



MADFORWATER s'est concentré sur le développement et l'application de solutions technologiques et de gestion intégrées pour le traitement des eaux usées et la réutilisation efficace dans l'agriculture adaptées aux besoins des pays africains méditerranéens.

[www.madforwater.eu](http://www.madforwater.eu)

Chère lectrice, cher lecteur

Bienvenue au quatrième bulletin d'information de MADFORWATER, un projet de l'Action de Recherche et d'Innovation Horizon 2020 financé par l'Union européenne et coordonné par l'Université de Bologne (Italie). L'objectif général de MADFORWATER était de développer un ensemble de solutions technologiques et de gestion cohérentes pour améliorer le traitement des eaux usées, leur réutilisation pour l'irrigation, et l'utilisation efficace de l'eau dans l'agriculture en Egypte, au Maroc, et en Tunisie. MADFORWATER s'est concentré sur les eaux usées municipales, agro-industrielles et industrielles, ainsi que sur les eaux de canal de drainage du delta du Nil. Le développement et la validation des technologies ont été combinés à la définition des stratégies intégrées de gestion de l'eau, adaptées au contexte local des bassins hydrologiques sélectionnés en Egypte, au Maroc, et en Tunisie.

Le projet MADFORWATER, qui a débuté le 1er juin 2016, a terminé ses activités après quatre ans et demi d'intense collaboration entre les partenaires européens et nord-africains. Au cours des 18 derniers mois d'activité, notre premier axe de travail s'est centré sur l'installation et l'exploitation de quatre unités pilotes en Egypte, au Maroc et en Tunisie dans lesquelles le traitement des eaux usées et leur réutilisation pour l'irrigation étaient intégrés. En outre, des stratégies de gestion de l'eau basées sur des modèles adaptés à 3 bassins hydrologiques sélectionnés en Égypte, au Maroc et en Tunisie ont été élaborées, ainsi qu'un large éventail d'activités de diffusion, de renforcement des capacités et d'exploitation a eu lieu.

Même si la crise de la Covid nous a obligé à arrêter toutes les activités expérimentales pendant le printemps de 2020, les partenaires de MADFORWATER ont rapidement repris l'exploitation de toutes les unités pilotes en juin-juillet 2020, afin de livrer tous les résultats escomptés d'ici la fin du projet, prévue en novembre 2020.

Ce bulletin d'information contient :

- la présentation de l'approche du projet MADFORWATER pour l'analyse de la sécurité de l'eau dans le contexte nord-africain ;
- une représentation de l'Initiative de la FAO relative à la pénurie d'eau ;
- la description des outils d'aide à la décision de MADFORWATER pour l'élaboration de stratégies de gestion des eaux usées et de gestion de l'eau en agriculture ;
- la présentation des principaux résultats délivrés par les quatre unités pilotes de traitement des eaux usées et de réutilisation des eaux usées dans l'irrigation.

Bonne lecture ! Si vous souhaitez recevoir plus d'information ou créer des collaborations, n'hésitez pas à nous contacter :

**Coordinateur:** Dario Frascari ([dario.frascari@unibo.it](mailto:dario.frascari@unibo.it))

**Co-coordonateur:** Giulio Zanaroli ([giulio.zanaroli@unibo.it](mailto:giulio.zanaroli@unibo.it))

**Contact de diffusion:** Marijn Mulder ([marijn.mulder@pnoconsultants.com](mailto:marijn.mulder@pnoconsultants.com))

## Contents

|   |   |
|---|---|
| 1. Une approche novatrice pour l'évaluation de la sécurité de l'eau dans les pays d'Afrique du Nord.....  | 2 |
| 2. Initiative régionale sur la raréfaction des ressources en eau.....   | 3 |
| 3. Elaboration d'un outil d'aide à la décision pour la mise en place de stratégies de gestion des eaux usées.....   | 4 |
| 4. Elaboration d'un outil d'aide à la décision pour la mise en place de stratégies de gestion de l'eau et des terres en agriculture.....  | 5 |
| 5. Adoption à grande échelle et validation des technologies MADFORWATER: les installations pilotes intégrées de traitement des eaux usées et leur réutilisation dans le secteur agricole..... | 7 |

# Une approche novatrice pour l'évaluation de la sécurité de l'eau dans les pays d'Afrique du Nord

Le développement agricole joue un rôle important dans les économies des pays d'Afrique méditerranéenne. La demande alimentaire augmente et les modes de consommation évoluent. Les pays sont confrontés à des défis communs quant à leur stratégie visant à améliorer la sécurité alimentaire, tels qu'une croissance démographique rapide, l'urbanisation, la dépendance vis-à-vis de l'agriculture pluviale dont les rendements sont fluctuants, la pénurie d'eau, une demande accrue en eau et des problèmes liés à la qualité de l'eau. Cependant, les pays d'Afrique méditerranéenne disposent d'intéressantes opportunités pour le développement agricole : disponibilité de terres arables, climat méditerranéen tempéré avec des possibilités de production toute l'année et un marché de consommation en croissance. Pour mieux comprendre les enjeux actuels et futurs liés à l'eau et la capacité de la société à y faire face, une évaluation de la sécurité de l'eau a été effectuée pour les trois pays d'Afrique du Nord prenant part au projet MADFORWATER : le Maroc, la Tunisie et l'Égypte.

ONU-Eau définit la sécurité de l'eau comme « La capacité d'une population à garantir un accès durable à des quantités suffisantes d'eau de qualité acceptable pour maintenir les moyens de subsistance, le bien-être humain et le développement socio-économique, pour assurer la protection contre la pollution d'origine hydrique et les catastrophes liées à l'eau, et pour préserver les écosystèmes dans un climat de paix et de stabilité politique. »

(<https://www.unwater.org/publications/water-security-infographic/>)

Habituellement, la sécurité de l'eau est utilisée indistinctement pour désigner d'autres termes similaires tels que le stress hydrique et la vulnérabilité de l'eau pour mettre en évidence les risques et les problèmes relatifs au défi de l'eau « il y a trop - trop peu - trop sale »! Aujourd'hui encore, les études et la documentation présentent une grande diversité de définitions, d'approches et de cadres d'évaluation, mais une approche unifiée pour l'analyse de la sécurité de l'eau n'existe toujours pas. L'objectif du projet MADFORWATER ne consistait donc pas à créer un autre cadre d'évaluation de l'eau, mais de trouver des moyens d'établir des liens entre les résultats du projet et le débat international actuel. C'est dans cette optique que le cadre d'évaluation AWDO 2016 a été sélectionné (Perspectives de développement de l'eau en Asie 2016. Renforcement de la sécurité de l'eau en Asie et dans le Pacifique. Banque asiatique de développement). Ce cadre fournit un aperçu national complet de cinq dimensions principales de la sécurité de l'eau : les foyers, la dimension économique, la dimension urbaine, la dimension environnementale et la résilience face aux catastrophes liées à l'eau.

Le projet MADFORWATER s'est concentré sur une dimension économique clé basée sur les résultats de quatre indices : un indice général pour évaluer les conditions limites liées à l'eau (indice des ressources en eau) et trois indices sectoriels (indices de l'agriculture, de l'énergie et de l'industrie). Chacun de ces indices est ensuite composé de plusieurs sous-indicateurs, dont les résultats sont transformés en une somme de points AWDO. Une description détaillée de la méthodologie est disponible dans le document 1.2 « Indicateurs et cartes du stress hydrique et de la vulnérabilité de l'eau », publié sur le site Internet de MADFORWATER ([www.madforwater.eu](http://www.madforwater.eu)). Le total final des points de chaque sous-indicateur est agrégé en une dimension finale de la sécurité économique de l'eau jusqu'à un maximum de 20 points. La sécurité économique de l'eau suit une approche imbriquée intégrée, combinant à la fois l'élaboration d'indicateurs spatiaux explicites liés au stress hydrique et des indicateurs établis au niveau national.

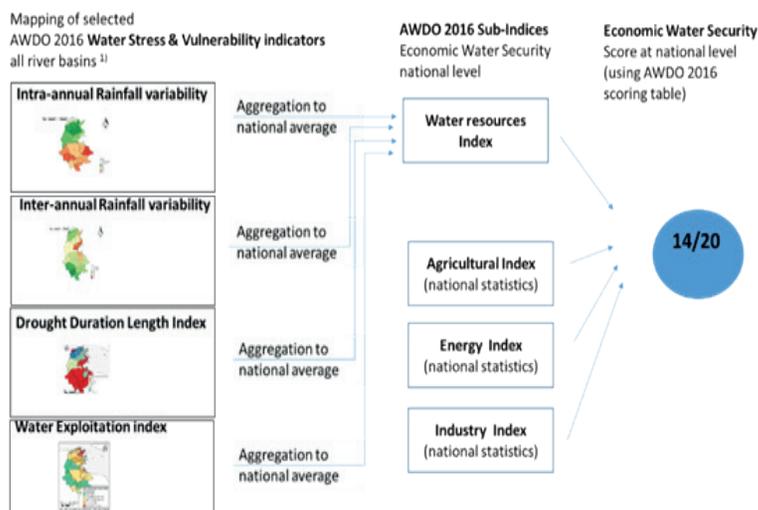
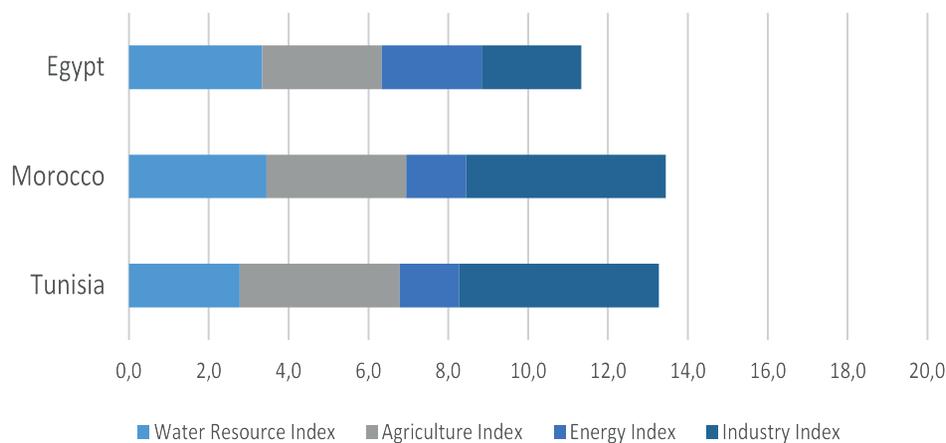


Figure 1. Structure et calcul de la sécurité économique de l'eau de l'AWDO 2016

Les résultats de cette analyse ont reflété une sécurité économique de l'eau relativement faible pour les trois pays évalués. L'Égypte est le pays avec la valeur la plus faible (environ 11), indiquant une vulnérabilité plus élevée, en raison de la faible productivité de l'eau agricole et de la faible autosuffisance de son économie liée aux produits agricoles. Au Maroc et en Tunisie, la sécurité économique de l'eau s'est élevée à environ 13, mais la valeur de l'indice énergétique était faible car la production d'énergie par habitant est bien inférieure à la production moyenne régionale des pays de la région Proche-Orient et Afrique du Nord.

Une analyse plus détaillée de l'indice des ressources en eau révèle qu'en raison de la grande capacité de stockage des eaux de surface dans ces régions, le risque de pénurie d'eau lié à la variabilité des précipitations et aux sécheresses est limité dans les trois pays étudiés. Cependant, la grande variabilité des précipitations au cours d'une même année et au niveau interannuelle, associée à une meilleure valorisation des périodes de hautes eaux pourrait entraver la future sécurité hydrique de ces pays. L'évaluation indique une augmentation potentielle de la vulnérabilité dans un avenir proche, car la baisse prévue de la disponibilité en eau pourrait compromettre la satisfaction des besoins futurs.



*Water security of Morocco, Egypt and Tunisia following the 2016 AWDO Economic Water Security approach. Aggregated values over a maximum score of 20.*

En conclusion, une évaluation de la sécurité de l'eau est un outil puissant pour comprendre les problèmes et les risques liés à l'eau dans une zone spécifique. Elle réunit les informations fournies par plusieurs sources en une valeur agrégée et standardisée. Cette approche, qui pourrait être utilisée pour des objectifs de sensibilisation à différents niveaux, des citoyens aux décideurs, représente un outil clé pour prendre des mesures et créer des instruments politiques pour améliorer la sécurité de l'eau. Lorsque cette approche est appliquée sur une portée géographique plus large, elle permet également de comparer la situation hydrique de différentes régions. De même, lorsqu'une évaluation de la sécurité de l'eau est faite régulièrement, l'effet des différentes politiques sur l'évolution de la sécurité de l'eau peut être évalué. Ainsi, les pays peuvent conforter leur approvisionnement alimentaire futur.

# Initiative régionale sur la raréfaction des ressources en eau

La région Proche-Orient et Afrique du Nord présente la plus faible disponibilité de ressources en eau douce par habitant de toutes les régions du monde. Au cours des 40 dernières années, l'eau douce disponible a diminué des deux tiers. D'ici 2050, elle devrait encore baisser de 50% en raison de l'augmentation de la population, des politiques de sécurité alimentaire, du développement socio-économique et du changement climatique. L'agriculture irriguée consomme plus de 85% des ressources en eau douce disponibles dans la région, ce qui signifie qu'elle sera confrontée à une forte concurrence des autres secteurs consommateurs d'eau et devra donc devenir plus efficace, tout en continuant de contribuer à la sécurité alimentaire et à l'économie rurale.

Face à cette situation, la FAO et ses partenaires ont lancé l'Initiative sur la raréfaction des ressources en eau (WSI) pour aider les pays de la région du Proche-Orient et de l'Afrique du Nord à faire face à l'un de leurs défis les plus urgents : l'atteinte de la sécurité alimentaire et hydrique, pour un développement social et économique durable, dans une situation sans précédent de raréfaction des ressources en eau. L'Initiative aide les pays de la région à planifier stratégiquement la gestion et l'allocation des ressources en eau, à revoir leurs politiques en matière d'eau, de sécurité alimentaire et d'énergie, à formuler des plans d'investissement efficaces, à moderniser la gouvernance et les institutions, à tenir compte des eaux de surface et souterraines transfrontalières et à adopter de bonnes pratiques agricoles.

L'Initiative sur la raréfaction des ressources est un mécanisme régional qui contribuera à la mise en œuvre de l'objectif stratégique 2 de la FAO : « Rendre l'agriculture, la sylviculture et la pêche plus productives et durables ». Dans ce contexte, une « Stratégie de collaboration régionale » a été élaborée pour une « Gestion durable de l'eau agricole dans la région du Proche-Orient et de l'Afrique du Nord » qui, entre autres objectifs, vise à soutenir et à compléter les initiatives régionales existantes telles que la Stratégie pour la sécurité de l'eau dans les pays arabes 2030. En fait, l'Initiative sur la raréfaction des ressources en eau a été approuvée par le Conseil ministériel de l'eau de la Ligue des États arabes en tant que mécanisme de soutien à la Stratégie pour la sécurité de l'eau dans les pays arabes 2030.

Les principaux domaines cibles de l'initiative sont les suivants: i) l'adoption de normes internationales pour les systèmes de comptage de l'eau; (ii) une base de connaissances élargie pour une irrigation efficace et une productivité hydrique accrue; (iii) l'amélioration de la gouvernance des eaux souterraines; (iv) l'utilisation des eaux non conventionnelles; (v) l'adaptation au changement climatique; (vi) la gestion la sécheresse; et (vii) la mise en œuvre d'une analyse de scénarios, y compris l'approche fondée sur les interactions entre l'eau, l'énergie, l'alimentation, afin d'identifier les limites de sûreté d'exploitation des ressources en eau, qui permettraient la réalisation des ODD.

La FAO est un partenaire actif du projet MADFORWATER, il est l'un des projets qui contribuent aux objectifs de l'Initiative sur la raréfaction des ressources en eau. En effet, les ressources en eau non conventionnelles, et les eaux usées traitées en particulier, ont le potentiel d'influencer positivement la disponibilité de l'eau, car c'est probablement la seule ressource en eau renouvelable croissante dans de nombreux pays de la région arabe. Des concepts et des outils d'aide à la décision appropriés et rentables comme ceux développés dans le cadre du projet MADFORWATER peuvent soutenir la gestion durable de l'eau. Des installations de traitement des eaux usées adaptées et reliées à des dispositifs innovants résistants aux obstructions pour les différents systèmes d'irrigation trouveront des applications directes dans de nombreux pays arabes. Les résultats du projet, en termes d'outils, de stratégies et de dispositifs, ont le potentiel de fournir des approvisionnements en eau salubre supplémentaires et donc d'aider à intégrer les eaux usées dans la planification et la gestion des ressources en eau et en même temps de contribuer à la sécurité alimentaire grâce à une production agricole accrue.

# Elaboration d'un outil d'aide à la décision pour la mise en place de stratégies de gestion des eaux usées

Sur la base des données de 2019 de l'Institut des ressources mondiales, douze des dix-sept pays étant sous stress hydrique se trouvent au Moyen-Orient et en Afrique du Nord et 82% des eaux usées de la région ne sont pas réutilisées. L'Institute for Copreneuship (IEC) de l'Université des sciences et des arts appliquées du nord-ouest de la Suisse (FHNW) a développé un outil puissant d'aide à la décision pour évaluer ex-ante la faisabilité de la réutilisation de l'eau dans divers cas à fort potentiel de valorisation de cette ressource. L'outil d'aide à la décision s'appuie sur Microsoft Excel, il est en accès libre et il peut être téléchargé à partir du site Web du projet MADFORWATER.

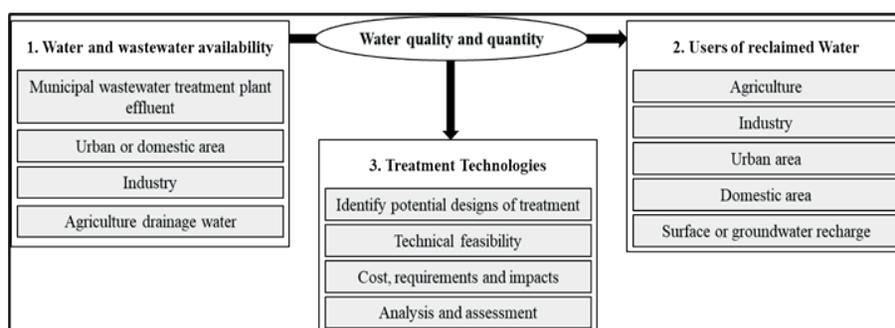
Il permet aux utilisateurs non spécialistes d'avoir accès à des options technologiques de premier plan (le coût du traitement et la conformité de la qualité), l'objectif principal étant de mener des études et des évaluations de pré-faisabilité, l'outil peut également être appliqué pour le renforcement des capacités dans les universités et des praticiens.

L'objectif de l'outil d'aide à la décision est d'identifier des options technologiques permettant de traiter les eaux usées pour obtenir la qualité souhaitée à partir de plusieurs études de cas représentatives. L'utilisateur doit fournir des informations sur (1) les eaux usées à récupérer (quantité et qualité à partir d'une sélection de classes prédéfinies), (2) la qualité souhaitée de l'eau récupérée (à partir d'un ensemble de réglementations nationales et de directives internationales), et (3) l'information sur les coûts locaux (par exemple le coût de l'électricité, le coût du terrain).

L'outil propose automatiquement les meilleures options technologiques à partir d'une base de données comprenant des chaînes de traitement de référence (série de processus unitaires) en fonction des coûts du cycle de vie du traitement et / ou en fonction d'un profil de pondération défini par l'utilisateur. Il comprend actuellement 37 processus unitaires regroupés en 70 chaînes de traitement de référence. L'outil d'aide à la décision se concentre sur l'étape d'évaluation ex-ante et examine systématiquement les plans potentiels de réutilisation de l'eau. Cela permet de déterminer si une zone identifiée avec un potentiel de réutilisation de l'eau pourrait conduire à un plan de remise à niveau avec les ressources et technologies actuelles et les informations disponibles.

Dans le cadre du projet MADFORWATER, l'outil d'aide à la décision a été adapté aux cas spécifiques de l'Égypte, du Maroc et de la Tunisie, en incluant des données et informations spécifiques au pays dans l'outil. Les données ajoutées comprennent les qualités typiques des eaux usées, les réglementations nationales sur les exigences de qualité de l'eau pour la conformité aux différents types de réutilisation, les directives ISO 16075 pour la réutilisation des eaux usées traitées dans l'agriculture et les facteurs liés aux coûts locaux.

Outres les considérations techniques, l'outil d'aide à la décision comprend une analyse multicritères composée de six sujets thématiques, à savoir l'économie, la gestion de l'eau, les politiques et l'institution, la législation et l'environnement. Chaque sujet thématique est décrit par deux à quatre questions clés. Ceux-ci sont à leur tour soutenus par un indicateur quantitatif ou semi-quantitatif.



Water reuse for pre-feasibility in a systemic approach: (1) wastewater for reuse, (2) type of intended reuse, (3) identification and assessment of technology.

Collectivement, ces indicateurs fournissent une estimation générale de la situation actuelle de la réutilisation de l'eau en Égypte, en Tunisie et au Maroc. Ces indicateurs sont sélectionnés sur la base d'indicateurs existants, qui ont été analysés à partir des principales études et bases de données sur la réutilisation de l'eau.

L'objectif de l'application de l'outil d'aide à la décision en Égypte, au Maroc et en Tunisie était d'identifier des chaînes de traitement adaptées pour la récupération des eaux usées municipales ou des effluents secondaires des stations d'épuration existantes pour des utilisations agricoles. Pour toutes les études de cas définies, des chaînes de traitement adaptées pouvant purifier les eaux usées pour obtenir la qualité souhaitée à des coûts raisonnables ont été identifiées. L'évaluation a indiqué un potentiel élevé de réutilisation de l'eau en Égypte, au Maroc et en Tunisie. En particulier, la Tunisie enregistre le niveau le plus élevé de réutilisation de l'eau, suivie de l'Égypte et du Maroc. Le contexte politique et l'acceptation sociale sont favorables à la mise en œuvre de la réutilisation de l'eau. Il s'avère que les principaux obstacles à la mise en œuvre de la réutilisation de l'eau soient d'ordre économique, puis administratif et enfin environnementale.

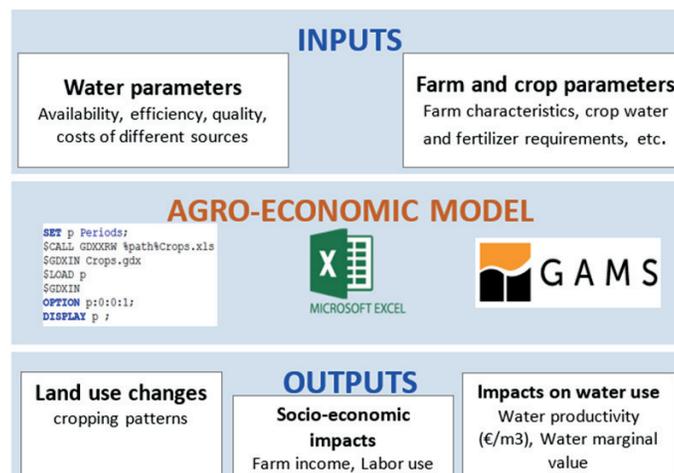
# Elaboration d'un outil d'aide à la décision pour la mise en place de stratégies de gestion de l'eau et des terres en agriculture

Une mission spécifique incombait au projet MADFORWATER, notamment l'élaboration et la mise en œuvre d'un modèle agroéconomique intégré à destination des autorités de bassin et des organismes de gestion de l'eau, qui permettrait de bâtir des stratégies de réutilisation et de gestion de l'eau, et des terres en agriculture.

L'objectif général d'un outil d'aide à la décision basé sur un modèle est d'élaborer des stratégies de gestion de l'eau et des terres visant (i) une exploitation optimale des technologies d'irrigation, et (ii) l'identification d'instruments économiques pour améliorer l'efficacité de l'irrigation et pour améliorer la réutilisation des eaux usées traitées dans l'agriculture.

Une structure générale de l'outil de l'aide à la décision a été élaborée d'une manière flexible, afin d'inclure toutes les spécificités des trois études de cas sur lesquelles le projet MADFORWATER concentre ses activités : le bassin de Souss-Massa au Maroc, la région de Nabeul en Tunisie et le nord-est du Delta du Nil en Egypte. Le cadre général de l'outil a été conçu pour intégrer différents types de cultures, de niveaux d'intensification, d'apports d'engrais, ainsi que différents types de sources d'eau. La structure générale du modèle agroéconomique peut être illustrée comme suit :

En identifiant les options optimales des agriculteurs par rapport aux modèles cultureux et agro-techniques, le modèle permet d'estimer l'incidence de l'adoption des innovations technologiques et des outils économiques et réglementaires qui peuvent être mis en place pour favoriser la réutilisation des eaux usées traitées. Plusieurs scénarios technologiques sont entrelés ou liés à des scénarios politiques, par exemple nous pouvons constater une augmentation de la disponibilité de l'eau grâce à une meilleure réutilisation de l'eau, à des technologies d'irrigation plus efficaces, et une diminution des besoins en engrais due à des niveaux élevés de nutriments dans les eaux usées traitées. Pour chaque cas, l'outil d'aide à la décision proposé permet d'identifier le scénario le plus efficace pour les agriculteurs et les gestionnaires de l'eau, en termes d'allocation des terres aux différentes cultures, de mélange de différents types d'eau et de niveau d'adoption des différentes technologies de réutilisation de l'eau et d'irrigation développées dans le contexte du projet MADFORWATER. Les décisions prises par les gestionnaires des agences de bassin et des organismes de planification et de gestion des ressources en eau peuvent donc s'appuyer sur une évaluation des mesures prises en ce qui concerne la consommation d'eau douce et des eaux traitées, les besoins en engrais, l'évolution relative à l'affectation des sols et les subventions nécessaires pour la mise en œuvre des politiques proposées.



## Une politique de tarification de l'eau pour améliorer la réutilisation des eaux usées dans le secteur marocain des agrumes

Dans la région de Souss-Massa au Maroc, intensivement cultivée avec des agrumes, une politique de tarification de l'eau a été simulée en diminuant le prix des eaux usées traitées pour atteindre 0,10 € / m3, alors que le tarif réel est de 0,23 € / m3. Grâce à cette politique, et selon l'outil d'aide à la décision, 40% de la superficie totale irriguée peut être irriguée avec des eaux usées traitées, le total d'eau douce requis dans ce cas par le secteur des agrumes diminue de 64% par rapport au niveau actuel et le coût total de l'eau diminue de 10%. À titre d'exemple, La clémentine, l'espèce d'agrumes qui est passée à l'irrigation par les eaux usées traitées, est celle qui se caractérise par les besoins en eau les plus faibles et la plus forte consommation d'engrais, de sorte que certains inconvénients du passage aux eaux usées traitées peuvent être contrebalancés par des économies d'engrais.

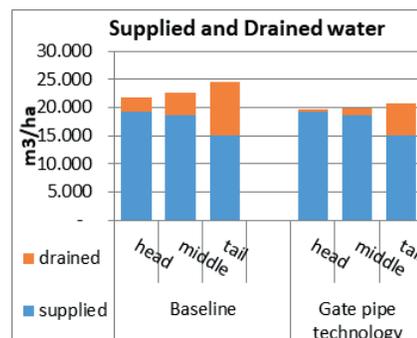
L'utilisation des eaux usées traitées permet d'économiser 38% de la consommation actuelle d'engrais dans le secteur marocain des agrumes, ce qui signifie des économies supplémentaires pour l'agriculteur et une contribution à la préservation de l'environnement. Les effets conjugués de la politique de tarification de l'eau proposée sur le rendement des cultures, le coût de l'eau et le coût des engrais se traduisent par une augmentation significative des revenus des agriculteurs, équivalant à 8500 euros / ha.

### Une technologie innovante pour une meilleure efficacité et une équité accrue des systèmes traditionnels d'irrigation de surface en Égypte

Dans la région du Delta du Nil en Égypte, toute la surface agricole est irriguée avec de l'eau douce fournie dans sa totalité par le Nil à travers un réseau complexe de canaux. L'irrigation gravitaire est largement appliquée et l'excès d'eau d'irrigation, contaminé par des engrais et des pesticides, est collecté au moyen d'un réseau complexe de canaux de drainage. Le scénario principal proposé pour cette région par le biais de l'outil d'aide à la décision consiste à introduire une technologie innovante d'irrigation, le rampe à vannettes auto-régulantes avec un nouveau type de buse régulante à haut débit. Fournissant des débits constants à mesure que la pression diminue, cette technologie devrait avoir deux impacts positifs sur le système traditionnel d'irrigation de surface en Égypte : i) réduire le repompage de l'eau drainée dans le système et, par conséquent, la détérioration de l'eau disponible pour les pratiques d'irrigation, et ii) améliorer l'équité du système, mesurée par la différence entre l'indice de performance dans les différentes sections du canal tertiaire.

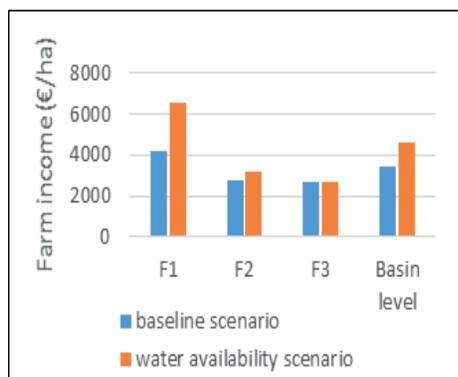
En augmentant l'efficacité de l'irrigation, l'introduction des rampes à vannettes auto-régulantes devrait réduire les besoins d'irrigation de 9%, 12% et 15% en tête, entre le début, le milieu et l'extrémité de chaque canal d'irrigation, respectivement. En outre, l'indice de performance du système - c'est-à-dire le rapport entre l'offre et la demande d'eau - devrait augmenter, ce qui incitera les agriculteurs à réduire le repompage de l'eau de drainage réutilisée dans le réseau de canaux d'irrigation.

D'autre part, le scénario basé sur un modèle indique que, malgré les économies des coûts énergétiques dues à la réduction de la quantité d'eau de drainage repompée dans le système, les revenus des agriculteurs diminuent légèrement, en raison des coûts de l'investissement, de l'exploitation et de l'entretien de la technologie des rampes à vannettes auto-régulantes. Ainsi, ce n'est que si les subventions publiques couvrent entièrement le coût total des rampes à vannettes auto-régulantes (investissement + exploitation et entretien), que les économies d'énergie des agriculteurs auront un impact positif sur leurs revenus et que par conséquent ils considéreront favorablement l'adoption de la technologie innovante proposée.



### Une nouvelle source d'eau pour l'agriculture tunisienne

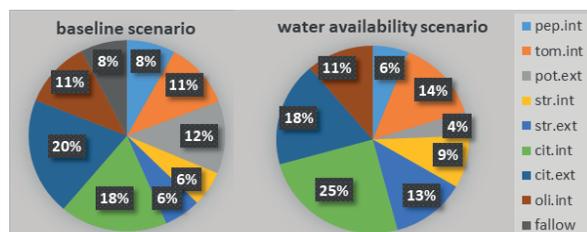
Trois exploitations agricoles de référence, de tailles et de cultures différentes, ont été choisies pour représenter la région de Nabeul dans le nord de la Tunisie : EA1 (3 ha, horticulture), EA2 (2 ha, agrumes) et EA3 (1,5 ha, agrumes et olives). Dans la situation de référence, les exploitations agricoles EA1 et EA2 utilisent des sources d'eau conventionnelles (eau souterraine et eau de surface, respectivement) et EA3 utilise des eaux usées traitées. Ce sont des exploitations moyennes, avec les cultures les plus courantes dans la région de Nabeul : les cultures horticoles telles que la tomate, la pomme de terre, le poivre et la fraise, et les cultures permanentes telles que les oliviers pour la production de l'huile et les agrumes.



Des efforts intenses déployés sur le terrain dans la zone d'étude ont indiqué que le scénario le plus réaliste serait de mélanger l'eau douce et les eaux usées traitées. Ainsi, l'outil d'aide à la décision a été utilisé pour simuler un scénario consistant en une augmentation de la disponibilité de l'eau pour EA1 et EA2, obtenue à partir de la réutilisation des eaux usées traitées. Le prix de l'eau est fixé conformément aux tarifs officiels tunisiens : 0,02 € / m<sup>3</sup> pour les eaux usées traitées et 0,04 € / m<sup>3</sup> pour l'eau douce. Les résultats sont présentés à deux niveaux d'agrégation différents, à savoir au niveau de l'exploitation et du bassin. La simulation indique que le revenu des agriculteurs devrait augmenter de 55% et 14% respectivement pour EA1 et EA2, par rapport au scénario de référence. Au niveau agrégé, le revenu agricole augmente de 35%. Concernant la répartition des cultures, la simulation indique que les agriculteurs cultivent des cultures annuelles plus rentables comme la fraise et la tomate (EA 1) et des cultures permanentes comme les agrumes intensifs (EA2).

### Conclusion

L'outil d'aide à la décision développé par les partenaires IAMB et UPM s'est avéré essentiel pour l'élaboration de stratégies de gestion de l'eau et des terres en agriculture pour les trois études de cas (Tunisie, Maroc et Égypte) et a permis d'analyser l'impact des technologies d'irrigation et des instruments économiques à différents niveaux d'agrégation, de l'exploitation au bassin. Construit et calibré sur les trois études de cas, le modèle peut être utilisé dans des contextes agropédologiques et socio-économiques similaires. En présence d'objectifs contradictoires et d'une multiplicité de parties prenantes, cet outil d'aide à la décision est particulièrement utile quand il y a des décisions complexes à prendre dans le cadre de stratégies plus larges de gestion de l'eau et des terres que les pays pourraient mettre en œuvre pour assurer une utilisation durable des ressources en eau à long terme.



pep.int:poivre intensif; tom.int:tomate intensive;  
 pot.ext:pomme de terre extensive; str.int:fraise intensive;  
 str.ext: fraise extensive; cit.int: agrumes intensifs; cit.ext:  
 agrumes extensifs; oli.int:olive intensive

# Adoption à grande échelle et validation des technologies MADFORWATER: les installations pilotes intégrées de traitement des eaux usées et leur réutilisation dans le secteur agricole

Dans le contexte du projet MADFORWATER, les technologies de traitement des eaux usées et d'irrigation développées et adaptées au cours des deux premières années d'activité à l'échelle du laboratoire, ont été adoptées et validées à grande échelle au cours des deux dernières années. En effet, des technologies sélectionnées ont été adoptées dans quatre installations/unités pilotes dans lesquelles le traitement des eaux usées et leur réutilisation dans le secteur agricole ont été efficacement intégrés. La sélection des technologies à adopter à grande échelle dans chaque unité pilote était basée sur leur rendement technique, l'analyse coût/bénéfices (ACB), l'analyse de cycle de vie (ACV) et les retours recueillis lors de plusieurs ateliers de consultation des parties prenantes qui ont eu lieu à Agadir (Maroc), au Caire (Égypte) et à Tunis (Tunisie). Différents types d'eaux usées ont été traitées et réutilisées dans les installations pilotes de MADFORWATER: eaux usées municipales, eaux usées textiles et eaux de canaux de drainage. La localisation géographique des 4 installations/unités pilotes est illustrée à la figure 1.



Figure 1. Localisation et principales caractéristiques des 4 installations pilotes de MADFORWATER. P1: eaux usées municipales; lieu: station d'épuration municipale de Chotrana, Ariana, Tunisie. P2: eaux usées textiles; lieu: industrie Gwash, Nabeul, Tunisie. P3: eaux usées municipales; lieu: Agadir, Maroc. P4: eau du canal de drainage; lieu: Lac Manzala, Égypte.

## Installations pilotes intégrées pour le traitement et la réutilisation des eaux usées municipales en irrigation (P1 et P3)

Deux installations pilotes ont été construites et exploitées à des fins de traitement et de réutilisation des eaux usées municipales en Tunisie et au Maroc.

L'installation pilote P1 (10 m<sup>3</sup> / j), installée à la station d'épuration de Chotrana à Ariana (Tunisie), est composée (i) d'un filtre à ruissellement nitrifiant qui assure le traitement secondaire des matières organiques et de l'ammoniac, (ii) d'un décanteur secondaire pour la sédimentation des boues, (iii) d'une zone humide construite pour l'élimination des métaux lourds et des éléments nutritifs restants, (iv) d'une unité de désinfection chimique et (v) d'un système de déshydratation des boues secondaires en excès (figure 2). Une efficacité d'élimination satisfaisante a été enregistrée au cours de la période expérimentale : 90% pour la DCO, 92% pour la DBO, 93% pour le TSS et le NTK, 61% pour le TP et une réduction de 3 log pour E. coli. Les concentrations moyennes à la sortie se situent dans les limites de sécurité fixées par la norme tunisienne NT106.03 pour la réutilisation des eaux usées dans l'agriculture et le décret tunisien n ° 2018-315 pour le rejet des eaux usées dans le domaine public.

Les eaux usées municipales traitées produites par l'installation pilote ont été utilisées pour l'irrigation des cultures de blé. Les partenaires de MADFORWATER ont fait un effort significatif afin de développer des technologies d'irrigation adaptées à la réutilisation des eaux usées municipales traitées, dans le but de réduire la consommation d'eau et d'augmenter la production agricole. Plusieurs technologies d'irrigation ont été testées dans l'installation pilote de Sidi Thabet: un modèle de programmation d'irrigation qui prend en compte les caractéristiques spécifiques des eaux usées traitées, des mini-asperseurs innovants adaptés aux eaux usées municipales traitées et aux climats chauds (restriction de la production de petites gouttes qui dérivent et s'évaporent) et la fourniture de bactéries favorisant la croissance des plantes. Des résultats prometteurs sur les paramètres agronomiques du blé ont été obtenus en combinant l'irrigation avec les eaux usées municipales traitées et la fourniture de bactéries favorisant la croissance des plantes. Les inoculats de bactéries peuvent être préparés d'une manière qui peut être facilement utilisée par les agriculteurs. Cependant, l'acceptation sociale et juridique de cette technologie représente toujours un obstacle majeur à sa mise en œuvre à grande échelle.



Figure 2- a) Processus de traitement des eaux usées municipales dans la station d'épuration de Chotrana (Ariana, Tunisie), b) Blé irrigué avec des eaux usées municipales traitées à l'aide de micro-asperseurs

Dans la région de Souss-Massa au Maroc, l'installation pilote P3 s'est appuyée sur une station d'épuration existante au sein de la station M'zar à Agadir, d'une capacité de 75 000 m<sup>3</sup> / jour (Figure 3).

Le processus de traitement des eaux usées municipales comprend une lagune anaérobie, une biodégradation et une infiltration sur une couche de sable et une désinfection aux UV. L'activité de surveillance a montré une élimination moyenne de 97 à 98% de la DBO<sub>5</sub>, de la DCO, du TSS ; de 99% de la NTK et de la turbidité ; de 100% des œufs d'helminthes et des coliformes fécaux et de 60% du phosphore.

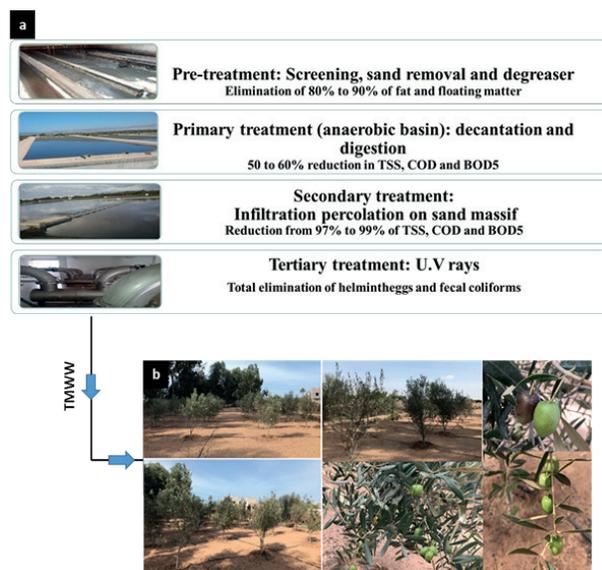
L'effluent final est conforme aux normes marocaines d'irrigation avec des eaux usées traitées, à l'exception de la conductivité électrique (3 - 4,5 mS / cm) qui dépasse légèrement cette norme. La conductivité électrique élevée peut s'expliquer par l'énorme quantité d'eaux usées salines produites par les usines de transformation du poisson. Pour surmonter ce problème, la société marocaine en charge du traitement des eaux usées municipales (RAMSA) a contraint les conserveries de poisson à séparer leurs eaux usées dans un réseau d'assainissement interne.

Les eaux usées municipales traitées produites par l'installation de M'Zar ont été utilisées pour l'irrigation des jeunes oliviers au moyen de buses calibrées innovantes. La planification de l'apport d'eau d'irrigation a été réalisée à l'aide d'un modèle innovant de simulation du bilan hydrique du sol. Après un an d'expérimentation, l'irrigation par eaux usées municipales traitées a permis des économies d'engrais et d'eau de 570 € / ha, lorsque le modèle de simulation du bilan hydrique du sol a été appliqué. Les rendements des cultures obtenus avec des eaux usées municipales se sont révélés similaires à ceux obtenus avec l'eau douce.

En conclusion, les deux filières de traitement des eaux usées municipales testées dans les installations pilotes de MADFORWATER ont conduit à la production d'eaux usées traitées de haute qualité qui ont été utilisées avec succès pour l'irrigation du blé et des oliviers. Pour les deux filières de traitement, le coût global du traitement des eaux usées (0,6-0,7 € / m<sup>3</sup>) s'est révélé acceptable dans le contexte tunisien et marocain.

En particulier, la combinaison filtre ruisselant / zone humide semble être tout à fait adaptée aux petites communautés rurales (1000-10000 personnes) dont les eaux usées collectées ne bénéficient d'aucun traitement et par un manque d'eau douce dont la qualité convient à l'irrigation. D'autre part, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer l'efficacité d'une telle séquence de traitement pour l'élimination des virus, des bactéries pathogènes et des polluants émergents.

Figure 3- a) Processus de traitement des eaux usées municipales à L'Mzar (Souss-Massa, Maroc), b) oliviers irrigués avec des eaux usées municipales traitées à l'aide de buses calibrées



### Installation pilote intégrée de traitement et de réutilisation des eaux usées textiles dans l'irrigation

Une installation pilote d'eaux usées textiles (Figure 1, P2) d'une capacité de 10 m<sup>3</sup> / j a été installée dans l'industrie textile GWash (Nabeul, Tunisie), elle se composait d'une unité de coagulation / floculation, d'un bassin de décantation primaire, d'un réacteur biologique aérobie à lit transporté, d'un bassin de décantation secondaire, d'un filtre à sable et une colonne d'adsorption (Figure 4). Lors des essais préliminaires de l'installation pilote, l'étape du réacteur biologique aérobie à lit transporté (moving bed bioreactor) s'est avérée inadaptée à ce type d'eaux usées, car une salinité élevée et des polluants récalcitrants jouent un rôle inhibiteur sur la croissance de la biomasse. À la lumière de ces résultats, l'installation pilote a été réadaptée et la floculation par coagulation a été appliquée comme traitement principal avant les processus d'adsorption et de filtration. L'installation pilote a conduit à la production d'un effluent de haute qualité, avec des éliminations moyennes égales à 96% pour la couleur, 63% pour la DCO, 66% pour la DBO, 95% pour le TSS et 100% pour le NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, coliformes totaux et fécaux. Toutes les valeurs d'effluents, à l'exception de l'EC (en moyenne autour de 18 ms / cm) se situaient dans les limites tunisiennes de réutilisation des eaux usées en agriculture NT106.03 et de qualité du rejet d'eaux usées dans le domaine public (Décret n ° 2018-315). La technologie développée se caractérise par un coût de traitement de 0,15 € par m<sup>3</sup> d'eaux usées, ce qui se situe dans la fourchette des prix acceptable en Tunisie.

Les eaux usées textiles traitées ont été réutilisées pour l'irrigation du sorgho. Les résultats sont encourageants en termes de paramètres morphologiques, physiologiques et de rendement. La croissance et les rendements des cultures dans les parcelles irriguées avec des eaux usées textiles traitées étaient similaires à ceux des parcelles irriguées avec de l'eau douce. Dans les deux types de parcelles, les rendements en grains de sorgho s'élevaient à environ 1500 kg / ha, donc dans la fourchette des valeurs moyennes rapportées pour la Tunisie en 2017.

Les industries textiles en Tunisie produisent environ 3 millions de m<sup>3</sup> / an d'eaux usées, qui sont généralement rejetées dans les égouts publics, ce qui représente une charge supplémentaire significative de matière organique non biodégradable et de couleur dans les unités de traitement des eaux usées municipales. Le procédé de traitement à faible coût testé avec succès dans l'installation pilote P3 pourrait potentiellement être mis en œuvre à grande échelle dans le contexte nord-africain, conduisant à une diminution marquée de cette charge polluante. Les eaux usées textiles ainsi traitées peuvent être réutilisées pour l'irrigation de cultures non alimentaires, comme l'a démontré efficacement l'installation pilote de MADFORWATER. Une option alternative consiste en une réutilisation interne au sein de l'industrie textile, avec une diminution conséquente de la consommation d'eau douce et finalement une diminution du stress hydrique dans les régions ayant une forte densité d'industries textiles.

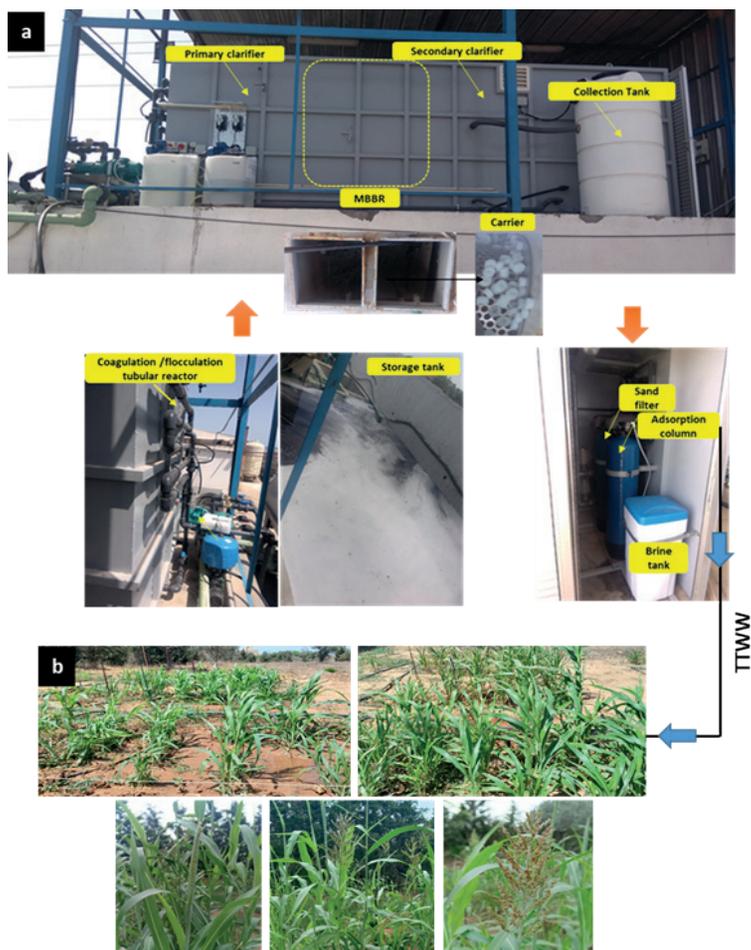


Figure 4- a) Processus de traitement des eaux usées textiles dans l'industrie textile Gwash (Nabeul, Tunisie), b) Plants de sorgho à différents stades de croissance, irrigués avec des eaux usées textiles traitées à l'aide de micro-asperseurs

### Installation pilote intégrée pour le traitement et la réutilisation de l'eau des canaux de drainage

L'installation pilote P4 de MADFORWATER pour le traitement et à la réutilisation des eaux des canaux de drainage, a été installée près du lac Manzala en Egypte, avec une capacité de 250 m<sup>3</sup> / j (Figure 5). L'installation pilote, composée d'un lagon facultatif et de trois types de zones humides construites testées en parallèle (système hybride zones humides artificielles, en cascade, système hybride zones humides artificielles, séquentielles et zones humides artificielle à lit transporté ???), a été menée pendant plus d'un an avec deux différents temps de rétention. La combinaison hybride du lagunage et des zones humides artificielles en cascade a conduit aux rendements d'élimination les plus élevés, soit 70% pour la DBO, 66% pour la DCO, 90% pour le TSS, 83% pour l'azote total, 81% pour le PO<sub>4</sub>, une réduction de 1,9 log pour les coliformes totaux et une réduction de 2,2 log pour les coliformes fécaux, avec un temps de rétention de 2,1 jours dans la zone humide artificielle et un temps de rétention de 2 jours dans la lagune. Les concentrations moyennes des effluents (39 mg / l pour la DCO, 16 mg / l pour la DBO, 13 mg / l pour le TSS, 3 mg / l pour l'azote total, 1,1 mg / l pour le PO<sub>4</sub>, 220 MPN / 100 ml pour les coliformes fécaux) étaient conformes aux normes égyptiennes pour l'irrigation des céréales et des cultures non alimentaires, comme le coton.

L'eau du canal de drainage traitée et semi-traitée (échantillonnée après le traitement par lagunage et amont la construction des zones humides) a été réutilisée pour l'irrigation du coton, en utilisant des rampes à vannettes auto-régulantes dans une section de l'installation pilote et une irrigation traditionnelle à la raie dans une autre section. En comparaison avec le système d'irrigation de surface traditionnellement mis en œuvre dans le delta du Nil, la technologie de tuyauterie à buse calibrée a été testée. Elle a permis d'économiser entre 14 et 23% d'eau d'irrigation - selon le type d'eau utilisée - sans aucune diminution du rendement du coton. L'irrigation avec de l'eau de drainage semi-traitée a conduit au rendement de coton le plus élevé, à la fois pour l'irrigation par des rampes à vannettes et l'irrigation de gravitaire (1780 et 1690 kg / ha, respectivement). Ces rendements expérimentaux étaient significativement supérieurs aux rendements fournis par le site d'indice Mundi, dont la valeur est de 762 Kg / ha en Egypte pour 2019. Les productivités relatives à l'eau obtenues avec les eaux de drainage traitées et semi-traitées étaient assez élevées, sans différence significative entre les deux techniques d'irrigation.

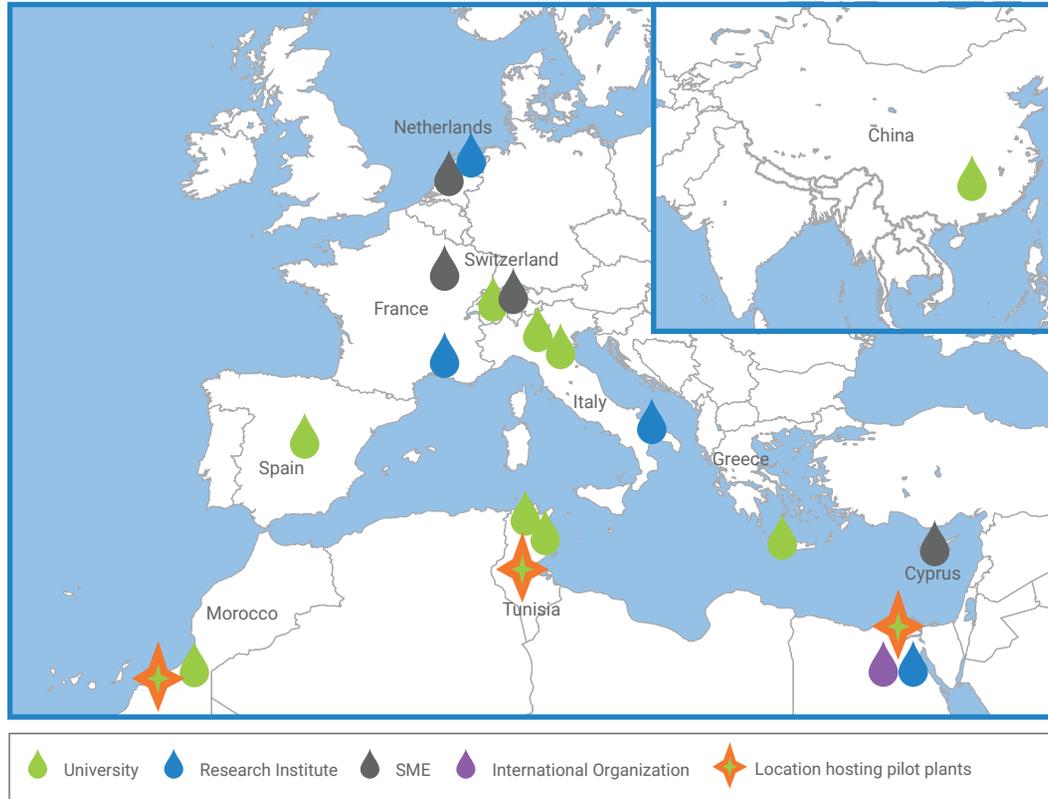
En conclusion, la combinaison de lagunes facultatives et de zones humides artificielles a montré un grand potentiel pour le traitement de l'eau des canaux de drainage dans le delta du Nil. Avec une conception et une planification minutieuse, l'eau du canal de drainage peut être traitée de façon à produire un effluent d'une qualité qui convient à l'irrigation, avec une consommation d'énergie extrêmement faible et une consommation nulle de produits chimiques. De plus, l'utilisation de systèmes de canalisations à buses calibrées pourrait réduire considérablement la quantité d'eau fournie au niveau du champ, réduisant ainsi la quantité d'eau de drainage, sans réduire le rendement des cultures. La mise en œuvre à grande échelle de ces technologies dans le delta du Nil pourrait conduire à une nette amélioration de la qualité



Figure 5- a) Processus de traitement de l'eau du canal de drainage dans le lac Manzala en Egypte, b) Plants de coton irrigués avec de l'eau de canal de drainage traitée à l'aide de tuyaux à vannes

# LE CONSORTIUM MADFORWATER

Le consortium MADFORWATER est composé de 17 partenaires répartis géographiquement principalement autour de la mer Méditerranée dans 7 pays européens, 3 MAC et la Chine. Il comprend 9 universités, 4 centres de recherche, 1 organisation internationale à but non lucratif (FAO), 1 consultant et 1 PME expert en marketing, développement de business plan et gestion de l'innovation et 2 PME dans les domaines du traitement et de l'irrigation WW. Les partenaires de MADFORWATER ont une expertise multidisciplinaire qui comprend le traitement des eaux usées, l'irrigation, l'analyse du cycle de vie des technologies, l'analyse coûts-bénéfices des technologies, l'analyse de la vulnérabilité de la ressource en eau, l'implication des parties prenantes, la gestion intégrée de l'eau, le renforcement des capacités, l'élaboration de plans d'affaires.



Pour plus d'informations sur le projet, visitez le site MADFORWATER à l'adresse: [www.madforwater.eu](http://www.madforwater.eu)

Suivez MADFORWATER sur



La communication ne reflète que le point de vue de l'auteur et l'EASME n'est pas responsable de l'utilisation qui pourrait être faite des informations qu'elle contient.



Ce projet a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention n° 688320