



THESE

Pour l'obtention du diplôme de DOCTEUR EN SCIENCE

Département: Génie Rural

Spécialité: Hydraulique Agricole

Présentée par: KHACHEBA RAFIKA

THEME

**Mise en valeur de la réutilisation des eaux usées épurées en tant
que moteur innovant dans le Nexus WEF en Algérie :
Stratégies et Perspectives Prometteuses**

Soutenue le 12 mai 2026 devant le jury composé de :

M^{me} BOURAS CHEKIRED Fatma Zahra

MCA à l'ENSA

Présidente

M. HARTANI Tarik

Professeur à l'ENSA

Directeur de Thèse

M. DROUCHE Nadjib

Directeur de recherche CRTSE

Co-Directeur de Thèse

M^{me} DJOUDAR HALLAL Dabbia

MCA à l'ENSA

Examinatrice

M. NACEUR Mohamed Wahib

Professeur à l'Université de Blida

Examinateur

M. FEDDAL Mohamed Amine

Professeur à l'ENSA

Examinateur

المخلص

تتناول هذه الأطروحة الإمكانيات الاستراتيجية لإعادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة في سياق إجهاد مائي هيكلي في الجزائر، يتميز بتزايد ظاهرة التصحر التدريجي، وارتفاع التقلبات المناخية، وتصادم الضغوط البشرية وفي المناطق شبه الجافة لحوض البحر الأبيض المتوسط أصبحت ندرة المياه عاملاً حاسماً في توجيه التنمية الزراعية والطاقة. وتستند الدراسة إلى الإطار المفاهيمي لنهج ترابط الماء-الطاقة-الغذاء (WEF Nexus)، الذي يتيح تحليل الترابطات المتبادلة بين الأمن المائي، والكفاءة الطاقوية، والأداء الزراعي.

يتمثل الهدف الرئيسي في تقييم ما إذا كان الإنعاج الاستراتيجي لإعادة استخدام المياه المعالجة يسمح بتحقيق أهداف مترابطة لهذه الأبعاد الثلاثة على المستوى الوطني. وتعد الدراسة على تحليل 183 محطة لمعالجة مياه الصرف الصحي، من خلال إطار منهجي متكامل يجمع بين تحليل المكونات الرئيسية (PCA)، والتحسين متعدد الأهداف عبر تحليل جبهة باريتو (على المستويين الفردي والإجمالي)، والتقييم متعدد المعايير لخدمة المائي والطاقي والزراعي، إضافة إلى التحليل الجغرافي المكاني باستخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS).

تبرز النتائج وجود تباين هيكلي ملحوظ داخل المنظومة الوطنية. إذ إن نسبة محدودة فقط من المحطات تجمع بين حجم مرتفع من المياه القابلة للتعبئة وكثافة طاقوية مبسطة. وقد نتج تطبيق جبهة باريتو تحديد مجموعة محدودة من المحطات غير اللهيمن عليها، والتي تحقق توازناً كفوفاً بين الحجم المتاح، والتكلفة الطاقوية النوعية، والإمكانات الزراعية. كما ظل نواة ثابتة مكونة من ثمانية محطات من أصل 65 محطة منتقاة أولاً غير لهيمن عليها عبر مختلف السيناريوهات متعددة المعايير، مما يعكس كفاءة تقنية جوهريّة.

غير أن التحليل يبين أن الكفاءة التقنية لا تعني بالضرورة تحقيق الأهمية في اتخاذ القرار. إذ تعتمد عملية الاختيار الاستراتيجي على مخاضات معيارية تلخذ بعين الاعتبار أولويات طاقوية وزراعية ومالية. وتبرز البعد المكاني كعامل حاسم، حيث إن الأداء الفعلي يرتبط بعدى التناسق بين محطات المعالجة والمحيطات الزراعية المسقية.

وبصفة عامة، تُظهر هذه الدراسة أن إعادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة، عند تخطيطها وفق مقاربة تكاملية لنهج الماء-الطاقة-الغذاء، تمثل رافعة قوية لتعزيز الأمن المائي الزراعي ودعم المرونة النظامية في البيئات شبه الجافة.

الكلمات المفتاحية: إعادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة - ترابط الماء-الطاقة-الغذاء - الأمن المائي الوطني - التخطيط الاستراتيجي المعجلى - التحسين متعدد المعايير - التغير المناخي - المناطق شبه الجافة.

Abstract

This thesis examines the strategic potential of treated wastewater reuse (TWWR) within a context of structural water stress in Algeria, characterized by progressive aridification, increased climate variability, and intensified anthropogenic pressures. In Mediterranean semi-arid regions, water scarcity has become a key determinant of agricultural and energy development. The study is grounded in the conceptual framework of the Water-Energy-Food (WEF) Nexus, which enables the analysis of interdependencies among water security, energy efficiency, and agricultural performance.

The main objective is to assess whether the strategic integration of TWWR can simultaneously optimize these three dimensions at the national scale. The research is based on the analysis of 183 wastewater treatment plants, using an integrated methodological framework combining Principal Component Analysis (PCA), multi-objective optimization through Pareto front analysis (both individual and global approaches), multicriteria evaluation of water, energy, and agricultural performance, and GIS-based geospatial analysis.

The results highlight significant structural heterogeneity within the national system. Only a limited proportion of treatment plants combine high mobilizable volumes with controlled energy intensity. The application of the Pareto front identifies a restricted subset of non-dominated plants presenting efficient trade-offs between mobilizable volume, specific energy cost, and agricultural potential. A stable core of eight out of the 65 preselected plants remains non-dominated across different multicriteria scenarios, demonstrating intrinsic technical efficiency. However, the analysis shows that technical efficiency does not equate to decision-making optimality. Strategic selection depends on normative trade-offs integrating energy, agricultural, and territorial priorities. The spatial dimension proves decisive, as actual performance depends on the coherence between treatment plants and irrigated agricultural areas.

Overall, this research demonstrates that TWWR, when planned according to an integrated WEF Nexus approach, constitutes a robust lever for agricultural water security and systemic resilience in semi-arid contexts.

Keywords: Treated wastewater reuse (TWWR) – Water-Energy-Food (WEF) Nexus – National water security – Territorial strategic planning – Multicriteria optimization – Climate change – Semi-arid regions.

Résumé

Cette thèse examine le potentiel stratégique de la réutilisation des eaux usées épurées (REUE) dans un contexte de stress hydrique structurel en Algérie, marqué par l'aridification progressive, l'accentuation de la variabilité climatique et l'intensification des pressions anthropiques. Dans les régions semi-arides méditerranéennes, la rareté de l'eau constitue un facteur déterminant du développement agricole et énergétique. L'étude s'inscrit dans le cadre conceptuel du Nexus Eau-Energie-Alimentation (WEF), qui permet d'analyser les interdépendances entre sécurité hydrique, efficacité énergétique et performance agricole.

L'objectif principal est d'évaluer si l'intégration stratégique de la REUE permet d'optimiser simultanément ces trois dimensions à l'échelle nationale. La recherche repose sur l'analyse de 183 stations d'épuration, en mobilisant une architecture méthodologique intégrée associant Analyse en Composantes Principales (ACP), optimisation multi-objectifs par front de Pareto (analyses individuelle et globale), évaluation multicritère des performances hydriques, énergétiques et agricoles et analyse géospatiale sous SIG.

Les résultats mettent en évidence une hétérogénéité structurelle importante du parc national. Seule une proportion limitée de stations associe un volume mobilisable élevé à une intensité énergétique maîtrisée. L'application du front de Pareto permet d'identifier un ensemble restreint de stations non dominées, présentant des compromis efficaces entre volume mobilisable, coût énergétique spécifique et potentiel agricole. Un noyau stable, de huit sur les 65 stations préselectionnées, demeure non dominé à travers différents scénarios multicritères, ce qui atteste d'une efficacité technique intrinsèque. L'analyse montre, toutefois, que l'efficacité technique ne se confond pas avec l'optimalité décisionnelle, la sélection stratégique dépend d'arbitrages normatifs intégrant des priorités énergétiques, agricoles et territoriales. La dimension spatiale apparaît déterminante, la performance effective reposant sur la cohérence entre stations d'épuration et périmètres irrigués.

En définitive, cette recherche démontre que la REUE, lorsqu'elle est planifiée selon une logique Nexus intégrée, constitue un levier solide de sécurisation hydrique agricole et de résilience systémique dans les contextes semi-arides.

Mots-clés : Réutilisation des eaux usées épurées (REUE) – Nexus Eau-Energie-Alimentation (WEF) – Sécurité hydrique nationale – Planification stratégique territoriale – Optimisation multicritère – Changement climatique – Régions semi-arides.

Table des matières

Remerciements	I
Dédicace	II
Résumé	Erreur ! Signet non défini.
Abstract	IV
الملخص	III
Liste des tableaux	VII
Liste des tableaux	IX
Liste des annexes	IX
INTRODUCTION GÉNÉRALE	6
1.Contexte général et état de l'art	6
2.Lacunes scientifiques	7
3.Problématique	7
4.Hypothèses de recherche	8
5.Objectifs de la recherche	8
6. Cadre méthodologique	9
7.Apport scientifique attendu	9
Chapitre I – Ressources naturelles «hydrique, énergétique et agricole » dans le Contexte du Changement Climatique	11
I.1 Contexte actuel des ressources naturelles hydrique, énergétique et agricole	12
I.1.1 Ressources en eau	12
a. Contexte mondial	12
b. Contexte régionale et national	13
I.1.2 Ressources énergétiques	17
a. Contexte mondial	17
b. Contexte régionale et national	19
Dans la région MENA	19
Focus : Algérie	20
I.1.3 Ressources agricoles	21
a. Contexte mondial	21
b. Contexte régional : la région MENA	21
c. Cas de l'Algérie	22
1.2 Contexte des ressources naturelles hydrique, énergétique et agricole dans la région MENA	23

I.2.1 Gouvernance et coopération régionale	24
I.2.2 Pressions démographiques et urbanisation	25
I.2.3 Sécurité alimentaire et commerce virtuel de l'eau	26
I.2.4 Changements climatiques	27
I.3. Analyse du contexte Algérien	28
I.4. Changements climatiques	31
I.4.1 Contexte mondial des changements climatique	31
I.4.2 Contexte national des changements climatique	32
I.4.3 Effets du changement climatique sur les ressources naturelles	33
a. Effets sur les ressources en eau	33
b. Effets sur les ressources énergétiques	35
c. Effets sur les ressources agricoles	37
I.4.4. Mesures d'adaptation et d'atténuation	39
I.4.4.1. Adaptation et résilience climatiques	40
I.4.4.2 Mesures d'atténuation du changement climatique	43
Chapitre II - Reclaimed Water et économie circulaire : technologies de traitement et stratégies de réutilisation durable	48
II.1 Technologies de traitement des eaux usées	48
II.1.1 Gouvernance de l'assainissement	48
II.1.2 Situation actuelle des infrastructures de traitement des eaux usées en Algérie	61
II.1.3 Technologies de traitement utilisées pour l'épuration des eaux usées	65
II.1.4 Innovations technologiques dans le traitement des eaux usées	76
II.1.5 Traitement des boues résiduaires	79
II.1.6 Consommation énergétique et coût de traitement des eaux usées	93
II.1.7 Adaptations technologiques aux contextes géographiques et climatiques de l'Algérie	96
II. 2 Comprendre et développer la réutilisation des eaux usées épurées (REUE)	98
II.2.1. Historique et évolution de la REUE	99
II.2.2 Orientations stratégiques mondiales et nationales en matière de réutilisation des eaux usées épurées (REUE)	100
II.2.3 État des lieux de la REUE	103
II.2.5 Contribution de la REUE aux Objectifs de Développement Durable et aux changements climatiques	118
II.2.6 Contraintes liées à la REUE	125
II.2.7 Défis stratégiques et opportunités de la REUE	130
II.2.8 Gestion des risques liés à la REUE selon les standards de la FAO	133

II.2.9 Approche réaliste de la mise en œuvre de la REUE en Algérie	137
Conclusion du chapitre.....	141
Chapitre III - Nexus Eau-Énergie-Alimentation : « Fondements conceptuels et enjeux d'intégration »	142
III.1 Présentation du Nexus WEF	142
III.1.1 Définition du Concept	142
III.1.2 Origine et objectifs du Nexus	143
III.1.3 Historique	143
III.1.4 Nexus WEF versus GIRE	148
III.1.5 Enjeux Mondiaux, régionaux et Algériens	149
III.2 Relation de dépendances et interdépendances dans le Nexus WEF	151
III.3 Règlementation et gouvernance du Nexus WEF internationale et nationale.....	152
III.3.1 Règlementation et gouvernance internationale du Nexus WEF	152
III.3.2 Règlementation et gouvernance du Nexus en Algérie.....	154
III.4 Importance du Nexus pour la résilience de la sécurité hydrique, énergétique et alimentaire ...	156
III.4.1 Rôle du Nexus dans la résilience de la sécurité hydrique	157
III.4.2 Rôle du Nexus dans la résilience de la sécurité énergétique	159
III.4.3 Rôle du Nexus dans la résilience de la sécurité alimentaire	161
III.5 Rôle stratégique de l'eau, de l'énergie et de l'alimentation dans le développement durable....	162
III.6 Limites et contraintes du concept.....	163
Conclusion du chapitre.....	163
Chapitre IV - Approche méthodologique	164
IV.1. Cadre conceptuel et orientation de l'étude.....	164
IV.2. Zone d'étude et contexte institutionnel	165
IV.2.1. Contexte hydrique, agricole et territorial	165
IV.2.2 Cadre institutionnel et rôle de l'Office National de l'Assainissement	166
IV.2.3 Présentation de l'Office National de l'Assainissement (ONA)	166
IV.3 Méthodologie et sources des données	168
IV.4 Typologie et structuration des données collectées	172
IV.4.1 Données techniques et de dimensionnement	172
IV.4.2 Données d'exploitation hydraulique.....	173
IV.4.3 Données de qualité des eaux usées et de performance épuratoire.....	173
IV.4.4 Données énergétiques et coût de l'énergie.....	174
IV.4.5. Gestion des boues d'épuration.....	174

IV.4.6. Données économiques.....	173
IV.4.7 Données relatives au potentiel agricole	173
IV.5 Critères de sélection des stations d'épuration à fort potentiel de REUE.....	173
IV.5.1 Critère de performance épuratoire.....	176
IV.5.1 Classification technologique des stations d'épuration	176
IV.6 Potentiel agricole	177
IV.6.1 Processus de l'enquête d'identification des potentialités agricoles.....	179
IV.6.2 Évaluation de la productivité agricole et des gains potentiels	183
IV.7 Optimisation dans le cadre du Nexus Eau-Énergie-Alimentation	184
IV.7.1 Utilisation du front ou frontière de Pareto	185
IV.7.2 Mise en œuvre de l'analyse	186
IV.8 Outil cartographique.....	187
IV.9 Originalité du choix méthodologique	187
Conclusion du chapitre.....	189
Chapitre V - Évaluation intégrée des performances : apport stratégique de la REUE dans le cadre du Nexus WEF.....	191
1 Données structurelles et opérationnelles du secteur de l'assainissement.....	191
V.1.1 Couverture territoriale et indicateurs de l'assainissement	191
V.1.2 Analyse globale:	193
V.2 Analyse croisée des performances techniques, énergétiques et économiques.....	211
V.2.1 Dynamique temporelle des paramètres étudiés	212
V.2.2 Répartition spatiale des stations.....	213
V.2.3 Distribution statistique des variables.....	214
V.2.4. Comparaison des paramètres selon le type de traitement	217
V.2.5 Relations bi-variées entre variables structurelles et hydrauliques.....	220
V.2.6. Analyse globale des corrélations.....	222
V.2.7. Conclusion des analyses descriptives relatives.....	223
V.3 Analyse en Composantes Principales (ACP).....	224
V.3.1. Variance expliquée par les dimensions.....	224
V.3.2 Structure des variables sur le plan factoriel.....	225
V.3.3 Contribution des variables aux axes	227
V.3.4 Contribution des individus	228
V.3.5 Qualité de représentation des individus.....	228
V.3.6 Analyse des dimensions secondaires	230

V.3.7 Structuration selon les groupes de procédés	230
V.3.8. Apport de l'Analyse en Composantes Principales (ACP).....	232
Conclusion de l'Analyse en Composantes Principales	233
V.4 Analyse multicritère approfondie des STEP : Étude des scénarios A, B et C	233
V.4.1 Analyse de la frontière de Pareto des STEP individuelles et l'optimisation multicritère par agrégation pondérée selon deux procédés (Boues activées et lagunage).....	234
V.4.2 L'optimisation multicritère par agrégation pondérée	246
Conclusion de l'optimisation	256
V.5. Contribution scientifique et stratégique de l'étude.....	257
V.5.1. Rappel de la problématique et positionnement de la recherche.....	257
V.5.2 Résultats structurels consolidés	257
V.5.3 Apports scientifiques de la recherche	259
V.5.4 Implications stratégiques pour la planification nationale.....	260
V.5.5 Limites et perspectives de recherche	260
Conclusion générale et perspectives prometteuses	261
Références bibliographiques	267
Annexes	293