'opportunité économique est faible sur la gestion de la nappe et que l'intégration des coûts externes est plus significative. Ces coûts externes, supportés par les agriculteurs, peuvent réduire leurs superficies de cultures irriguées par irrigation superficielle, les contraignant à se tourner vers l'irrigation la plus économe en eau et la plus rentable. De même, Amami *et al.* (2024) indiquent que l'introduction de l'olivier, cultivé sous un régime d'irrigation déficitaire, montre un potentiel intéressant et devrait être encouragée pour les petits agriculteurs, notamment en raison de l'augmentation des prix de cette culture sur le marché. Les travaux de Gisser et Sánchez (1980) ont montré que la mise en place d'un contrôle optimal des prélèvements basé uniquement sur l'intégration des coûts d'opportunité est négligeable par rapport à une gestion sans régulation, utilisant un modèle mathématique simplifié (Gisser et Sánchez, 1980 ; Koundouri, 2004). D'un autre côté, Esteban et Albiac (2011), MacEwan *et al.* (2017), Martínez-Dalmau *et al.* (2023) et Soula *et al.* (2023) prennent également en compte les externalités négatives induites par le pompage des eaux souterraines sur l'écosystème et montrent que la taxe environnementale augmente les niveaux de la nappe phréatique tout en réduisant les revenus des agriculteurs par rapport à 'SQ', constituant ainsi une bonne alternative pour la gestion de la nappe, même dans des situations de sécheresse.

Les politiques basées sur les quotas 'P4', 'P5' et 'P6' peuvent entraîner une augmentation des niveaux de la nappe dès la première année de simulation. Cependant, elles sont également associées à une diminution significative des revenus. Ces politiques garantissent une protection immédiate et durable des eaux souterraines dans des conditions de changement climatique et génèrent des revenus totaux après taxes supérieurs à ceux avant taxes. Ainsi, elles peuvent s'avérer particulièrement efficaces dans les aquifères soumis à une surexploitation sévère.

L'application d'une taxe environnementale permet de réduire les prélèvements optimaux à 8,271 Mm<sup>3</sup> à la fin de la période de simulation, ce qui entraîne une réduction des prélèvements de 23 % et une diminution de la surexploitation de 32,5 %. La fixation d'un quota de prélèvement égal à cette valeur optimale, où l'externalité environnementale est internalisée, permet d'obtenir des résultats similaires (Bredehoeft et Young, 1970). Cependant, cette taxe environnementale ne suffit pas à restaurer l'aquifère (voir matériel supplémentaire Annexe 2). Par conséquent, cette mesure doit être accompagnée d'autres types de taxes, telles qu'une taxe indirecte (par exemple, en augmentant le prix de l'énergie, comme le suggèrent Soula *et al.* [2023]), ou être combinée avec des quotas plus stricts, comme le démontre cette étude. Cependant, face aux taxes indirectes, les agriculteurs ont développé des méthodes innovantes en intégrant de nouvelles sources d'énergie pour éviter ces charges supplémentaires liées à la consommation d'énergie. Ferchichi *et al.* (2024) ont montré qu'à partir de 2014, un nombre croissant d'agriculteurs a commencé à adopter l'énergie solaire, notamment dans les zones rurales éloignées des centres urbains. Toutefois, cet accès accru à des sources d'énergie renouvelables en Tunisie peut également exacerber la surexploitation des ressources en eau.

Aarnoudse *et al.* (2016) et Oulmane *et al.* (2019) montrent que l'augmentation des prix de l'eau et l'instauration de quotas peuvent entraîner une réduction de la demande d'eau d'irrigation. Toutefois, les quotas se révèlent les plus efficaces pour gérer l'utilisation de l'eau, en assurant une protection immédiate, bien qu'ils entraînent une baisse notable des revenus des agriculteurs et des superficies irriguées. Feuillette (2001), Amami *et al.* (2014) et Chebil *et al.* (2018) montrent également que l'instauration d'un quota semble constituer la mesure la plus efficace pour limiter l'abaissement des nappes et le coût social de l'intervention de gestion en Tunisie (les travaux de recherche sont menés dans les régions de Kairouan et Cap-Bon). Selon Ndahangwapo *et al.* (2024), les quotas contribuent à prévenir la surexploitation des aquifères en protégeant leur capacité de stockage à court et à long terme. Ils sont donc essentiels dans la gestion des ressources souterraines limitées, permettant une régulation stricte et une utilisation durable de l'eau, particulièrement nécessaire dans les régions où l'eau est déjà rare.

Montginoul et Rinaudo (2009), Madani et Dinar (2013), ainsi que Valle-García *et al.* (2024) montrent que les taux d'acceptation des quotas d'eau sont élevés par rapport à ceux des taxes environnementales. Cette préférence s'explique par plusieurs facteurs. D'une part, les quotas sont perçus comme plus équitables, car chaque utilisateur reçoit une allocation proportionnelle à ses besoins, indépendamment de sa capacité de paiement. D'autre part, les quotas sont plus transparents : leur mise en œuvre est plus simple et leur compréhension est facilitée par rapport aux taxes, qui peuvent être perçues comme complexes et difficiles à expliquer aux utilisateurs. Cependant, les quotas risquent d'être refusés par les agriculteurs qui supportent toutes les pertes économiques. Ainsi, le quota doit s'accompagner d'un système de compensation des revenus pour préserver l'aquifère et être accepté par les agriculteurs (Varela-Ortega *et al.*, 2011). Par ailleurs, l'application des

quotas devrait être accompagnée de l'introduction de nouvelles technologies, telles que des compteurs pour mesurer les volumes prélevés, afin de faciliter le contrôle par les Groupements de développement agricole (GDA) (Aarnoudse et Bluemling, 2017). Cependant, les GDA des périmètres publics irrigués en Tunisie rencontrent des difficultés importantes. Les faiblesses du système des GDA sont principalement dues à l'interventionnisme des Commissariats régionaux de développement agricole (CRDA) dans leurs activités administratives et de gestion, ainsi qu'à des capacités financières et administratives insuffisantes pour entretenir et maintenir les infrastructures (Frija *et al.*, 2015). Ces limites montrent que les GDA ne remplissent pas la plupart des conditions énoncées par Ostrom (1990) pour assurer une gestion collective efficace des ressources. De même, les GDA de la région de Mahdia ne respectent pas ces conditions (Soula *et al.*, 2021). Dans les périmètres privés, l'absence de GDA complique davantage la gestion et le suivi des prélèvements d'eau souterraine, rendant difficile la mise en œuvre de mesures collectives et la coordination entre les différents acteurs locaux. Par conséquent, il est nécessaire de renforcer la capacité institutionnelle des GDA dans les périmètres publics utilisant les eaux souterraines profondes et de créer des GDA dans les périmètres privés utilisant les eaux souterraines de surface, ce qui permet d'encourager une plus grande participation des agriculteurs dans la prise de décision. Un exemple de réussite en gestion collective à suivre est le GDA dédié au contrôle des puits dans la zone de Bsissi Oued El Akarit, au sud de la Tunisie (Frija *et al.*, 2016). Ce succès repose sur trois facteurs clés : l'ouverture au dialogue de l'administration avec les agriculteurs, la compétence et la légitimité des leaders du GDA, et la nécessité d'un financement durable.

## 5 Conclusion

Les politiques de gestion des eaux souterraines mises en œuvre en Tunisie jusqu'à présent, telles que les instruments de régulation et les subventions pour l'acquisition de matériel d'irrigation économe en eau, n'ont pas réussi à endiguer leur surexploitation. Cette situation pourrait conduire à la dégradation totale des nappes après quelques décennies, si des mesures plus rigoureuses ne sont pas adoptées rapidement.

Nos résultats montrent que les politiques de taxes, de quotas et le système quota-taxe entraînent une augmentation des niveaux de la nappe, une réduction des superficies irriguées, une modification des choix de cultures, ainsi qu'une diminution des revenus pour les agriculteurs par rapport au statu quo.

Les politiques de gestion basées sur des quotas, notamment celles visant à préserver la nappe pour les générations futures, sont non seulement les plus efficaces, mais aussi essentielles pour garantir la durabilité à long terme des ressources en eau, en particulier face aux défis croissants posés par le changement climatique. Ces politiques imposent des limites strictes et immédiates sur les prélèvements, permettant ainsi d'augmenter rapidement le niveau de la nappe au-delà de son niveau initial dès les premières années de simulation, tout en prévenant sa surexploitation et en générant des revenus totaux après taxes supérieurs à ceux avant taxes.

Ainsi, les politiques basées sur des quotas offrent une protection immédiate et à long terme des eaux souterraines surexploitées dans la région de Mahdia. Toutefois, pour que ces quotas soient réellement applicables, il est crucial de surmonter certains défis. La faiblesse des contrôles des prélèvements, due à l'absence de compteurs volumétriques fiables, constitue un obstacle majeur à une gestion durable des nappes. Des investissements significatifs sont nécessaires pour installer ces compteurs et garantir un suivi rigoureux par les autorités. De plus, il est essentiel d'harmoniser les modes de décision entre la gestion régionale et les interventions locales afin d'assurer une gestion participative plus cohérente et efficace des ressources en eau. L'absence de Groupements de développement agricole (GDA) dans les périmètres irrigués privés utilisant les nappes phréatiques complique davantage la gestion et le suivi des prélèvements. La création de GDA dans ces périmètres et le renforcement de leur rôle pourraient améliorer la coopération entre les agriculteurs et garantir une gestion plus durable des ressources en eau.

La mise en œuvre efficace des politiques de quotas et de système quota-taxe, soutenue par des infrastructures adéquates et une coordination renforcée entre les acteurs, constitue une voie prometteuse pour la préservation des ressources en eau souterraines en Tunisie.

## Matériel supplémentaire

Le matériel supplémentaire est disponible sur <https://www.cahiersagricultures.fr/10.1051/cagri/2025003/olm>.

## Remerciements

Cette étude a été rendue possible grâce à l'opportunité de stage offerte par le Rectorat de l'Université de Sousse (Tunisie), qui a permis à l'auteur de réaliser un séjour de 5 mois au Centre de Recherche et de Technologie Agroalimentaire d'Aragon (Saragosse, Espagne), dans le cadre de ses études doctorales.

## Financement

Le financement de cette étude a été assuré par une bourse d'alternance du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique de la Tunisie.

## Références

- Aarnoudse E, Qu W, Bluemling B, Herzfeld T. 2016. Groundwater quota versus tiered groundwater pricing: Two cases of groundwater management in north-west China. *International Journal of Water Resources Development* 33(6): 917–934. <https://doi.org/10.1080/07900627.2016.1240069>.
- Aarnoudse E, Bluemling B. 2017. Controlling groundwater through smart card machines: The case of water quotas and pricing mechanisms in Gansu Province, China. Colombo (Sri Lanka): International Water Management Institute (IWMI), 20 p. <https://doi.org/10.5337/2016.224>.
- Abdelmalek MB, Nouiri I. 2020. Study of trends and mapping of drought events in Tunisia and their impacts on agricultural production. *Science of the Total Environment* 734: 139–311. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139311>.

- AFA (Agence foncière agricole). 2010. Studies of All Private Irrigated Areas in the Mahdia Region. Mahdia (Tunisia).
- Amami HE, Bachta MS, Ben Nasr J, Ben Nouna B. 2014. Le «Quota» comme instrument de régulation de l'exploitation des eaux souterraines : application à la plaine de Kairouan. *Annales de l'INRGREF* 19: 93–110.
- Amami HE, Kompany JR, Muanda C. 2023. Rabattement des nappes et équité d'accès aux eaux souterraines : analyse comparative des catégories d'exploitations agricoles dans le centre de la Tunisie. *Cahiers Agricultures* 33(13): 10. <https://doi.org/10.1051/cagri/2024008>.
- Aubriot O. 2006. Baisse des nappes d'eau souterraine en Inde du Sud : forte demande sociale et absence de gestion de la ressource. *Géocarrefour* 81(1): 83–90. <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.1805>.
- Ayadi M. 2017. Strategie de mobilisation des ressources en eau en Tunisie. [2023/02/03]. [https://energypedia.info/images/3/3c/Strategie\\_de\\_mobilisation\\_des\\_ressources\\_en\\_eau\\_en\\_Tunisie.pdf](https://energypedia.info/images/3/3c/Strategie_de_mobilisation_des_ressources_en_eau_en_Tunisie.pdf).
- Besbes M, Chahed J. 2023. Predictability of water resources with global climate models. Case of Northern Tunisia. *Géoscience* 1 (22): 465–486. <https://doi.org/10.5802/crgeos.219>.
- Bredheoht JD, Young RA. 1970. The temporal allocation of groundwater – a simulation approach. *Water Resources Research* 6(1): 3–21. <https://doi.org/10.1029/WR006i001p00003>.
- Cai X, McKinney DC, Lasdon LS. 2015. Integrated hydrologic and economic modeling of water resources. *Journal of Hydrology* 523: 20–35.
- Chebil A, Kahil T, Oueslati B. 2018. Policy measures for reducing aquifer depletion in a context of climate change: The case of the coastal area of Cap-Bon (Tunisia). *New Medit.* [2023/05/06]. <https://newmedit.iamb.it/2018/12/15/policy-measures-for-reducing-aquifer-depletion-in-a-context-of-climate-change-the-case-of-the-coastal-area-of-cap-bon/>.
- CRDA (Commissariat régional au développement agricole). 2017. Annuaire de la qualité chimique des eaux souterraines dans le gouvernorat de Mahdia. CRDA Mahdia-Tunisia, 8 p.
- CRDA (Commissariat régional au développement agricole). 2018. Water resources in Mahdia. CRDA Mahdia-Tunisia, 20 p.
- Delorit JD, Block PJ. 2020. Cooperative water trade as a hedge against scarcity: Accounting for risk attitudes in the uptake of forecast-informed water option contracts. *Journal of Hydrology* 583: 124–626. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124626>.
- Del Vecchio K. 2020. Gestion des eaux souterraines au Maroc : entre priorités du développement agricole et préoccupations environnementales. [2023/02/06]. <https://www.comite-costea.fr/wp-content/uploads/Gestion-des-eaux-souterraines-au-Maroc-Kevin-Del-Vecchio.pdf>.
- Duke JM, Liu Z, Suter JF, Messer KD, Michael HA. 2020. Some taxes are better than others: An economic experiment analyzing groundwater management in a spatially explicit aquifer. *Water Resources Research* 56(7): e026426. <https://doi.org/10.1029/2019WR026426>.
- Esteban E, Albiac J. 2011. Groundwater and ecosystems damages: Questioning the Gisser-Sánchez effect. *Ecological Economics* 70 (11): 2062–2069. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.06.004>.
- Esteban E, Dinar A. 2013. Modeling Sustainable Groundwater Management: Packaging and Sequencing of Policy Interventions. *Journal of Environmental Management* 119: 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.12.047>.
- Ferchichi I, Mekki I, Taouajouti N, Faysse N, Zairi A, Chaïbi T, *et al.* 2023. La visualisation spatiale : un outil de dialogue sur la gestion des eaux souterraines dans les palmeraies de Kébili, Tunisie. *Cahiers Agricultures* 33(24): 10. <https://doi.org/10.1051/cagri/2024021>.
- Feuillet S. 2001. Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre : exploration des interactions ressource usages par les systèmes multi-agents : application à la nappe de Kairouan, Tunisie centrale. Montpellier (France): IRD, 344 p.
- Frija A, Dhehibi B, Chebil A, Villholth K. 2015. Performance evaluation of groundwater management instruments: The case of irrigation sector in Tunisia. *Groundwater for Sustainable Development* 1: 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2015.12.001>.
- Frija I, Frija A, Marlet S, Leghrissi H, Faysse N. 2016. Gestion de l'usage d'une nappe par un groupement d'agriculteurs : l'expérience de Bsissi Oued El Akarit en Tunisie. *Alternatives Rurales* 4: 1–12. <https://alternatives-rurales.org/numero-4/>.
- Gisser M, Sánchez DA. 1980. Competition versus optimal control in groundwater pumping. *Water Resources Research* 31: 638–642. <https://doi.org/10.1029/WR016i004p00638>.
- Hamdane A. 2014. Management of Groundwater Resources (Aquifers) as Commons Good: Tunisia Case. Tunis (Tunisia): SCET.
- INM (National Institute of Meteorology of Tunisia). 2021. Climate Change. [2023/03/10]. <https://www.meteo.tn/fr/changement-climatique>.
- INS (Institut National de la Statistique). 2014. Mahdia through the General Census of the Population. [2023/04/11]. [http://census.ins.tn/sites/default/files/14\\_mahdia\\_0.pdf](http://census.ins.tn/sites/default/files/14_mahdia_0.pdf).
- Kahil MT, Dinar A, Albiac J. 2015. Modeling water scarcity and droughts for policy adaptation to climate change in arid and semiarid regions. *Journal of Hydrology* 522: 95–109. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.042>.
- Koundouri P. 2004. Potential for groundwater management: Gisser-Sánchez effect reconsidered. *Water Resources Research* 40: W06S16. <https://doi.org/10.1029/2003WR002164>.
- MacEwan D, Cayar M, Taghavi A, Mitchell D, Hatchett S, Howitt R. 2017. HEmodeling of sustainable groundwater management. *Water Resources Research* 53(3): 2384–2403. <https://doi.org/10.1002/2016WR019639>.
- Madani K, Dinar A. 2013. Exogenous regulatory institutions for sustainable common pool resource management: Application to groundwater. *Water Resources and Economics* 2: 57–76. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2013.08.001>.
- Mammadova L, Negri S. 2023. Understanding the impacts of overexploitation on the Salento aquifer: A comprehensive review through well data analysis. *Sustainable Futures* 7: 100188. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2024.100188>.
- Martínez-Dalmau J, Gutiérrez-Martín C, Kahil T, Berbel J. 2023. Impact of alternative water policies for drought adaptation in the Guadalquivir Mediterranean river basin, southern Spain. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 47: 101444. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101444>.
- Mitter E, Schmid E. 2021. Informing groundwater policies in semi-arid agricultural production regions under stochastic climate scenario impacts. *Ecological Economics* 180: 106908. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106908>.
- Molle F, Closas A. 2019. Groundwater governance. In : *Encyclopedia of Water: Science, Technology, and Society*. Wiley Online Library, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1002/9781119300762.wsts0191>.
- Montginoul M, Rinaudo JD. 2009. Quels instruments pour gérer les prélèvements individuels en eau souterraine ? *Économie rurale* 310: 40–56. <https://doi.org/10.4000/economierurale.2149>.

- Montginoul M, Rinaudo JD, Brozović N, Donoso G. 2016. Controlling groundwater exploitation through economic instruments: Current practices, challenges and innovative approaches. In : Jakeman AJ, Barreteau O, Hunt RJ, Rinaudo JD, Ross A, ed. *Integrated Groundwater Management*. Cham (Germany): Springer, pp. 321–336. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_22).
- Ndahangwapo NN, Thiam DR, Dinar A. 2023. Land Subsidence Impacts and Optimal Groundwater Management in South Africa. *Environmental Resource Economics* 87: 1097–1126. <https://doi.org/10.1007/s10640-024-00857-y>.
- Onagri. 2021. Rapport national du secteur de l'eau année – 2021. [2023/04/18]. [http://www.onagri.tn/uploads/secteur/au/RNE2021\\_VersionFianle\\_MarsF2023\\_ONAGRI.pdf](http://www.onagri.tn/uploads/secteur/au/RNE2021_VersionFianle_MarsF2023_ONAGRI.pdf).
- ONERC. 2015. Scénarios d'évolution des gaz à effet de serre. Fiche technique. [2025/02/04] [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/ONERC\\_Fiche\\_scenarios\\_evolution\\_GES\\_GIEC.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/ONERC_Fiche_scenarios_evolution_GES_GIEC.pdf).
- Ostrom E. 1990. *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge (UK): Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807763>.
- Oulmane A, Frija A, Brabez F. 2019. Modelling farmers' responses to irrigation water policies in Algeria: An economic assessment of volumetric irrigation prices and quotas in the Jijel-Taher irrigated perimeter. *Irrigation and drainage* 68(3): 507–519. <https://doi.org/10.1002/ird.2327>.
- Pereau JC. 2020. Conflicting objectives in Groundwater Management. *Water Resources and Economics* 31: 100–122. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2018.06.001>.
- Petit O. 2004. La surexploitation des eaux souterraines: enjeux et gouvernance. *Natures Sciences Sociétés* 12: 146–156. <https://doi.org/10.1051/nss:2004020>.
- Rodríguez-Estrella T. 2012. The problems of overexploitation of aquifers in semi-arid areas: The Murcia Region and the Segura Basin (South-east Spain) case. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 9: 5729–5756. <https://doi.org/10.5194/hessd-9-5729-2012>.
- Safari S, Sharghi S, Kerachian R, Noory H. 2023. A market-based mechanism for long-term groundwater management using remotely sensed data. *Journal of Environmental Management* 332: 117409. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117409>.
- Siebert S, Burke J, Faures JM, Frenken K, Hoogeveen J, Döll P, *et al.* 2010. Groundwater use for irrigation – A global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences* 14(10): 1863–1880. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010>.
- Soula R, Chebil A, McCann L, Majdoub R. 2021. Water scarcity in the Mahdia region of Tunisia: Are improved water policies needed? *Groundwater for Sustainable Development* 12: 100–510. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100510>.
- Soula R, Chebil A, Majdoub R, Crespo D, Kahil T, Albiac J. 2023. Simulation of the impacts of energy costs, climate change and groundwater management policies on the sustainability of the Mahdia Ksour Essef aquifer (Tunisia). *Water economics and policy* 9(01): 2340005. <https://doi.org/10.1142/S2382624X23400052>.
- Valle-García Á, Gutiérrez-Martín C, Montilla-López NM. 2023. Water pricing and quotas: A quantitative analysis from a private and social perspective. *Water Resources Management* 38: 4287–4306. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03865-1>.
- Varela-Ortega C, Blanco-Gutiérrez I, Swartz CH, Downing TE. 2011. Balancing groundwater conservation and rural livelihoods under water and climate uncertainties: An integrated hydro-economic modeling framework. *Global Environmental Change. The Politics and Policy of Carbon Capture and Storage* 21(2): 604–619. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.12.001>.
- Yang YCE, Son K, Hung F, Tidwell V. 2020. Impact of climate change on adaptive management decisions in the face of water scarcity. *Journal of Hydrology* 588: 125–015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125015>.

**Citation de l'article** : Soula R, Chebil A, Majdoub R, Kahil T, Albiac J. 2025. Utilisation des instruments économiques pour réduire l'épuisement des eaux souterraines dans le contexte du changement climatique : cas de l'aquifère de Mahdia-Ksour Essef en Tunisie. *Cah. Agric.* 34: 7. <https://doi.org/10.1051/cagri/2025003>