

PLAN D'IMPLEMENTATION DU NEXUS

Dessalement

Souss-Massa, **Maroc**



PRIMA
PARTNERSHIP FOR RESEARCH AND INNOVATION
IN THE MEDITERRANEAN AREA



This project is part of the
PRIMA programme supported
by the European Union.



PLAN D'IMPLEMENTATION DU NEXUS

Dessalement

Souss-Massa, **Maroc**

Copyright © Boosting Nexus
Framework Implementation in the
Mediterranean (BONEX), 2025

Contributions



Équipe nationale

Agronomic and Veterinary Institute Hassan II

Yasmina Imani, Mounia Ennami, Asmae Allaoui, Houda Taimourya, Khadija Khouya, Ouïam Lahlou

Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Souss Massa

Lahcen Oulli, Brahim Ben-Ihya, El arabi El Mahdi, Nor-eddine Kessa

Équipe Méthodes

Center for Environmental and Sustainability Research (CENSE), NOVA School of Science and Technology, NOVA University of Lisbon (NOVA FCT)

Paula Antunes, Irene Pérez Ramirez, Jessica Loureiro, Rita Lopes, Rui Ferreira dos Santos, Nuno Videira

University of Kassel

Nora Schütze, Andreas Thiel

Almeria University

Antonio Castro, Enrica Garau, Gabriela de Abreu Pérez

Future Water

Johannes Hunink, Tania Imran, Peter Droogers

Révision

Nora Schütze (University of Kassel)

Gabriela de Abreu Pérez (Almeria University)

Jessica Loureiro (CENSE, NOVA FCT)

Olfa Mahjoub (National Research Institute for Rural Engineering, Water and Forestry - INRGREF, University of Carthage – UCAR)

Coordinateur du Projet

BIOAZUL

Antonia Lorenzo, Rafael Casielles, Ângela Magno

Design par POLPA

Alexandre Pereira

Le projet BONEX est financé par le programme PRIMA



BONEX
Boosting Nexus Framework
Implementation in the Mediterranean



This project is part of the
PRIMA programme supported
by the European Union.



Résumé exécutif

La région de Chtouka, située dans la plaine du Souss-Massa au Maroc, fait face à une pénurie d'eau croissante, exacerbée par le changement climatique, la surexploitation des nappes phréatiques et la salinisation des sols. Ces problématiques compromettent la productivité agricole et les moyens de subsistance des populations locales. Pour y faire face, une usine de dessalement d'eau de mer a été mise en service. Utilisant la technologie de l'osmose inverse, elle fournit une eau douce de qualité, destinée à couvrir les besoins municipaux et pour la première fois, l'irrigation des terres agricoles.

Le projet **BONEX**, dont l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, et l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole (ORMVA) du Souss-Massa sont partenaires est une initiative méditerranéenne visant à promouvoir une gestion intégrée des ressources en s'appuyant sur l'approche **Nexus Eau-Énergie-Nourriture-Écosystèmes** (WEFe). Dans le cadre du projet Bonex et afin de renforcer, selon cette approche WEFe, la stratégie d'utilisation de l'eau désalée pour l'irrigation, un Plan d'Implémentation du Nexus (ou **Nexus Bridging Plan (NBP)**) a été élaboré. Il s'agit de l'un des sept NBP déployés dans la région méditerranéenne par BONEX pour orienter la mise en œuvre concrète de solutions adaptées aux contextes locaux. Dans la région du Souss-Massa, le NBP met l'accent sur la synergie entre l'utilisation de l'eau désalée pour l'irrigation et l'intégration des énergies renouvelables, telles l'énergie solaire, assurant ainsi des solutions à la fois durables sur les plans écologique et économique.

Dans le cadre du projet, des recherches agronomiques ont été menées pour **évaluer l'efficacité de différents mélanges d'eau dessalée et d'eau de puits dans l'irrigation des cultures de courgettes**, une production stratégique pour la région. Les résultats ont révélé qu'un taux de mélange compris entre 25% et 50% d'eau dessalée permettait d'optimiser l'usage de l'eau, tout en favorisant une bonne croissance des plantes et en limitant les émissions de CO₂.

Parallèlement, **d'autres expérimentations ont porté sur des systèmes de culture hors-sol**

intégrant plusieurs innovations: eau dessalée, traitement magnétique de l'eau, biofertilisants et irrigation alimentée par énergie solaire. Cette approche intégrée a démontré des effets positifs sur les rendements, la résilience des cultures et la réduction de l'empreinte environnementale, illustrant le potentiel des synergies technologiques pour répondre aux enjeux du Nexus.

Sur la base de ces résultats et d'enquêtes complémentaires Un élément central du projet a été

Le PNB met l'accent sur la synergie entre l'utilisation de l'eau dessalée pour l'irrigation et l'intégration des énergies renouvelables

l'élaboration d'un guide pratique à destination des agriculteurs, conçu en collaboration avec des chercheurs, institutions agricoles et producteurs locaux. Ce guide propose des recommandations pour l'usage optimal de l'eau dessalée, combinée à des technologies complémentaires, afin d'améliorer les rendements, la nutrition des plantes et de réduire les impacts environnementaux. Pour faciliter son adoption, un programme de

formation a été mis en place, incluant démonstrations, ateliers et outils pédagogiques.

En parallèle, un modèle systémique a été développé grâce à des **ateliers participatifs**, utilisant l'outil REWEFe pour analyser les liens entre eau, énergie, alimentation et aspects socio-économiques. Les simulations ont révélé un fort potentiel d'amélioration de la production, tout en soulignant les compromis à gérer concernant les ressources naturelles.

En conclusion, l'approche WEFe appliquée au Souss-Massa a permis des progrès concrets dans la gestion durable des ressources, renforçant la résilience agricole locale et proposant un modèle répliquable dans d'autres régions arides.

Approche méthodologique

Dans le cadre de sa mission de recherche et d'innovation, le projet BONEX a joué un rôle central dans la promotion d'une gestion durable des ressources naturelles dans la région du Souss-Massa, en s'appuyant sur l'approche intégrée du Nexus Eau-Énergie-Nourriture-Écosystèmes (WEFe). À travers une **méthodologie rigoureuse**, le projet a développé des solutions d'utilisation de l'eau dessalée adaptées aux contraintes naturelles, économiques et sociales propres à la région.

Le projet a débuté par une étude de faisabilité approfondie, destinée à évaluer les besoins énergétiques liés au dessalement et à explorer le potentiel d'intégration des énergies renouvelables locales, en particulier l'énergie solaire. Cette première étape a été suivie par la **mise en œuvre de systèmes pilotes**, testés dans des conditions agricoles réelles, afin de valider les technologies les plus appropriées.

Les solutions développées dans le cadre de BONEX répondent aux défis pressants liés à la rareté et à la qualité de l'eau. L'étude de cas portant sur l'eau dessalée produite par le DP Maroc illustre bien ce contexte, où les parties prenantes étaient déjà confrontées à des contraintes interconnectées: disponibilité limitée en eau douce, fortes exigences

énergétiques du dessalement, coûts élevés d'exploitation et de maintenance, ainsi que des tensions socio-économiques dues à la concurrence entre les usages domestiques et agricoles de l'eau. Pour relever ces défis, BONEX a mis en œuvre des approches innovantes et adaptées au contexte local. Parmi les stratégies adoptées figurent l'optimisation du mélange entre eau dessalée et eau de puits, l'amélioration de l'efficacité des systèmes d'irrigation, l'intégration de sources d'énergie renouvelable pour limiter la dépendance énergétique, ainsi que la gestion des impacts environnementaux, notamment ceux liés au rejet de saumure. Cette réponse multidimensionnelle contribue à une utilisation plus efficace de l'eau et à la mise en place d'un système de gestion plus résilient et durable pour la région.

Ces approches ont été **mise en œuvre selon une optique de participation inclusive**, le projet BONEX ayant organisé une série de **trois ateliers collaboratifs**, réunissant un large éventail d'acteurs: représentants des secteurs de l'eau, de l'énergie, de l'agriculture, de l'environnement, du monde académique, de la société civile et des agriculteurs. Ces ateliers ont permis de construire progressivement une compréhension partagée du Nexus WEFe et d'identifier des solutions concrètes autour de l'utilisation de l'eau dessalée au Maroc.

Le premier atelier a servi à définir les composantes du Nexus les plus pertinentes pour le contexte régional. **Le second** s'est concentré sur la co-construction de solutions, en identifiant les obstacles et leviers à leur mise en œuvre. **Le troisième** a permis de présenter les résultats obtenus et de proposer des actions concrètes pour lever les derniers freins à l'adoption de l'eau dessalée en agriculture. Parmi les résultats issus de ces ateliers figurent des diagrammes de boucles causales (CLDs) validés, des solutions co-développées, ainsi que leur intégration dans des projets de fin d'études d'étudiants, témoignant de l'engagement du projet en faveur de la recherche appliquée et de la mise en œuvre concrète sur le terrain.



Description du contexte

La région du Souss-Massa présente une diversité à la fois sociale et administrative, rassemblant des populations urbaines dans les centres-villes et des communautés rurales réparties sur l'ensemble du territoire. Sur le plan administratif, elle s'étend principalement sur les provinces d'Agadir Ida-Outanane et de Chtouka Ait Baha (voir Figure 1). Cette configuration institutionnelle joue un rôle essentiel dans la gestion des ressources naturelles, en particulier de l'eau, car elle nécessite une coordination étroite entre plusieurs échelons de gouvernance: municipalités urbaines et rurales, préfectures et représentations régionales des ministères sectoriels.

Sur le plan biophysique, le Souss-Massa est caractérisé par un climat semi-aride, avec une disponibilité en eau très inégale et soumise à de fortes variations. Le climat chaud et sec, conjugué à

des précipitations faibles et irrégulières, génère un stress hydrique élevé. Le littoral atlantique offre une source potentielle d'approvisionnement en eau via le dessalement, mais des facteurs biophysiques comme la salinité de l'eau de mer et les impacts environnementaux liés à son extraction doivent être soigneusement pris en compte. Le fleuve Souss, principal cours d'eau de la région, représente une source précieuse d'eau douce, mais il est soumis à une pression croissante en raison de l'urbanisation et de l'agriculture intensive. En outre, certaines zones agricoles sont touchées par la salinisation des sols, rendant l'irrigation plus complexe, surtout lorsque l'eau utilisée provient de sources salines.

La région du Souss-Massa est un pôle économique clé au Maroc, fortement dépendante de l'agriculture, du tourisme et d'un secteur industriel en pleine

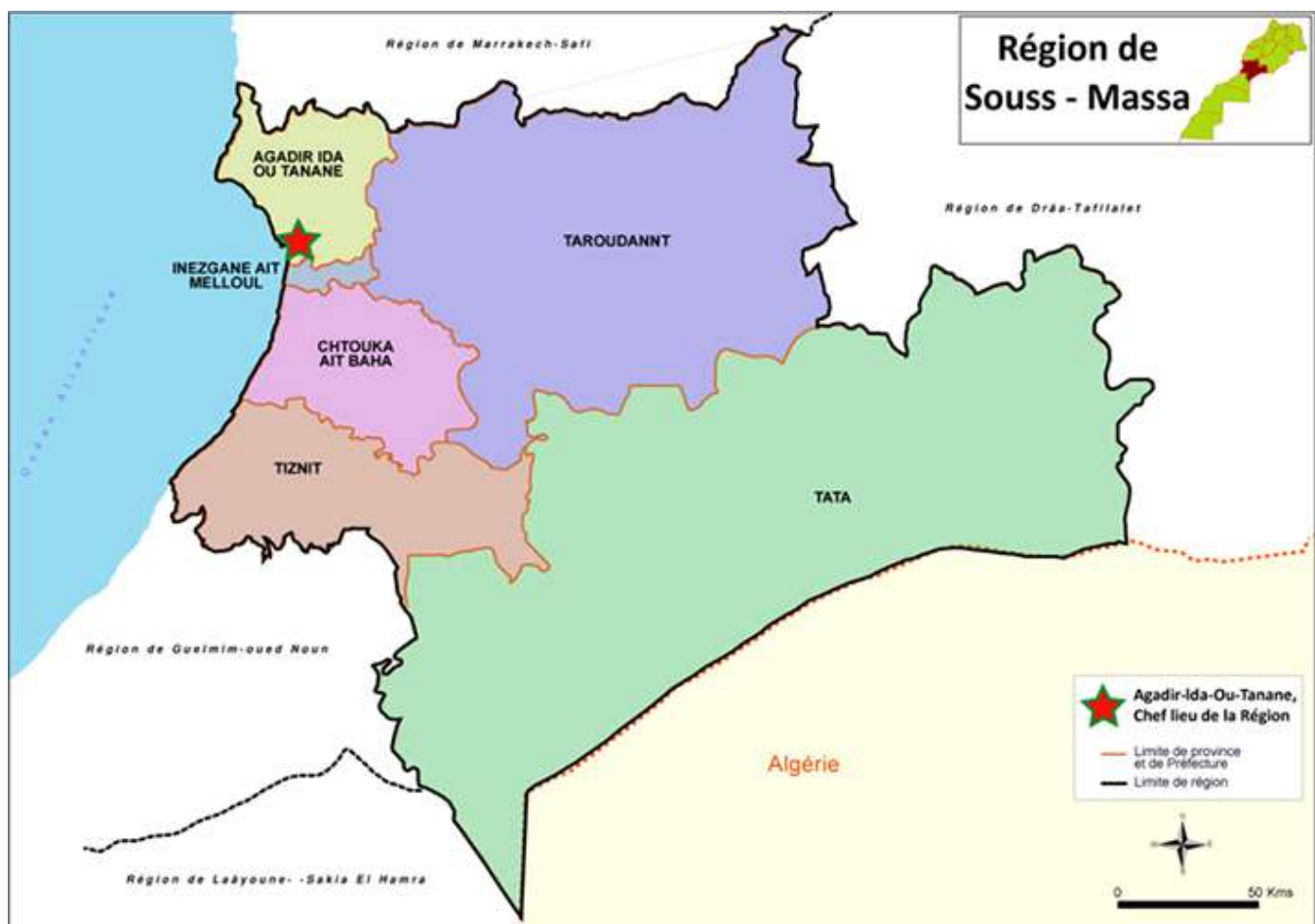


Figure 1 – Carte de la région du Souss-Massa



croissance, tous générant une forte demande en eau. Toutefois, ce dynamisme est confronté à des contraintes croissantes: conditions climatiques semi-arides, surexploitation des nappes phréatiques, pollution des ressources hydriques et impacts du changement climatique. Ce dernier accentue les sécheresses, favorise la montée du niveau de la mer et accélère la salinisation des sols, compromettant davantage la disponibilité en eau.

L'approche Nexus Eau-Énergie-Nourriture-Écosystèmes permet d'appréhender l'ensemble de ces enjeux interdépendants. Elle met en lumière plusieurs défis clés: la pénurie d'eau pour l'agriculture, les coûts énergétiques élevés associés au dessalement et la dégradation des terres liée à l'utilisation intensive d'engrais chimiques.

La mise en œuvre de projets de dessalement dans ce contexte s'avère complexe, en raison des investissements lourds requis, des difficultés de

coordination intersectorielle et des préoccupations des agriculteurs concernant les effets potentiels de l'eau dessalée sur la salinité des sols et son coût élevé. **Les projections futures** indiquent une aggravation du stress hydrique, une intensification de la dégradation des terres et une hausse continue de la demande en énergie. Cela rend d'autant plus indispensable l'intégration des énergies renouvelables, bien que leur déploiement à grande échelle soulève encore des défis, notamment en matière de stockage. Par ailleurs, l'urbanisation rapide, la perte de biodiversité et l'érosion côtière imposent de prendre pleinement en compte les dimensions socio-environnementales dans la planification des projets liés à l'eau et à l'énergie.

Face à ces défis, adopter une approche coordonnée basée sur le Nexus WEFé est essentiel pour assurer une gestion durable des ressources, **préserver la viabilité économique régionale et renforcer la résilience à long terme.**

Problématique du WEFé Nexus

Les défis liés au Nexus (WEFé) dans la région du Souss-Massa sont profondément interconnectés, impactant de manière simultanée la gestion de l'eau, la production énergétique, la sécurité alimentaire et la préservation des écosystèmes. En matière de ressources en eau, la région subit une intensification du stress hydrique, alimentée par une demande croissante issue de l'agriculture, de l'industrie et du tourisme. Cette pression est exacerbée par les effets du changement climatique, qui prolongent les périodes de sécheresse et réduisent les réserves disponibles. À cela s'ajoutent la pollution des nappes phréatiques par les intrants agricoles et le rejet d'eaux usées non traitées, aggravant encore la crise hydrique.

Ces pressions multiples ont entraîné une diminution significative de la disponibilité en eau, menaçant à la fois la production agricole et l'approvisionnement en eau potable. La concurrence entre les secteurs d'usage génère des tensions croissantes, accentuant

l'insécurité hydrique et fragilisant particulièrement les moyens de subsistance des petits agriculteurs.

Un diagramme en boucles causales (CLD), élaboré de manière participative avec les parties prenantes (*Figure 2*), met en évidence la nécessité d'une approche intégrée pour répondre à ces enjeux. Il illustre la complexité des interactions entre les différents éléments du Nexus dans le contexte marocain. Une coordination intersectorielle efficace apparaît essentielle pour optimiser les bénéfices attendus de chaque levier d'action, tout en limitant les effets négatifs. Le CLD souligne ainsi l'importance d'une gouvernance cohérente et systémique pour assurer une gestion durable des ressources naturelles.

Le CLD met en lumière un système dynamique dans lequel de nombreux facteurs interconnectés alimentent l'insécurité hydrique et la dégradation environnementale, exacerbées par la croissance démographique et la variabilité climatique. Un enjeu

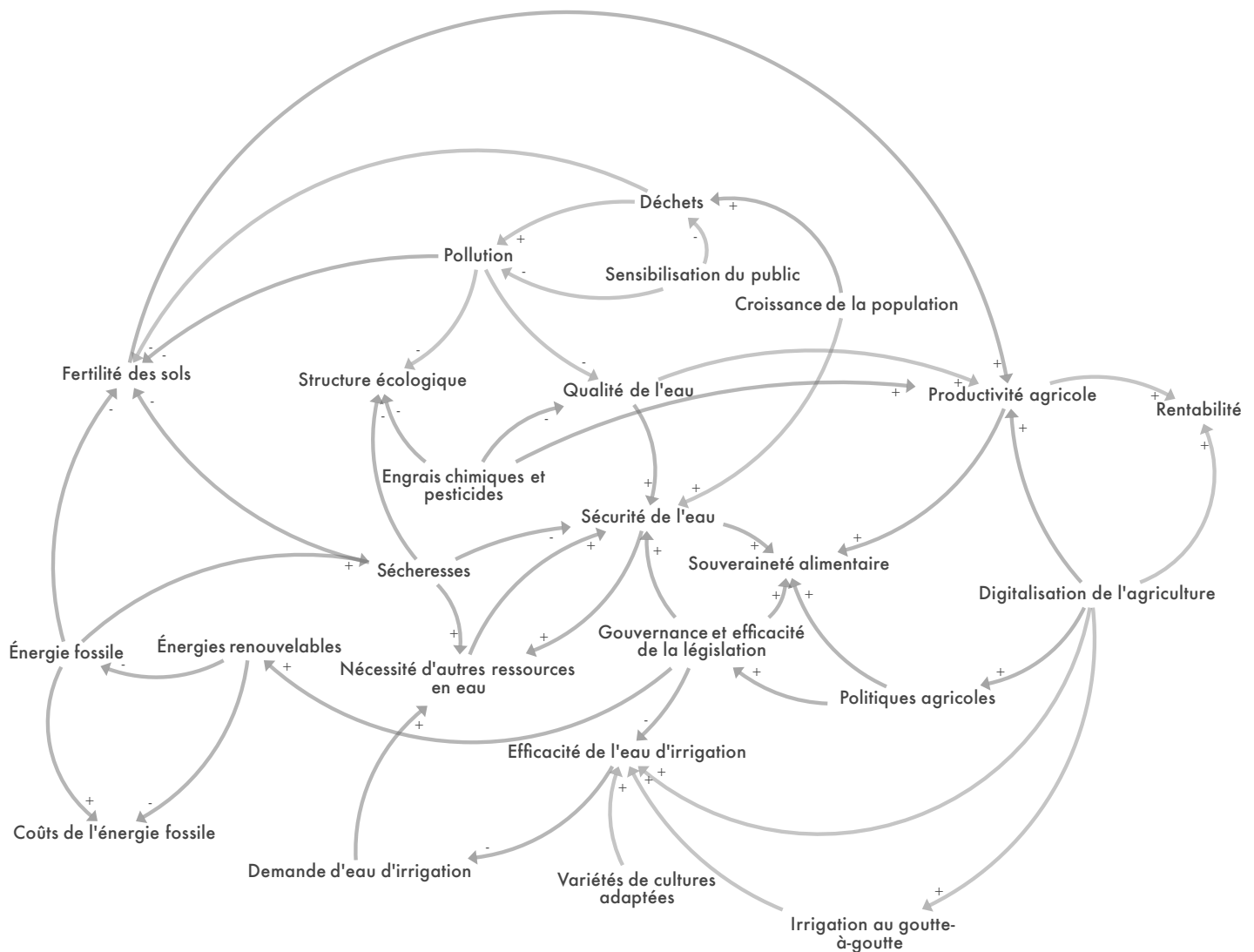


Figure 2 – Diagramme en boucles causales des interactions entre la sécurité de l'eau, l'agriculture durable et le développement socio-économique basé sur la technologie de dessalement de l'eau au Maroc: un modèle systémique fondé sur des solutions d'adaptation et des défis environnementaux

majeur est l'augmentation des besoins en productivité agricole, qui entraîne une demande accrue en eau d'irrigation. Cette pression intensifiée sur les ressources en eau favorise également l'usage croissant d'engrais chimiques et de pesticides, dont les effets dégradent la qualité de l'eau, appauvrissent la fertilité des sols et perturbent les écosystèmes. En retour, cette dégradation écologique réduit la productivité agricole, créant ainsi un cercle vicieux.

Par ailleurs, le recours massif aux énergies fossiles pour satisfaire ces besoins intensifie les émissions de

gaz à effet de serre, aggravant ainsi le changement climatique et exacerbant la fréquence ainsi que la sévérité des sécheresses. Ces épisodes prolongés de sécheresse accentuent la nécessité de recourir à des sources alternatives d'eau, ce qui accentue à son tour la pression sur les ressources hydriques. En parallèle, la pollution générée par les déchets et les intrants chimiques détériore l'environnement, altérant la qualité de l'eau et appauvrissant les sols. **L'interaction de ces facteurs** — pollution de l'eau, perte de fertilité des terres et dégradation écologique — compromet durablement la viabilité de la production agricole.



Toutefois, le CLD identifie aussi des leviers capables de briser ces cycles négatifs. L'adoption de variétés de cultures adaptées au climat local, l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation grâce à des technologies économes en eau (comme l'irrigation goutte-à-goutte) et la digitalisation agricole offrent des opportunités pour augmenter la productivité tout en économisant l'eau. Par ailleurs, la transition vers les énergies renouvelables, accompagnée d'un renforcement de la gouvernance et du cadre législatif, est essentiel pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles et garantir l'application de pratiques durables. La sensibilisation du public et l'évolution des politiques agricoles constituent également des éléments clés de cette transformation.

Ces interventions technologiques influencent la perception des acteurs locaux: le dessalement est vu comme une solution majeure pour atténuer la pénurie d'eau, même si certains restent préoccupés par ses effets sur la salinité des sols. L'irrigation goutte-à-goutte est largement acceptée pour son efficacité, tandis que les énergies solaire et éolienne sont valorisées pour la réduction des coûts énergétiques, bien qu'elles rencontrent des défis liés à leur intermittence. La durabilité repose donc sur une gestion intégrée des ressources et une adoption responsable des technologies, dans le cadre du Nexus WEFé, même si des inquiétudes subsistent concernant certains impacts environnementaux et socio-économiques.

Dans l'ensemble, le diagramme souligne que garantir la sécurité de l'eau et la durabilité agricole nécessite une approche intégrée, conciliant avancées technologiques, préservation écologique, renforcement de la gouvernance et sensibilisation collective. En définitive, il révèle que la sécurité à long terme de l'eau, de la nourriture et de l'énergie, au sein du Nexus WEFé, dépend de stratégies cohérentes, intersectorielles et équilibrées, combinant innovation, gestion écologique et gouvernance inclusive.

Valeurs non monétaires

Cette méthode vise principalement à identifier et à évaluer les différentes formes de valeurs et les multiples dimensions des relations entre l'humain et

la nature, dépassant les seules valeurs monétaires ou marchandes généralement associées aux composantes du Nexus Eau-Énergie-Nourriture-Écosystèmes. Elle cherche à mettre en lumière les bénéfices additionnels que le Nexus WEFé peut générer dans un contexte socio-écologique donné ou au sein d'une communauté locale.

Dans la région du Souss-Massa au Maroc, 21 enquêtes ont été réalisées auprès d'acteurs directement impliqués dans le secteur agricole. Ces parties prenantes ont souligné la forte dépendance de la région aux ressources naturelles pour assurer sa stabilité économique et sa sécurité alimentaire, illustrant ainsi le rôle clé de l'eau, de l'énergie et des écosystèmes dans le maintien des activités agricoles. Bien que les réponses aient été majoritairement axées sur des considérations économiques, certains participants ont également mis en avant les dimensions culturelles et sociales liées à ces systèmes naturels. **Cette étude de cas offre ainsi un éclairage précieux sur la perception du Nexus WEFé au Maroc**, révélant comment les communautés locales valorisent leur environnement et fournissant des pistes importantes pour une gestion durable des ressources dans la région (voir [Figure 3](#)).

En examinant chaque dimension (WEFé), les répondants ont fait part d'une diversité d'émotions, de perceptions positives et d'associations, influencées par leurs expériences personnelles et leur relation à l'environnement.

L'étude met en avant l'importance prépondérante accordée aux aspects matériels et économiques des systèmes socio-écologiques. Si les dimensions expérientielles et cognitives traduisent une relation globalement positive avec l'environnement et une conscience aiguë des enjeux écologiques locaux, il existe néanmoins un potentiel d'amélioration en matière d'éducation et d'engagement communautaire. Sur le plan philosophique, une profonde appréciation culturelle de la nature et de ses ressources est manifestée, soulignant la nécessité de stratégies de gestion fondées sur la durabilité. Ces enseignements enrichissent une approche intégrée de la gestion du Nexus WEFé au Maroc, qui prend en compte à la fois les besoins économiques et la résilience environnementale sur le long terme.



Figure 3 – Nuage de mots représentant les valeurs attribuées par les interviewés aux quatre composantes du Nexus WEF

Solutions WEF: Dessalement de l'eau de mer

La région de Chtouka, située dans la plaine du Souss-Massa au Maroc, constitue une zone agricole stratégique, notamment reconnue pour ses cultures destinées à l'exportation, telles que les fruits et légumes. Cependant, cette région fait face à une raréfaction croissante des ressources en eau, aggravée par les effets du changement climatique, la surexploitation des nappes phréatiques et la salinisation des sols agricoles. Pour répondre à ces enjeux, une usine de dessalement d'eau de mer a été installée, utilisant la technologie de l'osmose inverse. Cette infrastructure innovante vise à sécuriser l'approvisionnement en eau en réduisant progressivement les prélèvements excessifs sur la nappe phréatique grâce à la fourniture d'eau dessalée de haute qualité. L'eau produite par osmose inverse se distingue par une faible salinité, la rendant adaptée à l'irrigation agricole sous réserve d'une gestion rigoureuse.

Bien que cette technologie soit désormais opérationnelle, des recherches agronomiques ont été nécessaires pour optimiser son usage. L'eau dessalée présente des caractéristiques favorables, telles qu'une faible conductivité électrique, ce qui en fait une eau douce idéale pour l'irrigation, sans risque accru de salinisation des sols. De plus, elle est exempte de contaminants chimiques ou organiques. Cependant, sa composition en macro- et oligo-éléments peut nécessiter des ajustements afin d'assurer un équilibre nutritionnel adéquat pour les cultures. Cela impose un suivi attentif des paramètres physico-chimiques et l'adoption de pratiques agricoles adaptées pour préserver la fertilité des sols et garantir une production durable. Dans le cadre de cette optimisation, des recherches approfondies ont été menées pour étudier l'impact de différents mélanges d'eau dessalée et d'eau de puits sur la culture de courgettes (*Cucurbita pepo* L.), en



Figure 4 – Système de culture hors-sol de courgettes en serre avec suivi expérimental des conditions de croissance

s'inscrivant dans une approche intégrée du Nexus Eau-Énergie-Nourriture-Écosystèmes. L'objectif est d'améliorer la productivité agricole tout en limitant les impacts environnementaux liés à la consommation d'eau et d'énergie.

La première étude a porté sur deux variétés de courgettes, Radia et Kayssar, irrigées avec diverses proportions d'eau dessalée et d'eau de puits (voir Figure 4). Les résultats ont démontré que les mélanges contenant 25 % d'eau dessalée représentaient un compromis optimal entre croissance des plantes, consommation d'eau et émissions de CO₂. Ce traitement a nécessité 17,47 litres d'eau par kilogramme de courgettes produites, avec des émissions de 23 g de CO₂/kg, en comparaison à une irrigation à 100 % d'eau dessalée qui demandait 115 litres d'eau/kg et générait 237 g de CO₂/kg. En termes de croissance, les meilleures performances (hauteur, nombre de feuilles et de fruits) ont été observées avec les mélanges à 50 % et



25 % d'eau dessalée, tandis que l'uniformité hydraulique du système d'irrigation atteignait un niveau satisfaisant de 80 %.



Figure 5 – Système d'irrigation en serre utilisant de l'eau dessalée dans le cadre du projet BONEX

La deuxième étude, menée en conditions contrôlées, a examiné une approche durable combinant dessalement, traitement magnétique de l'eau, biofertilisants et énergie solaire pour optimiser l'efficacité de l'eau dessalée dans les systèmes hors-sol (voir Figure 5).

Les résultats ont révélé que l'association du traitement magnétique et des biofertilisants

améliore notablement les rendements des cultures, la disponibilité des nutriments et la résistance des plantes au stress. Les biofertilisants ont renforcé la fertilité du sol en favorisant l'absorption des nutriments, tandis que le recours à l'énergie solaire pour l'irrigation a permis de réduire les coûts et les impacts environnementaux.

Ces recherches montrent que l'irrigation avec des mélanges d'eau dessalée, couplée à des pratiques agricoles innovantes comme le traitement magnétique et l'utilisation de biofertilisants, peut générer des rendements agricoles satisfaisants, tout en diminuant la consommation d'eau et les émissions de CO₂. Elles soulignent aussi que des ajustements précis des quantités d'eau et une gestion optimisée des ressources sont indispensables pour garantir la durabilité des systèmes agricoles dans les zones confrontées au stress hydrique et aux effets du changement climatique.

Dans la région du Souss-Massa, l'amélioration des pratiques agricoles passe par une gestion rigoureuse des ressources en eau, particulièrement pour les cultures d'exportation à forte valeur ajoutée telles que les tomates, poivrons, framboises, concombres et courgettes. Après avoir déterminé les doses optimales d'eau dessalée associées à des technologies complémentaires comme le traitement magnétique de l'eau et l'usage de biofertilisants, **une troisième étude a été conduite afin d'élaborer un guide complet destiné aux principales cultures d'exportation de la région.** Ce guide constitue une référence clé pour les agriculteurs, proposant des pratiques adaptées pour une utilisation efficace de l'eau dessalée. Il s'appuie sur une évaluation précise des besoins en eau et en nutriments des différentes cultures, en tenant compte de la composition spécifique de l'eau d'irrigation, qu'elle soit dessalée, issue de puits ou de sources de surface.

L'étude recommande des stratégies concrètes pour ajuster la qualité et la quantité d'eau selon les exigences propres à chaque culture, notamment via le calcul de ratios spécifiques afin d'assurer un apport équilibré en nutriments essentiels. En harmonisant ces paramètres, le guide vise à préserver la santé des plantes, augmenter les rendements agricoles et encourager une gestion

durable des ressources hydriques dans un contexte marqué par un stress hydrique croissant.

Obstacles et mesures complémentaires

Lors du 2^e atelier BONEX organisé dans la région de Souss-Massa (voir Figure 6), plusieurs obstacles majeurs à l'adoption d'innovations durables ont été identifiés, notamment concernant l'énergie solaire, la gestion des déchets, les systèmes de culture hors-sol et les biofertilisants. Pour l'énergie solaire, les principaux défis incluaient les coûts élevés d'acquisition et d'installation, le manque de solutions efficaces pour le stockage de l'énergie, ainsi qu'une absence d'incitations fiscales ou de soutien gouvernemental régulier. Des difficultés techniques telles que les besoins fréquents en maintenance, des erreurs de dimensionnement et le risque de vol compliquaient également son adoption. **En matière de gestion des déchets**, les participants ont souligné l'absence d'infrastructures adaptées pour le traitement des déchets et de la saumure issue des stations de dessalement, le manque de solutions de valorisation, les coûts opérationnels élevés, ainsi qu'une réglementation insuffisante. Pour les systèmes hors-sol, les obstacles comprenaient une forte consommation énergétique

liée au recyclage, une complexité technique, une sensibilité aux pannes et des risques d'accumulation de sels, particulièrement critiques dans les conditions agroclimatiques spécifiques à Souss-Massa. Quant aux **biofertilisants**, les agriculteurs ont rapporté une disponibilité limitée, une connaissance insuffisante, des coûts initiaux élevés, l'absence de normes et de certifications, des temps d'action plus longs



Figure 6 – Atelier participatif dans le cadre du projet BONEX au Maroc

comparés aux engrais chimiques, ainsi que des préoccupations quant à leur compatibilité avec les pratiques agricoles locales.

En réponse, le 3^e atelier a formulé plusieurs mesures pour dépasser ces contraintes. Parmi celles-ci figurent l'augmentation des incitations financières et des subventions pour les technologies propres, le développement de programmes de formation pour renforcer les capacités locales, l'amélioration des services d'accompagnement technique et le renforcement des cadres législatifs concernant la gestion des déchets et la certification des biofertilisants.

D'autres recommandations visent à encourager les partenariats public-privé pour faciliter l'accès au marché et soutenir la production locale, à promouvoir des campagnes de sensibilisation, ainsi qu'à renforcer les liens entre la recherche et l'extension agricole afin d'adapter les solutions aux réalités agroécologiques de la région.

Ces actions combinées visent à assurer la faisabilité opérationnelle, l'acceptabilité sociale et la durabilité environnementale des initiatives intégrées dans le cadre du Nexus à Souss-Massa.

REWEFe

Pour évaluer l'état des ressources en eau, énergie, alimentation et écosystèmes, à la fois individuellement et dans leur interdépendance, l'outil REWEFe (Évaluation Rapide du Nexus Eau-Énergie-Alimentation-Écosystème) a été utilisé. Cet outil fournit des données quantitatives sur l'équilibre et l'utilisation des ressources (production, consommation, flux entrants et sortants) en eau, énergie et alimentation, tout en intégrant une estimation monétaire des principaux impacts positifs et négatifs sur les écosystèmes.

Dans le cadre de cette étude de cas, deux scénarios ont été définis afin d'évaluer les effets du recours au dessalement d'eau dans le contexte du Nexus WEFé dans la région de Souss-Massa. L'outil REWEFe a permis d'analyser quantitativement les impacts liés à une utilisation accrue de l'eau dessalée pour

l'irrigation, considérée comme scénario de référence, ainsi que ceux associés à l'intégration de l'énergie solaire dans le système de distribution d'eau (S1). Un second scénario (S2), à plus grande échelle et avec un taux d'adoption plus élevé, a également été modélisé (voir Figure 7).

- **La consommation d'eau** reste supérieure au volume d'eau disponible dans l'unité du nexus via les précipitations et le dessalement. Bien que les eaux souterraines et les écoulements de surface soient également disponibles, les niveaux de stress en eau bleue et eau verte restent élevés dans tous les scénarios en raison de demandes en eau significativement plus importantes.
- **Le scénario amplifié**, représentant une capacité doublée de production d'énergie solaire et de dessalement, n'est toujours pas capable de satisfaire les besoins en eau de l'unité du nexus bien qu'il contribue de manière significative à l'amélioration de la satisfaction de la demande.
- **La consommation d'énergie** augmente avec l'expansion des opérations de dessalement, entraînant des émissions plus élevées de CO₂.
- **La production alimentaire** augmente dans le scénario amplifié, car la disponibilité en eau bleue dans l'unité du nexus augmente grâce à l'accroissement du volume de dessalement.

Synergies et compromis observés: Dans un contexte de raréfaction des ressources en eau où une extraction accrue des eaux souterraines n'est pas une alternative durable; l'augmentation des opérations de dessalement a un impact significatif sur la satisfaction de la demande. De plus, l'augmentation de la disponibilité en eau dans l'unité du nexus grâce au dessalement permet d'accroître la production alimentaire et donc de contribuer la sécurité alimentaire. Toutefois, le dessalement est un procédé énergivore, qui mène à d'importantes émissions de CO₂ et le défi maintenant est d'alimenter les stations de dessalement avec de l'énergie bas-carbone notamment par exemple à partir des énergies renouvelables. Par ailleurs, une gestion responsable de l'élimination de la saumure doit être assurée pour protéger les écosystèmes.

EAU
 (MCM/y)

ÉNERGIE
 (GWh/y)

ALIMENTATION
 (Mkg/y)

ÉCOSYSTÈME
 (mEUR/y)

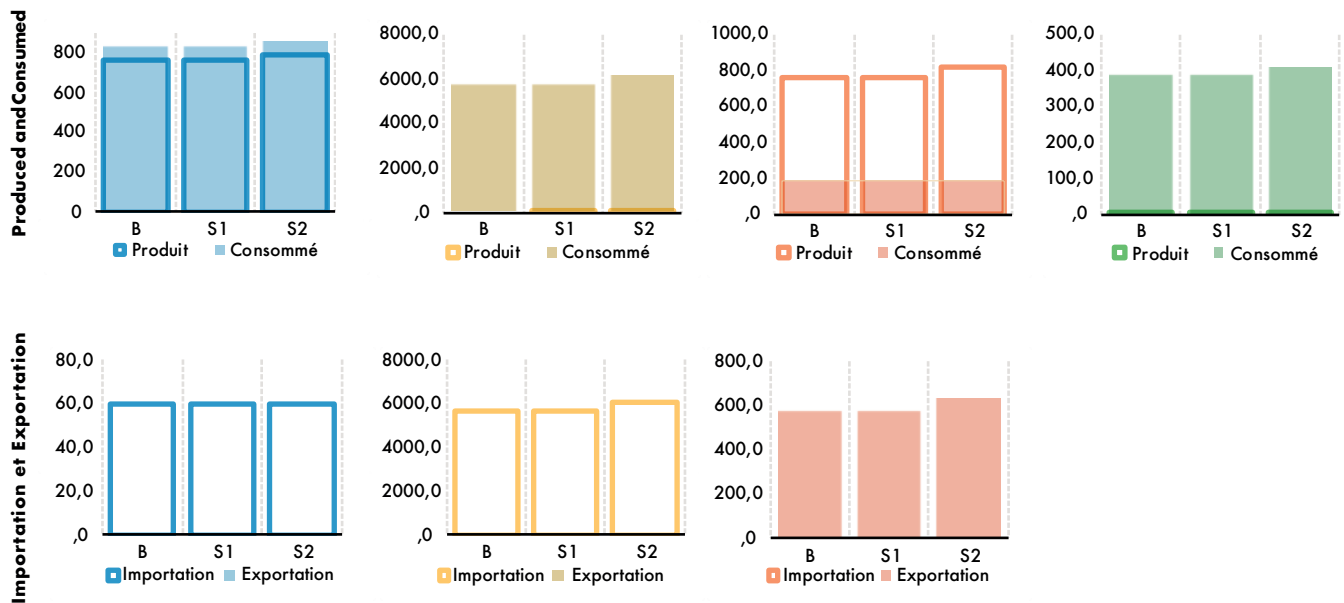
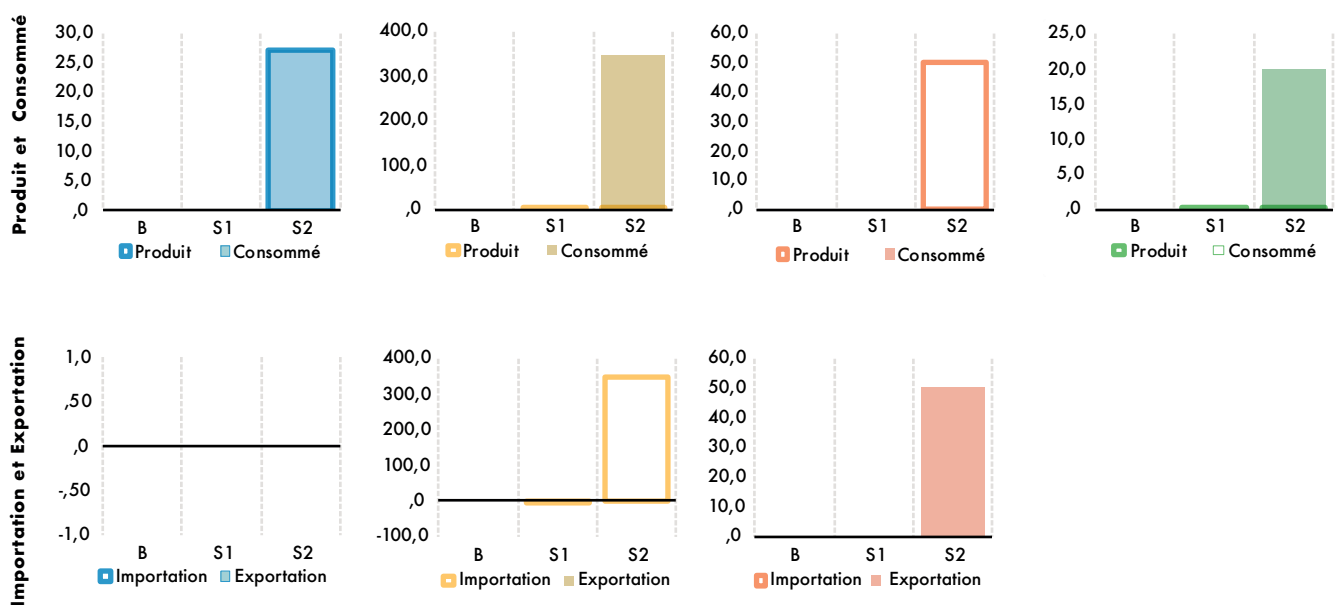
RÉSULTATS

ÉCART PAR RAPPORT À LA VALEUR DE BASE


Figure 7 – Résultats des trois scénarios REWEFe. **Scénarios: Référence (B)** – Utilisation d’eau dessalée pour l’irrigation; **Scénario 1 (S1)** – Énergie solaire pour le système de distribution d’eau; et **Scénario 2 (S2)** – Scénario amplifié reflétant une adoption plus élevée de l’intervention BONEX

Conclusion

L'initiative de dessalement de l'eau de mer dans la région de Souss-Massa, intégrée dans une approche globale du Nexus Eau-Énergie-Alimentation-Écosystèmes (WEFe), constitue une avancée majeure pour répondre aux défis interdépendants liés à la rareté de l'eau, à la durabilité agricole et à la résilience face au changement climatique.

En combinant des technologies avancées telles que le dessalement par osmose inverse, les systèmes d'irrigation alimentés par énergie solaire, le traitement magnétique de l'eau et l'usage de biofertilisants, cette initiative a démontré qu'il est possible d'allier efficacité dans l'utilisation de l'eau et augmentation de la productivité agricole, tout en limitant les impacts environnementaux.

Les résultats issus des essais scientifiques montrent que l'association de l'eau dessalée avec des pratiques agronomiques innovantes améliore significativement les rendements tout en réduisant la consommation d'eau et les émissions de CO₂ par unité produite. Par exemple, l'utilisation combinée d'eau dessalée et d'eau de puits, couplée à une irrigation de précision, a permis d'optimiser la croissance des plantes et l'usage des ressources, offrant ainsi des solutions concrètes pour une agriculture durable en zones arides.

Au-delà des innovations technologiques, le projet met en lumière l'importance capitale de l'engagement des parties prenantes et du transfert de connaissances pour garantir la pérennité des actions menées. À travers des ateliers participatifs, des guides pratiques co-conçus et des démonstrations sur le terrain, le projet BONEX a favorisé l'appropriation locale et renforcé la confiance entre agriculteurs, chercheurs, autorités publiques et acteurs privés. Ce processus inclusif a permis de développer les capacités locales et d'accompagner des changements de comportement vers des pratiques de gestion plus durables de l'eau et des sols.

L'utilisation d'outils systémiques comme le cadre REWEFe et les diagrammes de boucles causales a aussi contribué à une meilleure compréhension des synergies et compromis entre eau, énergie, alimentation et écosystèmes. Ces outils se sont

révélés indispensables pour planifier et évaluer différents scénarios, aidant ainsi les parties prenantes à prendre des décisions éclairées, conciliant objectifs agricoles immédiats et préservation écologique à long terme.

Sur le plan de la gouvernance, le projet souligne l'urgence de disposer de politiques cohérentes et intégrées capables de combler les clivages entre secteurs. Une coordination efficace entre les autorités de l'eau, les fournisseurs d'énergie, les institutions agricoles et les agences environnementales est essentielle pour renforcer l'impact des interventions fondées sur le Nexus. Les enseignements tirés de Souss-Massa montrent que, même si le dessalement représente une solution techniquement viable face à la pénurie d'eau, il doit être accompagné d'investissements dans les énergies renouvelables, la santé des sols, la formation et des réformes politiques pour assurer une réelle durabilité. Par ailleurs, l'attention portée aux valeurs non monétaires — telles que les liens culturels à la terre, l'équité sociale et l'intégrité écologique — illustre une vision plus globale du développement, qui respecte à la fois le bien-être humain et les limites environnementales.

En conclusion, l'approche intégrée mise en œuvre dans la région de Souss-Massa propose un modèle répliquable et adaptable pour d'autres territoires confrontés à un stress hydrique et à des pressions socio-environnementales similaires. En alliant innovation scientifique, inclusion des acteurs locaux et harmonisation des politiques, ce projet contribue non seulement à la sécurité alimentaire et hydrique régionale, mais aussi à l'adaptation au changement climatique, au développement rural et à la résilience des écosystèmes. Ainsi, il illustre comment une stratégie centrée sur le Nexus peut dépasser les silos sectoriels pour engendrer un changement transformateur, à la fois techniquement pertinent, socialement accepté et écologiquement durable.

 Spain

BIOAZUL
University of Cordoba
FutureWater
Universidad de Almería

Germany | UNI KASSEL

 Portugal

Center for Environmental and Sustainability Research (CENSE),
NOVA University of Lisbon
Natural Business Intelligence (NBI)

 Italy

Consorzio della Bonifica Renana
University of Bologna

 Jordan

German Jordanian University
IUCN-ROWA

 Lebanon

American University of Beirut
NOVAENERGIA

 Morocco

Agronomic and Veterinary Institute Hassan II

 Tunisia

SmartLOGGER
National Institute for Research in Rural
Engineering Water and Forests - INRGREF