Développement et mise à l'échelle des technologies de traitement et de réutilisation des eaux usées dans les pays d'Afrique méditerranéenne: le projet MADFORWATER

Révisé par Roberta Lamaddalena et Dario Frascari

Collaborateurs: ROBERTA LAMADDALENA, DARIO FRASCARI, NICOLAS KALOGERAKIS, STATHIS KYRIACOU, AHMED RASHED, ATEF JAOUANI, AMEUR CHERIF, REDOUANE CHOUKR-ALLAH, SARA BORIN, CATHERINE GIBERT, JOCHEN FROEBRICH, NICOLA LAMADDALENA, WEN-TAO LI, BRUNO MOLLE, CONSUELO VARELA ORTEGA, MARIJN MULDER, PHILIPPE CORVINI, MOHAMED ALHAMDI, VITO FELICE URICCHIO

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITE DE BOLOGNE

CONSEIL NATIONAL DE LA RECHERCHE - INSTITUT DE RECHERCHE SUR L'EAU - BARI 2020

Le Développement et la mise à l'échelle des technologies de traitement et de réutilisation des eaux usées dans les pays africains méditerranéens : le Projet MADFORWATER

Propriété intellectuelle des auteurs

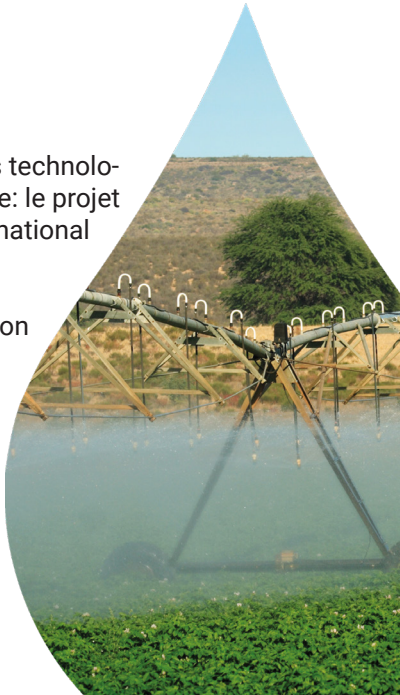
Cette œuvre est distribuée sous une licence Creative Commons - Attribution - 4.0 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Editeurs : Alma Mater Studiorum - Université de Bologne, Bologne 2020 et le Conseil national de la recherche- Institut de recherche sur l'eau, Bari 2020

DOI : http://doi.org/10.6092/unibo/amsacta/6560.
ISBN : 9788854970380

Citer comme suit : Lamaddalena R., Frascari D. (Eds.), Développement et mise à l'échelle des technologies de traitement et de réutilisation des eaux usées dans les pays d'Afrique méditerranéenne: le projet MADFORWATER, Université de Bologne, Bologne et l'Institut de recherche sur l'eau - Conseil national de la recherche, Bari, 2020. DOI : 10.6092 / unibo / amsacta / 6560. ISBN : 9788854970380.

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



CONTENTS

TABLE DES ABRÉVIATIONS....4

1. INTRODUCTION....5

2. SITUATION ACTUELLE DU TRAITEMENT DES EAUX USÉES, DE LA RÉUTILISATION DES EAUX USÉES, DE L'IRRIGATION ET DE LA GESTION DE L'EAU EN ÉGYPTE, AU MAROC ET EN TUNISIE....8

3. INFORMATIONS GÉNÉRALES SUR LE PROJET MADFORWATER....9

4. OBJECTIFS ET CONCEPT....10

5. LE CONSORTIUM....14

6. SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES DE TRAITEMENT DES EAUX USÉES DÉVELOPPÉES DANS LE CADRE DU PROJET MADFORWATER....15

7. INSTRUMENTS TECHNOLOGIQUES D'IRRIGATION DÉVELOPPÉS DANS LE CADRE DU PROJET MADFORWATER....40

8. LES INSTALLATIONS/UNITES PILOTES INTEGREES DE MADFORWATER POUR LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES ET LEUR RÉUTILISATION DANS LE SECTEUR AGRICOLE....50

TABLEAU DES ABRÉVIATIONS

BOD = Demande biologique en oxygène
CHCW = Système hybride de zones humides construites en cascade
DOC = Demande chimique en oxygène
CW = Zone humide construite
CWP = Productivité de l'eau agricole
DCW = Eau du canal de drainage
DM = Matière sèche
OD = oxygène dissout
UD = Uniformité de la distribution
CE = Conductivité électrique
UE = Union européenne
FAO = l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FBCW = Zones humides construites à lit transporté
CF = Coliformes fécaux
ADF = Activité d'hydrolyse du diacétate de fluorescéine
FW = Eau douce
FWS = La côte d'eau
GBSW = Zones humides souterraines de lit de gravier
HCW = Système hybride de zones humides construites
TRH = Temps de rétention hydraulique
M4W = MAD4WATER
PAM = Pays africains méditerranéens
MENA = Moyen-Orient et Afrique du Nord
NPP = nombre le plus probable
MWW = Eaux usées municipales
MWWTP = Installation de traitement des eaux usées municipales
ATK = Azote total Kjeldah
PGPB = Bactéries favorisant la croissance des plantes
PP = Installation/ unité pilote
RDCW = Eau brute du canal de drainage
Semi-TDCW = L'eau du canal de drainage semi-traitée
SHCW = Système hybride de zones humides construites séquentielles
SIM = Gestion sûre de l'irrigation/modèle d'irrigation sûr
SM = Matière en suspension
SP = Point de prélèvement
TC = Coliformes totaux
TDCWT = L'eau du canal de drainage traitée
TMWW = Eaux usées municipales traitées
TN = Teneur en azote totale
COT = Carbone Organique Total
TP = Quantité totale de phosphore
TSS = Quantité totale de solides en suspension
TTWW = Eaux usées textiles traitées
TWW = Eaux usées textiles
WP = Ensemble de travaux
WW = Eaux usées

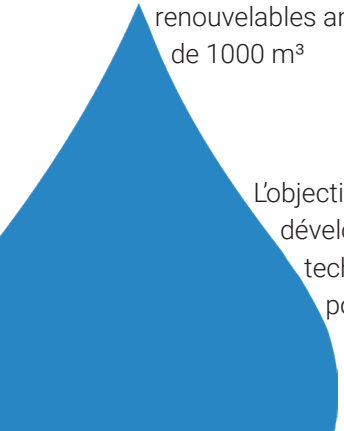
- INTRODUCTION

L'eau est une ressource vitale, un élément primordial pour l'homme, elle est indispensable à la survie et au développement de tout secteur productif. C'est la responsabilité de chacun, y compris les institutions, de protéger et de préserver l'eau en tant qu'essence de vie et de sécurité pour les générations futures. De là provient le cadre moderne de la gestion de l'eau dans l'agriculture, basée sur des critères rigoureux d'efficacité et de protection de l'environnement, des critères exigés également par les législations européennes et nationales. La menace du changement climatique, dont les effets ont un impact sur le cycle de l'eau et sont particulièrement évidents dans la région méditerranéenne, nécessite une approche intégrée de la gestion et des politiques de l'eau. Il est donc nécessaire de garantir des politiques basées sur des modèles de gouvernance compatibles avec les différentes demandes d'utilisation, en tenant compte des tendances de consommation et de disponibilité de l'eau.

L'eau couvre 70% de notre planète et il est facile de se dire qu'elle sera toujours abondante. Cependant, l'eau douce - celle que nous buvons, et avec laquelle nous nous baignons, et nous irriguons nos champs agricoles - est incroyablement rare. 3% seulement de l'eau du monde est de l'eau douce, et les deux tiers de cette eau sont cachés dans des glaciers gelés, ou non disponibles pour notre usage. Deux milliards et demi de personnes n'ont toujours pas accès aux installations d'assainissement de l'eau ; on s'attend à ce que 3 milliards de personnes souffrent de pénurie d'eau d'ici 2050, et d'ici 2030, un écart de 40% devrait se développer entre l'approvisionnement en eau durable et les prélèvements d'eau. On estime que 20% des aquifères du monde sont surexploités. La limite de durabilité du captage d'eau a été dépassée pour environ un tiers de la population humaine. L'eutrophisation devrait augmenter presque partout jusqu'en 2030. Le changement climatique aggravera la crise de l'eau, en raison des variations dans la distribution et la disponibilité des ressources en eau. L'agriculture est très sensible à la disponibilité et à la qualité de l'eau, car elle représente 70% des prélèvements d'eau douce dans le monde. L'agriculture est confrontée au défi de produire 100% en plus de nourriture d'ici 2050, mais en même temps, la bioéconomie exigera une production accrue de produits agricoles non alimentaires. Les conséquences de la rareté et de la mauvaise qualité de l'eau sont particulièrement importantes dans

la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord. Selon le rapport mondial des risques du Forum économique mondial de 2015, la crise de l'eau représente de loin le plus grand risque dans la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord, où la croissance démographique prévue combinée à la croissance économique devrait entraîner une augmentation de 47% de la demande en eau d'ici 2035. Le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord est la région la plus sèche du monde, avec des prélèvements d'eau dépassant de 30% les ressources en eau renouvelables. La région est considérablement affectée par la désertification, la surexploitation des eaux souterraines, l'intrusion d'eau de mer dans les aquifères et la détérioration de la qualité de l'eau. En 2010, les ressources en eau renouvelables annuelles dans les pays de la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (525 m³/habitant, en moyenne) étaient environ la moitié du seuil de 1000 m³ / habitant qui marque la pénurie d'eau et juste au-dessus du seuil de 500 m³/habitant de la pénurie d'eau absolue. La pénurie d'eau freine le développement socio-économique, en particulier en ce qui concerne le secteur de l'agriculture, qui utilise 86% des prélèvements d'eau dans la région. Le traitement des eaux usées est encore de faible ampleur dans cette région (43% en moyenne). En outre, les eaux usées traitées se caractérisent généralement par une élimination insuffisante des principaux polluants, en raison du manque de traitements tertiaires, d'un mauvais entretien et d'un mauvais suivi, de fréquentes pannes de courant, d'une faible qualification du personnel et du sous-dimensionnement des usines de traitement. Dans la région Moyen-Orient et Afrique du Nord, le changement climatique devrait réduire les précipitations et l'humidité du sol et augmenter l'évaporation des eaux de surface et les besoins en eau des cultures. Ces changements, combinés à la croissance démographique, devraient ramener les ressources en eau renouvelables annuelles à 414 m³/habitant d'ici 2025. Parmi plusieurs stratégies possibles pour lutter contre la crise de l'eau, la réutilisation des eaux usées traitées représente une stratégie prometteuse et largement étudiée : elle fournit un approvisionnement fiable en eau pendant les pénuries régionales, améliore la croissance économique locale, réduit les prélèvements d'eau des aquifères et des rivières, diminue la consommation d'engrais dans l'agriculture et réduit l'eutrophisation. Malheureusement, peu de pays de la région Moyen-Orient et Afrique du Nord ont mis en œuvre de solides programmes de réutilisation des eaux usées.

Plusieurs projets de recherche internationaux visent à réduire le stress hydrique dans la région méditerranéenne et africaine. Le projet MADFORWATER vise à développer un ensemble intégré d'instruments technologiques et de gestion pour l'amélioration du traitement des eaux usées, la réutilisation des eaux usées traitées dans l'irrigation et l'efficacité de l'eau dans l'agriculture. MADFORWATER concentre ses activités sur des bassins hydrologiques sélectionnés situés dans 3 pays méditerranéens-africains : l'Égypte, le Maroc et la Tunisie. Ces pays sont représentatifs de la région méditerranéenne-africaine par rapport à leur population (74% des habitants de la région), leur PIB (64%), leur production en eaux usées (88%), leur taux de traitement des eaux usées (50%) et leurs caractéristiques hydrologiques. Les pays sélectionnés se caractérisent par une pénurie d'eau importante : les ressources en eau renouvelables annuelles sont égales à 60% du seuil de 1000 m³



L'objectif de MADFORWATER était de développer un ensemble de solutions technologiques et de gestion intégrées pour améliorer le traitement des eaux usées, leur réutilisation dans l'irrigation et l'efficacité de l'eau dans le secteur de l'agriculture en Tunisie, au Maroc et en Égypte. MADFORWATER a développé des technologies pour la production d'eau d'une qualité qui convient à l'irrigation à partir des canaux de drainage, des eaux usées municipales, agro-industrielles et industrielles et des technologies pour promouvoir l'efficacité et la réutilisation de l'eau dans le secteur de l'agriculture, initialement validées à l'échelle du laboratoire, et les a adaptées à trois bassins hydrologiques principaux dans les pays africains méditerranéens sélectionnées. Les technologies sélectionnées ont été adaptées et validées dans quatre installations/unités pilotes sur le terrain de traitement / réutilisation intégrés des eaux usées. Des stratégies intégrées de traitement et de réutilisation des eaux usées ciblées sur les bassins sélectionnés ont été élaborées, et des lignes directrices pour l'élaboration de stratégies de gestion intégrée de l'eau dans d'autres bassins des trois pays africains méditerranéens cibles ont été décrites, en tenant compte du changement climatique, de l'augmentation de la population et des scénarios de croissance économique. La pertinence sociale et technique des technologies développées et des instruments non technologiques par rapport au contexte local a été évaluée avec la participation des parties prenantes et des partenaires des pays africains méditer-

ranéens. Des lignes directrices relatives aux instruments économiques et aux politiques pour une mise en œuvre efficace des solutions de gestion de l'eau proposées dans les pays africains méditerranéens cibles ont été élaborées. Le consortium MADFORWATER est composé de 17 partenaires, dont 5 d'Afrique du Nord et 1 de Chine.
Pour plus d'informations sur le projet, visitez le site Web: www.madforwater.eu ou contactez-nous: dario.frascari@unibo.it.

2 - SITUATION ACTUELLE DU TRAITEMENT DES EAUX USÉES, DE LA RÉUTILISATION DES EAUX USÉES, DE L'IRRIGATION ET DE LA GESTION DE L'EAU EN ÉGYPTE, AU MAROC ET EN TUNISIE

En termes de traitement des eaux usées, le rapport entre les eaux usées traitées et les eaux usées produites est égal à 57% en Egypte et 24% au Maroc, alors qu'une situation relativement avancée est observée en Tunisie, avec un rapport de 79%. Dans les 3 pays, une grande partie des eaux usées traitées (75% à 90%) subit un traitement secondaire pour l'élimination de la demande biologique en oxygène (DBO), tandis que la fraction restante est soumise uniquement à un traitement primaire. Les traitements tertiaires sont rarement mis en œuvre. Les principales technologies utilisées pour le traitement secondaire sont les boues activées en Tunisie et en Égypte et les lagunes au Maroc. Les principaux problèmes opérationnels associés au traitement des eaux usées dans ces pays sont les suivants : 1) une aération insuffisante au cours du traitement secondaire, en raison de pannes de courant ou d'un coût énergétique excessif; 2) des retards importants et des coûts élevés quant à l'achat de composants pour la réparation de l'équipement; 3) les défaillances du processus secondaire dues à la présence de composés toxiques véhiculés par des eaux usées industriels non traités; 4) des stations de traitement des eaux usées fonctionnant au-dessus de leur capacité, en raison de la croissance rapide de la population; et 5) un contrôle insuffisant de la qualité des eaux usées traitées en raison de contraintes juridiques ou techniques. Le type et l'étendu des technologies d'irrigation utilisées sont assez diversifiés dans les 3 pays étudiés : en Egypte 98% de la surface cultivée est équipée de moyens d'irrigation, alors qu'au Maroc et en Tunisie cette fraction

est respectivement égale à 16% et 10%. Les systèmes d'irrigation de surface, tels que l'irrigation par sillons, bandes de bordure et par bassin, représentent la technologie d'irrigation la plus courante, avec une efficacité moyenne égale à 60%. À l'inverse, les systèmes d'irrigation localisés ne sont pas couramment utilisés dans ces pays : l'irrigation goutte à goutte (90% d'efficacité au champ) est utilisée dans 20% de la superficie irriguée (moyenne des 3 pays), et l'irrigation par aspersion (efficacité de 75%) est utilisée en seulement 14% de la surface irriguée. Le Maroc et la Tunisie ont subventionné de manière significative la fourniture de systèmes d'irrigation goutte à goutte. Cependant, en raison d'un mauvais entretien et de la faible qualité de l'équipement, la plupart de ces systèmes étaient obstrués ou inefficaces après 1 à 2 ans, et les agriculteurs sont revenus à l'irrigation de surface. Les eaux usées traitées réutilisées pour l'irrigation est égal à 0,3%, 4% et 24% des eaux usées produites au Maroc, en Egypte et en Tunisie, respectivement. La fraction de la superficie totale d'irrigation équipée pour l'irrigation avec de l'eau traitée varie entre 1% et 2%. Les contraintes menant à ces faibles niveaux de réutilisation des eaux usées sont le manque d'acceptation sociale en raison d'une information inadéquate sur les avantages de cette pratique et du mauvais suivi des eaux traitées, une analyse économique incomplète des options de réutilisation des eaux usées, l'inadéquation entre la tarification de l'eau et la rareté de l'eau, et le manque d'incitations économiques pour la réutilisation des eaux usées traitées. Chacun des 3 pays méditerranéens-africains cibles a fait des progrès significatifs dans le domaine de la gestion durable de l'eau au cours des 2 dernières décennies. Cependant, des progrès supplémentaires sont nécessaires pour concevoir des stratégies de gestion de l'eau capables de 1) guider les gouvernements locaux, les autorités de bassin, les gestionnaires des stations de traitement des eaux usées et les agriculteurs dans la sélection des technologies de traitement de l'eau et d'irrigation les plus efficaces, et 2) définir des instruments économiques visant à promouvoir l'adoption de technologies efficaces pour le traitement de l'eau l'irrigation et la réutilisation des eaux usées traitées. Dans les 3 pays, la législation nationale impose des limites pour la réutilisation agricole des eaux usées traitées.

3- INFORMATIONS GÉNÉRALES SUR LE PROJET MADFORWATER

Titre: Développement et mise en application de solutions technologiques et de gestion intégrées pour le traitement des eaux usées et leur réutilisation efficace en agriculture, d'une manière adaptée aux besoins des pays africains méditerranéens

Acronyme: MADFORWATER

Type: Projet de recherce et d'innovation

Coordinateur de projet: Alma Mater Studorium – Università di Bologna

Partenaires concernés: 17 partenaires répartis dans 6 pays de l'UE, 3 pays d'Afrique méditerranéenne sélectionnés, la Suisse et la Chine

Financement: Horizon 2020 WATER-5c-2015

Durée: 1er juin, 2016 – 30 novembre, 2020

Le projet MADFORWATER vise à réaliser les objectifs de l'initiative de l'Union Européenne à l'Horizon 2020 dans le cadre de l'action WATER-5c-2015, en se concentrant sur le développement de solutions technologiques et non-technologiques pour la gestion des ressources en eau en Tunisie, au Maroc et en Egypte. Les partenaires du projet MADFORWATER participeront au développement et à l'adaptation de solutions technologiques et de gestion axées sur le traitement des eaux usées et leur efficace réutilisation dans le secteur agricole en Afrique du Nord.

Les nouvelles technologies développées, et qui ont été adaptés au contexte social et technique des trois pays concernés, visent à produire de l'eau pour l'irrigation à partir des eaux usées municipales et industrielles, ainsi que des canaux de drainage. En parallèle, le projet MADFORWATER a développé de nouvelles technologies pour assurer l'efficience de l'eau et sa réutilisation dans l'agriculture. Une collaboration étroite avec les acteurs et les parties prenantes locaux, contribuera à adapter les solutions proposées au contexte local. Le projet MADFORWATER vise à produire un impact à long terme en Egypte, au Maroc et en Tunisie, en termes de traitement et de réutilisation des eaux usées, améliorant ainsi la production agricole et réduisant l'exploitation des réserves d'eau et la pollution de l'eau.

4 - OBJECTIFS ET CONCEPT

L'objectif général de MADFORWATER est de développer un ensemble intégré d'instruments technologiques et de gestion pour l'amélioration du traitement des eaux usées, la réutilisation des eaux usées pour l'irrigation et l'efficacité de l'eau dans l'agriculture. Il vise à réduire la vulnérabilité des ressources en eau dans les bassins sélectionnés en Egypte, au Maroc et Tunisie. MADFORWATER abordera principalement l'intégration de l'offre (traitement des eaux usées) et de la demande (réutilisation des eaux dans

l'agriculture) et par la suite, l'adaptation des solutions proposées au contexte local à travers :

L'installation et l'optimisation de quatre usines pilotes visant à traiter les eaux usées et leur réutilisation de façon efficace ;

Une approche participative et multidisciplinaire pour la conception de technologies et de solutions de gestion dans le cadre d'une coopération internationale appuyée sur une solide collaboration entre les partenaires de l'Union Européenne et les pays méditerranéens africains ;

Un dialogue approfondi entre le consortium, de nombreux pays méditerranéens africains et les acteurs internationaux membres du Conseil consultatif des parties prenantes, afin de maximiser la pertinence des solutions proposées en fonction des différents contextes, et par la suite, l'impact à long terme des technologies, des stratégies de gestion de l'eau et des politiques proposées par le projet.

L'objectif général du projet MADFORWATER s'est traduit par les objectifs spécifiques suivants : 1) Une meilleure identification des vulnérabilités en termes de quantité et de qualité de l'eau en Égypte, au Maroc et en Tunisie et la mise en place d'un outil d'évaluation de la vulnérabilité de l'eau adapté au contexte local à utiliser pour l'évaluation de l'efficacité potentielle des stratégies de gestion de l'eau à l'échelle du bassin. 2) Développement et/ou adaptation au contexte local de solutions technologiques pour le traitement des eaux usées, la réutilisation des eaux usées traitées dans l'irrigation et l'utilisation efficace de l'eau dans l'agriculture. 3) La conception de stratégies de gestion de l'eau et des terres à l'échelle du bassin, qui soient étroitement liées aux technologies du projet. 4) Un renforcement accru des capacités dans les pays cible par rapport aux solutions proposées et à l'acceptation sociale de la réutilisation des eaux traitées dans l'agriculture.

La réalisation des objectifs de MADFORWATER repose sur 2 piliers : le traitement des eaux usées, designées comme source d'eau précieuse pour l'agriculture, et l'irrigation, qui représente la principale source de demande en eau dans les pays méditerranéens-africains. Alors que le premier pilier vise à augmenter la quantité d'eau disponible pour l'irrigation, le second vise à améliorer la réutilisation des eaux usées pour l'irrigation et l'efficacité de la consommation d'eau dans l'agriculture tout en garantissant une bonne santé des sols. Ces 2 piliers sont caractérisés transversa-

lement par 2 concepts clés : l'adaptation et l'intégration. Une approche d'adaptation rigoureuse est appliquée au développement de technologies et de stratégies de gestion de l'eau et des terres afin de les rendre techniquement et culturellement adaptées au contexte environnemental et socio-économique des pays méditerranéens-africains cibles. Une telle approche s'associe à une grande participation des parties prenantes concernées des pays méditerranéens-africains qui fournissent régulièrement des retours sur les mesures d'adaptation entreprises et sur l'acceptation sociale des solutions proposées. En outre, l'intégration est mise en application principalement entre les 2 piliers par une série d'installations de démonstration où différents types d'eaux usées sont traités avec les technologies proposées par le projet MADFORWATER et réutilisés pour l'irrigation de cultures typiques des 3 pays cibles, en utilisant des technologies d'irrigation adaptées à l'utilisation des eaux usées traitées. L'approche de l'intégration est également appliquée au sein de chaque pilier de MADFORWATER, avec un développement intégré de technologies, d'outils d'aide à la décision et de stratégies de gestion de l'eau et des terres.

MADFORWATER s'articule autour de 3 phases, ou groupes d'activités :

• la **phase d'analyse**, qui a produit des outils pour l'analyse des vulnérabilités hydriques liées à l'approvisionnement et à la demande en eau à l'échelle du pays et du bassin;
• la **phase technologique**, consacrée au développement et à l'adaptation de technologies de traitement des eaux usées et de réutilisation agricole; un grand nombre de technologies de traitement des eaux usées et d'irrigation ont été étudiées séparément à l'échelle du laboratoire, afin de cribler un grand nombre de solutions potentielles et d'identifier les plus prometteuses en termes de performances, d'impact environnemental, de coûts, d'avantages et d'adaptation au contexte local; ensuite, une sélection de technologies de traitement des eaux usées et d'irrigation a été intégrée dans 4 stations pilotes sur le terrain, augmentant ainsi le niveau d'adaptation technologique et intégrant les domaines de l'approvisionnement et de la demande en eau;
• la **phase de mise en œuvre**, qui comprend des activités visant à maximiser l'impact à long terme du projet, telles que les stratégies de gestion de l'eau et des terres, les recommandations politiques, le renforcement des capacités et l'exploitation industrielle.

Ce livret se concentre sur la présentation des principaux résultats atteints par MADFORWATER dans le cadre de la phase technologique. La section 6 spécifiquement présen-

te les résultats du développement et de l'adaptation des technologies de traitement des eaux usées et d'irrigation à l'échelle du laboratoire, tandis que la section 7 présente les résultats obtenus dans les 4 stations pilotes de traitement des eaux usées et de réutilisation agricole.

Quatre catégories d'eaux usées, sélectionnées sur la base de leur importance quantitative et qualitative dans les 3 pays méditerranéens-africains cibles, ont été abordées dans le cadre du projet MADFORWATER, dans le but de produire une eau de qualité pour l'irrigation, sur la base du raisonnement suivant :

1. **Les eaux usées municipales,** qui représente 82-92% du total des eaux usées produites dans les pays méditerranéens-africains étudiés, et dont une grande fraction est non traitée.
2. **Les eaux usées textiles**, choisi comme un type pertinent d'eaux usées industrielles, en raison de l'importance et de la croissance rapide de l'industrie textile dans les 3 pays méditerranéens-africains cibles (la production textile fournit 6% du PIB en Egypte, 7% au Maroc et en Tunisie). La production des eaux usées textiles est égale à $48x10^6$ m^3/an en Égypte, $2,8x10^6$ m^3/an en Tunisie et $2,7x10^6 m^3$/an au Maroc (5-7% du total des déchets industriels produits dans les pays méditerranéens-africains cibles).
3. Deux sources d'eaux usées agro-industrielles ont été sélectionnées sur la base de leur pertinence quantitative et qualitative dans les 3 pays méditerranéens-africains et du manque de procédés rentables à l'échelle industrielle pour leur traitement :

a. **Les eaux usées des pressoirs à huile** contenant de fortes concentrations de phénols (0,5-18 g/l) et de DCO (20-70 g/l), et caractérisé par une production élevée dans les pays méditerranéens-africains cibles : en Tunisie $1,2x10^6$ m_3/an, au Maroc $3,5x10^5$ m^3/an, en Egypte $1,4x10^5$ m^3/an. Leur teneur élevée en composés polyphéniques (0,1-18 g/l) est toxique pour les plantes. Ainsi, bien que les eaux usées des pressoirs à huile aient traditionnellement été rejetées directement dans les champs d'oliviers, la plupart des pays ont récemment interdit cette pratique, imposant ainsi le traitement de ces eaux.

b. Les eaux usées du conditionnement des fruits et des légumes, produites au cours du processus de conditionnement de tous les fruits et légumes exportés par les pays méditerranéens-africains cibles. Les eaux usées du conditionnement des fruits et des légumes représentent une source de préoccupation principalement en raison des concentrations de différents fongicides, principalement le thiabendazole (0,8-1,5 g/l), l'imazalil (0,25-0,5 g /l), la guazatine (0,6-1,2 g/l) et l'orthophénylphénol (1 à 1,2 g/l).

4. Pour l'Égypte, le projet MADFORWATER s'est concentré sur l'eau des canaux de drainage, qui recueille la plupart des eaux usées municipales et industrielles produites dans la zone Delta. Elle contient de la DBO (0,02-0,07 mg/l), de la DCO (0,03-0,12 g/l), du NH_3 (0,01-0,03 g / L), des métaux lourds (Cu, Cr, Ba, Mn, Zn ; jusqu'à 0,01 g/L), des coliformes fécaux. $11x10^9$ m^3/an de l'eau des canaux de drainage sont utilisés pour l'irrigation en Egypte.

5 - LE CONSORTIUM

Le consortium de MADFORWATER est composé de 17 partenaires répartis géographiquement principalement autour de la mer Méditerranée, dans 7 pays européens, 3 pays méditerranéens africains et en Chine. Il comprend 9 universités, 4 centres de recherche, une organisation internationale à but non lucratif (FAO), un cabinet de conseil avec une expertise en matière de marketing et de conception de plans d'affaires, et 2 entreprises de traitement des eaux usées et d'irrigation qui ont conçu et construit les installations de démonstration du projet MADFORWATER.

Partner	Expertise
Alma Mater Studiorum – University of Bologna (Italy)	Project coordination; WW treatment
University of Manouba (Tunisia)	WW treatment; demonstrator pilot operation
Technical University of Crete (Greece)	WW treatment
University of Tunis El Manar (Tunisia)	WW treatment; demonstrator pilot operation
Wageningen Environmental Research (Netherlands)	Water vulnerability analysis; stakeholder involvement
University of Applied Sciences and Arts of Northwestern Switzerland (Switzerland)	WW treatment; water vulnerability analysis; integrated water management, including policies and economic instruments, life cycle analysis of technologies
Agronomic and Veterinary Institute Hassan II (Morocco)	WW treatment; irrigation; demonstrator pilot operation
University of Milan (Italy)	WW treatment; irrigation
FAO Regional Office for Near East and North Africa (International)	Water vulnerability analysis; capacity building
Polytechnic University of Madrid (Spain)	Water vulnerability analysis; integrated water management, including policies and economic instruments
Mediterranean Agronomic Institute of Bari (Italy)	Irrigation; integrated water management, including policies and economic instruments
National Water Research Center - Ministry of Water Resources and Irrigation (Egypt)	WW treatment; demonstrator pilot construction and operation
National Research Institute of Science and Technology for Environment and Agriculture (France)	Irrigation
PNO Innovatieadvies (Netherlands)	Cost benefit analysis of technologies; business plans development; coordination of exploitation and dissemination activities
S.K. Euromarket Ltd (Cyprus)	WW treatment; demonstrator pilot construction
Nanjing University (China)	WW treatment
ROLLAND Arroseurs Sprinklers (France)	Irrigation; demonstrator pilot construction

6 - SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES DE TRAITEMENT DES EAUX USÉES DÉVELOPPÉES DANS DE LE CADRE DU PROJET MADFORWATER

1 - Eaux usées municipales

Principaux polluants à éliminer pour une réutilisation agricole :
Composés organiques, azote, phosphore, TSS et agents pathogènes

Technologies principalement utilisées en Egypte, au Maroc et en Tunisie pour le traitement de ces eaux usées
La plupart des stations de traitement des eaux usées municipales situées en Tunisie, au Maroc et en Égypte utilisent des procédés aérobies à boues activées classiques (à faibles et moyennes charges) comme traitement secondaire. Peu de stations possèdent un traitement tertiaire pour l'élimination de l'azote et du phosphore avec des lagunes aérées. La désinfection par UV est utilisée pour le traitement tertiaire uniquement dans les stations pilotes. Le principal inconvénient du procédé à boues activées réside dans la consommation d'énergie électrique pour l'aération, alors que le principal inconvénient des lagunes aérées est la faible efficacité de l'élimination de l'azote ammoniacal ou du phosphore. La teneur en DCO et en DBO5 des eaux usées municipales traitées par les procédés susmentionnés dépasse généralement les limites imposées par les normes locales et ISO (par exemple la norme tunisienne NT 106.03) pour la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation. De plus, le contenu microbiologique des eaux usées traitées pose un risque pour la santé si elles sont utilisées pour l'irrigation agricole.

Brève présentation des technologies développées par MADFORWATER pour ces eaux usées
Le défi consiste à développer un train de traitement capable d'atteindre une efficacité et une fiabilité de traitement élevées, avec des coûts d'installation, d'exploitation et de maintenance réduits. MADFORWATER développe une technique qui consiste à utiliser des lits bactériens percolateurs avec étage de nitrification utilisant des supports innovants à haute surface spécifique, pour le traitement secondaire des eaux usées municipales. En ce qui concerne le traitement tertiaire, deux techniques sont testées : a) les zones humides artificielles pour éliminer l'azote, le phosphore, les métaux lourds et les polluants émergents et b) les bioréacteurs à enzymes immobilisées.

Lits bactériens percolateurs avec nitrification utilisant des supports innovants à surface spécifique élevée (Nitrifying trickling filters with innovative high-surface carriers)

Polluants spécifiques ciblés par cette technologie : DBO résiduelle, azote, phosphore et agents pathogènes

Description de la technologie

Le lit percolateur est composé d'un matériau en plastique poreux sur lequel les eaux usées sont distribuées pour ensuite ruisseler. Une distribution hydraulique rotative est généralement standard pour ce processus.

Cette technologie vise à :

- réduire les temps de rétention grâce à l'obtention d'une épaisseur de biofilm élevée,
- améliorer les performances de nitrification / dénitrification.

Le réacteur de laboratoire se composait de 4 compartiments : une fosse septique pour le traitement primaire des eaux usées municipales, un filtre percolateur nitrifiant configuré comme un système à deux étapes (dans la première étape, l'élimination de la DBO est accomplie, suivie de la deuxième étape où la nitrification est réalisée), un réservoir de recirculation et un purificateur secondaire pour la décantation des boues.

Réacteur de laboratoire pour le traitement des eaux usées municipales

(1) Entrée d'influent, (2) Filtre à charbon actif, (3) Fosse septique, (4) Réservoir de recirculation, (5) Pompe de recirculation, (6) Distributeur d'eau, (7) 1ère étape du filtre percolateur, (8) 2ème étape du filtre percolateur, (9) Purificateur secondaire, (10) Sortie d'effluent.

Caractéristiques spécifiques qui rendent cette technologie adaptée au contexte égyptien, tunisien et/ou marocain et en accord avec les exigences de la norme ISO 16075 pour la réutilisation agricole des eaux usées traitées

Les lits percolateurs peuvent convenir aux pays cibles grâce à leur faible maintenance, leur installation bon marché et leur grande résistance aux fluctuations des charges hydrauliques et organiques. L'alimentation goutte à goutte présente également l'avantage de ne pas avoir le besoin d'aérer, ce qui réduit la consommation d'énergie puisque l'air y est naturellement convoyé, en raison de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. De plus, le système proposé combine le traitement secondaire et le traitement tertiaire permettant l'élimination à la fois de la DBO et de l'azote ammoniacal, ce qui le rend approprié pour obtenir une eau de qualité pour l'irrigation.

Résultats obtenus dans le contexte du projet MADFORWATER

Le réacteur a fonctionné pendant 350 jours à des temps de rétention hydraulique (TRH) différents, voire 20, 10, 5 et 2 jours. Pendant cette période, nous avons surveillé les paramètres suivants : DCO, DBO, azote ammoniacal, nitrite, nitrate et phosphore. La performance du réacteur à chaque TRH a été évaluée dans des conditions de régime permanent. Une fois le système stabilisé, le réacteur a montré une efficacité satisfaisante d'élimination de la matière organique, puisque des taux d'élimination de 91 et 92% ont été atteints respectivement pour la DCO et la DBO5. Les concentrations résultantes de DCO et de DBO se situent dans la plage des limites imposées par la norme tunisienne NT106.03 pour la réutilisation des eaux usées dans l'irrigation (DCO <90 mg /l et DBO <30 mg /l).

Dans des conditions de régime permanent, l'azote ammoniacal a fortement diminué pour atteindre une concentration d'environ 0,6 mg /l qui est dans les limites spécifiées par le nouveau règlement tunisien publié en 2018 (Journal officiel de la République tunisienne) relatif aux rejets dans le réseau d'assainissement public. Cependant, la concentration de nitrite et de nitrate a augmenté pour atteindre environ 0,18 mg /l et 13 mg /l, respectivement. La concentration de phosphore a nettement diminué de 12,5 mg /l à environ 2 mg /l, mais dépasse tout de même les limites des normes tunisiennes.

La concentration totale des sédiments en suspension (TSS) a diminué de manière remarquable, passant de 354,3 mg /l à environ 5,4 mg /l, ce qui correspond à une efficacité d'élimination de 98%. Ces valeurs satisfont aux limites imposées par la norme tunisienne NT 106.03 en

termes de TSS (30 mg /l).

Les données sur le pH des effluents ont oscillé entre 7,13 et 7,62 et ont atteint la valeur de la norme standard tunisienne de 6,5 à 8,5. La valeur de la CE moyenne de l'effluent était de 7,2 mS / cm, ce qui était similaire à celle observée pour l'affluent (7,8 mS / cm). Les valeurs de CE obtenues dépassent légèrement les valeurs autorisées par la norme tunisienne NT106.03 de 7 mS / cm.

Obstacles spécifiques relatifs à l'application de cette technologie en Egypte, en Tunisie et/ou au Maroc et à la production d'eaux usées traitées de qualité pour l'irrigation selon la norme ISO 16075

Les valeurs moyennes des principales caractéristiques physicochimiques des eaux usées municipales traitées étaient comparables à celles spécifiées par la norme tunisienne NT106-03 pour la réutilisation des eaux usées dans l'irrigation et la nouvelle réglementation tunisienne publiée en 2018 (Journal officiel de la République tunisienne) sauf pour le phosphore et coliformes fécaux.

Cette technologie relève du traitement secondaire et ressort partiellement du traitement tertiaire. D'autres traitements pour l'élimination des agents pathogènes devraient être intégrés.

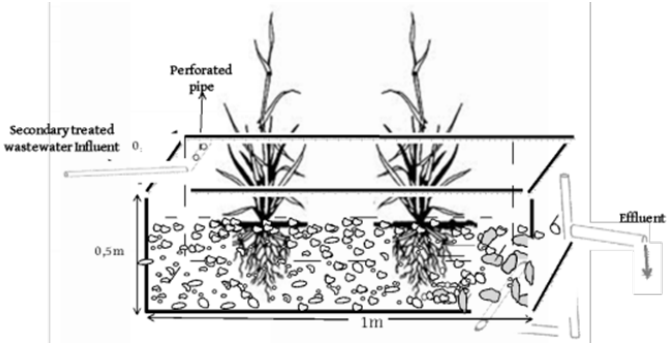
Zones humides artificielles (Constructed wetlands)

Polluants spécifiques ciblés par cette technologie :
Métaux lourds (Ni, Cd, Zn) et contaminants organiques émergents (bisphénol A, ciprofloxacine, sulfaméthoxazole)

Description de la technologie

Les zones humides artificielles pour le traitement des eaux usées impliquent l'utilisation de systèmes d'ingénierie élaborés et construits pour utiliser des processus naturels. Ces systèmes sont conçus pour imiter les systèmes des zones humides naturelles, en utilisant la végétation des terres humides, le sol et les micro-organismes associés pour éliminer les contaminants des effluents d'eaux usées. Ils peuvent atteindre plusieurs objectifs en termes d'élimination des contaminants, tels que les matières en suspension (MES), la demande biochimique en oxygène, les composés organiques et les constituants inorganiques pour atteindre les seuils réglementaires. Les mésocosmes horizontaux de flux souterrains en acier inoxydable, remplis de gravier et plantés avec l'haloplyte méditerranéenne Juncus acutus L. sont alimentés avec des eaux usées municipales polluées par des métaux lourds et des contaminants organiques émergents. Des inoculants bactériens spécifiques dotés d'un potentiel de dégradation et de la capacité de favoriser la croissance des plantes peuvent

être utilisés pour récupérer l'eau dans la «phytoépuration assistée par les microbes», faisant de l'étude du microbiome associé aux plantes CW une priorité pour acquérir des connaissances avancées et exploitables.



Représentation du système d'écoulement souterrain horizontal pour le traitement des eaux usées municipales polluées par les contaminants organiques émergents/ métaux lourds.

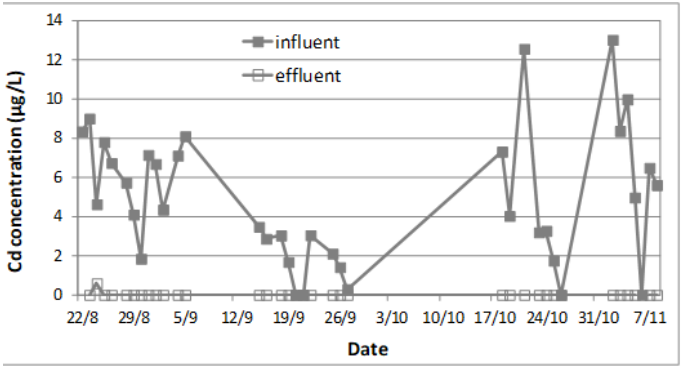
Caractéristiques spécifiques qui rendent cette technologie adaptée au contexte égyptien, tunisien et/ou marocain et en accord avec les exigences de la norme ISO 16075 pour la réutilisation agricole des eaux usées traitées

Les zones humides artificielles sont peu coûteuses, peu énergivores, faciles à exploiter et à entretenir comparées aux systèmes de traitement conventionnels, capables d'absorber les contaminants pour atteindre les objectifs réglementaires et présentent un fort potentiel d'application dans les pays en développement, en particulier dans les petites communautés rurales. De plus, comme la sélection des espèces végétales appropriées constitue un paramètre important d'efficacité, les halophytes méditerranéennes se sont révélées être des candidats idéaux.

Résultats obtenus dans le contexte du projet MADFORWATER

Avec des concentrations de métaux lourds influents dans les eaux usées municipales dépassant presque deux fois les limites relatives à la réutilisation des eaux usées pour l'irrigation, les zones humides artificielles fournissent des capacités de suppression allant jusqu'à 99% pour le cadmium, 51% pour le nickel et 45% pour le zinc. Avec des concentrations influentes de contaminants organiques émergents de 100 µg/l de bisphénol A (BPA), 1 mg/l de

ciprofloxacine (CIP) et 5 mg/l de sulfaméthoxazole (SXS), les zones humides artificielles assurent une efficacité d'élimination allant jusqu'à 76% pour le BPA, 94% pour la CIP et 27% pour le SXS sont enregistrés. Ces résultats ont été obtenus sans l'ajout de bactéries promotrices de la croissance des plantes ce qui pourrait améliorer l'efficacité globale du processus.



Concentration de cadmium dans l'influent et l'effluent des zones humides artificielles à écoulement souterrain horizontal

Obstacles spécifiques relatifs à l'application de cette technologie en Egypte, en Tunisie et/ou au Maroc et à la production d'eaux usées traitées de qualité pour l'irrigation selon la norme ISO 16075

Aucun.

Bioréacteurs à enzymes immobilisées (Immobilized enzyme bioreactor)

Polluants spécifiques ciblés par cette technologie :

Produits pharmaceutiques, micropolluants organiques

Description de la technologie

Cette technologie utilise des laccases immobilisées sur des particules de résine à faible perte de charge dans un réacteur à lit fixe alimenté par un flux continu d'eaux usées. Les laccases ont été sélectionnées car elles peuvent catalyser l'oxydation d'une large gamme de composés phénoliques et non phénoliques apparentés à la lignine, notamment de nombreux produits pharmaceutiques et micropolluants couramment retrouvés dans les eaux usées municipales et qui ne sont généralement pas dégradés dans les stations de traitement des eaux usées municipales conventionnelles. En plus de permettre un fonctionnement continu, on a démontré que l'immobilisation sur des supports solides améliore la stabilité enzymatique.

Colonne de lit fixe garnis avec des enzymes immobilisées

Caractéristiques spécifiques qui rendent cette technologie adaptée au contexte égyptien, tunisien et/ou marocain et en accord avec les exigences de la norme ISO 16075 pour la réutilisation agricole des eaux usées traitées

Le réacteur à lit fixe est facile à utiliser, ne nécessite pas d'instruments sophistiqués, de régulation ou de pompes haute pression et pourrait être plus approprié que d'autres configurations de réacteurs, comme les réacteurs à membrane, pour le traitement des eaux usées dans les pays africains.

Résultats obtenus dans le contnexte du projet MADFORWATER

Les laccases de P. sanguineus (L1) et T. versicolor (L2) ont été immobilisées sur des particules de résine ou des nanoparticules de silice (fsNP) et testées dans un réacteur discontinu sur des eaux usées municipales chargées (500 ng/l de chaque composé). La laccase la plus efficace (provenant de P. sanguineus) a éliminé 7 à 83% des produits pharmaceutiques après 5 jours. Le traitement des eaux usées municipales existantes a été effectué avec la laccase de P. sanguineus dans un réacteur à lit fixe avec un débit continu. Une adsorption des micropolluants sur les supports d'enzyme a été observée lors des essais préliminaires, ce qui a entravé la quantification de la dégradation des polluants;

Concentrations des produits pharmaceutiques dans les échantillons existants d'eaux usées municipales

ng/L	Tunisia	Dragra	Tiznit
4-Acetamidoantipyrin	n.d.	163	112
Amisulpride	78	n.d.	101
Atenolol	384	117	219
Atenolol Acid	151	124	90
Carbamazepine	237	245	443
Carbendazim	50	99	162
Celiprolol	180	n.d.	19
Climbazole	279	719	583
Fluconazole	164	512	407
Irbesartan	461	101	46
Niflumic Acid	383	389	218
Sulpiride	161	70	178

Obstacles spécifiques relatifs à l'application de cette technologie en Egypte, en Tunisie et/ou au Maroc et à la production d'eaux usées traitées de qualité pour l'irrigation selon la norme ISO 16075

Cette technologie est considérée comme un traitement tertiaire. Le traitement primaire et le traitement biologique secondaire doivent être intégrés. Les coûts des enzymes et des résines utilisées pour l'immobilisation sont relativement élevés.

2 - Eaux usées des moulins à huile (margines)

Principaux polluants à éliminer pour une réutilisation agricole:

Composés organiques (COD 20-100 g/l); polyphénols (1-10 g/l)

Technologies principalement utilisées en Egypte, au Maroc et en Tunisie pour le traitement de ces eaux usées:

Selon la législation tunisienne, la principale pratique de gestion des eaux usées des moulins à huile (margines) consiste à les déverser dans des bassins d'évaporation. Ce processus de traitement vise à réduire l'impact des margines sur l'environnement : risque d'infiltration avec forte émission d'odeurs désagréables. En effet flottation des substances huileuses résiduelles dans les margines, inhibe l'évaporation et crée des conditions anaérobies.

Brève présentation des technologies développées par MADFORWATER pour ces eaux usées:

MADFORWATER développe deux filières alternatives de traitement des margines: la première est axée sur l'élimination des solides en suspension par microfiltration, la récupération des polyphénols du filtrat par adsorption et l'élimination finale de la DBO par biométhanisation; la seconde consiste en un traitement biologique aérobie dans un réacteur discontinu séquencé avec ajout de chaux.

Microfiltration et récupération des polyphénols par adsorption (Microfiltration and polyphenol recovery by adsorption)

Polluants spécifiques ciblés par cette technologie:

Solides en suspension et polyphénols

Description de la technologie

Une première étape de microfiltration, visant à éliminer les solides en suspension, est suivie d'une étape d'adsorption/désorption visant à récupérer les polyphénols. Cela conduit à la production de : i) un mélange riche en polyphénols qui, grâce à sa capacité antioxydante élevée, peut trouver une application dans plusieurs procédés industriels ou formulation de produits utiles et ii) une eau déphénolisée qui peut être traitée biologiquement d'une manière plus efficace. Deux colonnes fonctionnent en parallèle: alors que la première adsorbe les polyphénols des eaux usées des moulins à huile, la seconde désorbe les antioxydants recueillis au cours du cycle précédent. Le solvant de désorption (typiquement l'éthanol) est entièrement recyclé dans le procédé par évaporation et recondensation.

Station pilote de microfiltration pour l'élimination des solides en suspension dans les margines

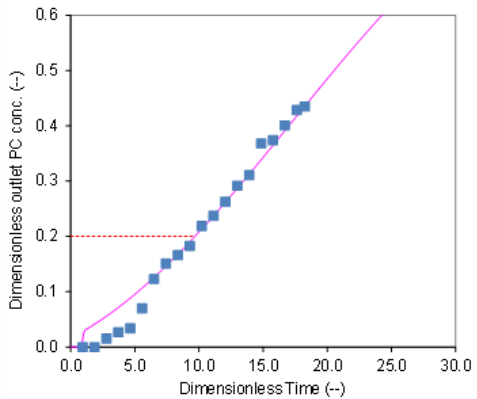
Caractéristiques spécifiques qui rendent cette technologie adaptée au contexte égyptien, tunisien et/ou marocain et en accord avec les exigences de la norme ISO 16075 pour la réutilisation agricole des eaux usées traitées

Cette technologie est adaptée au contexte nord-africain étant donné qu'elle est à même de produire un mélange antioxydant pouvant potentiellement avoir une valeur marchande pertinente. En même temps, il est important d'éliminer les polyphénols des margines afin d'éviter tout effet indésirable de ces composés sur les plantes lorsque l'effluent traité sera utilisé en irrigation.

Résultats obtenus dans MADFORWATER relatifs à cette technologie

Le taux d'élimination des solides en suspension par filtration était très élevé (98%) avec une perte limitée acceptable de polyphénols (9%) avec les solides. Différents types de résines ont été testés pour l'étape de récupération des polyphénols à partir de la phase aqueuse. Une résine d'adsorption neutre (XAD 16) a été choisie comme étant la plus efficace. Cela conduit à la récupération d'un mélange de polyphénols caractérisé par une très forte capacité antioxydante. L'élimination des polyphénols est égale à environ 90%, ce qui conduit à une concentration de polyphénols résiduels dans l'effluent traité d'environ 0,1 g/l.

Concentration de sortie des polyphénols en fonction du temps à la sortie d'un test d'adsorption. Données expérimentales et simulation optimale



Obstacles spécifiques relatifs à l'application de cette technologie en Egypte, en Tunisie et/ou au Maroc et à la production d'eaux usées traitées de qualité pour l'irrigation selon la norme ISO 16075

• Afin de produire une eau de qualité pour l'irrigation, la technologie proposée devrait être intégrée à une autre étape de traitement visant à la biodégradation des composés organiques (Ex. Digestion anaérobie).

• Le fonctionnement de la technologie proposée nécessite un personnel disposant des compétences techniques adéquates, et capable de gérer les processus d'adsorption, d'évaporation et de condensation.

• Certains problèmes de sécurité sont liés à la nécessité de stocker l'éthanol. La législation locale relative à la sécurité sur les lieux de travail devrait être appliquée avec soin.

Digestion anaérobie (Anaerobic digestion)

Polluants spécifiques ciblés par cette technologie:

Matières organiques

Description de la technologie

Les composés organiques biodégradables (DBO) sont transformés en méthane et en dioxyde de carbone grâce à l'action combinée de micro-organismes acidogènes et méthanogènes. Le procédé est mis en œuvre dans des conditions anaérobies à 35-40 ° C dans un réacteur agité. Les margines déphénolisées peuvent être co-digérées en combinaison avec d'autres déchets agricoles. Le biogaz produit est généralement brûlé, conduisant à une production combinée de chaleur et d'énergie électrique.

Station pilote de digestion anaérobie pour le traitement des margines

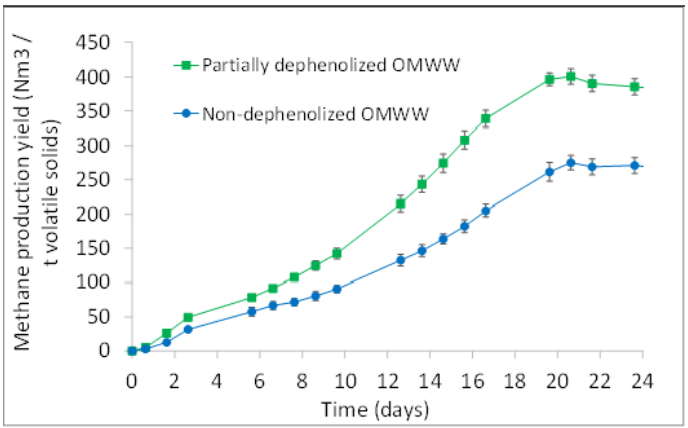
Caractéristiques spécifiques qui rendent cette technologie adaptée au contexte égyptien, tunisien et/ou marocain et en accord avec les exigences de la norme ISO 16075 pour la réutilisation agricole des eaux usées traitées

La digestion anaérobie se caractérise par un niveau de complexité technique moyen à bas et par une consommation d'énergie nulle. D'un autre côté, cela conduit à la production d'énergie électrique qui peut être vendue au réseau énergétique local. La production d'une eau de qualité pour l'irrigation nécessite un temps de rétention élevé pour l'élimination complète du DBO et une étape supplémentaire de traitement pour la séparation solide / liquide (par exemple, un filtre-presse). Le digestat solide produit peut être utilisé comme engrais.

Résultats obtenus dans le contexte du projet MADFOR-WATER

Les résultats indiquent que les margines sont un bon candidat pour le processus de digestion anaérobie, avec un rendement de production de méthane relativement élevé (260-400 NL_{CH_4}/kg Solides volatils) et un taux de production de méthane acceptable (110-200 L_{CH_4}/ m^3 digestat /d). La déphénolisation des margines conduit à une réduction de 30 à 40% des performances du procédé. Les

essais visant à évaluer la capacité du procédé à atteindre les faibles concentrations de DBO requises par les normes ISO pour la réutilisation de l'eau en agriculture (<100 mg/l) sont toujours en cours.



Rendement de production de méthane déphénolisé et non déphénolisé obtenu avec les eaux usées des moulins à huile

Obstacles spécifiques relatifs à l'application de cette technologie en Egypte, en Tunisie et/ou au Maroc et à la production d'eaux usées traitées de qualité pour l'irrigation selon la norme ISO 16075

La digestion anaérobie des margines est adaptée au contexte spécifique de l'Egypte, du Maroc et de la Tunisie.

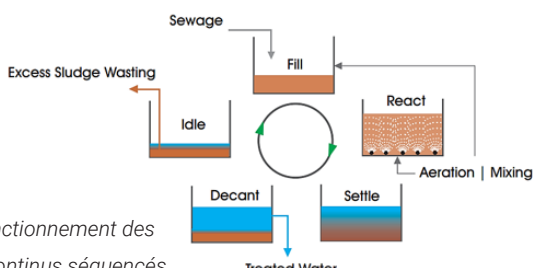
Traitement biologique aérobie dans un réacteur discontinu séquencé (Aerobic biological treatment in a sequenced batch reactor)

Polluants spécifiques visés par cette technologie:

Composés organiques, composés phénoliques

Description de la technologie

Les réacteurs discontinus séquencés (SBR) représentent une forme particulière de traitement par boues activées selon laquelle le processus de traitement a lieu dans le réservoir du réacteur et les clarificateurs ne sont pas nécessaires. Ce procédé traite les eaux usées en mode discontinu et chaque lot est séquencé par une série de 5 étapes de traitement: 1. Remplir ; 2. Réagir; 3. Régler; 4. Décanter et récupérer les eaux traitées et 5. Laisser au repos et récupérer l'excès de boue.



Principe de fonctionnement des réacteurs discontinus séquencés

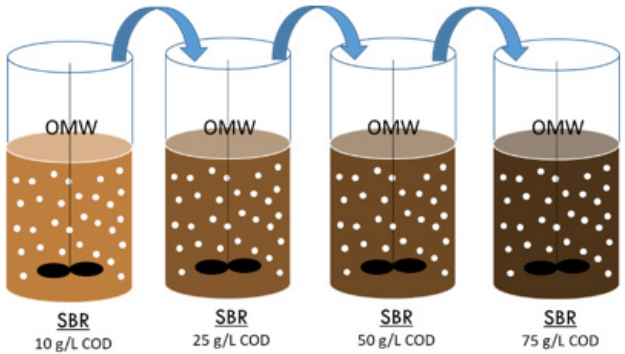
Premièrement, le réservoir est rempli par les eaux usées des moulins à huile. Au cours de la deuxième étape, le mélange est assuré par des moyens mécaniques et l'aération de la liqueur mixte est assurée par l'intermédiaire de diffuseurs fixés au fond de la cuve. Aucune aération et mélange ne sont prévus dans la troisième étape pour décanter les solides en suspension. Au cours de la quatrième étape, les eaux usées des moulins à huile, traitées et surnageantes, sont récupérées. Dans la cinquième étape, les boues en excès sont enlevées. Les eaux usées traitées sont ensuite soumises à l'ajout de chaux sous forme pulvérulente (CaO) jusqu'à atteindre un pH de 12.

Caractéristiques spécifiques qui rendent cette technologie adaptée au contexte égyptien, tunisien et/ou marocain et en accord avec les exigences de la norme ISO 16075 pour la réutilisation agricole des eaux usées traitées

Les réacteurs discontinus séquentiels peuvent être utilisés pour éliminer les nutriments et diminuer la demande biochimique élevée en oxygène des eaux usées industrielles. La configuration à un seul réservoir, la petite empreinte, l'extensibilité facile, le fonctionnement simple et les faibles coûts d'investissement comptent parmi les avantages de ce procédé. De plus, ce procédé a permis l'établissement d'une population microbienne stable, capable de dégrader des composés potentiellement toxiques. L'ajout de chaux pulvérulente permet l'élimination d'une fraction de la DCO et des composés phénoliques résiduels par des phénomènes de coagulation et d'adsorption.

Résultats obtenus dans le contexte du projet MADFORWATER

Le réacteur discontinu séquentiel a été ensemencé avec un échantillon de boues activées provenant d'une station d'épuration municipale, qui a été acclimatée progressivement à des teneurs élevées en DCO initiales dans les margines avec un temps de rétention hydraulique (TRH) de 30 jours. Les concentrations de DCO dans l'influent des eaux usées des moulins à huile ont atteint 75 g l^{-1}. Des efficacités constantes de réduction du DCO (environ 60%) ont été obtenues avec un taux d'élimination stable de 1,5 g DCO l^{-1} $jour^{-1}$, indiquant la présence d'un consortium microbien stable. La combinaison du traitement biologique à l'ajout de chaux pulvérulente a permis d'éliminer jusqu'à 80% et 90% de la DCO et des composés phénoliques respectivement. Cependant, le DCO des eaux usées des margines traitées dépasse toujours les seuils fixés par l'ISO 16075 et les normes tunisiennes pour la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation (NT 106.03).



Acclimatation progressive du consortium aérobie à des concentrations élevées des margines dans un réacteur séquentiel discontinu

Obstacles spécifiques relatifs à l'application de cette technologie en Egypte, en Tunisie et/ou au Maroc et à la production d'eaux usées traitées de qualité pour l'irrigation selon la norme ISO 16075

Cette technologie est adaptée au contexte spécifique de l'Egypte, du Maroc et de la Tunisie. Aucun obstacle spécifique n'est signalé en ce qui concerne la production d'eaux usées traitées de qualité pour l'irrigation. Cependant, une dilution ou un traitement supplémentaire est nécessaire afin de réduire davantage la concentration de DCO résiduelle.

3 - Eaux usées textiles

Principaux polluants à éliminer pour une réutilisation agricole:

Colorants azoïques, colorants azoïques sulfonés

Technologies principalement utilisées en Egypte, au Maroc et en Tunisie pour le traitement de ces eaux usées

La situation actuelle du traitement des eaux usées textiles dans ces trois pays est assez diverse. Certaines entreprises textiles ont déjà intégré des processus internes de traitement des eaux usées, visant à atteindre jusqu'à 60% de réintégration des eaux usées dans les processus. Les eaux usées traitées restantes sont rejetées dans le réseau municipal d'égouts. Dans certains cas, les effluents textiles sont rejetés directement dans le réseau municipal sans aucun traitement préalable. La coagulation est un procédé largement appliqué en tant que traitement préalable avant le traitement principal par boues activées, oxydation ou membranes. La coagulation vise à éliminer les particules colloïdales et les substances organiques. L'efficacité des procédés actuels est généralement instable par rapport à l'importante variation journalière et saisonnière du volume des effluents et de la charge organique et minérale. Un procédé adéquat capable de tolérer des pics occasionnels au niveau du volume d'effluent et de la charge organique

doit être utilisé.

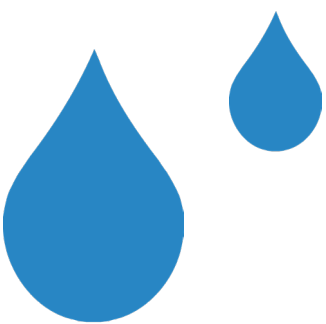
Brève présentation des technologies développées par MADFORWATER pour ces eaux usées

MADFORWATER développe un procédé de traitement secondaire dans un bioréacteur à lit mobile à appliquer en aval d'une étape de coagulation / floculation pour dégrader la DCO et les colorants, et deux procédés de traitement tertiaire alternatif visant à éliminer les colorants résiduels, à savoir i) dégradation enzymatique des colorants dans des réacteurs à lit fixe avec des laccases immobilisées et, ii) l'adsorption / désorption de colorants avec des résines magnétiques innovantes.

Bioréacteur à lit fluidisé (Moving bed bioreactor)

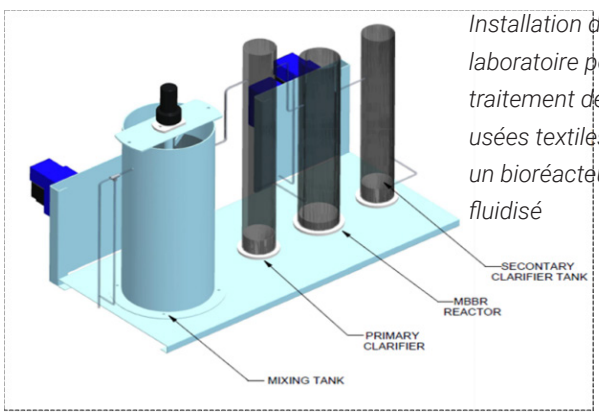
Polluants spécifiques ciblés par cette technologie:

Azodyes toxiques



Description de la technologie

Les eaux usées contaminées par des colorants toxiques sont pompées dans la première cuve de mélange où des coagulants - floculants sont ajoutés, puis elles débordent vers le clarificateur primaire pour la précipitation des particules en suspension. Les eaux usées s'écoulent vers le réservoir avec des supports (Bioréacteur à lit fluidisé), où la dégradation biologique se produit. Un aérateur fournit de l'oxygène à l'eau et fluidifie les supports de biofilm. Les boues peuvent se déposer dans le réservoir du clarificateur secondaire suivant, tandis que l'effluent de ce réservoir est recirculé à travers une pompe péristaltique vers le réservoir de biodégradation (Bioréacteur à lit fluidisé). Le système fonctionnait comme un réacteur discontinu, puisque le bioréacteur à lit fluidisé et le réservoir du clarificateur secondaire étaient seuls actionnés par recirculation.



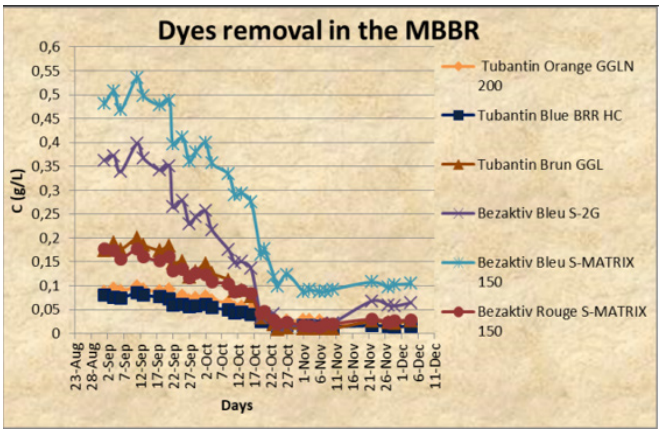
Installation de laboratoire pour le traitement des eaux usées textiles dans un bioréacteur à lit fluidisé

Caractéristiques spécifiques qui rendent cette technologie adaptée au contexte égyptien, tunisien et/ou marocain et en accord avec les exigences de la norme ISO 16075 pour la réutilisation agricole des eaux usées traitées

Cette technologie s'est avérée efficace dans la biodégradation des colorants dont la présence dans les eaux usées textiles pose un problème critique pour leur réutilisation dans l'irrigation.

Résultats obtenus dans le contexte du projet MADFORWATER

Le bioréacteur à lit fluidisé a été alimenté en eaux usées synthétiques avec 0,08 à 0,48 g de concentrations de colorant par litres. Ces concentrations sont généralement obtenues après un traitement primaire avec des coagulants. Un consortium efficace isolé du milieu marin a été inoculé au système, développant la biomasse sur des transporteurs mobiles. L'efficacité de décoloration du système était supérieure à 80% pour tous les colorants testés durant 95 jours de fonctionnement. L'azote ammoniacal, l'azote total et le phosphore total ont été mesurés respectivement à 1,2, 35 et 2,7 mg/L. Selon les niveaux maximaux de nutriments dans les eaux usées textiles utilisées pour l'irrigation (ISO 16075) qui sont 30 mg/l pour l'azote ammoniacal, 35 mg/l pour l'azote total et 7 mg/l pour le phosphore total, les eaux usées textiles traitées peuvent être utilisées pour l'irrigation.



Elimination des colorants des eaux usées textiles dans le bioréacteur à lit fluidisé

Obstacles spécifiques relatifs à l'application de cette technologie dans un contexte du système MAC et à la production des eaux usées traitées pour l'irrigation

Dans l'ensemble, il ne devrait pas y avoir de problème dans l'application de la technologie du bioréacteur à lit fluidisé;

Cependant, il faut faire attention à l'élimination des boues de la phase primaire. Si les quantités sont faibles (lorsque des coagulants coûteux sont utilisés), un séchage et une élimination simples devraient être pertinents. Dans le cas où de la chaux est utilisée, la quantité de boues aqueuses produite est très élevée (près de 30 à 50% du volume initial des eaux usées) et une technologie de traitement spécifique doit être envisagée.

Bioréacteurs à enzymes immobilisées (Immobilized enzyme bioreactor)

Polluants spécifiques ciblés par cette technologie :

Colorants azoïques, colorants azoïques sulfonés

Description de la technologie :

Les laccases et les peroxydases sont des enzymes connues capables de décolorer différents types de colorants. Cette technologie utilise des enzymes immobilisées dans un réacteur à lit fixe pour traiter les eaux usées textiles. L'immobilisation des enzymes améliore habituellement la stabilité de l'enzyme. Des particules de résine (taille de 100 à 300 µm) ont été utilisées comme supports d'enzyme et le réacteur à lit fixe a fonctionné en mode continu.

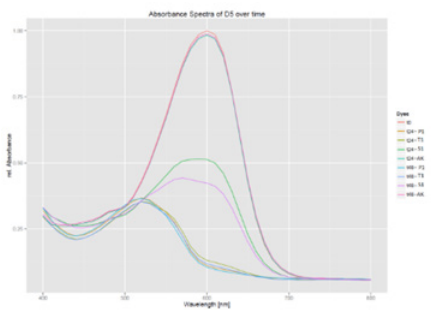
Colonne de lit fixé garnis avec des enzymes immobilisées

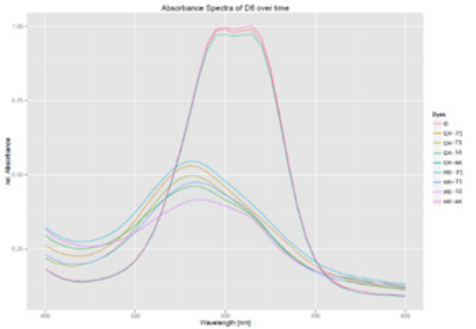
Caractéristiques spécifiques qui rendent cette technologie adaptée au contexte égyptien, tunisien et/ou marocain et en accord avec les exigences de la norme ISO 16075 pour la réutilisation agricole des eaux usées traitées

Le réacteur à lit fixe est facile à utiliser, ne nécessite pas d'instruments sophistiqués, de régulation ou de pompes haute pression et pourrait être plus adapté aux autres types de réacteurs utilisant des enzymes immobilisées, comme les réacteurs membranaires, pour le traitement des eaux usées dans les pays africains.

Résultats obtenus dans le contexte du projet MADFOR-WATER

Six colorants azoïques sulfonés ont été sélectionnés comme contaminants principaux des eaux usées textiles réelles. Les laccases des champignons P. sanguineus et T. versicolor ont pu décolorer deux des six colorants. La peroxydase fongique n'a éliminé aucun des colorants et la peroxydase de raifort n'a dégradé qu'un seul colorant. Les médiateurs redox permettent à la laccase d'oxyder davantage de composés. L'étape d'oxydation est réalisée par la forme oxydée du médiateur, générée lors de son interaction avec la laccase. Trois médiateurs redox différents ont été testés et le 1-hydroxybenzotriazole 1 mM a montré le plus large spectre de décoloration. Une décoloration partielle par la laccase de T. versicolor a été observée dans les eaux usées textiles auxquelles six colorants ont été ajoutés. Dans les expériences réalisées avec des laccases immobilisées, l'adsorption des colorants sur le support enzymatique s'est principalement produite, avec une dégradation négligeable des colorants.





La décoloration des colorants Bezaktiv Bleu S-Matrix 150 et Bezaktiv Bleu S-2G par les laccases, comme indiqué par la réduction de l'absorbance à 600 nm.

Obstacles spécifiques relatifs à l'application de cette technologie en Egypte, en Tunisie et/ou au Maroc et à la production d'eaux usées traitées de qualité pour l'irrigation selon la norme ISO 16075

Cette technologie dépend largement de la qualité des eaux usées textiles. Les enzymes ne sont pas capables de décolorer une grande variété de colorants structurellement différents et si la composition des eaux usées fluctue de manière significative, cette technologie peut devenir inefficace. Les colorants chargés négativement sont adsorbés par les supports d'enzymes. Les coûts des enzymes et de la résine utilisés pour l'immobilisation sont relativement élevés.

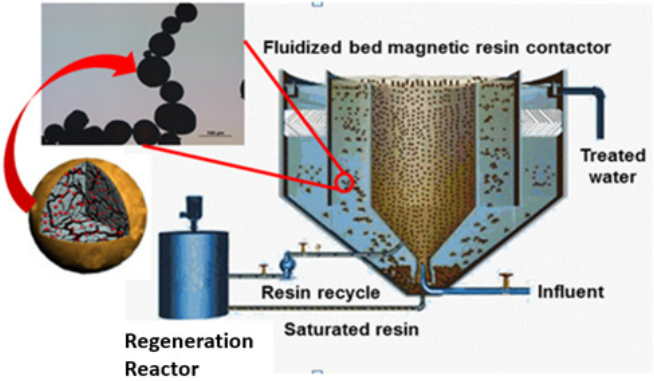
Adsorption sur des résines innovantes (Dye adsorption on innovative resins)

Polluants spécifiques ciblés par cette technologie:

Colorants et matière organique dissoute

Description de la technologie

La résine magnétique échangeuse d'anions développée par l'Université de Nanjing en Chine est spécialement conçue pour éliminer la matière organique et les colorants à charge négative de l'eau et des eaux usées. La résine magnétique échangeuse d'anions possède une matrice polyacrylique, une structure macroporeuse et des groupes fonctionnels à base forte. Les billes de résine ont un diamètre de 100-200 µm, ce qui a donne une surface spécifique et un taux de transfert de masse élevés par rapport aux résines conventionnelles. La résine magnétique échangeuse d'anions est utilisée en suspension dans un réacteur à lit fluidisé. Le noyau magnétique facilite l'agglomération et la sédimentation de la résine. La résine magnétique échangeuse d'anions peut être régénérée par une solution de NaCl à 10% et le réacteur utilise un procédé de régénération continue à courant latéral permettant une qualité d'eau traitée constante. Environ 200 ~ 300 m³ d'eaux usées génèrent 1 m3 d'eaux usées de saumure.



La résine échangeuse d'anions magnétiques et le réacteur à lit fluidisé

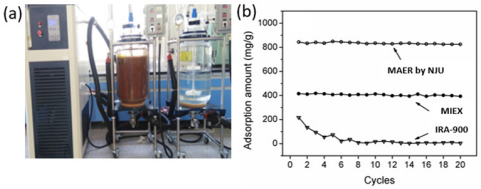
Caractéristiques spécifiques qui rendent cette technologie adaptée au contexte égyptien, tunisien et/ou marocain et en accord avec les exigences de la norme ISO 16075 pour la réutilisation agricole des eaux usées traitées

La résine magnétique échangeuse d'anions a une capacité de traitement rapide et efficace pour l'élimination de la plupart des matières organiques et des colorants chargés négativement. Cependant, l'utilisation de NaCl et le traitement des eaux résiduaires de saumure produites lors de la régénération de la résine limitent son application à grande échelle. L'usine de textile de ces pays produit générale-

ment ~ 200 m³ d'eaux usées par jour, ce qui signifie que chaque jour 1 m³ d'eaux usées de saumure est produit. Le prix du NaCl est bon marché et les eaux usées de la saumure peuvent être évaporées grâce au taux d'ensoleillement local élevé.

Résultats obtenus dans le contexte du projet MADFORWATER

Une nouvelle résine magnétique échangeuse d'anions a été développée en utilisant de l'itaconate de diallyle en tant qu'agent de réticulation, ce qui améliore significativement l'hydrophilie, la résistance et la capacité d'adsorption. Les résines magnétiques échangeuses d'anions saturées de colorant peuvent être efficacement régénérées par un mélange de solution de NaCl / NaOH (10% / 1%). Pendant 20 cycles, la résine échangeuse d'anions magnétiques a pu être réutilisée sans diminution notable de la capacité d'adsorption du colorant Orange-G, ce qui indique une performance antisalissure élevée pour l'élimination des matières organiques. Prise ensemble, la grande capacité, la cinétique rapide, l'excellente réutilisabilité et la séparabilité commode de la résine magnétique échangeuse d'anions en ont fait un bon candidat pour l'élimination des colorants et des polluants organiques des effluents de l'industrie textile.



La synthèse de la résine magnétique échangeuse d'anions et sa capacité d'adsorption sur le colorant Orange-G par rapport aux résines commerciales MIEX et IRA-900 échangeuses d'anions

Obstacles spécifiques relatifs à l'application de cette technologie en Egypte, en Tunisie et/ou au Maroc et à la production d'eaux usées traitées de qualité pour l'irrigation selon la norme ISO 16075

Les résines échangeuses d'anions ne peuvent pas éliminer les fibres, les matières organiques ou les colorants qui ne possédant pas une charge négative dans les eaux usées textiles.

4 - Eaux usées des usines de conditionnement des fruits et légumes

Principaux polluants à éliminer pour une réutilisation agricole:

Matières organiques (DCO), matières en suspension, fongicides

Technologies principalement utilisées en Egypte, au Maroc et en Tunisie pour le traitement de ces eaux usées:

Selon les conditions locales, différentes options sont actuellement utilisées pour le traitement des eaux usées provenant du conditionnement des fruits et des légumes, telles que les fosses septiques, les bassins aérobies ou les boues activées. Ces technologies de traitement sont capables d'éliminer une partie des contaminants critiques (matières organiques persistantes, solides en suspension et fongicides), mais la qualité des effluents qui en résulte est médiocre par rapport aux normes de réutilisation.

Brève présentation des technologies développées par MADFORWATER pour ces eaux usées:

Pour obtenir un effluent de haute qualité pouvant répondre aux normes de réutilisation, une filière de traitement combinant différentes technologies a été conçue: Réacteur de biofilm à lit mobile pour éliminer les contaminants organiques et les fongicides, et floculation avec flottation intégrée pour éliminer, d'une manière efficace, les matières en suspension et les enzymes fongicides résiduels. La sorption sur charbon actif peut être appliquée pour l'élimination des fongicides.

Bioréacteur aérobic à lit mobile (moving bed bioreactor)

Polluants spécifiques ciblés par cette technologie :

Contaminants organiques dissous et colloïdaux

Description de la technologie

La technologie est basée sur l'utilisation de petits éléments porteurs en plastique ayant une densité similaire à celle de l'eau, et qui sont colonisés par des micro-organismes sous forme de biofilm. Les supports sont mélangés avec les eaux usées dans un réservoir aéré et les micro-organismes éliminent les matières organiques dégradables des eaux usées. L'aération du bioréacteur sert à mélanger et à fournir de l'oxygène aux micro-organismes. Le temps de contact nécessaire pour les eaux usées spécifiques est de 1 à 4 jours, en fonction de la concentration initiale des fongicides. Ensuite, l'eau usée traitée est retirée du bioréacteur, tandis que les porteurs sont retenus à l'intérieur par un tamis. Les processus biologiques génèrent une certaine quantité de biomasse en excès, qui est isolée lors de l'étape suivante de floculation et de flottation à l'air dissous (FAD), conjointement avec les solides en suspension provenant des eaux usées.

Support avec biofilm développé de réacteurs à lit fluidisé

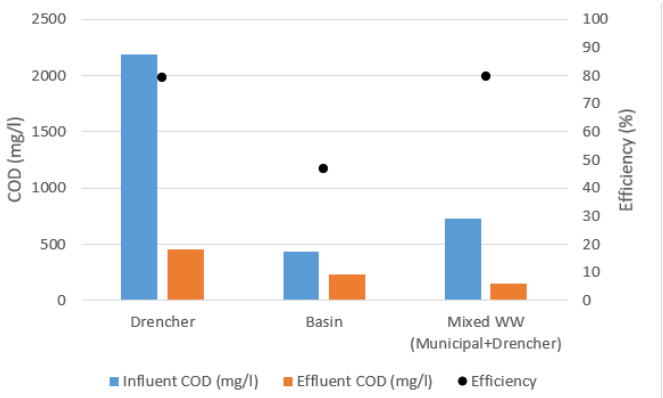
Caractéristiques spécifiques qui rendent cette technologie adaptée au contexte égyptien, tunisien et/ou marocain et en accord avec les exigences de la norme ISO 16075 pour la réutilisation agricole des eaux usées traitées

La présence de composés toxiques et peu dégradables dans ces eaux usées peut affecter négativement les micro-organismes pendant le traitement biologique. La biomasse immobilisée sur le support est moins sensible à ces composés et peut être retenue dans le réacteur, empêchant le lessivage des organismes à croissance lente. Les réacteurs à lit fluidisé avec biofilm garantissent également une densité de biomasse élevée et donc l'utilisation de réacteurs plus compacts. La technologie est simple à mettre en œuvre et à utiliser.

Résultats obtenus dans le contexte du projet MADFOR-WATER

Différents flux d'eaux usées provenant des usines de conditionnement des fruits et légumes ont été traités par la technologie des réacteurs à lit fluidisé. Cette technologie a permis d'éliminer 65 à 80% de la contamination organique (DCO). Après l'acclimatation, le traitement biologique peut éliminer plus de 90% des fongicides. Certains fongicides ont également été éliminés efficacement, mais d'autres sont restés dans les eaux usées après traitement. Si l'élimination des fongicides dans le réacteur biologique est insuffisante, un post-traitement par adsorption peut être installé comme étape supplémentaire. Les matières en suspension des eaux usées sont traitées par floculation / flottation intégrée, qui constitue une partie intégrante de la filière de traitement proposée.

Élimination de la DCO, de la turbidité et du thiabendazole (fongicide) des eaux usées par la technologie hydraulique par la technologie du réacteur à lit fluidisé à différents temps de rétention



Obstacles spécifiques relatifs à l'application de cette technologie en Egypte, en Tunisie et/ou au Maroc et à la production d'eaux usées traitées de qualité pour l'irrigation selon la norme ISO 16075

La production des eaux usées provenant du conditionnement/traitement des fruits et légumes est saisonnière. Cependant, le réacteur à lit fluidisé - comme d'autres méthodes biologiques de traitement des eaux usées - repose sur l'approvisionnement continu en substrat. Des eaux usées alternatives (par exemple un cours d'eau municipal) sont nécessaires pour les périodes d'indisponibilité.

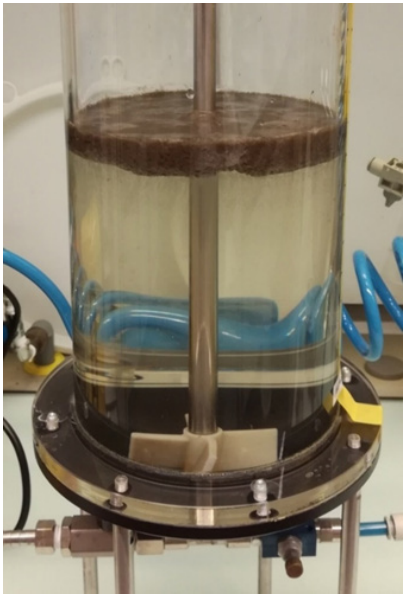
Floculation et flottation intégrées (Integrated flotation and flocculation)

Polluants spécifiques ciblés par cette technologie:

Matières en suspension, colloïdes

Description de la technologie

Le principe de la flottation à l'air dissous consiste à éliminer les particules en suspension dans les eaux usées en utilisant des microbulles générées pressurisation. Les bulles s'attachent aux particules et les transportent à la surface, où elles forment une couverture de boues (jusqu'à 3 à 6% de solides secs). Les particules dans les eaux usées doivent être coagulées et floculées avant la pressurisation de l'air pour faciliter l'agglomération entre les particules et les microbulles. Dans le schéma proposé, ce principe est couplé au traitement par réacteur de biofilm à lit mobile pour éliminer les particules et la biomasse en excès. Une autre option consiste à ajouter du charbon actif en poudre à l'entrée du système de flottation pour la sorption des fongicides résiduels.



Séparation des solides en suspension dans une unité de flottation à l'échelle du laboratoire

Caractéristiques spécifiques qui rendent cette technologie adaptée au contexte égyptien, tunisien et/ou marocain et en accord avec les exigences de la norme ISO 16075 pour la réutilisation agricole des eaux usées traitées

Par rapport à la sédimentation, la technique de flottement à l'air dissous consomme plus d'énergie mais peut assurer une élimination efficace des solides à un temps de rétention hydraulique très court (quelques minutes). Cela permet de construire une unité compacte avec un débit volumétrique élevé. L'élimination très efficace des solides contaminés des eaux usées de conditionnement des fruits et légumes fournit de l'eau hautement purifiée pouvant être réutilisée.

Résultats obtenus dans le contexte du projet MADFORWATER

Le procédé combiné a été proposé pour l'élimination des solides en suspension après le traitement biologique par la technologie du réacteur à lit fluidisé. Il pourrait éliminer efficacement les solides en suspension des échantillons d'eaux usées provenant de l'usine de conditionnement des fruits et légumes jusqu'à <5 mg/l. Avec l'unité du réacteur de biofilm à lit fluidisé, l'efficacité d'élimination de la DCO arrivait à 95%, en fonction de la composition des eaux usées. La meilleure qualité de l'eau a été obtenue avec une DCO <30 mg/l et une DBO <5 mg/l. Le processus combiné pourrait également éliminer les fongicides jusqu'à <0,1 mg/l, sauf pour le thiabendazol, qui était présent dans le cas d'une plus forte concentration. L'ajout du charbon actif en poudre à l'entrée du système de flottation pourrait permettre une meilleure élimination du fongicide (90% environ).

Obstacles spécifiques relatifs à l'application de cette technologie en Egypte, en Tunisie et/ou au Maroc et à la production d'eaux usées traitées de qualité pour l'irrigation selon la norme ISO 16075

Pas d'obstacles spécifiques

Oxydation par UV avec des lits revêtus de TiO2 combinés à des bioréacteurs à enzymes immobilisées

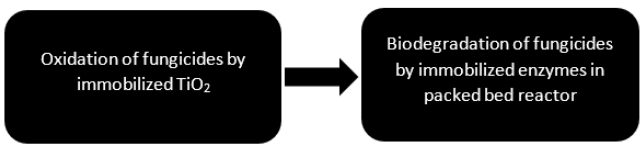
Polluants spécifiques ciblés par cette technologie:

Thiabendazole

Description de la technologie

Le traitement postérieur est effectué dans un photoréacteur avec du dioxyde de titane immobilisé. Le réacteur fonctionne en continu à la lumière du soleil. Les principaux produits de photo-transformation sont des dérivés hydroxylés des fongicides qui représentent des substrats

plus facilement bioconvertibles. La technologie de traitement suivante utilise des laccases immobilisées. Les particules de résine ayant une faible perte de charge ont été choisies comme supports d'enzymes, ainsi un réacteur à lit fixe peut être construit et utilisé en continu.



Photoreactor

Packed bed column

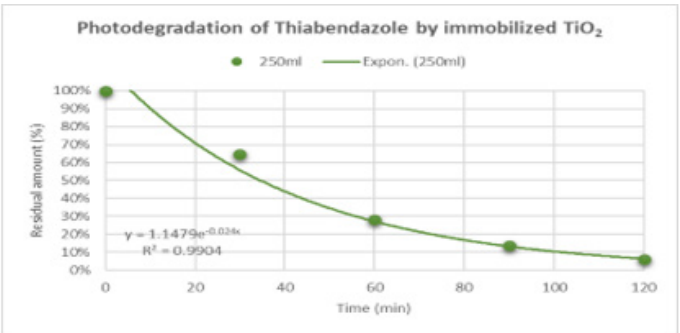
Caractéristiques spécifiques qui rendent cette technologie adaptée au contexte égyptien, tunisien et/ou marocain et en accord avec les exigences de la norme ISO 16075 pour la réutilisation agricole des eaux usées traitées

Le photoréacteur ne requiert pas de lampes UV ou d'énergie pour l'oxydation. Il peut être utilisé au soleil. Le réacteur à lit fixe est facile à utiliser, ne nécessite pas d'instruments sophistiqués, de régulation ou de pompes haute pression et pourrait donc être plus approprié que d'autres configurations de bioréacteurs, comme les bioréacteurs à membrane, pour le traitement des eaux usées dans les pays africains.

Résultats obtenus dans le contexte du projet MADFOR-WATER

Le thiabendazole dans les eaux usées synthétiques pourrait être dégradé par du dioxyde de titane immobilisé avec un rendement pouvant atteindre 94% en 120 minutes. L'analyse des particules de dioxyde de titane dans l'effluent traité a montré une libération très faible (<1%) qui a confirmé la bonne stabilité mécanique du photocatalyseur immobilisé. Cependant, l'efficacité du photo-réacteur a été significativement influencée par la matrice des eaux usées et réduite par l'encrassement biologique, puisque la photodégradation du thiabendazole dans les eaux usées

réelles n'a pas été observée. Les étapes de lavage du photoréacteur devraient être introduites dans le processus de traitement. La laccase immobilisée n'a pas permis la dégradation du thiabendazole.



Photodégradation du thiabendazole par la laccase immobilisée

Obstacles spécifiques relatifs à l'application de cette technologie en Egypte, en Tunisie et/ou au Maroc et à la production d'eaux usées traitées de qualité pour l'irrigation selon la norme ISO 16075

Le photoréacteur peut fonctionner uniquement pendant la journée car une lumière solaire est nécessaire. Des lampes UV supplémentaires doivent être installées en cas d'utilisation nocturne. Les coûts des enzymes et de la résine utilisés pour l'immobilisation sont relativement élevés.

7 - INSTRUMENTS TECHNOLOGIQUES D'IRRIGATION DÉVELOPPÉS DANS LE CADRE DU PROJECT MADFORWATER

1 - Micro-asperseur adapté à la distribution d'eaux usées traitées

Types de cultures ciblées par cette technologie

Ce micro-asperseur innovant est conçu spécifiquement pour l'irrigation sous le feuillage des vergers.

Nouvelles technologies utilisées en Egypte, au Maroc et en Tunisie pour l'irrigation de leurs cultures

Dans les pays ciblés, les vergers sont typiquement irrigués par des goutteurs quand l'eau est de bonne qualité, ou avec des micro-asperseurs si des problèmes de colmatage deviennent de plus en plus fréquents en raison de la présence de matières en suspension dans l'eau d'irrigation.

Description de la technologie

Cette technologie peut être utilisée dans le cas de l'irrigation sous le feuillage des vergers de manière à éviter le contact de l'eau avec les parties consommables. L'objectif est de développer un mini asperseur à bas prix qui réduit les risques de dissémination des pathogènes par les aéro-

sols produits par les fines gouttelettes, et qui résiste aux éventuels problèmes de colmatage associés à l'utilisation des eaux usées traitées. Conçu pour gérer la taille des gouttelettes produites, le mini asperseur réduit la production de fines gouttelettes non souhaitées. Il est destiné à fonctionner à basse pression (<2 bar).

Le diamètre d'une gouttelette varie entre 0,5mm et 2,5mm pour plus de 95% du volume livré : supérieur à 0,5 mm pour éviter la dérive des gouttelettes à cause du vent et inférieur à 2,5mm pour éviter le compactage du sol dû à l'impact des gouttelettes. Le contrôle de la distribution granulométrique est réalisé grâce à plusieurs facteurs combinés : la taille de la buse, la pression de fonctionnement, la forme du canal du déflecteur et de la vitesse de rotation.

La conception de prototypes et l'optimisation de la forme de cet asperseur innovant représentent une partie importante de cette recherche. Concernant la maintenance et le conditionnement de l'eau, il s'agit d'atteindre un fonctionnement à long terme avec une filtration grossière de 0,5 mm.

En termes de couts, cette technologie est un dispositif en plastique simple, facile à monter et peu couteux. C'est une technologie qui fonctionne à faible pression et la mise en place sera possible sur une infrastructure d'irrigation classique très simple d'utilisation. En termes d'impact environnemental, la basse pression de fonctionnement de l'asperseur permet de réduire les pertes d'eau liées au vent, les consommations d'énergie et pour éviter les grandes stations de pompage (exigeantes en énergie).

Figure – Micro-asperseur antidérive

Les caractéristiques qui rendent cette technologie adaptée aux contextes égyptien, tunisien et/ou marocain et à l'utilisation des eaux usées traitées

Les pays ciblés font tous état d'une considérable pénurie d'eau et d'un climat à fort taux d'évaporation. Le but initial de cette technologie est de pouvoir réutiliser les eaux usées traitées avec un risque minimal de colmatage et de réduire le risque de dissémination de pathogènes dans les conditions venteuses, tout en atteignant une taille de gouttelettes qui limite une potentielle dérive.

Ce qui, à son tour, diminuera toute évaporation potentielle.

Résultats obtenus par MADFORWATER concernant cette technologie

Les résultats obtenus à ce jour sont principalement liés à la distribution des gouttelettes de différentes tailles au long du rayon. Ces données ont été obtenues à l'aide d'un disdromètre laser-optique qui compte les gouttelettes et estime leurs tailles. Les mesures montrent que la taille des gouttelettes est proche de la gamme de diamètre prévue. Nous avons effectué des expériences avec des effluents pour tester cette technologie avec des eaux usées caractérisées par une présence de matières en suspension pertinente (> 200 mg /l) qui n'a pas changé la plage de distribution de la taille des gouttelettes. L'analyse de l'impact du vent sur la répartition de l'eau et la distribution granulométrique est en cours.

Les obstacles spécifiques concernant la mise en application de cette technologie avec des eaux usées traitées, en Egypte, en Tunisie et / ou au Maroc

La conception d'un tel micro-asperseur avec une durabilité élevée et des propriétés antidérive présente des obstacles dont la sélection des matériaux qui empêchent le développement de biofilm et la forme appropriée du déflecteur pour adapter les caractéristiques de distribution à travers la vitesse de rotation et résister à l'usure. L'identification des matériaux plastifiés a eu lieu à partir d'une expérience avec de véritables eaux usées traitées.

2 - Buse d'irrigation calibrée antividange

Types de cultures ciblées par cette technologie

Ce type d'émetteur peut être utilisé avec des cultures permanentes ou temporaires à haute valeur, mais il ne convient pas aux cultures céréalières ni à d'autres cultures plus extensives.

Nouvelles technologies utilisées en Egypte, au Maroc et en Tunisie pour l'irrigation de ces cultures

Cet émetteur pourrait être une alternative aux émetteurs d'irrigation goutte-à-goutte, car il ne nécessite pas un filtre de taille inférieure à 1 mm après la décantation de l'effluent.

Cette propriété provient du fait que le débit est élevé, ce qui empêche tout dépôt dans l'émetteur pouvant entraîner un colmatage et diminuer l'uniformité de la distribution et donc compromettre l'efficacité de l'irrigation. Pour empêcher le lessivage ou le ruissellement liés au débit élevé, le distributeur est anti-vidange ce qui lui permet de fonctionner pendant de courts cycles (généralement à un rythme d'une impulsion/minute) pour fournir l'irrigation requise en plusieurs lots pour rendre l'infiltration plus efficace.

Description de la technologie

D'après la taille de la buse ajustée à l'émetteur, la décharge varie entre 30 et 100 l / h sous une pression de 0,5 à 2 bars. Cette décharge de pression élevée entraîne des taux d'irrigation instantanés qui dépassent la capacité d'infiltration de la plupart des sols agricoles. Par conséquent, l'opération est divisée en cycles courts (typiquement d'une ou deux minutes) répétés selon les besoins. Un bloc d'irrigation de 200 m prend environ 1 minute pour être rempli et pressurisé lorsqu'il est activé. Une membrane antifuite qui ferme l'émetteur à une pression de 0,35 bar a été ajoutée pour empêcher la vidange.

Ainsi, la pressurisation du système est presque instantanée, permettant une uniformité de distribution importante. Un dispositif de régulation de pression est en cours de développement pour maintenir une distribution uniforme avec une taille de buse unique.

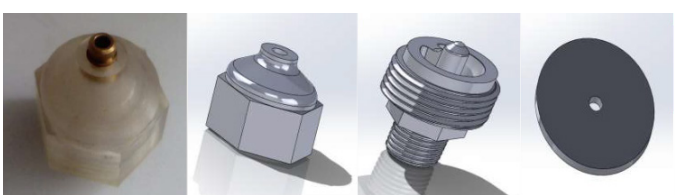


Figure- schéma d'un émetteur antifuite

Les caractéristiques qui rendent cette technologie adaptée aux contextes Egyptien, Tunisien et/ou Marocain et à l'utilisation des eaux usées traitées

Le principal avantage de cette technologie est sa capacité de résister à une concentration élevée de matières en suspension dans les eaux usées traitées ; un facteur qui nécessite normalement l'utilisation de systèmes de filtration fine ou des solutions de nettoyage fréquent lorsque les solides en suspension sont distribuées avec des goutteurs de micro-irrigation. Il est vrai que si les filtres fins nécessitent un entretien constant que de nombreux agriculteurs utilisant l'irrigation goutte à goutte ne respectent pas à long terme, cette solution acceptant la filtration grossière peut être mieux entreprise par des agriculteurs peu qualifiés. Cet émetteur innovant a été évalué avec des solides en suspension à des concentrations comprises entre 2 à 4 g / L ; aucun phénomène de colmatage n'a été observé. Cela prouve qu'il convient à l'utilisation avec des eaux usées traitées grossièrement filtrées contenant des niveaux élevées de matières en suspension.

Résultats obtenus par MADFORWATER concernant cette technologie

Au cours du développement du projet, l'émetteur a été conçu comme prototype et évalué expérimentalement en termes de performance hydraulique et sensibilité au

colmatage avec divers types de contaminants physiques (particules, voir le graphique ci-dessous et fibres). Le système a également été évalué en termes de mécanique des fluides par simulation numérique. Les essais au laboratoire avec des effluents synthétiques, développés de manière à reproduire les effluents des différents types d'eaux usées ciblés par MADFORWATER ont réussi. D'autres essais effectués avec de vrais effluents d'eaux usées traitées dans des sites expérimentaux gérés par Irstea ont confirmé les résultats du laboratoire sur une période de 10 semaines.

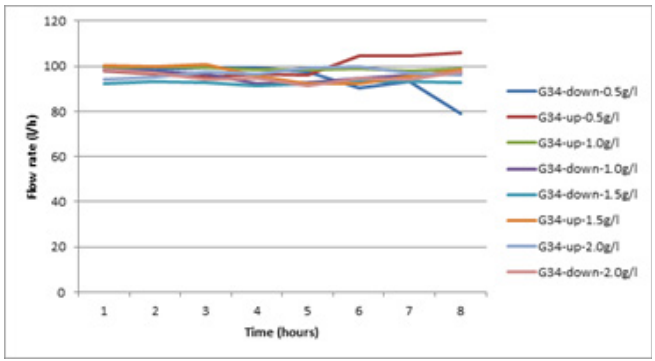


Figure- Évaluation du colmatage par des fibres, pour une concentration jusqu'à un maximum de 2 g / L (diamètre de 50-60 µm) avec la position de l'émetteur vers le haut et le bas

Les obstacles spécifiques concernant la mise en application de cette technologie avec des eaux usées traitées, en Egypte, en Tunisie et / ou au Maroc

Les pratiques liées à l'utilisation de ce type d'émetteurs sont différentes de celles relatives aux systèmes d'irrigation goutte-à-goutte existants. Il est nécessaire d'observer un temps d'adaptation, avec des démonstrations au terme du projet. La décharge élevée de cet émetteur ne convient pas à tous les types de cultures. Il serait peut-être nécessaire de modifier la taille des canaux d'irrigation pour changer la gamme de débits par rapport aux systèmes d'irrigation goutte à goutte standard.

3 - Outil de modélisation pour une planification optimale de l'irrigation avec différents types d'eau

Types de cultures ciblées par cette technologie

Ce modèle a été testé sur plusieurs cultures maraîchères (par exemple la tomate, la pomme de terre) et sur des grandes cultures (par exemple le blé, le maïs).

Description de la technologie

Le Modèle d'Irrigation Sûr (MIS) est un modèle du seau qui

permet d'évaluer les besoins en eau des cultures en case de l'utilisation d'eau conventionnelle, des eaux usées traitées ou de mélanges d'eau. Ce modèle s'adapte à divers systèmes d'irrigation, différentes qualités d'eau, différents types de sols et variétés de cultures. Dans le cas des eaux usées traitées, deux paramètres principaux sont pris en compte : i) La salinité de l'eau et ii) La concentration d'E. coli.

Le modèle permet également d'évaluer et de contrôler le risque microbien. Il est capable de simuler l'impact de l'irrigation sur les propriétés physiques des sols et sur le rendement annuel pour les cultures.

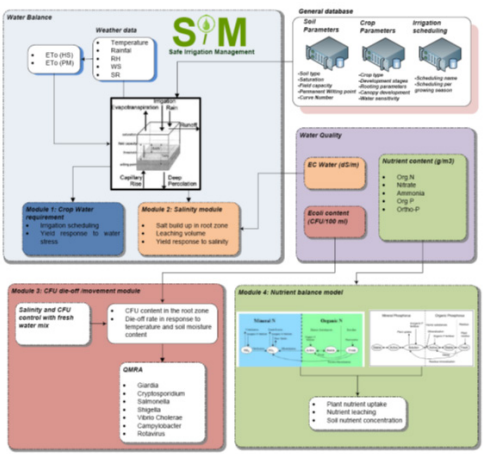


Figure- Les modules de Gestion de l'Irrigation Sûr (MIS)

Les caractéristiques qui rendent cette technologie adaptée aux contextes Egyptien, Tunisien et/ou Marocain et à l'utilisation des eaux usées traitées

Ce modèle aide les agriculteurs et les décideurs à identifier les options relatives à une attribution, un calendrier et une gestion optimaux de l'eau, y compris la sélection du mélange d'eau idéal. La capacité du modèle d'anticiper les conditions futures est très utile pour la projection des résultats des diverses stratégies possibles de gestion de l'irrigation.

Résultats obtenus par MADFORWATER en relation à cette technologie

Le MIS est en cours d'application dans le bassin de Souss-Massa au Maroc, pour optimiser la planification de l'irrigation et la tolérance à la salinité de certaines cultures en utilisant différentes qualités d'eau. Afin d'évaluer la performance du modèle, un essai préliminaire a été effectué. La figure ci-dessous présente un calendrier d'irrigation. Le programme d'irrigation est défini par le minutage et par la quantité d'eau d'appliquer. L'irrigation est chronométrée d'une manière automatique. Une fois le minutage d'irrigation réglé, le volume d'eau peut être automatiquement appliqué en tant que : i) quantité d'eau fixe (mm) ; ii) retour au déficit hydrique fixe du sol (mm) ; iii) retour à l'épuisement fixe de l'humidité du sol (% de la capacité de rétention d'eau du sol).

Figure-Un calendrier d'irrigation obtenu à partir du MIS

Les obstacles spécifiques concernant la mise en application de cette technologie avec des eaux usées traitées, en Egypte, en Tunisie et / ou au Maroc

• Difficulté d'obtenir les données de base requises (notamment au niveau des paramètres hydrologiques du sol

• Difficulté d'obtenir les données requises pour calibrer le modèle pour chaque pays (culture, conditions météorologiques, sol, …)

• L'utilisation des eaux usées est restreinte et n'est souvent autorisée que dans le cadre des expériences contrôlées

4 - Bactéries Promotrices de la Croissance des Plantes (BPCP) pour améliorer la résistance des cultures au stress hydrique et à la salinité

Types de cultures ciblées par cette technologie

Une grande collection de BPCP isolées à partir de la rhizosphère de plusieurs plantes-hôtes, à savoir le sorgho, la luzerne, l'arganier, l'olivier, le figuier, les agrumes et les plantes extrémophiles récoltés dans les pays méditerranéens africains (MACs) a été construite et soumise à plusieurs tests de sélection. Les souches les plus performantes ont été sélectionnées pour des essais in-vivo sur des tomates et du blé dur, cultures d'intérêt dans les pays du MACs. Ces inocula de BPCP peuvent être appliquées à toutes les cultures afin d'améliorer leur croissance, leur productivité ainsi que leur tolérance au stress.

Description de la technologie

Les BPCP peuvent favoriser la croissance des plantes dans des conditions de stress typique des environnements extrêmes, tels que la sécheresse et la salinité du sol, qui sont les principaux stress abiotiques affectant la productivité des cultures. Mais leur utilisation pour promouvoir la productivité des cultures est encore peu appliquée à grande échelle.

MADFORWATER développe et met en application des ino-

cula de BPCP adaptés au site en tant que biofertilisants / biostimulants pour des cultures sélectionnées présentant un intérêt économique élevé pour les MACs. Les inocula sélectionnés non seulement favoriseraient les activités de croissance végétale, mais seront également bien adaptés et efficaces dans le contexte de la réutilisation des eaux usées traitées dans les terres arides et endommagés, caractéristiques des pays ciblés. dans des conditions de stress typique des environnements extrêmes, tels que la sécheresse et la salinité du sol, qui sont les principaux stress abiotiques affectant la productivité des cultures. Mais leur utilisation pour promouvoir la productivité des cultures est encore peu appliquée à grande échelle.

Les caractéristiques qui rendent cette technologie adaptée aux contextes Egyptien, Tunisien et/ou Marocain et aux cultures irriguées avec des eaux usées traitées

En plus de leurs effets liés à la biofertilisation (amélioration de l'absorption des nutriments) et au biocontrôle (les facteurs associés à la production d'antimicrobiens et d'insecticides), les BPCP peuvent contribuer à la bioremédiation des micropolluants du sol et améliorent la tolérance des cultures aux conditions climatiques extrêmes spécifiques de l'Afrique du Nord (e.g. salinité des sols , sécheresse).

Résultats obtenus par MADFORWATER concernant cette technologie

Une large collection de BPCP a été mise en place à partir de différentes espèces de plantes herbacées et arboricoles collectées en Tunisie, au Maroc et en Egypte. Nous avons identifié les souches bactériennes les plus performantes et nous avons évalué leurs résistances aux stresses osmotique et salin et leurs activités promotrices de la croissance des plantes, y compris l'activité de biocontrôle, à travers des essais in-vitro. Nous avons également confirmé in-vivo l'effet bénéfique des souches sélectionnées sur la croissance de la tomate et du blé dur, dans des conditions de culture en serre, en créant différentes conditions d'irrigation telles que l'utilisation des eaux usées traitées et l'induction artificielle du stress hydrique et salin. Nos résultats ont abouti à l'identification et la caractérisation de nouvelles BPCP qui pourraient être prometteuses pour la mise en place de biofertilisants adaptés aux conditions climatiques typiques des pays de l'Afrique du Nord.

Nous avons réalisé une expérience sur le terrain en utilisant un consortium de souches de rhizobactéries favorisant la croissance des plantes sélectionné pour tester l'effet de facteurs tels que l'irrigation avec de l'eau

douce ou avec les eaux usées municipales traitées et la gestion sûre de l'irrigation (modèle SIM) sur le rendement des cultures de maïs. Nos résultats ont montré l'effet favorable de l'utilisation desdites bactéries pour favoriser la croissance des plantes, cependant, un autre facteur, principalement lié aux conditions climatiques, peut jouer un rôle important dans le développement d'une culture. Une deuxième expérience est en cours pour tester les mêmes facteurs sur les cultures de blé dur.

Les obstacles spécifiques concernant la mise en application de cette technologie avec des eaux usées traitées, en Egypte, en Tunisie et / ou au Maroc

- Faible vulgarisation des technologies et manque de production à grande échelle en Egypte, en Tunisie et au Maroc.
- Manque de sensibilisation de la communauté agricole aux propriétés des biofertilisants
- Manque de réglementation et de normes pour la production et la commercialisation des biofertilisants
- Un règlement précis des problèmes éthiques et de sécurité est nécessaire.

Figure- Montage expérimentale en serre pour tester les effets des bactéries promotrices de la croissance des plantes sur les plants de tomates cultivés sous différents régimes hydriques

Figure - Configuration expérimentale sur le terrain pour tester les effets des bactéries favorisant la croissance des plantes sur la culture de maïs irriguée par les eaux usées municipales traitées, tout en appliquant le modèle de la gestion sûre de l'irrigation

5 - Améliorer l'efficacité des systèmes traditionnels d'irrigation de surface en Egypte

Types de cultures ciblées par cette technologie

Grandes cultures

Technologie utilisée essentiellement en Egypte pour l'irrigation de ces cultures

Dans le delta du Nil, en Égypte, des canaux ouverts (appelés Mesqas) acheminent l'eau d'irrigation jusqu'aux fossés quaternaires des exploitations appelées Marwas, qui à leurs tours alimentent les champs en eau. L'eau de drainage qui en résulte irrigue soit les champs en aval, soit mélangée avec de l'eau douce pour ensuite réintégrer le système de distribution. Cela engendre une très grande efficacité au niveau du bassin au détriment de la qualité de l'eau rejetée dans les canaux de drainage.

Description de la technologie

L'idée essentielle de cette technologie consiste à transformer les Mesqas et les Marwas en canaux sous pression optimisés, équipés de bornes-fontaines qui alimentent en eau les tuyaux à vannes en aval munies de buses calibrées et les sillons des champs.

Ce système d'irrigation permet de maintenir à long terme l'irrigation au niveau de l'exploitation et une distribution uniforme réduisant ainsi la quantité d'eau de drainage et donc une quantité plus importante d'eau douce sera disponible en amont.

En conséquence, les besoins en eau de drainage seraient réduits et les conditions environnementales générales dans la zone irriguée seraient améliorées.

Caractéristiques qui rendent cette technologie adaptée au contexte égyptien

L'application de cette technologie ne nécessite pas un pré-traitement de l'eau. Dans le contexte égyptien, cette technologie s'applique à la fois à l'eau d'irrigation et à l'eau de drainage.

Résultats obtenus par MADFORWATER concernant cette technologie

Pour minimiser les coûts d'énergie et de maintenance, la conception du système localisé a été adaptée afin de fonctionner à basse pression (environ 0,5 bar). Le taux élevé de décharge des buses proposées réduit considérablement le risque d'encrassement et de colmatage des émetteurs ; problèmes fréquents quand l'irrigation est effectuée avec de l'eau de mauvaise qualité. Une attention particulière a été accordée à l'intégration des membranes élastomères dans la buse, de manière à développer des émetteurs dont la compensation de pression est caractérisée par une haute uniformité de décharge le long du tuyau. Des tests sur le terrain ont démontré qu'en utilisant cette technologie, la quantité d'eau de drainage pourrait être réduite de plus de 30%.

Pression (Bars)	Décharge (l/s)
0,15	0,75
0,2	0,8
0,4	0,84

Figure- Tuyau à vannes et les buses calibrées en détail

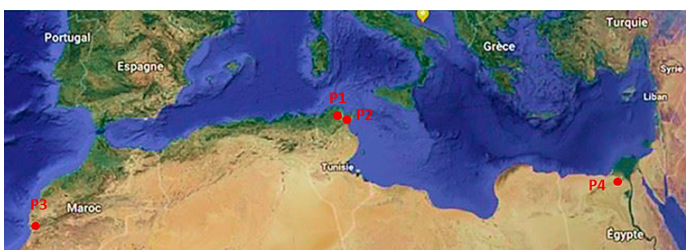
Les obstacles spécifiques concernant l'application de cette technologie en Egypte

Le principal obstacle est au niveau des agriculteurs. C'est difficile qu'ils acceptent d'adapter leur approche et d'utiliser une nouvelle technologie qui remplacerait un système d'inondation ancien et consolidé.

8 - LES INSTALLATIONS/UNITES PILOTES INTEGREES DE MADFORWATER POUR LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES ET LEUR RÉUTILISATION DANS LE SECTEUR AGRICOLE

Dans le cadre des principales activités du projet il était prévu de construire, suivre et optimiser 4 installations/unités pilotes dans lesquelles les technologies les plus prometteuses pour le traitement et la réutilisation agricole de différents types d'eaux usées ont été efficacement intégrées: une a été installée en Égypte, deux en Tunisie et une au Maroc. Différents types d'eaux usées ont été traités et réutilisés dans les installations pilotes de MADFORWATER : eaux usées municipales, eaux usées textiles et eaux de canaux de drainage, comme spécifié dans le tableau suivant :

Installation pilote	Types d'eaux usées	Lieu
P1	Eaux usées municipales	Station d'épuration municipale de Chotrana
P2	Eaux usées textiles	Industrie Gwash, Nabeul, Tunisie
P3	Eaux usées municipales	Agadir, Maroc
P4	Eaux de canaux de drainage	Lac de Manzala, Egypt



Localisation et principales caractéristiques des 4 installations pilotes de MADFORWATER. P1, P2, P3, P4

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.

1. Installations pilotes pour le traitement et la réutilisation des eaux usées municipales à Chotrana, Tunisie (P1) et Agadir, Maroc (P3)

1.1 Installation pilote P1, Ariana, Tunisie

La première installation pilote des eaux usées municipales a été installée dans la station d'épuration de Choutrana à Ariana, en Tunisie. Dans cette installation il s'agit du traitement et de la réutilisation des eaux usées muncipales.

L'installation pilote P1 (10 m³ / j), est composée :
1. d'un filtre à ruissellement nitrifiant qui assure le traitement secondaire des matières organiques et de l'ammoniac
2. d'un décanteur secondaire pour la sédimentation des boues
3. d'une zone humide construite pour l'élimination des métaux lourds et des éléments nutritifs restants
4. d'une unité de désinfection chimique
5. d'un système de déshydratation des boues secondaires en excès.

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.

La station d'épuration de Choutrana à Ariana, en Tunisie : le site de l'installation pilote de traitement des eaux usées municipales de MADFORWATER P1

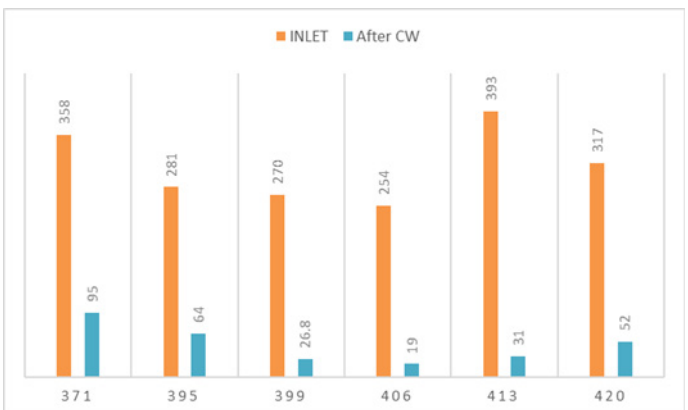
Les eaux usées municipales traitées produites par l'installation pilote ont été utilisées pour l'irrigation des cultures

de blé. Les partenaires de MADFORWATER ont développé des technologies d'irrigation adaptées à la réutilisation des eaux usées municipales traitées durant la période du projet, dans le but de réduire la consommation d'eau et d'augmenter la production agricole. Une sélection de technologies d'irrigation a été testée dans cette installation pilote : un modèle de programmation d'irrigation qui prend en compte les caractéristiques spécifiques des eaux usées traitées (modèle d'irrigation sûr), des mini-asperseurs innovants adaptés aux eaux usées municipales traités et aux climats chauds 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 inoculants 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.

Traitement des eaux usées municipales dans l'installation pilote p1 à Ariana, Tunisie, a) photo de l'installation pilote b) Blé irrigué avec des eaux usées municipales traitées à l'aide de micro-asperseurs

Traitement des eaux usées municipales dans l'installation pilote p1 à Ariana, Tunisie : détails de la zone humide construite

Au cours des premières semaines de fonctionnement, l'installation pilote P1 a donné des taux d'élimination très élevés pour les principaux paramètres. Cependant, l'accumulation de boues dans les 2 unités de filtrage par ruissellement a affecté négativement les résultats de l'ensemble du système. L'installation d'un clarificateur primaire a considérablement amélioré la qualité de l'effluent. De plus, la mise en place de la zone humide construite comme traitement tertiaire a grandement amélioré la qualité des effluents. Néanmoins, la désinfection chimique était encore nécessaire, pour répondre aux normes nationales et internationales de réutilisation agricole des eaux usées traitées.



Traitement des eaux usées municipales dans l'installation pilote P1 à Ariana, Tunisie: concentration en fonction du temps : DBO_5 (mg / L). CW: zone humide construite

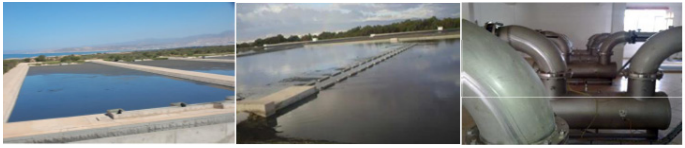
Le train de traitement proposé (sédimentation - filtre ruisselant et zone humide construite) semble être parfaitement adapté aux petites communautés rurales (1000-10000 personnes) caractérisées par une absence totale de traitement des eaux usées municipales et par un manque d'eau douce qui convient à l'irrigation. Le coût global du traitement des eaux usées (0,6-0,7 € / m^3) s'est avéré acceptable dans le contexte tunisien. Ce traitement représente une technologie abordable potentiellement implémentable dans plusieurs pays africains.

1.2 Installation pilote P3, AGADIR, Maroc

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^3 / jour. Le site de L'Mzar est situé à environ 8,5 km au sud de la ville d'Agadir sur les dunes côtières de L'Mzar. La limite ouest du site est à environ 1500 m de la mer. La superficie du site réservée à la mise en œuvre du projet est de 200 ha. Le processus de traitement des eaux usées municipales comprend une lagune anaérobie comme traitement primaire, une infiltration sur une couche de

sable, comme traitement secondaire et une désinfection UV comme traitement tertiaire. L'activité de surveillance a montré une élimination moyenne de 97 à 98% de la DBO_5, 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% de 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 et à accomplir un traitement préalable de leurs effluents avant de les injecter ensuite dans le réseau d'assainissement.



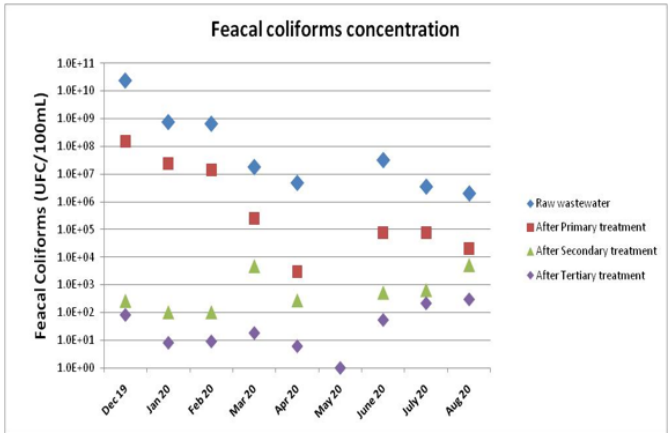
Traitement des eaux usées municipales dans l'installation pilote P3 à Agadir, Maroc : a) traitement primaire : lagune anaérobie ; b) traitement secondaire: filtre à sable; c) Système de désinfection UV - traitement tertiaire

La technologie proposée pour le traitement des eaux usées municipales présente plusieurs avantages :
- Sans danger pour les humains, l'environnement et la faune ; elle garantit des résultats satisfaisants sans ajout de produits chimiques ;
- d'excellents résultats dans la réduction des matières en suspension ;
- nitrification et oxydation de la DBO avancées ;
- élimination bactériologique importante ;
- faibles coûts d'exploitation ;
- facile à utiliser ;
- une bonne intégration environnementale.

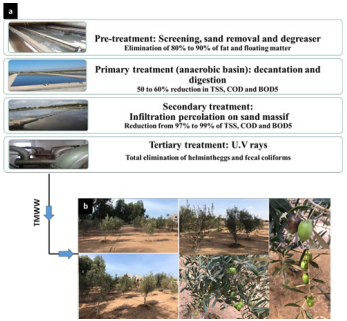
La forte salinité de l'effluent détectée dans l'eau produite par l'installation de L'Mzar limite ses utilisations pour les cultures sensibles au sel.

Les eaux usées municipales traitées produites par l'installation de M'Zar a été utilisée pour l'irrigation des jeunes oliviers au moyen de buses calibrées innovantes. La programmation de l'irrigation a été réalisée à l'aide d'un modèle innovant de simulation du bilan hydrique du sol (modèle d'irrigation sûr). Après un an d'expérimentation, l'irrigation par les eaux usées municipales traitées a permis des économies d'engrais et d'eau de 570 € / ha, lorsque le modèle d'irrigation sûr a été appliqué. Les rendements des

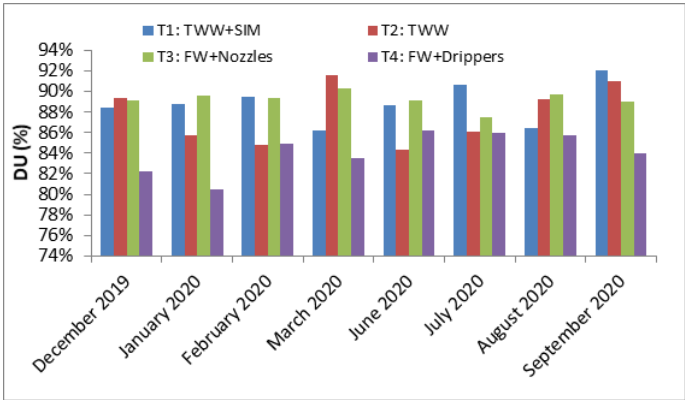
cultures obtenus avec les eaux usées municipales étaient similaires à ceux de l'eau douce.



Traitement des eaux usées municipales dans l'installation pilote P3 à Agadir, Maroc : élimination des coliformes fécaux au fil du temps



Traitement des eaux usées municipales dans l'installation pilote P3 à Agadir, Maroc: a) processus de traitement des eaux usées municipales à L'Mzar, b) oliviers irrigués avec des eaux usées municipales traitées à l'aide de buses calibrées



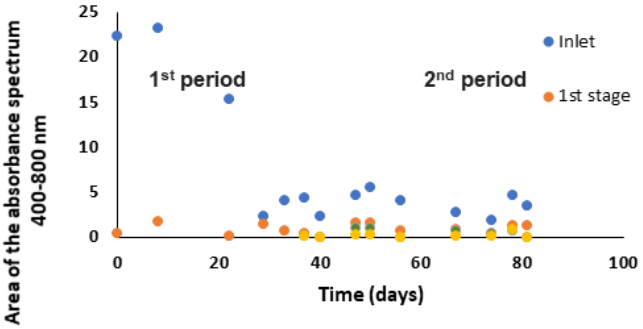
Installation pilote de traitement et de récupération des eaux municipales à Agadir, Maroc: valeurs d'uniformité de distribution mesurées pour les différentes technologies d'irrigation testées, pendant la période expérimentale. TWW, eaux usées traitées; FW, eau douce; SIM: modèle d'irrigation sûr

2. Installation pilote P3 de traitement et de réutilisation des eaux usées textiles l'industrie textile GWash (Nabeul, Tunisie)

Une installation pilote d'eaux usées textiles d'une capacité

de 10 m³ / 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 Lors des essais préliminaires de l'installation pilote, l'étape du réacteur biologique aérobie à lit transporté 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 de raffinage 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_4, PO_4, 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 du rejet d'eaux usées national acceptable dans le domaine public (Décret n ° 2018-315). La technologie développée se caractérise par un coût de traitement de 0,15 € par m³ d'eaux usées, ce qui se situe dans la fourchette des prix de rejet payés en Tunisie.

Industrie Gwash (Korba, Nabeul, Tunisie): le site de l'installation pilote P2 de traitement et de réutilisation des eaux usées textiles

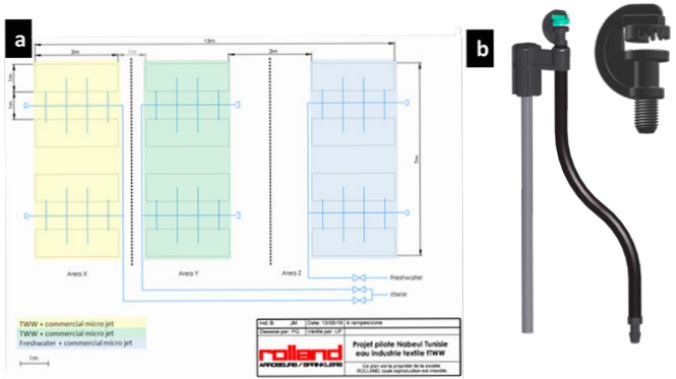


Installation pilote P2 pour le traitement et la réutilisation des eaux usées textiles à Nabeul, Tunisie: décoloration sur les différentes sections de la station d'épuration. 1ère étape: unité de floculation de coagulation, 2ème étape: filtre à sable et 3ème étape: colonne d'adsorption de résine.

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 remontaient à environ 1500 kg / ha, donc dans la fourchette des valeurs moyennes rapportées pour la Tunisie en 2017.

Installation pilote P2 de traitement et de réutilisation des eaux usées textiles à Nabeul, Tunisie: installation du système d'irrigation dans le champ expérimental

Les industries textiles en Tunisie produisent environ 3 millions de m3 / an d'eaux usées, qui sont généralement rejetées dans les égouts publics, ce qui représente une charge supplémentaire significative de matière organique non biodégradable dans les unités de traitement des eaux usées municipales.



Installation pilote P2 pour le traitement et la réutilisation des eaux usées textiles à Nabeul, Tunisie: a) schéma de principe du réseau d'irrigation (b) micro-asperseurs

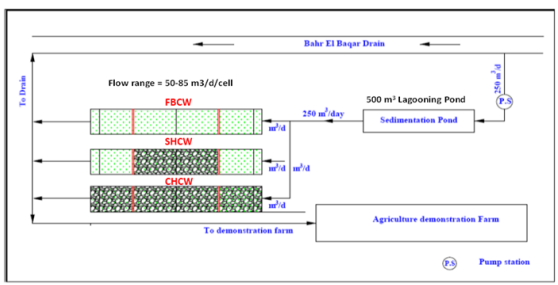
Le profil du sol irrigué avec des eaux usées textiles traitées était très similaire à celui du sol témoin irrigué avec de l'eau douce. Après presqu'un an, une augmentation de la conductivité électrique a été observée, ce qui peut nuire aux cultures sensibles au sel. Un drainage adéquat est

essentiel à la gestion de la salinité. Le drainage aidera à faciliter le lessivage des sels vers le bas dans le sol. Le système d'irrigation utilisé, composé d'un système de micro-aspersion à débit régulé, est facile à utiliser. Une distribution uniforme de l'eau a été obtenue. Cependant, les micro-asperseurs devaient être entretenus et nettoyés régulièrement pour éliminer les résidus. Il est à noter également que les micro-asperseurs étaient moins efficaces par temps venteux.

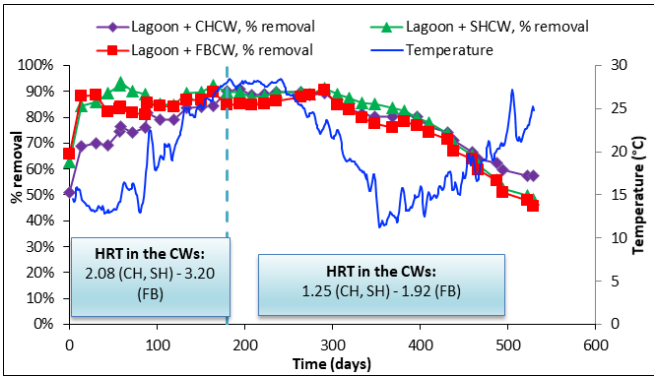
Le procédé de traitement à faible coût testé avec succès dans l'installation pilote P3 pourrait potentiellement être mis en œuvre à grande échelle dans le contexte nord-africain, conduisant à une diminution marquée de cette charge polluante. Les eaux usées textiles traitées peuvent être réutilisées dans 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 de l'entité de stress hydrique dans les régions caractérisées par une forte densité d'industries textiles.

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

L'installation pilote P4 de MADFORWATER composée d'un lagon facultatif et de trois types de zones humides construites testées en parallèle (système hybride zones humides construites en cascade, système hybride zones humides construites séquentielles et zones humides construites à lit transporté), a été menée pendant plus d'un an à deux différents temps de rétention. Elle était dédiée au traitement et à la réutilisation des eaux des canaux de drainage, et a été installée près du lac Manzala en Egypte, avec une capacité de 250 m³ / j. Un organigramme de la section de traitement de l'eau est présenté ci-dessous.



Installation pilote P4 pour le traitement et la réutilisation des eaux du canal de drainage du lac Manzala, Egypte: schéma de la section de traitement des eaux.



Installation pilote P4 pour le traitement et la réutilisation des eaux des canaux de drainage dans le lac Manzala, Egypte: efficacité de l'élimination de l'ammonium en fonction du temps HRT: temps de rétention hydraulique. CW: zones humides artificielles.

La combinaison hybride du lagunage et des zones humides construites 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_4, 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 construite 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_4, 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. La diminution du temps de rétention des zones humides construites, testée au cours de la deuxième partie de la période de suivi, a déterminé une réduction marquée de l'efficacité du traitement.

L'eau du canal de drainage traitée et semi-traitée (échantillonnée après le traitement par lagunage et avant la construction des zones humides) a été réutilisée pour l'irrigation des cotonniers, en utilisant des tuyaux à vannes dans une section de l'installation pilote et une irrigation traditionnelle par sillon 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 tuyaux à vannes et l'irrigation de surface (1780 et 1690 kg / ha, respectivement). Ces rendements expérimentaux étaient significativement su-

périeurs 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 construites 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 de l'eau d'irrigation, une économie significative de la consommation d'eau douce provenant du Nil, une diminution significative de la charge polluante rejetée dans la Mer Méditerranée, et une nette amélioration de la qualité de l'eau d'irrigation.

Installation pilote P4 pour le traitement et la réutilisation de l'eau des canaux de drainage : a) mise en place d'une zone humide construite hybride séquencée dans le lac Manzala en Egypte, b) cotonniers irrigués avec de l'eau de canal de drainage traitée à l'aide de tuyaux à vannes.

En conclusion, l'adoption à grande échelle et l'exploitation de certaines technologies MADFORWATER dans les installations pilotes de traitement et de réutilisation intégrés des eaux usées sur le terrain ont permis de comprendre en profondeur, d'une part, le potentiel de mise en œuvre à grande échelle et, par conséquent, l'adoption par le marché

Pour plus d'informations sur le projet, visitez le site Web de MADFORWATER à l'adresse : www.madforwater.eu ou contactez-nous: dario.frascari@unibo.it.

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.

Cette publication reflète uniquement 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.