Revue Française d'Économie et de Gestion
ISSN : 2728- 0128
Volume 7 : Numéro 11

Arbitrages microéconomiques face à la rareté de l'eau, analyse des stratégies de gestion, d'allocation et de résilience hydrique au Maroc et à l'international : une revue de littérature

Microeconomic Trade-offs in the Face of Water Scarcity, An Analysis of Water Management, Allocation, and Water Resilience Strategies in Morocco and Internationally: A Literature Review

HASNAOUY Ismail
Doctorant en Sciences de droit et économie
La Faculté des Sciences Juridiques, Économiques et Sociales – Souissi, l'Université Mohammed V de Rabat. Maroc
Laboratoire d'analyse économique et modélisation

YOUSFI Abdellah
Professeur d'Enseignement supérieur
La Faculté des Sciences Juridiques, Économiques et Sociales – Souissi, l'Université Mohammed V de Rabat. Maroc
Laboratoire d'analyse économique et modélisation

Date de soumission : 18/08/2026

Date d'acceptation : 01/11/2026

Pour citer cet article :

HASNAOUY. I. YOUSFI. A (2026) « Arbitrages microéconomiques face à la rareté de l'eau, analyse des stratégies de gestion, d'allocation et de résilience hydrique au Maroc et à l'international : une revue de littérature », Revue Française d'Economie et de Gestion « Volume 7 : Numéro 11 » pp : 797- 823.

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License

Résumé

L'article analyse la gestion des ressources hydriques à l'échelle mondiale et dans le contexte marocain. Il s'appuie sur des études économiques (2017-2025) centrées sur l'eau. Il combine l'approche microéconomique pour évaluer les tensions entre la pénurie d'eau et la croissance économique. Il met aussi en évidence l'importance de la sécurité alimentaire dans les pays les plus vulnérables. Concernant le Maroc, l'article montre que la politique publique reste largement orientée vers des solutions techniques côté offre, notamment le dessalement. Cette approche atteint toutefois ses limites, d'où la nécessité de passer à une maîtrise de la demande. Le texte propose, à cet effet, des solutions fondées sur la nature, des instruments économiques de régulation et des outils digitaux, soutenus par une gouvernance intégrée reliant agriculture et énergie.

Mots clés : Gestion de l'eau, Pénurie hydrique, Croissance économique, Sécurité alimentaire, Maroc, Microéconomie, Gouvernance de l'eau, Benchmark, Développement durable.

Abstract

This article analyzes water-resource management at the global level and within the Moroccan context, drawing on economic studies published between 2017 and 2025. Using a microeconomic perspective, it examines the tensions between water scarcity and economic growth while emphasizing the critical role of food security in vulnerable countries. In Morocco, the analysis finds that public policy remains largely focused on technical, supply-side solutions, particularly seawater desalination. However, the limitations of this approach highlight the need for more effective demand-management strategies. The article therefore advocates the adoption of nature-based solutions, economic regulatory instruments, and digital tools. These measures should be supported by integrated governance frameworks that strengthen coordination between the agricultural and energy sectors.

Keywords: Water management; water scarcity; economic growth; food security; Morocco; microeconomics; water governance; benchmarking; sustainable development.

Introduction

Au cours de dernières décennies, on observe un regain d'intérêt dans les études économiques pour la question de l'eau en quantité limitée, poussant à explorer comment répartir mieux les richesses naturelles. Partant de ce constat, cet article s'appuie sur des concepts tirés de la microéconomie concrète, ainsi que sur des cadres liés aux décisions collectives, L'optimum de Pareto (l'équilibre concurrentielle) désigne une situation économique où il est impossible d'améliorer le bien-être d'un individu sans détériorer celui d'au moins un autre. Ce critère évalue l'efficacité d'une allocation de ressources, sans pour autant juger de sa justice sociale ou de son équité. Sert ici de boussole pour guider l'analyse, élaborée par Vilfredo Pareto (1848-1923), souvent utilisée comme point d'appui pour mesurer dans quelle mesure les marchés hydriques fonctionnent efficacement. Bien que le modèle de concurrence pure et parfaite offre une base utile, il met surtout en lumière le compromis entre performance technique et justice distributive. Pourtant, dès que certaines imperfections (stress hydrique, sécurité alimentaire, changement climatiques…) touchent ces marchés, on observe fréquemment un recours à l'économie du bien-être, dont Arthur Cecil Pigou (1877-1959) a posé les principes fondateurs. Grâce à cet outil conceptuel qui ont parlé au paravent comme l'équilibre concurrentielle et l'équidé sociale de Pareto, les chercheurs examinent alors quel rôle peut jouer l'État lorsque les impacts écologiques menacent l'intérêt général ou altèrent les conditions sociales. En outre, on étudie la gestion matérielle et géographique de l'eau selon une logique d'Analyse Coût-Avantage. Inspirée par les réflexions anciennes de Jules Dupuit sur le gain perçu par les usagers, elle s'appuie aussi sur des normes fixées plus tard par Kaldor et Hicks. Bien qu'établie il y a longtemps, cette approche guide encore aujourd'hui les choix en matière d'infrastructures coûteuses. Lorsqu'il s'agit d'évaluer la viabilité financière d'un projet, tel que la commercialisation de l'eau ou la construction de canalisations entre les régions, cette approche est souvent privilégiée. En définitive, le financement du transport de l'eau et de sa répartition efficace repose sur un principe essentiel : établir les tarifs en fonction du coût marginal, c'est-à-dire du coût supplémentaire engendré par la fourniture d'une unité additionnelle.

Cette idée a notamment été défendue par plusieurs économistes, dont Harold Hotelling (1895-1973), qui l'a appliquée à l'étude des ressources épuisables, ainsi que Marcel Boiteux (1922-2023).

Grâce à leurs cadres analytiques, il est possible d'estimer avec précision le coût d'acheminement de chaque mètre cube d'eau. Le prix fixé peut ainsi refléter à la fois la pression

exercée sur la ressource et les dépenses liées aux canalisations, aux réservoirs et aux autres infrastructures nécessaires pour approvisionner les régions déficitaires.

Face à la raréfaction croissante des ressources en eau, leur gestion constitue aujourd'hui un enjeu majeur sur les plans économique, social et environnemental. Dans ce contexte, cet article analyse les mécanismes économiques et les stratégies permettant d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de renforcer la résilience hydrique. La problématique centrale est la suivante :

Dans quelle mesure les mécanismes économiques de gestion et d'allocation de l'eau peuvent-ils améliorer l'efficacité de son utilisation et renforcer la résilience hydrique au Maroc ?

L'objectif de cette recherche est d'identifier les principaux instruments économiques et les stratégies de gestion mobilisée face à la rareté de l'eau, puis d'évaluer leur pertinence et leur transférabilité au contexte marocain. Sur le plan méthodologique, l'étude adopte une **approche qualitative, descriptive et comparative**, fondée sur une **revue systématique de la littérature scientifique nationale et internationale publiée principalement entre 2017 et 2025**. La recherche documentaire porte sur des articles scientifiques, études et travaux consacrés à la rareté de l'eau, à l'efficacité de son utilisation, à la tarification, à la réutilisation des eaux usées, au dessalement, à l'irrigation efficiente, aux transferts d'eau et à la gouvernance des ressources hydriques. Les travaux retenus sont ensuite analysés et comparés selon leurs objectifs, leurs méthodes, leurs résultats et leurs implications économiques. L'analyse mobilise également les fondements de la microéconomie, de l'économie du bien-être, de l'optimum de Pareto, de l'analyse coûts-bénéfices et de la tarification au coût marginal. Cette démarche permet d'identifier les avantages, les limites et les conditions d'efficacité des différentes stratégies étudiées. Enfin, une analyse de leur **transférabilité au contexte marocain** est réalisée afin de dégager des pistes d'amélioration de la gestion économique de l'eau. Le premier axe présente les **fondements économiques de la gestion de la rareté de l'eau et les stratégies d'optimisation**, tandis que le deuxième axe propose une **analyse comparative des stratégies et de leurs perspectives d'application au Maroc**.

1 Les fondements économiques de la gestion de la rareté de l'eau et les stratégies d'optimisation

1.1 Arbitrages économiques et résilience hydrique : évaluation des stratégies de gestion de l'eau aux échelles nationale et internationale.

L'optimisation de la ressource hydrique à l'échelle locale repose avant tout sur l'analyse rigoureuse des arbitrages individuels que font les agents économiques face à la rareté. En modélisant les fonctions de production des agriculteurs et leur réactivité aux signaux de prix, cette approche permet de concevoir des structures tarifaires incitatives qui favorisent l'adoption de technologies d'irrigation efficientes.

L'étude des coûts marginaux et de l'élasticité de la demande locale s'avère ainsi indispensable pour corriger les défaillances de marché et maximiser la productivité de chaque mètre cube d'eau au niveau de chaque exploitation.

Le monde moderne oscille souvent entre deux impératifs. D'un côté, l'attention portée aux ressources naturelles, en particulier à l'eau, ne cesse de croître, tant elles sont essentielles au maintien de la vie. De l'autre, la pression en faveur de la performance économique s'intensifie : chaque pays cherche à maintenir une croissance régulière de son produit intérieur brut. Cette tension met clairement en opposition la préservation de l'environnement et l'accumulation matérielle.

Rien ne permet d'affirmer qu'une solution globale puisse résoudre ce dilemme en une seule fois. Il reste néanmoins essentiel de réfléchir aux moyens d'y faire face. L'objectif n'est pas nécessairement de supprimer le conflit, mais plutôt d'explorer des voies permettant à ces différentes priorités de coexister, même de manière imparfaite.

1.2 La réutilisation de l'eau usé

L'évolution des technologies d'assainissement s'inscrit désormais dans une logique de circularité, visant à transformer les contraintes hydriques en opportunités économiques et écologiques. Cette dynamique d'optimisation globale trouve une application concrète dans la réutilisation des eaux usées traitées, un mécanisme qui se positionne aujourd'hui comme un vecteur essentiel de l'économie circulaire. Ce concept consiste à récupérer les eaux résiduaires (domestiques ou industrielles), à les soumettre à des processus d'épuration avancés, puis à les réinjecter dans le circuit économique pour des usages non potables (irrigation agricole, arrosage des espaces verts ou besoins industriels). Au lieu de rejeter l'eau après un seul usage (modèle linéaire "puiser-utiliser-jeter"), la REUT crée une boucle vertueuse qui préserve les ressources en eau douce naturelles, réduit la pollution des écosystèmes et transforme un déchet en une

ressource productive continue. Plusieurs travaux de recherche micro-économiques ont été élaborés pour ce problème, parmi lesquels nous citons : (Cardona et al., 2017) analyse un système pilote d'Assainissement Décentralisé et de Réutilisation (DESAR) dans une communauté rurale de Rio de Janeiro. Lorsque on utiliser le DESAR (decentralized sanitation and resource reuse) la récupération du nutriment pour l'agriculture et de 73% de cout d'exploitation grâce la VNA (la valeur nette actuelle) c'est une solution qui répond à la sécurité alimentaire et le développement écologique locaux (Gestion durable des ressources). (Frascari et al., 2018), soulignent que la crise hydrique des pays méditerranéens africains, où l'agriculture est très consommatrice et l'irrigation peu efficace (≈ 60 % de rendement moyen en surface), le projet de la réutilisation de l'eau usé promeut une approche intégrée : améliorer le traitement des eaux usées et les techniques d'irrigation pour permettre leur réutilisation à grande échelle. Cette stratégie vise à sécuriser l'approvisionnement en eau, réduire les prélèvements dans les ressources naturelles et stimuler l'économie locale.

1.3 Le dessalement de l'eau de mer

Confronté à un stress hydrique structurel exacerbé par les chocs climatiques, le recours au dessalement de l'eau de mer s'affirme comme une option d'infrastructure majeure pour stabiliser l'offre et sécuriser les dotations destinées aux secteurs potable et industriel.

Le problème réside dans sa forte dépendance énergétique et ses coûts d'exploitation élevés, qui pèsent sur les tarifs microéconomiques de l'eau. De plus, le rejet de saumure à forte salinité et de produits chimiques pose un défi environnemental majeur pour les écosystèmes marins locaux. L'enjeu actuel est donc d'optimiser ces technologies en réduisant leur empreinte carbone, notamment via le couplage avec les énergies renouvelables.

Selon (Bellver-domingo et al., 2019) à travers une étude menée dans la Communauté valencienne, en Espagne. Elles y appliquent une analyse coût-bénéfice (ACB), combinée à la méthode des prix fantômes

Ou prix de référence, afin d'évaluer la viabilité du dessalement des eaux usées à des fins agricoles. En quantifiant la valeur économique des bénéfices environnementaux, notamment la réduction des rejets de saumure, ainsi que la valorisation d'un volume d'eau susceptible d'alimenter un périmètre irrigué de 272 hectares, elles montrent que cette approche contribue à renforcer la gestion durable et institutionnelle de la ressource. Parallèlement, elles soulignent que l'efficience technique constitue une condition indispensable pour optimiser la rentabilité de ces investissements lourds.

Selon (Bellver-domingo et al., 2019), Cette étude applique la programmation linéaire en nombres entiers Mixed-Integer Linear Programming pour optimiser le dimensionnement d'un système de dessalement couplé aux énergies renouvelables et à une station de transfert d'énergie par pompage (STEP), L'intégration du stockage hydraulique permet de maximiser la rentabilité économique, tandis que l'optimisation technique s'avère déterminante pour la viabilité financière du projet, réduisant le délai de récupération à seulement 2,2 ans. Selon (Copernicana et al., 2023), mettent en avant les Zones Humides Artificielles comme une solution durable et rentable pour traiter les eaux usées et pallier la pénurie d'eau. En transformant les déchets en ressources, cette approche fondée sur la nature favorise l'économie circulaire tout en répondant aux enjeux sociétaux des Objectifs de Développement Durable.

1.4 L'impact économique de la rareté de l'eau

La pénurie hydrique constitue une variable critique du développement contemporain, dont les répercussions systémiques altèrent durablement les performances économiques et la résilience des nations. La réduction des quotas hydriques incite les entreprises et les agriculteurs à réorienter leurs choix de production, tout en provoquant une augmentation inévitable des coûts d'exploitation et des tarifs d'accès à la ressource.

L'analyse de ces effets est donc essentielle pour élaborer des politiques de régulation et de tarification susceptibles de concilier l'efficacité productive avec la durabilité environnementale. L'intégration repose sur des solutions fondées sur la nature (SFN), qui permettent de répondre aux enjeux environnementaux tout en favorisant une gestion durable des ressources. Une alternative stratégique pour la résilience hydrique, alliant épuration écologique et réalimentation des réserves souterraines. Pour (Edmonds et al., 2021) étudier et quantifier l'impact économique mondial de la rareté de l'eau en couplant des modèles hydrologiques et économiques à l'échelle des bassins versants.

Elle révèle que les dynamiques commerciales et l'adaptation des marchés amplifient considérablement l'incertitude économique par rapport à l'incertitude hydrologique. L'impact final dépend donc principalement de la capacité future de chaque bassin à s'adapter au transfert d'eau vers d'autres villes.

1.5 Optimisation des ressources d'eau

Face à l'épuisement des nappes phréatiques et à la variabilité des précipitations, l'optimisation des ressources d'eau est devenue un impératif de survie économique. À l'échelle microéconomique, elle repose sur l'adoption de technologies d'irrigation de précision et sur des structures tarifaires incitatives qui poussent les usagers à rationaliser leur consommation.

Réussir cette optimisation permet ainsi de transformer la contrainte de la rareté en un levier d'innovation technique et de résilience globale.

Parallèlement au traitement, la sécurisation des réserves stratégiques passe par la gestion active des nappes phréatiques L'étude de (Halytsia et al., 2022) , démontre que la rentabilité économique et sociale de l'extension d'un système de recharge d'aquifères en Pologne en monétisant les bénéfices environnementaux perçus par les habitants c'est la méthode de L'analyse coûts-avantages.

Ce projet constitue un levier stratégique pour assurer un approvisionnement durable en eau et préserver les ressources des risques de contamination et de pénurie. Selon (Jin et al., 2023) l'optimisation par essaim particulaire est utilisée pour évaluer la viabilité économique de la récupération des eaux pluviales à Incheon. La valeur nette actualisée (VNA) apparaît comme l'indicateur clé de cette évaluation. L'étude montre également qu'une subvention publique peut augmenter la rentabilité du projet de 52 %, contribuant ainsi à sa viabilité financière sur une période de 30 ans. Selon (Bennouna, 2020), il s'agit d'analyser la réduction drastique du ruissellement en Afrique du Nord sous l'effet du changement climatique, dans un contexte où l'agriculture consomme 85 % des ressources en eau. Il préconise une approche holistique mêlant gouvernance participative, gestion de la demande et modernisation des infrastructures. Cette stratégie multidimensionnelle est jugée indispensable pour garantir la sécurité hydrique et la résilience de la région. Selon (Chadli et al., 2022), Proposer la réutilisation des eaux usées traitées à Sidi Bel Abbès, en Algérie, pour l'irrigation agricole constitue une stratégie pertinente pour limiter la surexploitation et l'épuisement des nappes souterraines. Les analyses montrent que les eaux de l'oued Mekerra, après traitement, respectent les normes de qualité requises pour un usage agricole. Cette démarche met également en évidence le lien étroit entre la disponibilité des ressources hydriques et la stabilité économique, dont la préservation représente un enjeu majeur pour renforcer la résilience des marchés et des territoires. Selon (Zheng et al., 2024), démontrent que la vulnérabilité hydrique accroît significativement le coût du capital des entreprises chinoises, à la fois via la dette et les capitaux propres. Cette relation est amplifiée par une réglementation stricte de l'eau, mais atténuée par des investissements proactifs en gestion hydrique, particulièrement sur le coût de la dette. L'impact varie de manière notable selon les secteurs industriels. Enfin, la vulnérabilité économique se mesure également à travers le coût des externalités négatives. Selon (Yao et al., 2016), les auteures ont développé une méthode destinée à quantifier les pertes économiques associées aux pollutions accidentelles, appliquée au cas de la catastrophe environnementale de la rivière Songhua. En prenant en

compte huit fonctions écosystémiques, notamment la pêche, la santé publique et l'approvisionnement en eau, leur analyse estime les dommages à 2,263 milliards de yuans. Ces résultats valident un modèle permettant d'évaluer les coûts de remplacement et de restauration des eaux de surface. Ainsi, l'eau apparaît au cœur de la résilience des territoires, confrontés à des pressions environnementales et économiques croissantes.

La gestion des ressources hydriques constitue aujourd'hui le défi central du développement durable, agissant comme le "facteur limitant" majeur des bassins hydrographiques (T. Wang et al., 2022), Cette étude démontre que l'eau est le facteur limitant central du bassin du Fleuve Jaune. Grâce à un modèle PVAR, elle confirme que la relation entre la ressource hydrique et le développement socio-économique suit une courbe environnementale de Kuznets (EKC) : cela signifie qu'après avoir atteint un certain seuil de richesse, l'impact sur l'eau commence théoriquement à décroître. Pour (S. Wang et al., 2022), démontre que dans la section du Henan du Fleuve Jaune, le sous-système hydrique est le moteur principal de l'équilibre entre économie et écologie. Avec un indice de coordination élevé de 0,8105 atteint en 2019, les projections pour 2025 confirment qu'un management intégré d'eau permet de stabiliser durablement les pressions sociales tout en préservant la santé du bassin. Cette approche systémique trouve une application concrète dans l'Agriculture Intégrée à l'Aquaculture (12). Ces systèmes basés sur des étangs multifonctionnels permettent non seulement d'augmenter les revenus et la fertilité des sols, mais offrent aussi une réponse directe à l'insécurité alimentaire, D'après (Footprint & Province, 2024) menée dans la province du Henan souligne que l'équilibre de l'utilisation d'eau entre l'économie, la société et l'écologie (EEWB) est actuellement dans un état de « déséquilibre de proximité », principalement freiné par une santé écologique alarmante. Bien que l'efficacité technique et l'harmonie homme-eau montrent des signes d'amélioration grâce aux politiques de gestion stricte et aux technologies d'économie d'eau, l'indice de santé écologique reste la composante la plus faible, contribuant à plus de 70 % au déséquilibre global dans la majorité des villes. Cette situation révèle une tension critique : la croissance économique ne peut être durable si elle continue de se faire au détriment des écosystèmes aquatiques, car la dégradation environnementale finit par limiter le développement socio-économique lui-même. Pour rétablir cet équilibre, il est impératif d'intégrer des stratégies de protection écologique rigoureuses, d'optimiser la structure industrielle et de renforcer la capacité de charge des ressources hydriques régionales. Selon (Ibrahim et al., 2023), elle parlle sur les avantages des systèmes d'Agriculture Intégrée à l'Aquaculture basés sur des étangs. La revue de littérature (2000-2021) confirme leur multifonctionnalité, augmentant productivité et revenus, améliorant la fertilité

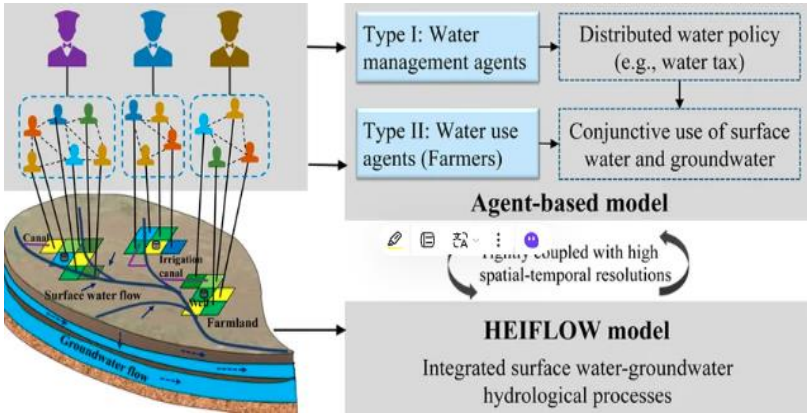
des sols et contribuant à l'adaptation climatique. Ils s'affirment de la sorte comme un mécanisme d'adaptation systémique, capable de concilier la résilience hydrique, la souveraineté alimentaire et les impératifs d'atténuation face au changement climatique. (Scientifique, 2020), es résultats confirment que la rareté économique de l'eau constitue un obstacle institutionnel, technique ou financier susceptible de limiter l'accès à la ressource, même lorsque celle-ci est physiquement disponible. Ils montrent également que 25 % des terres cultivées dans le monde sont concernées par cette situation. Leur mise en valeur durable pourrait permettre de nourrir 840 millions de personnes supplémentaires, constituant ainsi un levier majeur pour renforcer la sécurité alimentaire mondiale. l'article de (Climatique et al., 2019), parle sur la réutilisation de l'eau en Espagne réduit efficacement la pression sur les ressources municipales, mais reste insuffisante dans l'industrie et l'agriculture pour compenser l'impact de la croissance économique. L'étude confirme que la hausse des tarifs incite à la sobriété, bien que cette mesure doive désormais être couplée à une augmentation massive des volumes d'eau recyclée. Selon (Saleh & Mezher, 2021), le coût du dessalement thermique aux Émirats arabes unis augmente considérablement lorsque les effets indirects négatifs sur l'environnement et la société sont intégrés à l'analyse. À l'aide d'une méthode d'analyse hiérarchique, les chercheurs montrent que le coût réel s'accroît de 65,8 % pour la distillation à effets multiples et de 81,9 % pour la distillation flash multiétagée. Ces résultats soulignent l'importance d'adopter une évaluation économique globale, prenant en compte non seulement les coûts directs du dessalement, mais également ses externalités environnementales et sociales.

Pour (Rokochinskiy et al., 2021), proposent une méthode d'évaluation des systèmes hydrauliques complexes conciliant rentabilité économique et durabilité écologique, même en contexte d'incertitude. Testée sur l'irrigation rizicole en Ukraine, cette approche optimise les rendements et les délais de récupération pour sécuriser les investissements dans le secteur de l'eau. Désormais (Rezaee et al., 2021), critique l'allocation de l'eau basée uniquement sur la rentabilité financière et propose un modèle dynamique multicritère intégrant le social et l'environnement. Appliquée à l'industrie en Iran, cette méthode révèle que le scénario actuel est inefficace du premier rang jusqu'à le (7ème rang) qui les résultats sont efficaces, désignant l'industrie non métallique comme le choix optimal pour une gestion équilibrée.

Pendant ce temps (Grafton & Chu, 2023), (Zeggagh, 2020) Parlons sur l'analyse la crise de l'eau via les concepts économiques de tarification et de valorisation de l'eau domestique. Elle souligne que distinguer le prix de la valeur de l'eau permet d'atteindre à la fois efficacité économique et équité. Les auteurs affirment que cette démarche est indispensable pour atteindre

l'ODD 6 relatif à l'eau et à l'épuration. L'auteur, quant à lui, s'intéresse à l'étude de (Zeggagh, 2020) [2] pousse à repenser le prix de l'eau en Algérie, où les tarifs ne bougent pas depuis longtemps tandis que près de la moitié du volume disparaît dans les fuites du réseau. À partir d'un examen précis des comportements des consommateurs, l'étude suggère un calibrage fin des prix, inspiré de Ramsey-Boiteux, qui adapte chaque niveau de coût à la sensibilité d'usage. Ainsi, ceux qui utilisent beaucoup paient davantage, pendant que les ménages aux revenus limités bénéficient de seuils protégés. Le système tient compte des dépenses réelles tout en maintenant un accès équitable. Finalement cela trace une voie vers une exploitation plus sobre avec moins d'appel aux aides d'État. Selon (Finco et al., 2022), Cette revue analyse la crise de l'eau via les concepts économiques de tarification et de valorisation de l'eau domestique. Elle souligne que distinguer le prix de la valeur de l'eau permet d'atteindre à la fois efficacité économique et équité. Les auteurs concluent que cette approche est essentielle pour réaliser l'ODD 6 sur l'eau épuration. jusque-là (Dionisio et al., 2022), Exe modèle multidimensionnel (SWAT-PMP-CGE) permet d'anticiper comment une taxe sur l'eau en Espagne modifie les cycles hydrologiques et les décisions agricoles. L'étude prouve que la hausse des redevances pousse les agriculteurs à changer de cultures, ce qui stabilise paradoxalement leurs revenus via l'ajustement des prix du marché. Dans le même contexte, mais en s'intéressant aux conséquences des coupures d'eau, Raihan et al. (2023) ont réalisé une étude quantitative de leur impact économique en Malaisie. Leurs résultats évaluent les pertes à 461,094 milliards de ringgits, soit environ 34 % du produit intérieur brut (PIB) national en 2020. Ce coût astronomique englobe principalement la valeur des actifs exposés au risque et les pertes d'exploitation directes subies par les petites et moyennes entreprises en raison des pollutions et des pannes techniques. Et d'autre part (Pichura & Potravka, 2021), démontrons l'érosion hydrique dégrade 68,7 % des terres arables en Ukraine, menaçant la sécurité alimentaire et les ressources en eau. L'étude préconise un aménagement anti-érosif adaptatif et une agriculture de conservation pour restaurer durablement ces paysages. Dans un autre coté l'approches innovantes et durabilité l'un des principes innovantes sur la gestion des ressource hydriques (Menu & Charrette, 2017), parlons sur la variabilité climatique reste un facteur dominant, les pressions socio-économiques sont des leviers de crise plus prévisibles. L'utilisation d'un modèle basé sur les agents (Agent-Based Model ou ABM) permet d'analyser l'interaction dynamique entre les usagers (agriculteurs, ménages, gestionnaires) et les ressources hydriques. Ce résultat souligne l'intérêt économique des politiques axées sur la gestion de la demande par rapport à celles axées sur l'offre.

Figure 1 : Couplage ABM et modèle hydrologique.



Source : ResearchGate

Vers la suite des innovations en parallèle dans ce point (Khalaji et al., 2025), L'aménagement urbain sensible à l'eau (Water Sensitive Urban Design ou WSUD) transforme la gestion des eaux pluviales et du ruissellement en intégrant le cycle naturel de l'eau au cœur de la planification des villes (noues paysagères, jardins de pluie, revêtements perméables, bassins de rétention végétalisés).

En Chine, la gestion du Yangtsé s'améliore globalement, malgré un stress hydrique critique persistant dans l'Est industriel. Une vision holistique et géographique est donc indispensable pour garantir la sécurité écologique et socio-économique de l'eau.

Tout d'abord, (Israilova et al., 2023), présentent la crise mondiale de l'eau comme une réalité urgente qui transcende les frontières nationales. Leur étude analyse le lien entre la pénurie hydrique et le développement socioéconomique, en mettant en évidence le rôle déterminant des moyens de subsistance ruraux, qui sont fortement corrélés à la migration et au développement. En revanche, les rendements agricoles et les flux migratoires exercent une influence plus limitée sur la croissance socioéconomique.

Ensuite, étudions le lien direct entre la pénurie d'eau et le ralentissement du développement socio-économique, notamment dans les pays les plus vulnérables. au dire de (Grafton & Chu, 2023), Cet article aborde la crise planétaire, d'eau par le prisme économique, insistant sur la nécessité d'une tarification et d'une valorisation adaptées de l'eau potable pour les ménages. Il souligne que l'application de concepts économiques peut corriger des décennies de défaillances de gouvernance. La conclusion est claire : sans réforme du prix et de la valeur de l'eau, les objectifs de l'ODD 6 (eau pour tous) ne seront pas atteints d'ici 2030. Et en fin nous parlons sur l'évolution de la progression de l'efficience dans l'usage d'eau par (Barbier, 2024), Cette étude analyse la progression de l'efficience dans l'usage d'eau (PIB réel par m^3) dans 130 pays entre 1995 et 2020. Elle révèle un mécanisme de rattrapage : les pays initialement moins

efficaces ont progressé plus rapidement. Cependant, une forte dépendance à l'agriculture freine ces gains d'efficience. L'étude souligne surtout le rôle clé des facteurs institutionnels solides et de la capacité d'innovation pour améliorer la productivité de l'eau, en particulier lorsque les marchés ne transmettent pas le signal de sa rareté croissante. et pour (Chebil et al., 2013), Face à une demande agricole représentant 80 % des ressources en eau de la Tunisie, la culture du blé dur accuse une efficacité d'usage de l'eau (EUE) moyenne de seulement 64,86 %, traduisant un déficit d'optimisation préjudiciable sous contrainte de rareté. L'analyse économétrique bi-étagée (DEA-Tobit) menée auprès de 170 exploitations révèle que l'intégration des structures communautaires (GDA) et l'adoption de l'irrigation de complément rehaussent significativement l'EUE, validant ainsi des pistes d'action concrètes pour une gouvernance hydrique plus résiliente. au dire de (Huang et al., 2021), analysons l'efficacité verte de l'eau dans la ceinture économique du Yangtze (2002-2017). Les résultats montrent une baisse générale de cette efficacité, avec un gradient spatial décroissant de l'aval vers l'amont. La productivité globale (TFP) progresse néanmoins, portée principalement par les avancées technologiques. L'insécurité hydrique, loin d'être une simple conséquence du changement climatique, s'ancre profondément dans les dynamiques démographiques et les structures économiques contemporaines.

d'après (Connell, 2017), l'insécurité hydrique est davantage déterminée par les dynamiques démographiques et économiques que par les facteurs climatiques. Son analyse souligne ainsi la nécessité de recourir à des modèles intégrant les comportements humains. Dans cette perspective, une stratégie combinant la gestion de l'offre et celle de la demande apparaît préférable, l'approche fondée exclusivement sur l'augmentation de l'offre pouvant s'avérer quatre fois plus coûteuse. Selon (Yao et al., 2016), Face à la multiplication des pollutions des eaux de surface en Chine, cet article développe une méthodologie pour chiffrer leurs dommages économiques directs et indirects. En classant les impacts en huit catégories (santé, pêche, etc.) et en utilisant des méthodes d'évaluation adaptées, l'étude estime les pertes de l'accident du fleuve Songhuajiang (2005) à 2 263 milliards de yuans. Cette approche fournit un outil précis pour éclairer la prise de décision politique.

Dans les régions arides du Nord-Ouest de la Chine, la croissance économique demeure fortement tributaire des ressources hydriques, en raison de l'absence d'un véritable découplage entre développement économique et pression environnementale. Selon (Zhang et al., 2021), cette dépendance est particulièrement marquée dans les zones désertiques, où l'expansion économique continue d'exercer une pression considérable sur les ressources en eau.

L'agriculture accapare 90 % des ressources, imposant des politiques de réallocation strictes pour stopper la pollution et la pénurie. Cependant, ce processus de transition trouve un moteur inattendu dans l'expansion urbaine. Selon (Mu et al., 2021), l'urbanisation dans le Nord-Ouest de la Chine constitue un levier de rationalisation des ressources hydriques, en contribuant à réduire l'empreinte écologique &globale de l'eau. Cette évolution s'explique principalement par la diminution significative de la consommation d'eau agricole, qui compense l'augmentation de la demande urbaine et industrielle. À l'instar des situations analysées précédemment, l'Algérie est également confrontée à une grave crise de stress hydrique, caractérisée par une pression croissante sur ses ressources en eau. au dire de (Mohammed & Al-amin, 2018), L'Algérie est confrontée à un stress hydrique sévère, avec un potentiel hydrique par habitant estimé à seulement 430 m^3 en 2025, bien en deçà du seuil de rareté fixé à 1000 m^3. Le changement climatique devrait aggraver cette situation, avec une hausse des températures de 3 à 5°C d'ici 2100. Face à cette crise, la stratégie nationale s'appuie sur le développement d'infrastructures, comprenant déjà 14 usines de dessalement opérationnelles en 2010. La remise en circulation des eaux usées traitées et l'accroissement de l'efficience hydrique sont considérés comme cruciaux pour renforcer la capacité de résistance du pays.

En Iran, le dérèglement climatique impose des contraintes tout aussi alarmantes sur les ressources naturelles. Selon (Oroud, 2008), le dérèglement climatique en Iran devrait se traduire par une hausse des températures et une diminution des précipitations pouvant atteindre 30 %. Cette évolution contribuerait à réduire considérablement les ressources en eaux souterraines et menacerait la pérennité de l'agriculture. Les cultures céréalières seraient particulièrement vulnérables, avec une baisse des rendements pouvant atteindre 60 % pour le blé pluvial.

L'ajustement du prix de l'eau peut agir comme un levier subtil mais efficace pour transformer les pratiques agricoles. Selon (Zamani et al., 2021), analyse l'effet de la tarification de l'eau sur son utilisation dans les exploitations agricoles iraniennes. Fondée sur un modèle de programmation mathématique positive, élaboré à partir de données recueillies auprès de 213 exploitations de la région de Hamadan-Bahar, elle montre qu'une tarification appropriée peut inciter les agriculteurs à modifier progressivement leurs choix de production. Certains se tournent notamment vers le colza, dont la rentabilité par unité d'eau consommée est plus élevée, tandis que d'autres adoptent des techniques d'irrigation plus performantes.

Ces résultats indiquent que la tarification de l'eau ne constitue pas seulement un instrument financier ; elle agit également comme un signal économique qui oriente progressivement les comportements et les pratiques agricoles. Toutefois, l'importance de la productivité

économique de l'eau en tant qu'indicateur de gestion est remise en question, car cet indicateur ne permet pas toujours de mesurer précisément l'efficience réelle de l'utilisation des ressources hydriques.

Cette pertinence est fortement remise en question par les travaux (Ozcelik et al., 2024b), qui évaluent la robustesse de la productivité économique de l'eau en tant qu'indicateur d'efficience à partir d'une analyse comparative portant sur 27 pays européens et 7 pays asiatiques. Les résultats mettent en évidence un découplage entre la productivité économique de l'eau et la gestion physique des flux hydriques. En effet, cet indicateur est fortement influencé par les dotations en capital et en énergie.

La productivité économique de l'eau reflète ainsi davantage la productivité économique globale que l'efficience réelle de l'utilisation de la ressource. Elle apparaît donc comme un indicateur potentiellement biaisé et peu adapté à la conception de stratégies spécifiquement axées sur la gestion de l'eau. Cette critique est renforcée par une seconde étude. Selon (Ozcelik et al., 2024a), l'augmentation de la productivité économique de l'eau, mesurée par le rapport entre la valeur ajoutée brute et le volume d'eau consommé (VAB/m³), ne traduit pas nécessairement une amélioration réelle de l'efficience hydrique. L'estimation économétrique fondée sur des données de panel met en évidence un phénomène de découplage : les gains observés sont principalement attribuables à l'accumulation du capital et à l'amélioration de la productivité du travail, tandis que l'efficience physique de la ressource demeure stagnante. Cet indicateur peut ainsi générer une asymétrie d'information quant aux progrès effectivement réalisés. Les auteurs préconisent donc de privilégier des indicateurs fondés sur l'empreinte hydrique ou la consommation directe, plus pertinents pour élaborer des politiques optimales d'allocation de l'eau.

L'optimisation opérationnelle des réseaux de distribution repose désormais sur des outils de régulation avancés, comme le démontrent (Y. Wang et al., 2022), L'application du contrôle prédictif (EMPC) permet de moduler les charges de pompage en fonction des structures tarifaires de l'énergie, induisant une baisse des coûts d'exploitation comprise entre 3 % et 250 % selon la configuration du réseau. Cette optimisation en temps réel corrige les inefficiences de court terme et sécurise l'équilibre financier des infrastructures. Dans les zones confrontées à une pénurie de données d'observation directes, comme le bassin du Litani au Liban, l'apport de la télédétection devient alors une condition sine qua non pour calibrer efficacement ces systèmes de gestion.(Sapino et al., 2024), L'étude combine la télédétection (WaPOR) et des modèles économiques pour analyser la gestion de l'eau dans le bassin du Litani. Elle montre

que la réallocation par quotas entraîne des pertes économiques et sociales fortement non linéaires dès que la réduction dépasse 50 %. La demande en eau est peu sensible jusqu'à 0,03 USD/m³, puis devient élastique avant de redevenir inélastique à des prix plus élevés. Enfin, l'irrigation de précision apparaît comme une solution ciblée face à la raréfaction, notamment pour des cultures à forte valeur comme la viticulture. (Finco et al., 2022), Ce document propose un modèle d'irrigation de précision intégrant capteurs et indice de Productivité Économique de l'Eau (EWP) pour optimiser la gestion de l'eau en viticulture. L'étude de cas (2020) démontre qu'un euro investi en irrigation génère au moins 0,6 euro de rendement, tout en soulignant la sensibilité de l'EWP aux prix du marché. L'objectif est d'aider les viticulteurs à concilier rentabilité et rareté de l'eau.

2 L'analyse comparative des stratégies et de leurs perspectives d'application au Maroc.

L'analyse comparative montre que la crise hydrique mondiale menace directement la sécurité alimentaire au niveau micro-économique en contraignant les choix des agriculteurs. Au Maroc, ce stress hydrique structurel fragilise fortement les revenus des petites exploitations face à la baisse des quotas d'eau et à l'épuisement des nappes. Alors que les modèles internationaux prévoient souvent des ajustements fluides par les prix, la réalité marocaine révèle une vulnérabilité locale accrue. Cette confrontation aide à concevoir des mécanismes de régulation et de tarification adaptés pour sécuriser la production alimentaire nationale.

2.1 Crise hydrique structurelle et sécurité alimentaire

D'après (Mohammed EL YOUSRYN, 2024) le Maroc est confronté à une crise hydrique de plus en plus préoccupante. La disponibilité en eau par habitant y est passée d'environ 2 500 mètres cubes en 1960 à moins de 600 mètres cubes aujourd'hui, compromettant ainsi la sécurité alimentaire du pays. Par ailleurs, (Cardona et al., 2017) montrent, dans le contexte de Rio de Janeiro, qu'un système décentralisé d'assainissement et de réutilisation des eaux usées permet de récupérer des nutriments destinés à l'agriculture et de réduire les coûts d'exploitation de 73 %. Alors que Cardona propose une solution technique opérationnelle pour sécuriser l'alimentation locale, le Maroc doit d'abord stabiliser ses ressources disponibles. La stratégie adaptée consiste à combiner sécurisation des volumes d'eau et intégration de systèmes de réutilisation.

2.2 Gouvernance et gestion intégrée de l'eau

d'après (MADHER Khalid & ELMOUTAOUKIL Abdelkader, 2024), une gouvernance efficiente doit tenir compte des vulnérabilités propres à chaque territoire. Leur approche

mobilise l'analyse en composantes principales (ACP) et le clustering hiérarchique afin d'identifier les profils territoriaux et d'adapter les politiques publiques aux spécificités locales. Selon (Frascari et al., 2018) proposent une approche intégrée pour améliorer le traitement des eaux usées et l'irrigation dans les pays méditerranéens africains, sécurisant l'approvisionnement et stimulant l'économie locale. Les deux approches insistent sur la coordination institutionnelle et technique. Pour le Maroc, la combinaison d'une gouvernance adaptée aux territoires et de techniques d'irrigation durables est essentielle.

Vulnérabilité du secteur agricole face aux changements climatiques :

d'après (Ouabouch, 2018) souligne la forte variabilité de la production de dattes dans les oasis marocaines, une situation qui accentue l'insécurité alimentaire et fragilise les conditions de vie des populations concernées. Pour sa part, (Bennouna, 2020) insiste sur l'importance d'une démarche globale reposant sur la participation des acteurs locaux et sur la maîtrise de la demande en eau, dans le but de diminuer le ruissellement et d'atténuer les contraintes pesant sur l'activité agricole.

L'expérience nord-africaine étudiée par (Bennouna, 2020) pourrait être adaptée au contexte marocain, notamment afin d'accroître la capacité d'adaptation des oasis et des systèmes agricoles aux impacts du changement climatique.

Réutilisation de l'eau et sensibilisation :

Selon (Nourredine et al., 2023), un projet pédagogique fondé sur la réutilisation des eaux usées provenant d'un hammam pour l'irrigation d'un jardin scolaire permet de sensibiliser efficacement les élèves et de mettre en évidence le potentiel de la réutilisation de ces eaux.

(Copernicana et al., 2023) analysent les Zones Humides Artificielles pour traiter les eaux usées et promouvoir l'économie circulaire. Les deux approches démontrent la faisabilité et l'impact économique et social de la réutilisation. Le Maroc peut combiner sensibilisation locale et petites infrastructures de réutilisation.

Surexploitation des nappes et solutions techniques :

Hssaisoune et al. (2020) mettent en garde contre la salinisation progressive des nappes phréatiques, principalement due à leur surexploitation et aux effets du changement climatique. Les auteurs recommandent notamment le recours au dessalement de l'eau ainsi qu'à une gestion participative des ressources hydriques. Par ailleurs, (Jin et al., 2023) montrent qu'un système optimisé de récupération des eaux pluviales, fondé sur l'algorithme d'optimisation par essaim particulaire et soutenu par des subventions publiques, peut accroître la rentabilité de 52 % sur une période de trente ans. Ainsi, la combinaison de solutions techniques, de mécanismes de

soutien financier et de dispositifs participatifs constitue une voie pertinente pour le Maroc, notamment grâce au dessalement de l'eau, à la récupération des eaux pluviales et à l'implication des communautés locales.

L'orientation croissante vers des cultures fortement consommatrices d'eau constitue également l'un des facteurs contribuant à l'épuisement des ressources hydriques au Maroc. Dans la zone R3P2 du Haouz, certaines cultures présentent des besoins particulièrement élevés en eau. Le citronnier nécessite environ 10800 mètres cubes par hectare, suivi de la luzerne avec 10596 mètres cubes par hectare, tandis que l'orge affiche une consommation nettement plus faible, inférieure à 3348 mètres cubes par hectare.

Cependant, l'analyse de la consommation d'eau doit être mise en relation avec la productivité agricole afin d'évaluer l'efficacité de l'utilisation de cette ressource. À titre d'exemple, la productivité hydrique du maïs s'élève à 7,20 kilogrammes par mètre cube, contre 4,24 kilogrammes par mètre cube pour la luzerne et seulement 0,43 kilogramme par mètre cube pour l'olivier. Ces résultats montrent qu'une consommation élevée d'eau ne garantit pas nécessairement une meilleure valorisation de cette ressource (Marni et al., 2017).

Gouvernance institutionnelle et acteurs clés :

D'après (Hicham, 2019) identifie le potentiel des Paiements pour Services Environnementaux mais pointe des obstacles liés à la centralisation. (Badr et al., 2022) mettent également en évidence la prédominance des agences de bassin hydraulique et de l'Office régional de mise en valeur agricole, une situation qui engendre des déséquilibres dans la répartition du pouvoir entre les acteurs concernés. (Grafton & Chu, 2023) insistent sur la tarification et valorisation adaptées pour atteindre 6 de l'ODD. Une gouvernance décentralisée, combinée à une tarification incitative et équitable, est indispensable pour améliorer la gestion de l'eau au Maroc.

Optimisation des ressources et interconnexion des bassins :

Selon (Saghiry et al., 2025) propose un modèle de transfert d'eau entre barrages pour sécuriser l'approvisionnement des zones urbaines. (S. Wang et al., 2022) et (T. Wang et al., 2022) optimisent les réseaux de distribution via contrôle prédictif pour réduire les coûts de pompage. Le Maroc pourrait combiner interconnexion des barrages et gestion intelligente des réseaux pour maximiser l'efficacité économique et hydrique.

Sécurité des ressources et mix hydrique :

D'après (Khalid & El Moujahid, 2023) recommandent un cadre réglementaire et une optimisation agricole intégrée. (Ouhbi & Hafsa, 2025) insistent sur un « mix hydrique » incluant dessalement, réutilisation des eaux usées et régulation stricte des cultures. (Bellver-domingo et

al., 2019) montre qu'un dessalement optimisé peut irriguer 272 ha et réduire le délai de récupération économique. La combinaison des expériences espagnoles et marocaines valide la nécessité d'une stratégie intégrée technique, économique et réglementaire adaptée aux ressources limitées du Maroc.

Déficit d'eau et sécurité alimentaire :

Selon (Dinar et al., 2019) alerte sur le seuil de pénurie absolue avec 500 m^3/habitant/an et la hausse attendue de la demande alimentaire de 70 à 100 % d'ici 2050. (Finco et al., 2022) montre qu'un euro investi en irrigation génère au moins 0,6 € de rendement grâce à l'irrigation de précision. L'optimisation microéconomique de l'irrigation, combinée à la planification des besoins alimentaires, est essentielle pour le Maroc.

Autres stratégies microéconomiques internationales :

Les travaux récents de (Ozcelik et al., 2024b) et (Ozcelik et al., 2024a) apportent une nuance cruciale à la gestion des ressources au Maroc en démontrant que la Productivité Économique de l'Eau (PEE) ne dépend pas systématiquement d'une gestion physique optimale ; Ces travaux contribuent à approfondir l'analyse de la gestion des ressources hydriques au Maroc en mettant en évidence que la productivité économique de l'eau ne découle pas systématiquement d'une gestion physique optimale de la ressource. Cette dissociation souligne la nécessité de repenser les indicateurs d'évaluation de la performance économique afin de les adapter aux spécificités territoriales et aux niveaux différenciés de stress hydrique. Cette nécessité de résilience est corroborée par des études internationales menées en Malaisie, en Espagne (Dionisio et al., 2022), (Pichura & Potravka, 2021), qui mettent en exergue les coûts économiques drastiques engendrés par les ruptures d'approvisionnement et l'érosion des sols. Pour le contexte marocain, ces analyses confirment l'importance vitale de privilégier des stratégies préventives et des investissements massifs dans les infrastructures afin de limiter l'impact financier de la pénurie.

3 Les défis de la recherche

Les recherches existantes sur la crise hydrique, qu'elles soient marocaines ou internationales, présentent plusieurs limites. Au Maroc, les études comme celles de (Cardona et al., 2017) ou (Bellver-domingo et al., 2019) présentent des solutions techniques efficaces (réutilisation des eaux, dessalement, irrigation de précision), elles sont souvent limitées à des contextes locaux spécifiques, et leur transposabilité aux réalités marocaines reste incertaine. Par ailleurs, des recherches sur les indicateurs économiques de gestion de l'eau, comme celles de (Ozcelik et al., 2024a) et (Ozcelik et al., 2024b) montrent que la Productivité Économique de l'Eau (PEE)

ne reflète pas toujours l'efficacité physique de la ressource, négligeant la dimension sociale et comportementale cruciale pour l'adoption des mesures.

Ces limites ouvrent des pistes de recherche futures importantes. Il est nécessaire de développer des études empiriques à l'échelle locale et nationale, combinant données techniques, socio-économiques et environnementales pour évaluer l'efficacité réelle des interventions. L'intégration de modèles intersectoriels et participatifs pourrait permettre d'étudier l'impact combiné des politiques agricoles, urbaines et industrielles sur la ressource en eau. De plus, la conception de nouvelles méthodes d'évaluation de l'efficacité hydrique, incluant dimensions sociales, culturelles et comportementales, aiderait à mieux guider les stratégies de sensibilisation et de gouvernance. Enfin, des recherches prospectives sur l'adaptation aux changements climatiques, la réutilisation des eaux usées, le dessalement durable et l'interconnexion des bassins pourraient contribuer à formuler des solutions concrètes et transférables adaptées aux spécificités marocaines et aux contextes similaires dans le monde.

En somme, bien que ces études constituent une base scientifique solide pour l'élaboration des politiques hydriques, leurs limites tiennent principalement à la simplification des modèles, aux contraintes de données, au caractère parfois normatif des recommandations et à une intégration encore incomplète des dimensions institutionnelles et sociales. Une recherche future plus interdisciplinaire, combinant modélisation économique, analyse institutionnelle, approche territoriale et évaluation sociale, permettrait de renforcer la pertinence et l'opérationnalisation des stratégies proposées face à la pénurie hydrique.

Conclusion

La raréfaction de la ressource en eau pose aux agents économiques un problème fondamental d'allocation optimale sous contrainte de rareté. Comme l'a démontré cette étude, l'approche microéconomique offre un cadre d'analyse indispensable pour dépasser les défaillances de marché inhérentes à la gestion des biens communs. En s'appuyant sur les fondements de l'optimum de Pareto et de l'économie du bien-être d'Arthur Cecil Pigou, l'analyse met en lumière la nécessité d'une intervention correctrice de l'État pour internaliser les externalités négatives (pollutions, surexploitation des nappes, dégradation des écosystèmes) et concilier l'efficacité allocative avec l'équité distributive.

En réponse à la problématique centrale, l'examen des instruments de régulation montre que les mécanismes économiques peuvent substantiellement améliorer l'efficience hydrique et renforcer la résilience du Maroc, à condition de ne pas les réduire à de simples outils monétaires univoques. La tarification au coût marginal théorisée par Harold Hotelling et Marcel Boiteux constitue un signal prix déterminant pour orienter les arbitrages individuels des producteurs vers l'irrigation de précision et la réorientation des assolements. Complétées par la programmation mathématique positive (PMP) et l'analyse coûts-avantages (ACA), ces démarches permettent d'évaluer les ajustements des fonctions de production agricole et la viabilité d'un mix hydrique non conventionnel (dessalement et réutilisation des eaux usées traitées).

Cependant, ces apports théoriques et empiriques révèlent des **limites conceptuelles et méthodologiques majeures** sur le plan microéconomique :

Le biais d'information des indicateurs : L'utilisation univoque de la Productivité Économique de l'Eau (PEE — VAB/m^3) induit un biais d'évaluation, car elle reflète davantage l'intensité capitalistique ou énergétique de l'exploitation qu'une réelle sobriété physique de la ressource.

L'évaluation incomplète des externalités : De nombreuses études peinent à quantifier et chiffrer avec précision l'ensemble des externalités négatives (salinisation des sols, rejets de saumure) et positives (recharge stratégique des aquifères) dans le calcul du coût marginal social.

L'absence d'intégration de l'Intelligence Artificielle (IA) : L'apport de l'IA et de l'apprentissage automatique dans l'optimisation microéconomique en temps réel (tarification dynamique, contrôle prédictif des réseaux d'irrigation et de distribution) reste encore très peu modélisé dans la littérature économique.

La sous-estimation des arbitrages lors des transferts inter-bassins : Les modèlemicroéconomiques traditionnels analysent souvent les bassins de manière isolée,

négligeant les coûts d'opportunité, les distorsions tarifaires et les transferts de richesse induits par l'interconnexion entre bassins versants donneurs et receveurs.

L'omission des interactions stratégiques (Théorie des jeux) : La plupart des travaux adoptent une vision unilatérale de l'agent individuel, sans modéliser les comportements stratégiques, la rivalité et les phénomènes de passager clandestin entre les divers usagers d'une même nappe ou entre différents secteurs (agricole, urbain, industriel).

Ces limites ouvrent des perspectives particulièrement stimulantes pour de futures recherches en microéconomie appliquée au contexte marocain :

Développement de modèles fondés sur la théorie des jeux : Analyser les comportements stratégiques, les mécanismes de négociation et les arbitrages tarifaires entre usagers lors des transferts inter-bassins et au sein des agences de bassin.

Intégration de l'IA dans l'optimisation microéconomique : Mobiliser l'intelligence artificielle pour calibrer dynamiquement les fonctions de production agricole, ajuster la gestion prédictive des réseaux et simuler en temps réel les élasticités de la demande face aux chocs climatiques.

Modélisation multi-agents et micro-économétrie appliquée : Coupler la PMP avec des modèles de simulation basés sur les agents (ABM) afin de mieux appréhender l'hétérogénéité comportementale des producteurs.

Structures tarifaires équitables : Mener des investigations fondées sur des données d'exploitations pour quantifier précisément l'ensemble des externalités et concevoir des structures tarifaires de type Ramsey-Boiteux, seules capables de garantir l'efficience hydrique tout en préservant la viabilité socio-économique des petites exploitations agricoles.

BIBLIOGRAPHIE

Article de revue

- ✓ Aliyev, V., & Suleymanov, F. (2023). the Protection of Water Resources for Sustainable Tourism Under Climate Change in South Caucasus: in the Context of Azerbaijan. Geojournal of Tourism and Geosites , 47(2), 515–522. https://doi.org/10.30892/gtg.47219-1051
- ✓ Barbier, E. B. (2024). *Économie de la rareté de l ' eau et efficacité*.
- ✓ Bellver-domingo, A., Fuentes, R., & Hernández-sancho, F. (2019). Reclaimed water and irrigation : a cost-benefit analysis for desalination of WWTPs effluents. *Desalination and Water Treatment*, *166*, 193–201. https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24556
- ✓ Bennouna, A. (2020). Gestion de l'eau au Maroc et changement climatique. *Revue Espace Géographique et Société Marocaine*, *32*, 250–259.
- ✓ Cardona, J. A., Segovia, O. C., Böttger, S., Medellin, N. A., Cavallo, L., Ribeiro, I. E., & Schlüter, S. (2017). Reuse-oriented decentralized wastewater and sewage sludge treatment for rural settlements in Brazil : a cost – benefit analysis. *Desalination and Water Treatment*, *91*, 82–92. https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21421
- ✓ Chadli, A., Benhasseini, H., Fertout Mouri, N., & Aguiar, H. (2022). Wastewater reuse, a sustainable alternative for the management of water resources in the city of Sidi Bel Abbes (Algeria). *Geo-Eco-Trop*, *46*(2), 301–313.
- ✓ Chebil, A., Bahri, W., & Frija, A. (2013). Mesure et déterminants de l'efficacité d'usage de l'eau d'irrigation dans la production du blé dur: Cas de Chabika (Tunisie). *New Medit*, *12*(1), 49–55.
- ✓ Climatique, C., Les, S. U. R., En, R., Le, E. A. U., Espagne, C. A. S. D. E. L., Gracia-de-rentería, P., Pérez-zabaleta, A., Escalera-izquierdo, G., Gracia-de-rentería, P., Pérez-zabaleta, A., & Escalera-izquierdo, G. (2019). *L ' ÉCONOMIE CIRCULAIRE COMME OUTIL POUR ATTÉNUER LES EFFETS DU CLIMAT ÉVOLUTION DES RESSOURCES EN EAU : LE CAS DE L ' ESPAGNE . d*, 1–5.
- ✓ Connell, E. O. (2017). *Towards Adaptation of Water Resource Systems to Climatic and Socio-Economic Change*. 2965–2984. https://doi.org/10.1007/s11269-017-1734-2
- ✓ Copernicana, O., Copernicana, O., Lakho, F. H., Hulle, S. W. H. Van, Batlles-delafuente, A., Lakho, F. H., & Hulle, S. W. H. Van. (2023). *OeconomiA copernicana*. 103–134. https://doi.org/10.24136/oc.2023.003
- ✓ Dionisio, C. P., Standardi, G., Gil-garcía, L., & Guti, C. (2022). *Assessing farmers ' adaptation responses to water conservation policies through modular recursive hydro-micro-macro-*

economic modeling. *360*(May 2021). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132208

- ✓ Edmonds, J., Lamontagne, J., Link, R., Hejazi, M., & Reed, P. (2021). Evaluating the economic impact of water scarcity in a changing world. *Nature Communications*, 1–10. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22194-0
- ✓ Finco, A., Bentivoglio, D., Chiaraluce, G., Alberi, M., Chiarelli, E., Maino, A., Mantovani, F., Montuschi, M., Giulia, K., Raptis, C., Semenza, F., Strati, V., Vurro, F., Marchetti, E., Bettelli, M., Janni, M., Anceschi, E., Sportolaro, C., & Bucci, G. (2022). *Combining Precision Viticulture Technologies and Economic Indices to Sustainable Water Use Management*. 1–20.
- ✓ Footprint, W. E., & Province, H. (2024). *OPEN A multi-index comprehensive evaluation method for assessing the water use balance between economic society and ecology considering efficiency-*. *100*, 1–23.
- ✓ Frascari, D., Zanaroli, G., Motaleb, A., Annen, G., Belguith, K., Borin, S., Choukr-allah, R., Gibert, C., Jaouani, A., Kalogerakis, N., Karajeh, F., Rault, P. A. K., Khadra, R., Kyriacou, S., Li, W., Ortega, C. V., Molle, B., & Mulder, M. (2018). *Integrated Technological and Management Solutions for Wastewater Treatment and Ef fi cient Agricultural Reuse in*. *14*(4), 447–462. https://doi.org/10.1002/ieam.4045
- ✓ Grafton, R. Q., & Chu, L. (2023). *The price and value of water : An economic review*.
- ✓ Halytsia, O., Vrachioli, M., Janik, K., & Sitek, S. (2022). *Assessing Economic Feasibility of Managed Aquifer Recharge Schemes : Evidence from Cost-benefit Analysis in Poland*. 5241–5258.
- ✓ Hicham, E. (2019). *Gestion des ressources en eau au Maroc : d ' une simple lutte contre la dégradation à l ' étude faisabilité des Paiements pour les Services Environnementaux (PSE) Management of water resources in Morocco : from a simple fight against degradation to the* . *2*, 675–698.
- ✓ Hssaisoune, M., Bouchaou, L., & Sifeddine, A. (2020). *Moroccan Groundwater Resources and Evolution with Global Climate Changes*.
- ✓ Huang, C., Yin, K., & Liu, Z. (2021). *Spatial and Temporal Differences in the Green Efficiency of Water Resources in the Yangtze River Economic Belt and Their Influencing Factors*.
- ✓ Ibrahim, L. A., Abu-hashim, M., Shaghaleh, H., Elsadek, E., Ali, A., Hamad, A., & Hamoud, Y. A. (2023). *A Comprehensive Review of the Multiple Uses of Water in Aquaculture-Integrated Agriculture Based on International and National Experiences*.
- ✓ Israilova, E., Voronina, A., & Shatila, K. (2023). *Impact of water scarcity on socio-economic development*. *08027*, 1–13.

- ✓ Jin, Y., Lee, S., Kang, T., Park, J., & Kim, Y. (2023). *Capacity Optimization of Rainwater Harvesting Systems Based on a Cost – Benefit Analysis : A Financial Support Program Review and Parametric Sensitivity Analysis*.
- ✓ Khalaji, F., Zhang, J., & Sharma, A. K. (2025). *Social and Economic Impacts of Water Sensitive Urban Design : A Review*.
- ✓ Khalid, F., & El Moujahid, L. (2023). La gestion de l'eau au Maroc : vers un nouveau mode de gouvernance. *Revue Droit et Société*, *Juillet*(10), 6–21. https://doi.org/10.5281/zenodo.8108933
- ✓ Mohammed EL YOUSRYN, F. H. (2024). La Pénurie d'Eau au Maroc : Entre Gestion et Répartition. International Journal of Economics and Management Sciences, 3(1), 01–25.
- ✓ Mu, L., Fang, L., Dou, W., Wang, C., Qu, X., & Yu, Y. (2021). Urbanization-induced spatio-temporal variation of water resources utilization in northwestern China: A spatial panel model based approach. *Ecological Indicators*, *125*. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107457
- ✓ Noureddine, G., Eslamian, S., Katlane, R., Journal, I., Sciences, W., Technologies, E., Access, O., Press, S., Limited, I., Noureddine, G., Eslamian, S., & Katlane, R. (2021). *of water resources and Climate in Maghreb regions ISSN Online : 1737-9350 ; ISSN Print : 1737-6688 , Open Access Status of water resources and Climate change in Maghreb regions University of Carthage , National Research Institute of Rural Engineering , Wa*. *4*, 67–94.
- ✓ Nourredine, H., Barjenbruch, M., Million, A., Amrani, B. El, Chakri, N., & Amraoui, F. (2023). *education sciences Linking Urban Water Management , Wastewater Recycling , and Environmental Education : A Case Study on Engaging Youth in Sustainable Water Resource Management in a Public School in Casablanca City , Morocco*.
- ✓ Oroud, I. M. (2008). The Impacts of Climate Change on Water Resources in Jordan. *Environmental Science and Engineering*, 110–123. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85047-2_10
- ✓ Ouabouch, H. (2018). *L ' agriculture Oasienne Et Les Défis Des Changements Climatiques : Cas Du Maroc*. *11*(6), 5–12. https://doi.org/10.9790/2380-1106010512
- ✓ Ouhbi, H., & Hafsa, O. (2025). *Water Sustainability and Policy in the Moroccan Context: Challenges, Solutions, and Future Perspectives Durabilité et politique de l'eau dans le contexte marocain : défis, solutions et perspectives futures Water Sustainability and Policy in the Moroccan C*. *6*(8), 601–618. www.ijafame.orgwww.ijafame.org
- ✓ Ozcelik, N., Rodríguez, M., Sartal, A., & Lutter, S. (2024a). Taking away the economic " water productivity " illusion : An indicator inapt to inform meaningful water policies. *Ecological*

Indicators, *165*(June), 112220. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112220

- ✓ Ozcelik, N., Rodríguez, M., Sartal, A., & Lutter, S. (2024b). Taking away the economic "water productivity" illusion: An indicator inapt to inform meaningful water policies. *Ecological Indicators*, *165*(June). https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112220
- ✓ Pichura, V., & Potravka, L. (2021). *Environmental and economic effects of water and deflation destruction of steppe soil in Ukraine*. 10–26. https://doi.org/10.24425/jwld.2021.138156
- ✓ Raihan, A., Pereira, J. J., Begum, R. A., & Rasiah, R. (2023). *L ' impact économique des perturbations de l ' approvisionnement en eau provenant de la rivière Selangor , Malaisie* □.
- ✓ Rezaee, A., Haddad, O. B., & Chu, X. (2021). Reallocation of water resources according to social , economic , and environmental parameters. *Scientific Reports*, 1–13. https://doi.org/10.1038/s41598-021-96680-2
- ✓ Rokochinskiy, A., Volk, P., Frolenkova, N., Tykhenko, R., Kovalenko, P., & Turcheniuk, V. (2021). *Evaluation of ecological and economic efficiency of investment in water management and land reclamation projects*. https://doi.org/10.24425/jwld.2021.136149.Abstract
- ✓ Saghiry, S., Loudyi, D., & Laassilia, O. (2025). An Integrated Conceptual Framework for Interconnected Dam Reservoirs Systems Implementation: A Case Study from Morocco. *Journal of Sustainability Research*, *7*(1), 1–32. https://doi.org/10.20900/jsr20250017
- ✓ Saleh, L., & Mezher, T. (2021). Techno-economic analysis of sustainability and externality costs of water desalination production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *150*(February), 111465. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111465
- ✓ Sapino, F., Hazimeh, R., Dionisio, C. P., & Jaafar, H. H. (2024). *Socioeconomic impact of agricultural water reallocation policies in the Upper Litani Basin (Lebanon): a remote sensing and microeconomic ensemble forecasting approach*. *296*(April 2023). https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108805
- ✓ Scientifique, C. (2020). *Économie agricole mondiale : pénurie d'eau*. *6*.
- ✓ Wang, T., Jian, S., Wang, J., & Yan, D. (2022). Dynamic interaction of water – economic – social – ecological environment complex system under the framework of water resources carrying capacity. *Journal of Cleaner Production*, *368*(May), 133132. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133132
- ✓ Wang, Y., Yok, K. T., Wu, W., Simpson, A. R., Weyer, E., & Manzie, C. (2022). *Minimizing Pumping Energy Cost in Real-time Operations of Water Distribution Systems using Economic Model Predictive Control*. 1–31.
- ✓ Yao, H., You, Z., & Liu, B. (2016). *Economic Estimation of the Losses Caused by Surface*

Water Pollution Accidents in China From the Perspective of Water Bodies ' Functions. 5–8. https://doi.org/10.3390/ijerph13020154

- ✓ Zamani, O., Azadi, H., Abolghasem, S., Balali, H., Movahhed, S., & Jurik, L. (2021). The impact of water-pricing policies on water productivity : Evidence of agriculture sector in Iran. *Agricultural Water Management*, *245*(November 2020), 106548. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106548
- ✓ Zeggagh, A. (2020). *TARIFICATION ET USAGE DOMESTIQUE DES SERVICES D ' EAU ALGÉRIENS : APPROCHE MICRO PRICING AND DOMESTIC USAGE OF ALGERIAN WATER SERVICES : A MICRO-ECONOMETRIC*. *36*, 85–117.
- ✓ Zhang, Y., Liu, W., Cai, Y., Khan, S. U., & Zhao, M. (2021). Science of the Total Environment Decoupling analysis of water use and economic development in arid region of China – Based on quantity and quality of water use. *Science of the Total Environment*, *761*, 143275. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143275
- ✓ Zheng, L., Gao, P., & Wang, M. (2024). *The Economic Impact of Water Vulnerability on Corporate Sustainability : A Perspective of Corporate Capital Cost*.
- ✓ Zhou, H., Zhang, J., Cui, S., & Zhao, J. (2024). *Modeling Hydrologic – Economic Interactions for Sustainable Development : A Case Study in Inner Mongolia , China*.