

Thèse de doctorat

Pour l'obtention le grade de Docteur en Sciences Agronomiques
ENSA

Présentée par

Bekaddour Sara

Titre

**Déverrouillage des eaux non conventionnelles vers de nouveaux
modèles-hydro agricole en milieu aride**

Directeurs de Thèse : Pr. **HARTANI Tarik** et Dr. **Ait-Mouheb Nassim**

Devant le Jury composé de :

Mme HANK D.	Professeur, ENSA Alger	Présidente
M. BOUARFA S.	Professeur, INRAE Montpellier	Examinateur
M. BENMIHOUB A.	Directeur de recherche CREAD Alger	Examinateur
M. HARTANI T.	Professeur, ENSA Alger	Directeur de thèse
M. Ait-Mouheb N.	Chargé de recherche, INRAE Montpellier	Directeur de thèse

Remerciement

Nous remercions le Tout Grand Dieu le Tout Puissant qui nous a donné la santé et le courage et nous a permis d'arriver au terme de cette Thèse.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes plus grands remerciements à mes directeurs de thèse **Pr. Tarik HARTANI** et **Dr. Nassim Ait-Mouheb** pour la confiance qu'ils m'ont accordée, la bienveillance, leur suivi tout le long de mon projet de recherche, leurs encouragements, leur gentillesse et leurs précieux conseils pour concrétiser cette thèse. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance et ma considération.*

*J'adresse mes remerciements aux membres de jury : **Pr. Hanke Dalila**, **Pr. Sami Bouarfa** et **Pr. Benmihoub Ahmed** qui ont accepté d'endosser le rôle de jury, et pour l'intérêt qu'ils ont manifesté à l'égard de ce travail de recherche.*

*Mes remerciements vont aussi à **Pierre -Louis Mayaux**, Chercheur au CIRAD et **Christian Leduc**, chercheur à L'IRD France pour leurs collaborations dans la réalisation de ce travail.*

*J'adresse également mes sincères remerciements aux acteurs locaux de Ghardaïa : les agriculteurs, les associations locales et les différentes institutions (**DSA, DRE, ONA, APC**) d'avoir me facilité l'accès aux informations et à la collecte des données et également pour son accueil chaleureux durant les 5 années de ce travail*

Et que tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

SARA

Table des matières

LISTE DES FIGURES	3
LISTE DES TABLEAUX	4
LISTE DES ABRÉVIATIONS	6
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GÉNÉRALE	8
I. Introduction.....	8
II. Aperçu sur la gestion ressources en eau en Algérie	8
III. La réutilisation des eaux usées traitées comme solution alternative.....	10
III.1. La réutilisation des eaux usées et des nutriments dans le monde.....	10
III.2. Les eaux usées traitées : une nouvelle composante du bilan hydrique	11
III.3. Impact de la réutilisation des eaux usées.....	12
IV. Pourquoi s'intéresser à la réutilisation des eaux usées et des nutriments en agriculture dans les régions arides ?	14
V. La réalité de la réutilisation des eaux usées en Algérie	15
VI. Problématique	19
VII. Etude de cas : Ghardaïa	20
VII.1. Situation géographique.....	21
VII.2. Synthèse climatique	22
VII.3. Hydrographie et géomorphologie	23
VII.4. Production agricole.....	26
VII.5. Démarche de recherche de cette thèse.....	28
VII.6. Cadre d'analyse	32
CHAPITRE 2: RE-EMERGENCE OF DRY TOILETS AND FECAL NUTRIENT REUSE IN M'ZAB CITIES .	38
1. INTRODUCTION	39
2. MATERIALS AND METHODS	40
1.1. Study area.....	40
1.2. Research methodology	41
2. RESULTS	42
2.1. Umbilical cord linking the domestic habitat and dry toilets in the M'zab	42
2.2. Decline of dry toilets after the emergence of deep wells	47
2.3. Dry toilets in Beni Isguen: a revival or just a survival?	48
3. DISCUSSION	51
4. CONCLUSION.....	53

CHAPITRE 3: A STORY OF HOPE AND FRUSTRATION: A WASTEWATER-BASED AGRICULTURAL FRONTIER IN THE ALGERIAN SAHARA.....	56
1. INTRODUCTION.....	57
2. MATERIALS AND METHODS.....	59
2.1. Study area.....	59
2.2. Research methodology.....	61
3. RESULTS.....	63
3.1. Water reuse builds on long-standing practices in the Algerian Oases.....	63
3.2. Other factors that contributed to agricultural settlement.....	66
3.3. Constraints on wastewater-based agricultural development.....	67
4. DISCUSSION.....	69
5. CONCLUSION.....	71
CHAPITRE 4 : L'IRRIGATION PAR LES EAUX SOUTERRAINES EN AVAL D'UNE LAGUNE : QUEL IMPACT DES EAUX USÉES SUR LE MILIEU ?.....	73
1. INTRODUCTION.....	74
2. MATERIELS ET METHODES.....	76
2.1. Présentation de la zone d'étude.....	76
2.2. Hydrogéologie et ressource en eau dans la région.....	77
2.3. Méthodologie.....	78
3. RESULTAS.....	80
3.1. Caractérisation hydrogéochimique des eaux de la nappe phréatique.....	80
3.3. Evaluation de la qualité microbiologique de la nappe phréatique.....	85
3.4. Mesures isotopiques : utilisation des isotopes stable de l'oxygène 18 et de deutérium pour étudier la possibilité de connexion eaux usées/ eau de nappe.....	87
4. DISCUSSION.....	90
5. CONCLUSION.....	90
CHAPITRE 5 : CONCLUSION GÉNÉRALE.....	93
I. Principaux résultats de cette thèse.....	93
II. Réutilisation des eaux usées et des nutriments dans la vallée du M'zab : Concept d'économie circulaire.....	95
III. Perspectives.....	96
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES.....	102
RESUME.....	114

Liste des figures

Chapitre 1 : Introduction générale

Figure 1 : Carte des pays du pourtour méditerranéen qui souffrent de stress hydrique dont l'Algérie fait partie

Figure 2 : Part d'eau prélevée pour l'agriculture

Figure 3 : Localisation géographique de la wilaya de Ghardaïa

Figure 4 : Précipitations annuelles à Ghardaïa entre 1982 et 2020

Figure 5 : Caractéristiques climatiques à Ghardaïa calculées pour la station météorologique

« Numérate »

Figure 6 : Les principaux oueds qui alimentent Dorsale de M'zab »

Figure 7 : Carte hydrogéologique du domaine de SASS

Figure 8 : photos représentant les ressources en eau exploitées à Ghardaïa

Figure 9 : photos représentant le système de production à Ghardaïa

Figure 10 : Evolution de la superficie agricole (ha) par spéculation à Ghardaïa

Figure 11: photos representant les stations d'épuration à Ghardaïa

Figure 12 : photos illustrant les conséquences de la pénurie de l'eau à Ghardaïa

Figure 13 : photos illustrant le pompage illicite des eaux usées brutes à partir du collecteur pour l'irrigation dans la région de Guerrara

Figure 14 : dispositifs de traitement et de réutilisation des eaux usées et des nutriments à différentes échelles à Ghardaïa

Figure 15 : Schéma du plan de la thèse avec les objectifs de chaque chapitre

Chapitre 2 : Réémergence des toilettes sèches et réutilisation des nutriments fécaux dans les villes du M'zab

Figure 1: Geographic localisation of the M'zab cities

Figure 2: Chronology of the different phases of dry toilet use

Figure 3: dry toilets architecture in the M'zab valley

Figure 4: private and public dry toilets in M'zab Valley

Figure 5: New dry toilets in Beni Isguen (2019)

Figure 6: example of dry toilet use and recycled human excreta

Chapitre 3 : Création d'un front pionnier basé sur la réutilisation des eaux usées dans le Sahara algérien : cas d'un périmètre irrigué à Ghardaïa

Figure 1: Map of Berriane

Figure 2: Timeline showing the history of sanitation, the reuse of wastewater in the old oasis of Berriane and its development

Figure 3: Summary diagram showing the problems undermining the reuse project in Berriane.

Chapitre 4 : L'irrigation par les eaux souterraines en aval d'une lagune : quel impact des eaux usées sur le milieu

Figure 1 : localisation géographique du périmètre étudié Oued El Bir – Berriane- Ghardaïa

Figure 2 : Coupe hydrogéologique du domaine de SASS

Figure 3 : Coupe géologique simplifiée au centre de la vallée du Mzab

Figure 4 : points de prélèvements des eaux usées et des eaux de forages effectués dans la zone d'étude (BF : eau de forage, EU : Eau usée)

Figure 5 : diagramme de piper indiquant les faciès hydro chimiques des eaux des forages phréatiques, des eaux usées et de forage albien de la zone d'étude

Figure 6 : Schéma montrant la localisation des forages par rapport à l'oued

Figure 7 : mesures isotopique des eaux usées et des eaux des forages pour les années 2019 et 2021

Figure 8 : diagramme isotopique des eaux usées et du forage albien à Berriane durant 2019 et 2021

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Introduction générale

Tableau 1 : Réutilisation des eaux usées épurées à fin Juin 2018 des STEP en exploitation en Algérie

Tableau 2 : description des 4 stations d'épuration de Ghardaïa

Chapitre 2 : Réémergence des toilettes sèches et réutilisation des nutriments fécaux dans les villes du M'zab

Table 1: Examples of questions to the actors in Ghardaia, 2019

Chapitre 3 : Création d'un front pionnier basé sur la réutilisation des eaux usées dans le Sahara algérien : cas d'un périmètre irrigué à Ghardaïa

Table 1: Main agricultural characteristics of the study area

Table 2: Main characteristics of the wastewater treatment plant

Table 3: Main questions addressed to farmers and state officials in 2019 and 2021.

Chapitre 4 : L'irrigation par les eaux souterraines en aval d'une lagune : quel impact des eaux usées sur le milieu

Tableau 1 : Caractéristiques des forages concernés par notre étude

Tableau 2 : mesures de la CE des eaux de la nappe phréatique pour l'année 2021, 2022 et 2023

Tableau 3 : Résultats des mesures de paramètres microbiologique et biologique des eaux usées à l'entrée et à la sortie de la STEP des années 2021 et 2022

Tableau 4 : Résultats des analyses des pathogènes des forages qui sont localisés en aval de la STEP pour les années 2021,2022

Tableau 5 : Normes microbiologiques algériennes de réutilisation et d'irrigation avec les eaux usées traitées selon le type de culture

Liste des abréviations

CE : Conductivité électrique

COSTEA : Comité scientifique et technique de l'eau agricole

DRE : Direction des ressources en eau

DSA : Direction des services agricole

MTH : Maladies à transmission hydrique

ONID : Office nationale d'irrigation et de drainage

pH : Potentiel d'Hydrogène

SAR : Sodium Adsorption Ratio

SASS : Système Aquifère du Sahara Septentrional

STEP : Station de traitement des eaux usées

Chapitre 1 : Introduction générale

Chapitre 1 : Introduction générale

I. Introduction

Cette thèse se concentre sur le diagnostic de la situation de la réutilisation des eaux usées et des nutriments en Algérie, en particulier dans la région du Sahara. Elle s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche international nommé "Massire". Dans un contexte aride saharien, l'eau est un facteur limitant pour toute activité (**Bensaad et al.2011**). Le Sahara connaît des mutations socio-spatiales d'une vigueur exceptionnelle, sans précédent dans d'autres territoires, caractérisées notamment par un rythme d'urbanisation, une dynamique agricole et une croissance démographique exceptionnels par rapport aux régions avoisinantes. Ces mutations ont entraîné une forte pression sur les ressources hydrauliques, faisant de l'eau un enjeu central au Sahara (**Bensaad A. 2011**). Ces changements constituent le fondement de toute réflexion sur l'avenir hydraulique d'un environnement classé comme relativement fragile. Historiquement, l'eau a été le principal moteur du développement dans les régions sahariennes. Cependant, l'apparition de nouvelles ressources souterraines, notamment grâce à la diffusion des motopompes et aux forages profonds, a perturbé l'équilibre entre l'homme et son environnement (**Kouzmine et Avocat 2007**). L'exploitation de ces ressources fossiles a entraîné une augmentation du rejet des eaux usées dans les oasis, posant des défis environnementaux et sanitaires (**Bensaad 2011**). Dans cette thèse, nous avons pris les oasis de la région de Ghardaïa comme cas d'étude pour analyser et diagnostiquer la situation de la réutilisation des eaux usées en milieu saharien aride.

Dans l'introduction générale, nous allons évoquer 1 :la problématique de l'eau en Algérie notamment en milieu aride, 2/ la réalité de la réutilisation des eaux usées en Algérie, 3/ Une comparaison entre L'Algérie et d'autres cas dans le monde (la position en Algérie par rapport au monde).4/ La réutilisation des eaux usées traitées et des nutriments représentent elles une solution miracle (Avantage et inconvénients). 6/ problématiques et objectifs de la thèse. 5/Le cas d'étude : Ghardaïa et on finit par la démarche utiliser dans cette thèse.

II. Aperçu sur la gestion ressources en eau en Algérie

D'autant que l'Algérie est un pays semi-aride, voire même Aride (200 à 400 mm) et les ressources en eau sont faibles, irrégulières, et localisées dans la bande côtière (**Kettab 2001**) avait fait face à une sécheresse (Tableau 1). D'après le MRE (Ministère des ressources en eau,2017 notre pays se trouve entre une position de rareté et de rareté absolue (moins de 500m³/hab.). Les modèles de changement climatique indiquent que les précipitations pourraient

diminuer de plus de 20 % d'ici 2050, ce qui entraînerait une aggravation des pénuries d'eau dans les différents bassins de l'Algérie (**Hamiche et al.2015**). Ses potentialités hydriques, comprenant eaux de surfaces et eaux souterraines s'évaluent 19,4 milliard de m³ dont 14,4 milliards de m³ renouvelables localisées au nord et 5 milliards de m³ non renouvelables totalement localisées au sud (**MRE.2017**). Elles restent très faibles par rapport à la demande croissante de la population (**Bouchaala 2017**) (**figure1**)

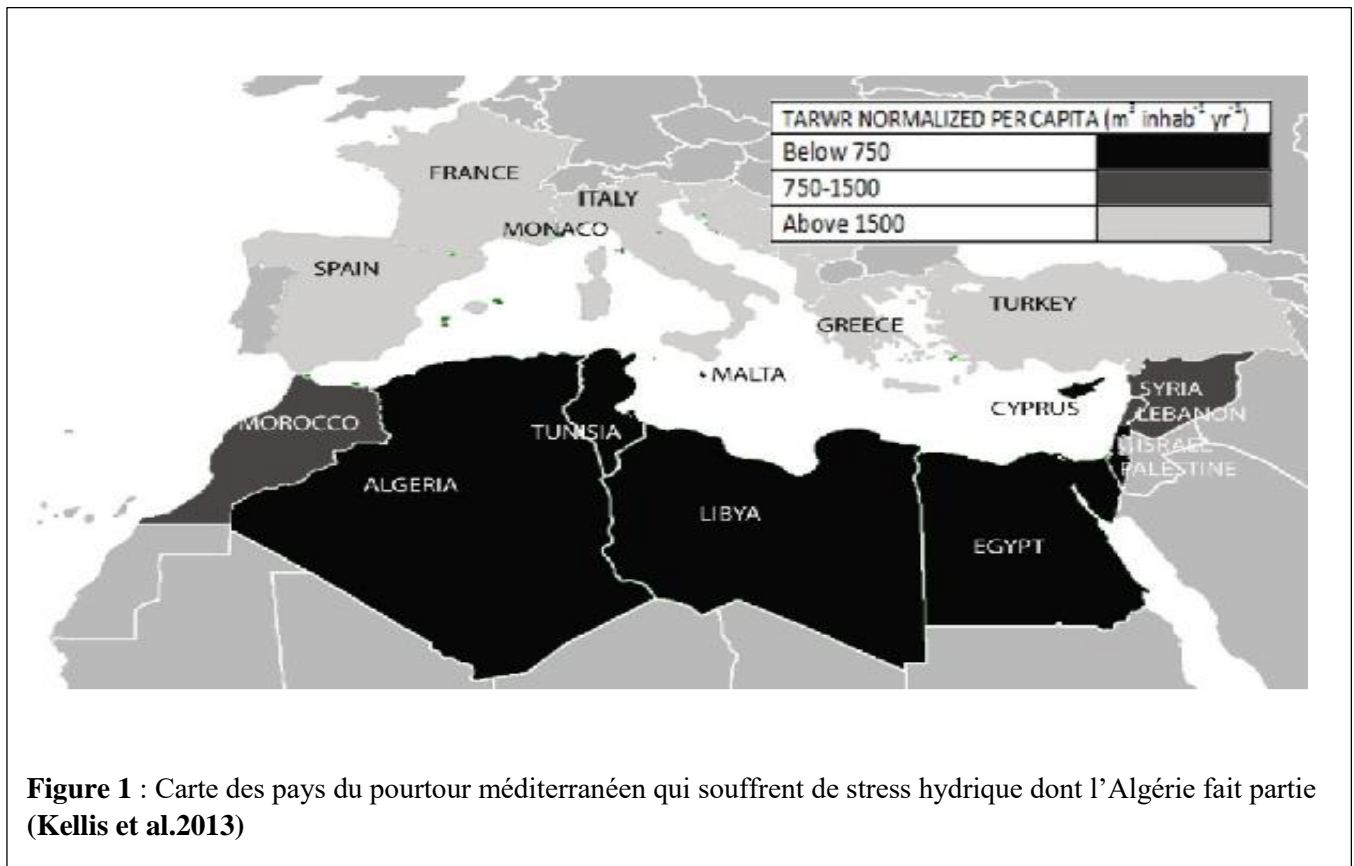


Figure 1 : Carte des pays du pourtour méditerranéen qui souffrent de stress hydrique dont l'Algérie fait partie (**Kellis et al.2013**)

La majeure quantité des eaux sont destinées à l'irrigation (62 %) (**Moza et Ghosn 2013**). L'Observatoire National du Développement Durable note dans ce cadre, que la réalisation inconsidérée de forages a conduit le pays à une surexploitation des nappes, menaçant le système artésien dont la recharge est rendue problématique par les sécheresses récurrentes en conduisant à des rabattements des aquifères (**Bessaoud et al. 2019**). De plus L'extension des cultures irriguées dans les zones arides du grand Sud, reposant sur l'utilisation des ressources en eau fossile non renouvelable, ce questionne fortement la durabilité de ces systèmes agraires (**Bessaoud et al.2019**). L'Algérie, afin de protéger ses ressources en eau et assurer une gestion durable de ces ressources, a réalisé le plan national de l'eau. Ce programme est fait pour améliorer les performances du secteur de l'eau du pays à travers la construction des barrages, la désalinisation des eaux de mer et la valorisation des eaux usées en agriculture (**Drouiche et**

al. 2012). Depuis le début des années 2000, le gouvernement algérien a pris des mesures importantes pour sortir de la situation de pénurie d'eau qui touchait le pays. La question hydraulique a été placée en priorité sur l'agenda politique et de gros moyens ont été mis en œuvre pour mobiliser de nouvelles ressources en eau conventionnelles et non conventionnelles. La nouvelle politique de l'eau s'est ainsi structurée autour de deux axes stratégiques (**Moza et Ghosn 2013**) :

- le développement de l'infrastructure hydraulique : barrages, transferts, stations de dessalement d'eau de mer, stations d'épuration etc.
- la réforme institutionnelle du secteur de l'eau qui vise à promouvoir une meilleure gestion de la ressource (**Moza et Ghosn 2013**).

De ce fait, une politique active de mobilisation des ressources en eau a été mise en œuvre, ainsi que de nouveaux instruments de gestion, c'est la réutilisation des eaux usées en agriculture (**Hannachi et al. 2014**). La réutilisation des eaux usées traitées, constitue une forme de valorisation d'un potentiel hydrique important, qui permet d'alléger le recours aux ressources hydriques conventionnelles en Algérie, notamment les eaux de surface et souterraines très vulnérables (**Bouchaala 2017**). Sachant que le rejet des eaux usées va atteindre le 1.5 milliard de M³ en 2020 selon les données de l'office nationale de l'assainissement. La réutilisation des eaux usées traitées est un défi à la fois politique et socio-économique. Toutefois, cette voie peut contribuer à atténuer les pénuries d'eau en permettant une meilleure conservation des ressources naturelles et en contribuant également au développement de systèmes intégrés de gestion de l'eau (**Elmeddahi et al. 2014**).

III. La réutilisation des eaux usées traitées comme solution alternative

III.1. La réutilisation des eaux usées et des nutriments dans le monde

L'épandage des eaux usées, des boues et des excréments est une pratique très répandue qui s'appuie sur une longue tradition dans de nombreux pays à travers le monde. Pendant des siècles, les agriculteurs chinois ont utilisé les excréments des humains et des animaux comme engrais (**Chmielewská 2022**). Le but de cette pratique était de détourner les déchets humains en dehors des agglomérations urbaines (**Chmielewská 2022**). Les premières communautés humaines étaient dispersées sur de vastes étendues et les déchets qu'elles produisaient étaient retournés à la terre et décomposés selon les cycles naturels (**Lofrano et Brown 2010**). Les eaux usées domestiques ont été également utilisées pour l'irrigation par les civilisations préhistoriques (par exemple la Mésopotamie, la vallée de l'Indus) depuis l'âge du bronze (vers 3200-1100 avant

JC). Par la suite, ces eaux usées ont été utilisées à des fins d'élimination, d'irrigation et de fertilisation par les civilisations helléniques et plus tard par les Romains dans les zones entourant les villes (par exemple Athènes et Rome) (**Chmielewská 2022**). Les boues provenant des eaux usées et des égouts ont aussi été utilisées par les civilisations du nord de l'Europe et de la Méditerranée comme fumier (**Cisneros et al.2010**).

A la fin du XIXe siècle il est devenu possible de traiter les eaux usées en décomposant biologiquement les composants organiques à l'aide de micro-organismes et en éliminant les polluants. Le procédé des boues activées a été découvert en 1913 au Royaume-Uni par deux ingénieurs (**Chmielewská 2022**). Au début du 20e siècle, les grandes villes d'Europe utilisaient les eaux usées pour l'irrigation dans ce que l'on appelle les "fermes d'épuration". Cette pratique a favorisé l'agriculture, mais elle est ensuite devenue un problème de l'environnement et de la santé (**Gohil 2000 In Ofori et al.2021**)

III.2. Les eaux usées traitées : une nouvelle composante du bilan hydrique

Takashi Asano à introduit son livre Water Reuse par « *Les impacts sociaux, économiques et environnementaux de l'exploitation passée des ressources en eau et les perspectives inévitables de pénurie d'eau conduisent à l'adoption d'un nouveau paradigme en matière de gestion des ressources en eau. Les nouvelles approches intègrent désormais les principes de durabilité, d'éthique environnementale et de participation du public à l'élaboration des projets.* » (**Asano 2007**). Selon lui, les eaux usées traitées représentent une ressource très attractive pour augmenter l'approvisionnement en eau en permettant de : 1/ assurer une ressource en eau pour des applications que ne nécessitent pas une eau de haute qualité. 2/ Augmenter les sources d'eau disponible par le recyclage des eaux usées. Ceci va permettre de répondre aux besoins en eau actuels et futurs. 3/ protéger les systèmes aquatiques en réduisant les quantités des éléments nutritifs et toxiques qui se rejettent dans ces milieux. 4/ Réduire le besoin des ouvrages de stockage des eaux naturelles tels que les barrages. En dernier lieu, la réutilisation des eaux usées traitées permet, de respecter la réglementation environnementale qui exigent une gestion rationnelle et raisonnable de la consommation des eaux et des déchets et également le rejet des eaux usées (**Asano 2007**)

Les eaux usées traitées servent comme « nouvelles ressources ajoutées au bilan hydrique » où leur réutilisation en agriculture notamment peut améliorer la qualité des ressources en eau conventionnelles en réduisant la pression sur cette dernière et en éliminant également la principale source de pollution (eaux usées municipales) des ressources en eau conventionnelles

(Friedler 2001). Dans certains pays arides et semi-arides, comme la Jordanie, la réutilisation des eaux usées municipales traitées fournit une grande partie de l'eau d'irrigation. Dans ce secteur particulier, la réutilisation de l'eau devient une ressource vitale pour améliorer la production agricole, offrant un certain nombre d'avantages supplémentaires tels que l'augmentation des rendements des cultures, l'amélioration de la sécurité sanitaire et la diminution de la dépendance aux engrais chimiques **(Lazarova et Bahri 2005)**.

Des estimations montrent que 20 million d'ha sont irrigués par les eaux usées traitées ou non dans le monde, localisés principalement en Asie, Amérique latine et l'Afrique semi – saharienne **(Keraita 2010)**, et cette superficie a tendance d'augmenter dans les décennies à venir avec l'augmentation du stress hydrique dans le monde **(Hamilton 2007)**. La plupart des pays en sud d'Europe qui souffrent de manque d'eau douce tels que la Grèce, Italie, Portugal et Espagne réutilisent déjà les eaux usées traitées et ont introduit des lignes directrices pour réglementer ce domaine **(Lavrnié et al. 2017)**. En outre, de nombreux pays ont inclus la réutilisation des eaux usées comme une dimension importante de la planification des ressources en eau par exemple : l'Australie, la Jordanie, l'Arabie saoudite, la Tunisie, la Chine, l'Inde, le Mexique et les États-Unis. Dans ce dernier, plus de 1,7 million de m³ d'eau recyclée sont réutilisés chaque jour en Californie et en Floride, principalement pour l'irrigation des cultures et l'aménagement des paysages **(Lazarova et Asano 2005)**.

L'analyse du scénario de réutilisation confirme que, dans des conditions contrôlées, les eaux usées de faible qualité peuvent être utilisée comme ressource en eau supplémentaire pour augmenter la production de légumes dans les régions méditerranéennes pauvres en eau **(Cirelli et al.2012)**.

III.3. Impact de la réutilisation des eaux usées

Bien que l'utilisation des eaux usées traitées soit une pratique établie depuis plusieurs décennies, il demeure essentiel, et constitue toujours un défi, d'adapter les directives aux domaines de préoccupation spécifiques **(Cirelli et al., 2012)**. L'adaptation des réglementations afin de prendre en considération les conditions locales devrait accroître les avantages de la réutilisation des eaux usées traitées et réduire les risques sanitaires **(Cirelli et al., 2012)**. Les impacts relatifs à la réutilisation des eaux usées sont liés au niveau de traitement des effluents, des cultures, des pratiques agricoles et des méthodes d'irrigation utilisées donc pour minimiser les risques sur l'environnement, il faut bien choisir les pratiques culturales, les méthodes d'irrigation et les types de cultures à irriguer **(Pereira et al.2002)**.

La réutilisation des eaux usées en agriculture exige l'application de multiples barrières à fin d'assurer une réutilisation sûre (**Bahri 1999**). Après traitement, elle doit être basée sur une gestion appropriée d'irrigation qui inclut des méthodes de stockage, de distribution et d'application (**Bahri 1999**). La gestion des ressources en eau et des ressources en eaux usées présente plusieurs aspects communs, tels que le besoin de stockage saisonnier et / ou pluriannuel, les sources multiples et les utilisations multiples (**Friedler 2001**). Cependant l'approvisionnement en eaux usées ne dépend pas des précipitations mais de la production des eaux usées municipales qui doivent subir un traitement approprié par système de traitement extensif ou intensif afin de répondre aux exigences techniques, environnementales et sanitaires (**Friedler 2001**).

III.3.1. Avantages de la réutilisation des eaux usées en agriculture

- La réutilisation de l'eau augmente l'approvisionnement en eau disponible et permet d'atteindre des besoins humains plus importants avec moins d'eau douce, réduisant ainsi l'impact de l'humanité sur l'environnement mondial de l'eau (**Anderson 2000**).
- la réutilisation des eaux usées constitue une source importante d'apport de nutriments qui peuvent améliorer la fertilité du sol, et elle joue un rôle dans le développement des produits locaux et l'amélioration du niveau de vie des agriculteurs (**El Moussaoui et al. 2017**)
- L'un des avantages les plus importants de la réutilisation de l'eau est la valeur créée par l'inclusion de la réutilisation de l'eau dans la planification intégrée des ressources en eau et d'autres aspects de la politique de l'eau et la mise en œuvre de projets hydrauliques (**Wade Miller 2006**)
- Elle peut contribuer également à la conservation de l'eau douce en libérant cette dernière pour l'approvisionnement en eau potable et d'autres utilisations prioritaires, et si cette réutilisation sera bien gérée (**Chenini 2011**).

III.3.2. Inconvénients de la réutilisation des eaux usées en agriculture

- L'irrigation continue avec l'eau usée peut conduire à l'accumulation des sels, des éléments nutritifs pour les plantes et métaux lourds au-delà des niveaux de tolérance de la plante (**Rusan et al.2007**). Des études montrent que les propriétés physiques et chimiques des sols ont significativement changé avec la réutilisation des eaux usées à long terme (**Chen et al. 2008, Xu et al. 2010**).

- Le risque le plus important est lié à la salinisation du sol, qui peut affecter la culture à long terme (**Candela et al. 2007**). En Tunisie une irrigation de 4 ans avec les eaux usées traitées montre une diminution significative du pH, du taux d'infiltration et une augmentation significative de la matière organique, du SAR (sodium adsorption ratio) et de la CE (conductivité électrique) (**Aldo 2013**)
- Pour l'irrigation agricole présente des défis environnementaux, sanitaires. Ces défis sont représentés par l'exposition aux agents pathogènes et aux métaux lourds ainsi que la salinisation des sols (**Ofori et al.2021**).

IV. Pourquoi s'intéresser à la réutilisation des eaux usées et des nutriments en agriculture dans les régions arides ?

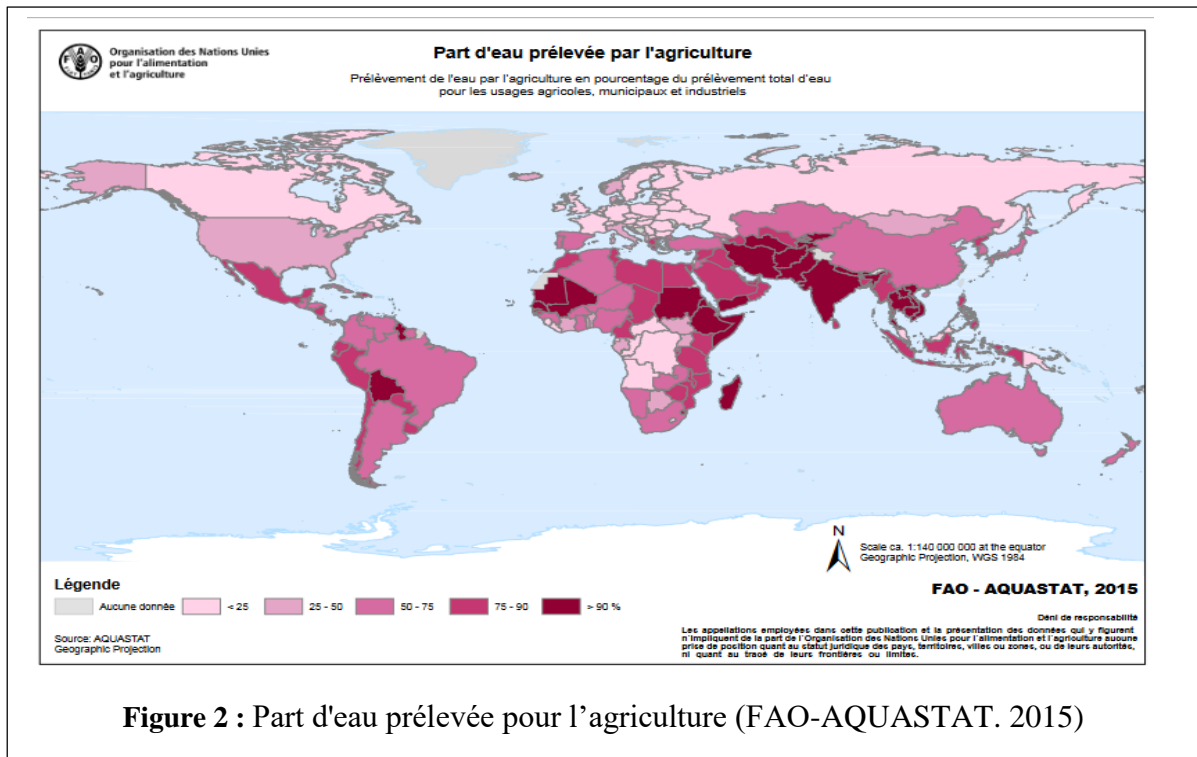
La région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MENA) est la région la plus sèche du monde, avec seulement 1% des ressources mondiales en eau douce (**Qadir et al. 2009**).

L'eau est nettement rare dans les zones arides densément peuplées, en Asie centrale et occidentale et en Afrique du Nord, avec des disponibilités prévisibles inférieures à 1000 m³ / habitant / an (**Rijsberman 2005**). Dans certains pays de la région de MENA, les chiffres de consommation d'eau par habitant par an montrent cette grave pénurie, en citant : la Tunisie 432 m³/hab., la Jordanie 145 m³/hab. qui est l'une des régions la plus déficitaire en eau dans le monde, et la Chypre avec 707 m³/hab. (**Qadir et Sato 2016**). Plus de 80% des dommages et pertes causés par la sécheresse concernent le secteur agricole et touchent les productions animales et végétales. Cette sécheresse engendre de graves conséquences sur les disponibilités alimentaires et les moyens de subsistance, en particulier pour les petits exploitants et les membres les plus pauvres des sociétés rurales (**FAO.2017**).

Le changement climatique, en particulier l'augmentation des températures, et la croissance des centres urbains (croissance démographique) sont des raisons qui imposent une grave pression sur la demande en eau (**Faour-Klingbeil Todd 2017**). En Asie par exemple, cette croissance démographique, conduit la région à une demande en eau et de terres cultivables supérieure aux ressources locales en la rendant dans la future incapable d'assurer l'autosuffisance alimentaire (**Marsily 2014**). En 1995, environ 2.3 milliards de personnes vivaient dans des zones soumises à un stress hydrique, et cette valeur pourra atteindre 3.2 milliards de personnes en 2025 (**Hamilton, 2007**).

Comme l'agriculture est le plus grand consommateur de l'eau dans le monde, et avec le potentiel de pénurie d'eau, le besoin de trouver une autre ressource d'eau devient nécessaire

(Lavrnié et al.2017). Les prélèvements totaux en eau douce dans le monde sont estimés à 3 800 kilomètres cubes (IWMI. 2007) où l'agriculture représente 70% des prélèvements mondiaux de ces eaux (soit 2700 km³) (FAO. 2012). (Figure 2)



V. La réalité de la réutilisation des eaux usées en Algérie

La gestion et l'utilisation rationnelle de l'eau en Algérie constitue l'un des éléments majeurs dans la stratégie de développement socio- économique de l'horizon 2035 (MRE.2017). La mise en œuvre d'un nouveau modelé économique en basant sur l'exploitation des ressources à haute valeur ajoutée nécessite des quantités additionnelles d'eau (MRE. 2017). Pour faire face à cette demande croissante en eau, la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture constitue une forme de valorisation d'un potentiel hydrique important, qui permettra officiellement d'alléger le recours aux ressources hydriques conventionnelles, notamment les eaux de surface et souterraines très vulnérables (Bouchaala 2017). Cependant en Algérie, d'un volume de 1570×10^6 m³/an des eaux usées collectées, seulement 275×10^6 m³/an sont traitées (17% du volume total) et 7 % de ces eaux traitées sont réutilisées pour des fin agricole (19.3×10^6 m³/an) (Benzater et al. 2019). Pourtant dans la nouvelle politique du pays, pour renforcer l'implication de l'utilisation des eaux usées traitées en agriculture, la réhabilitation des anciennes stations d'épuration et la réalisation de nouvelles stations sont prioritaires, ainsi

que l'élaboration des arrêtés ministériels du 15 juillet 2012 fixant la liste des cultures autorisées et les spécifications normatives de qualité des eaux usées épurées (**Moza et Ghosn 2013**).

En Algérie, Il existe 148 station de traitement des eaux usées qui assure le traitement de 125 million de m³. Parmi ces STEP 17 sont concernées par la réutilisation des eaux usées traitées avec un volume réutilisé de 8 millions m³. Ce volume assure l'irrigation de 11062 ha (**ONA.2018**)

Des données collectées de l'office nationale de l'assainissement et de la GIRE (gestion intégrée des ressources en eau) en 2018 donnent un aperçu sur les Stations d'épuration des eaux usées qui sont destinée à la réutilisation des eaux usées en agriculture.

Le tableau ci-dessous indiquent ces stations avec leurs régions, la superficie à irriguer et les types de cultures. Il montre également les capacités des stations d'épuration, les volumes d'eau traitées et à réutilisées (tableau 1).

Tableau 1: Réutilisation des eaux usées épurées à fin Juin 2018 des STEP en exploitation en Algérie

Zone/ D.A	Unité	Désignation	Capacité (Eq/H)	Débit nominal (m3/j)	Volume (m ³)		Domaine Agricole (Ha)	Type de culture	Utilisateurs (Concessionnaire)
					épuré	réutilisé			
Alger	Boumer dès	Station d'épuration à boues activées de Boumerdès	75 000	15 000	2 949 243	16 843	Flici : 49	Pépinière d'oliviers, Orangers et Vignes	M. Flici
							Rahmoun : 76		M. Rahmoun
Ouargla		Station de lagunage aéré d'Ouargla	260 102	56 997	5 668 147	566 815	16,5	4 000 Palmiers Dattiers et 100 Oliviers	Autorisation DRE Réhabilitation du périmètre
El Oued		Station de lagunage aéré de Kouinine	239 134	44 335	4 448 194	97 000	15	Arbres (Eucalyptus et Kazarina)	ONA
Annaba	Guelma	Station d'épuration à boues activées de Guelma	200 000	32 000	1 868 704	1 868 704	Guelma, Boumahra et Boucheouf : 6 980	Vergers	ONID
	Souk Ahras	Station d'épuration à boues activées de Souk Ahras	150 000	30 000	529 222	529 222	200	Arboriculture	Réutilisation indirecte (Apport à Oued Medjerda)
Oran	Tlemce n	Station d'épuration à boues activées de Tlemcen	150 000	30 000	4 282 404	2 257 477	Plaine de Hennaya : 912,22	Arboriculture	ONID
	Mascar a	Station d'épuration à boues activées de Mascara	100 000	13 000	1 401 274	1 401 274	El-Kouaer : 400	Oliviers Culture céréalière Agrumes	Associations agriculteurs
		Station de lagunage aéré de Ghriss	48 000	5 800	118 876	118 876	Ghriss : 420		
Station de lagunage aéré	32 500	3 900	158 112	158 112	475				

		de Bouhanifia							
		Station de lagunage aéré de Hacine	20 000	3 200	16 358	16 358	390		
		Station de lagunage naturel d'Oued Taria	21 000	2 520	133 886	133 886	196		
		Station de lagunage naturel de Tizi	12 000	1 440	59 533	59 533	200		
		Station de lagunage naturel de Mohammadia Est	19 000	2 280	283 385	283 385	El-Habra : 175		
		Station de lagunage naturel de Froha	9 400	1 128	52 268	52 268	Ghriss : 182		
		Station de lagunage naturel de Khalouia	6 321	949	117 536	117 536	182		
		Station d'épuration à boues activées d'Ain Témouchent	72 800	10 920	1 956 836	333 000	135	Arboriculture	Autorisation DRE
Saida	Saida	Station d'épuration à boues activées d'Ain El Hadjar	30 000	4 800	552 475	122 000	58	Arboriculture	
Total des 17 STEP			1 445 257	258 269	24 596 453	8 132 289	11 062Ha		

VI. Problématique

En Sahara algérien, les ressources en eaux souterraines non renouvelables estimées de 5 milliard de m³ constitue le support indispensable de l'irrigation or la problématique de la surexploitation des ressources hydriques dans le Sahara septentrional algérien est plus que jamais d'actualité (**Bouchahm 2013**). La structure sédimentaire du Sahara algérien comprend plusieurs réservoirs souterrains qui sont à l'origine du quaternaire (**Hamiche et al.2015**). On trouve en premier lieu la nappe du complexe terminal avec une profondeur allant de 100 à 400 m. En deuxièmes lieu, la nappe du continental intercalaire dont sa profondeur est entre 500 à 1500 m. cette dernière comprend une réserve d'eau significative entre 30000 à 40000 milliard m³. Cependant cette réserve est non renouvelable (**Hamiche et al.2015**).

La nappe du continental intercalaire et du complexe terminal assurent trois quart des besoins en eau (**Bensaad 2011**). Cette nappe qui est fortement exploitée par la multiplication des forages profonds qui fournissent des débits qui peuvent atteindre 250l/s a pour effet des bouleversements écologiques et hydrauliques importants (**Bensaad 2011**). Sachant que l'oasis est un milieu fermé qui ne possède pas un exutoire, c'est par conséquent, le résultat, le retour des eaux usées rejetées vers la nappe phréatique (**Cote 1998 ; Bensaad 2011**). L'agriculture dans le Sahara algérien a subi des transformations radicales au cours de la seconde moitié du 20ème siècle (**Hamamouche al. 2015**). Durant ces 20 dernière année, une émergence importante de bassins de production maraichère a été enregistrée dans le Sahara algérien par la mobilisation des eaux souterraines profondes, en marge des oasis traditionnelles (**Ouled Rebai et al. 2017**). Les programmes de développement agricole, visant à intégrer le Sahara dans l'économie nationale, étaient basés sur un modèle agroalimentaire mis en œuvre en dehors des oasis existantes - dans les extensions dites - à travers la conquête de nouvelles terres agricoles et l'utilisation d'eaux souterraines pompées (**Hamamouche et al.2018**). Plusieurs sortes d'innovations, d'adaptations et de pratiques ont été adoptées dans la Sahara algérien après avoir l'accès facile aux eaux souterraines. Telle que l'émergence de pivot artisanal à l'Oued qui a permis une grande production de pomme de terre (**Ouled Rebai et al.2017**), l'hybridation de la foggara avec les eaux des forages à Adrar (**Ida et al. 2019**). Une grande production laitière, grandes exploitations céréalières et introduction de nouvelles cultures comme le Safran d'Iran (**Benmihoub et al.2021**), le Morinaga et aussi l'apiculture à Ghardaïa (**DSA.2019**).

Ces transformations sont apparues particulièrement dans le déclin de l'agriculture oasisien au profit de l'agriculture moderne et industrielle par le développement de monoculture (**Hadeid 2016**). Deux solutions sont proposées pour gérer les effets de l'épuisement des eaux

souterraines dans la région : premièrement, la rationalisation de l'utilisation des eaux souterraines par des mesures efficaces de gestion de la répartition des eaux souterraines et, deuxièmement, la mise en œuvre de la réutilisation des eaux usées traitées comme source d'eau alternative pour l'agriculture. Cette dernière mesure pourrait se faire de deux manières : soit par une utilisation directe en irrigation pour soulager la pression sur l'aquifère phréatique, soit indirecte par une recharge artificielle de l'aquifère phréatique (**Khezzani et Bouchemal 2018**).

Depuis l'année 2000, l'Algérie s'est engagée dans un vaste programme de développement de l'agriculture dans les zones steppiques et au Sahara couplé à la mise en service de nombreux ouvrages d'épuration destinés : (1) à préserver la qualité du milieu naturel et à (2) appuyer le développement de l'agriculture par la production d'eau d'irrigation. Cette démarche s'est accompagnée par la promulgation de textes juridiques précisant le cadre et les conditions de réutilisation des eaux non conventionnelles en agriculture. Malgré la présence de plusieurs stations d'épuration concernées par la réutilisation des eaux usées en agriculture à savoir Ouargla et El Oued (tableau 1) et également Ghardaïa, Aucun projet de réutilisation formelle des eaux usées existe jusqu'à ce jour

Cette thèse se propose de dresser un diagnostic des pratiques et innovations apportées par la réutilisation des eaux usées en milieu dans le Sahara algérien dont nous avons pris la région de Ghardaïa comme cas d'étude afin d'en dégager les vigueurs et les fragilités. Par ailleurs, beaucoup de parcelles irriguées reçoivent indistinctement des eaux souterraines de qualités diverses et des eaux non conventionnelles sans que l'on sache la part de chacune dans la production et cela d'autant plus que les analyses prospectives annoncent des volumes croissants mis en jeu et des risques de pollution des nappes. Au niveau local et parcellaire, l'effet de la réutilisation des eaux usées sur les agrosystèmes, les techniques d'irrigation et le rendement agricole devra être également étudié C'est pourquoi, on se propose d'estimer les impacts et de produire les connaissances nécessaires pour orienter les politiques publiques et les agriculteurs.

VII. Etude de cas : Ghardaïa

La wilaya à Ghardaïa a été choisie comme terrain d'étude dans le cadre d'un projet de recherche international financé par le fond international du développement agricole « FIDA ». Le projet porte le nom « Massire » et il vise Renforcer les systèmes d'innovation agricole et rurale dans les zones oasiennes et arides du Maghreb. L'un des axes de recherche dans ce projet est la gestion des ressources en eau dont la réutilisation des eaux usées traitées est incluse.

VII.1. Situation géographique

La ville de Ghardaïa est située dans la vallée du M'Zab dans la partie nord du Sahara algérien. Elle, est située au sud de la capitale (600 km) entre 32° et 33°20' de latitude nord et 2°30' de longitude est à une altitude moyenne de 500 mètres (**Hamdani et al.2012**). Elle occupe avant le découpage administratif de 2020 une superficie de 86560 km² (**Khelifa et Remini 2019**).

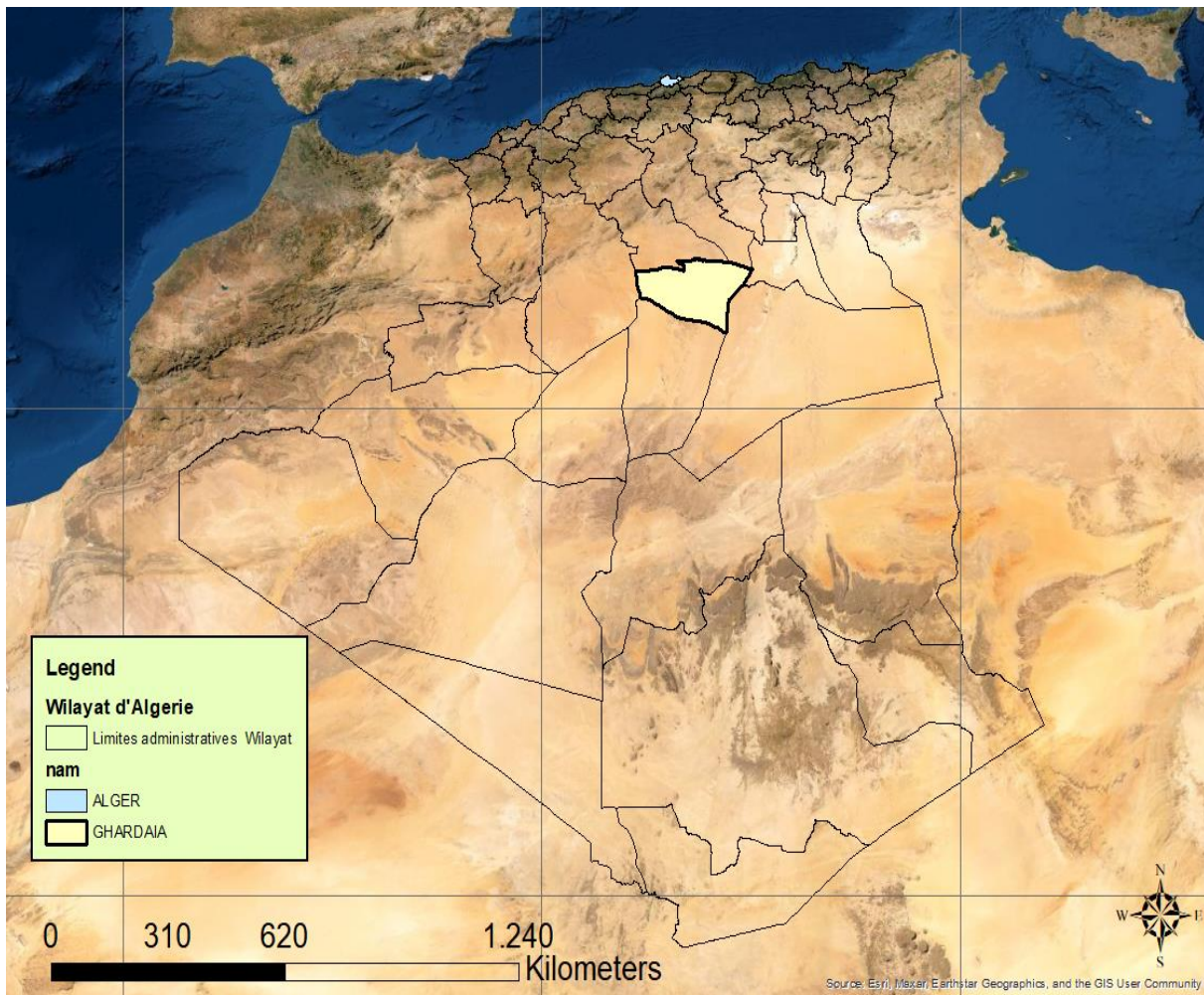


Figure 3 : Localisation géographique de la wilaya de Ghardaïa (carte réalisée par ARC Gis).

La vallée de M'Zab est classée patrimoine national en 1971 et au patrimoine de l'Humanité par l'Unesco en 1982 (**Djellouli 2010**). Le M'Zab est connu, dans tout le Sahara et au de là, pour la qualité admirable de son architecture, pour la symbiose de son urbanisme avec le cadre environnemental (**Cote 2002**). Au XI siècle, la Pentapole qui veut dire cinq a été constituée, comprenant 5 cités (d'amont en aval Ghardaïa, Melika, Béni Isguen, Bounoura, El Atteuf), 6 barrages, 5 palmeraies (situées dans le lit de l'oued principal, et également dans 2 vallées affluentes) (**Cote, 2002**). En dehors de la vallée, deux autres villes « *ksour* » ont été fondée en 17 eme siècle :

Guerrara en 1631 qui se trouve au nord- est de la chebka du M’Zab, sur le cours de l’oued Zegrir et Berriane en 1679 située au nord à 48 km sur L’oued Soudan (**Moulias 1927 ; Donnadiou et al. 1977**).

La doctrine Ibadite est à l'origine de la formation de la communauté mozabite et de la création de ses villes. Elle a façonné, son mode de pensée, son mode de vie, son mode d'appropriation de l'espace, son idéal social culturel et politique (**Adad,2008**).

Le modèle oasien mozabite se caractérise par plusieurs éléments distinctifs par rapport aux autres types de ksour, selon Ben Salah et al. (2018). D'une part, le ksar se compose de quatre éléments clés, comprenant une mosquée surplombant la colline comme point de repère central, entourée de logements, un marché situé en contrebas, un mur d'enceinte délimitant le ksar et servant de barrière infranchissable tant pour les étrangers que pour les extensions, ainsi que des cimetières situés autour du ksar mais à l'intérieur des remparts. D'autre part, la palmeraie ne se limite pas à un espace agricole, mais constitue également un lieu de résidence occasionnel, offrant un refuge estival contre la chaleur, avec la présence de maisons secondaires connues sous le nom de "Dar El Ghaba (**Bensalah et al.2018**).

VII.2. Synthèse climatique

VII.2.1. Pluviométrie

Ghardaïa est une région saharienne avec un climat hyperaride et chaud particulièrement en été. Les précipitations sont rares, irrégulières et souvent de faible étendue spatiale (**Houichiti 2018**). Elles varient entre 13 et 68 mm sur une durée moyenne de quinze (15) jours par an (DSA Ghardaïa 2018)

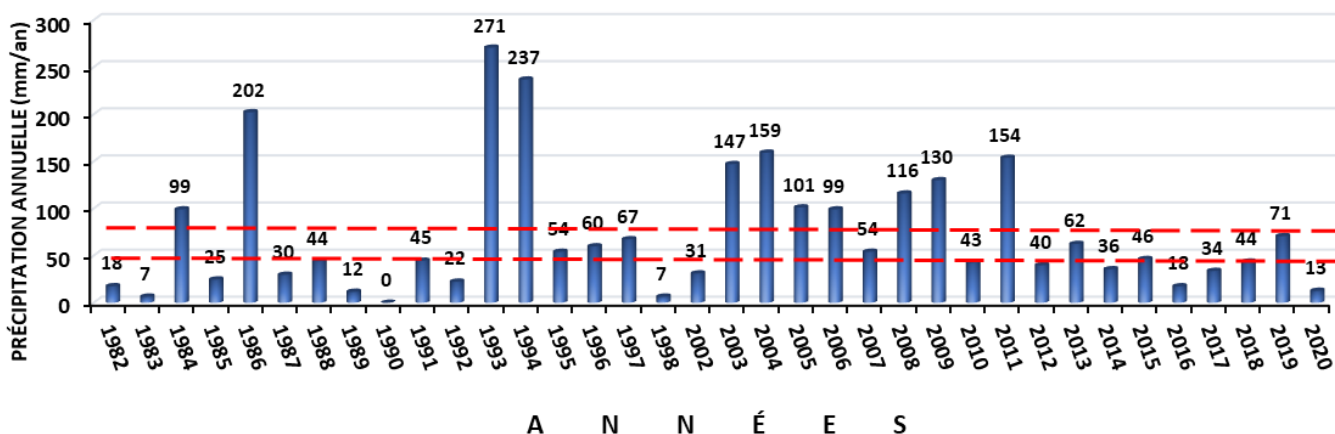


Figure 4 : Précipitations annuelles à Ghardaïa entre 1982 et 2020 (Hakimi 2021)

VII.2.2. Température

Elle est marquée par une grande amplitude entre les températures de jour et de nuit, d'été et d'hiver. La période chaude commence au mois de Mai et dure jusqu'au mois de Septembre. La température moyenne enregistrée au mois de Juillet est de 36,3 °C, le maximum absolu de cette période a atteint 47°C. Pour la période hivernale, la température moyenne enregistrée au mois de Janvier ne dépasse pas 9,2°C, le minimum absolu de cette période a atteint -1 °C. (DSA Ghardaïa 2018) (Figure 5)

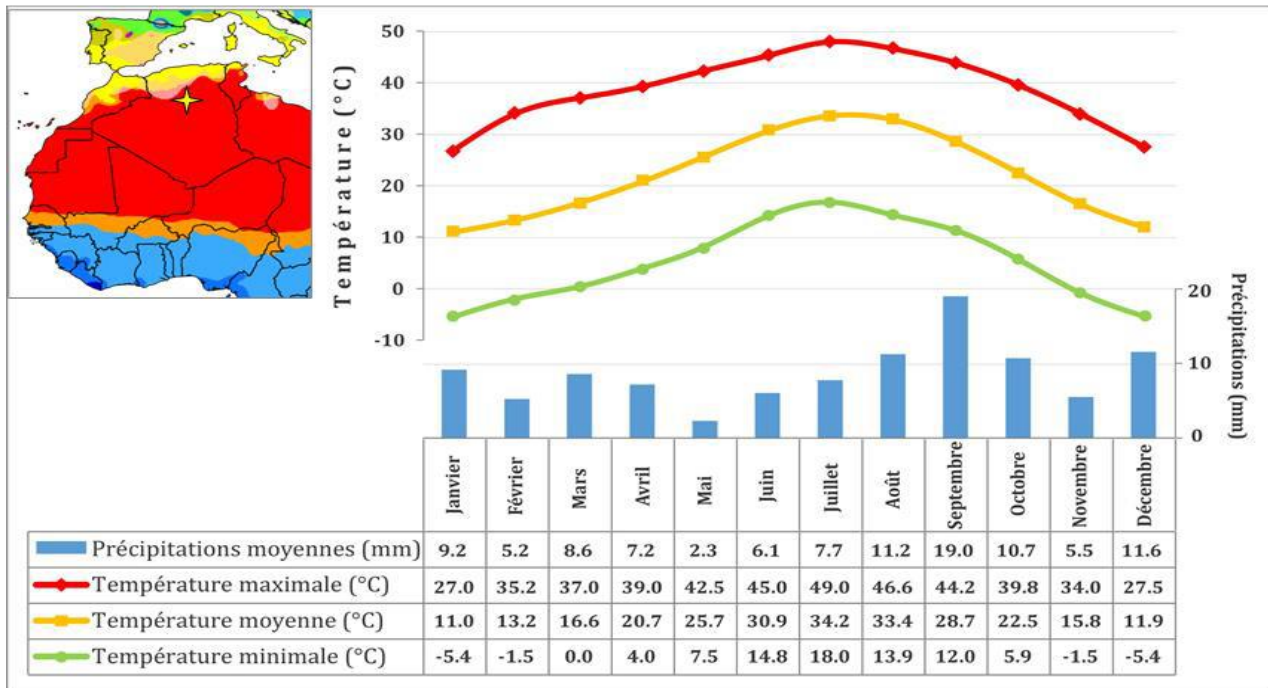


Figure 5 : Caractéristiques climatiques à Ghardaïa calculées pour la station météorologique « Numérate » (Hakimi 2021)

VII.3. Hydrographie et géomorphologie

La vallée du M'zab présente des caractéristiques distinctives, avec des plaines situées dans le Continental Terminal, des zones ensablées telles que la Chebka et l'ensemble de la région centrale. Elle s'étend sur environ 450 km du Nord au Sud et sur environ 200 km d'Est en Ouest. Le paysage est façonné par des escarpements rocheux et des oasis, qui définissent l'emplacement des villes de la pentapole du M'Zab. La région du M'Zab est supportée par le plateau de la Hamada sur sa portion nord comprise entre 32° et 33° 20' latitude nord et 2° 30' longitude est, d'une altitude varie entre 300 et 800 m (Benyoucef 2010). Le milieu physique est caractérisé par un sol qui est formé par de puissantes assises de calcaire, brunies par la patine désertique entaillée par des ravins profonds et ramifiés, qui ont lui donné le nom de « *Chebka du M'Zab* » (Filet) (Moulias, 1927)

VII.3.1 Ressources en eau exploitées dans la région

VII.3.1.1. Eaux de surface

Dans les zones sahariennes arides, l'eau est un facteur limitant de tous types d'activités. La région Ghardaïa et notamment la dorsale du M'zab assure son approvisionnement en eau en utilisant les eaux de surface et les eaux souterraines. L'existence des ressources en eau souterraines dans la région de M'Zab s'explique par la présence d'assises marneuses imperméables de l'étage cénomanien sous les calcaires turoniens de la Chebka en constituant une nappe non homogène qui alimente les puits du M'Zab où les puits d'amont conservent l'eau plus longtemps que les puits d'aval (**Moilias 1927**). Il existe un certain nombre de puits dont le débit d'eau est grand et constant même dans la période de sécheresse, ils les appellent « *Ouarouara* » (**Moulias1927**).

Les Mzab utilisent les eaux d'Oued M'Zab et ses effluents en période de crue où l'eau des puits est appelée « **Ma El Hai : l'eau vive** » et l'eau de la rivière « **Ma essil : l'eau courante** » (**Moulias 1927**). La figure ci-dessous donne un aperçu sur les différents Oueds qui alimentent la dorsale du M'zab avec ces 7 villes pendant la période de crue. Pour une meilleure exploitation des eaux de crue, les ancêtres des M'zab ont mis en place tout un système hydraulique bien complet qui assure le partage, le stockage et la recharge de la nappe avec cette eau. Ce système comprend différents deux d'ouvrages très importants : des puits, galeries, barrages, déversoirs, canaux. Ces ouvrages ont pour rôle, l'irrigation de la palmeraie, la recharge artificielle de la nappe phréatique et la minimisation des dégâts des crues (**Remini 2002**)

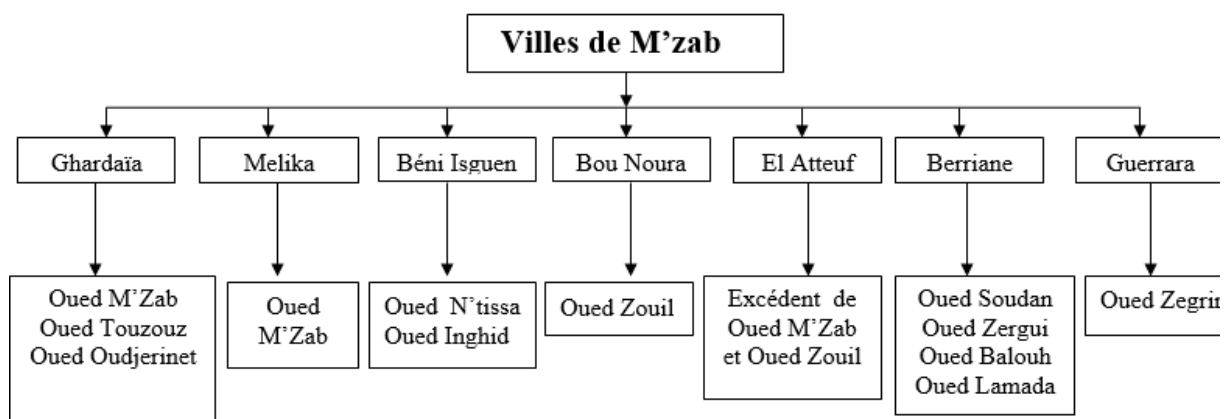


Figure 6 : Les principaux oueds qui alimentent Dorsale de M'zab (Félin, 1908)

VII.3.1.2. Aquifères souterrains exploités dans la région

Dans le Sahara Septentrional, trois nappes sont présentes dans la région : la nappe phréatique, la nappe du complexe terminal, et le continentale intercalaire (Guendouz et al 1997). Cependant la région de Ghardaïa est alimentée principalement par deux aquifères : la nappe phréatique superficielle d'infero-Flux, et la nappe profonde captive du continentale intercalaire (l'albien) (Achour 2007). La nappe du continental intercalaire est exploité par un nombre de 760 forages albiens. Pour la nappe phréatique, on trouve 6270 puits (DSA,2018).

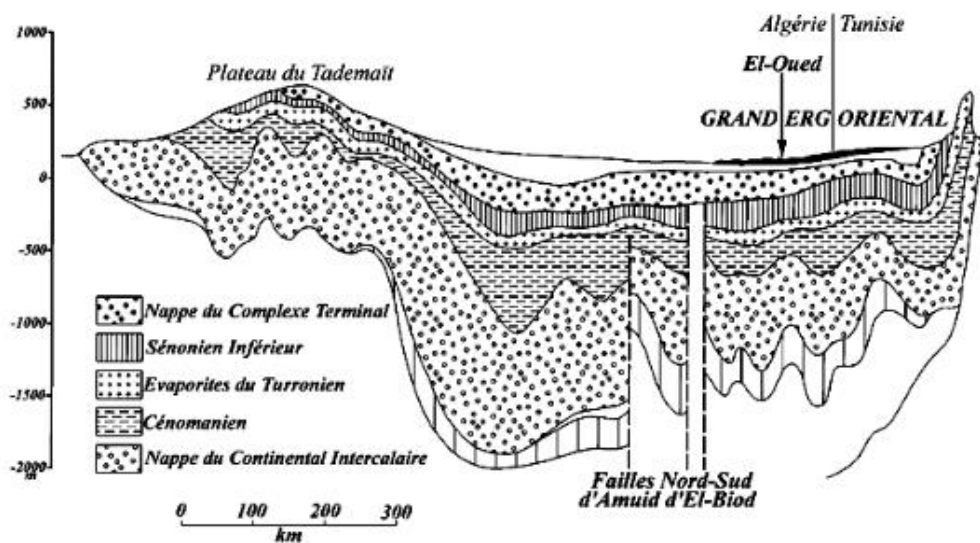


Figure 7 : Carte hydrogéologique du domaine de SASS (Guendouz et al., 1997). La dorsale du Mzab est l'équivalent géologique et géomorphologique du plateau de Tademaït (Hakimi 2021).

On trouve principalement les puits traditionnels dans l'ancienne oasis. Les petites extensions sont caractérisées par une alimentation en eau de la nappe phréatique par des forages allant de 40 à 80 m en moyenne et également la nappe albiens avec des forages de 450 à 1000 m. ces forages profonds sont géré collectivement par des associations des irrigants. Dans les grandes exploitations agricoles, on trouve que les forages albiens profonds qui sont géré individuellement (Figure 8)



Figure 8 : photos représentant les ressources en eau exploitées à Ghardaïa : à gauche un puit traditionnel et adroite un forage albien avec bassin de stockage

VII.4. Production agricole

La région de Ghardaïa a connu un grand essor agricole notamment avec l'introduction de la production des grandes cultures dans la région. Elle présente en 2018 une superficie agricole totale de 1.370.911 ha dont 58.508 ha totalement irriguée représente la superficie agricole utile (Figure10).

C'est une zone à vocation phoenicicole dont le palmier dattier est la principale culture dans la région. Le système agriculture sous étage est le plus dominant où on trouve les trois strates : palmier dattier, arboriculture et cultures maraichères (DSA Ghardaïa, 2021). (Figure 9)



Figure 9 : photos représentant le système de production à Ghardaïa (élevage et système de culture de différents étages : palmier dattier, culture fourragères et maraichères et arboriculture)

En allant vers le sud de Ghardaïa, on trouve les grands périmètres irrigués qui sont dominant par la production céréalière et fourragère. La superficie agricole occupée par les céréales et les cultures fourragères s'est doublé entre 2012 et 2017.

La région représente un bassin laitier très important avec l'élevage bovin qui a compris 4060 tête en 2017 dont 2935 vaches litières (DSA Ghardaïa 2018)

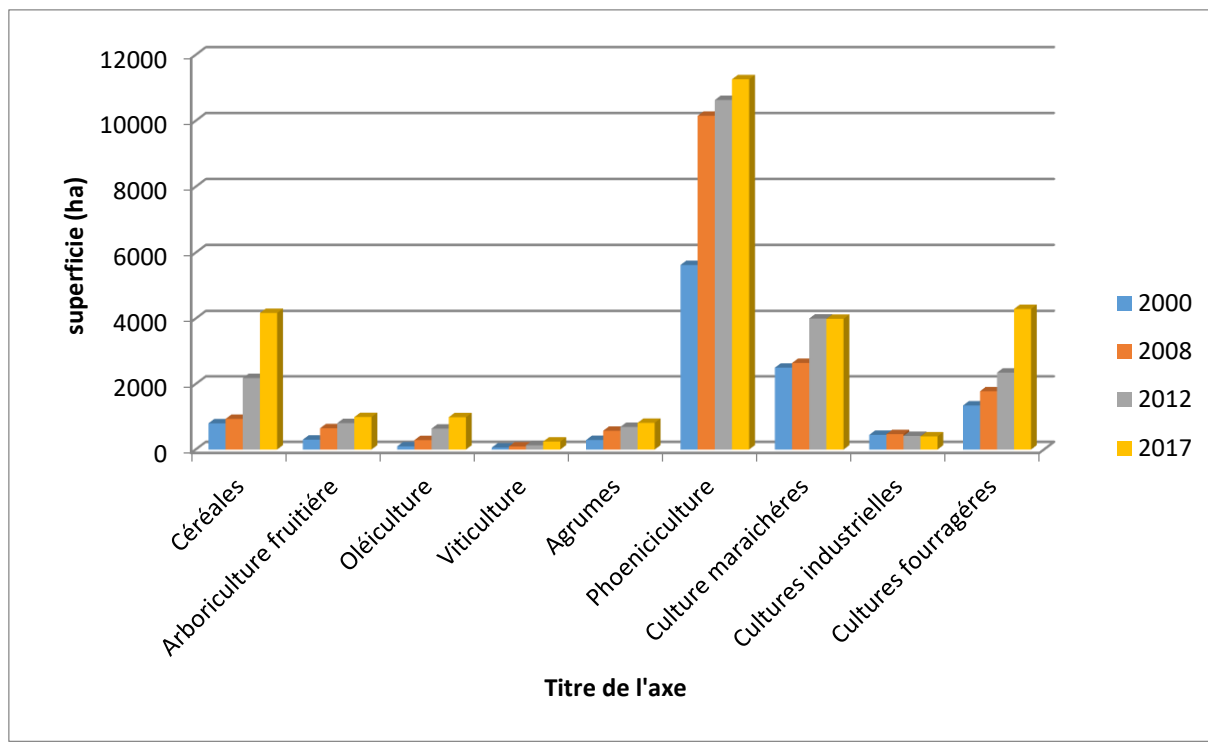


Figure 10 : Evolution de la superficie agricole (ha) par spéculation à Ghardaïa (DSA Ghardaïa, 2018)

VII.5. Démarche de recherche de cette thèse

VII.5.1. Explorer pour mieux comprendre

À la suite d'une recherche documentaire sur l'exploitation des ressources en eau en agriculture dans la région de Ghardaïa, j'ai entamé une phase de terrain à la fin de l'année 2018. Les objectifs de cette enquête étaient d'établir un contact avec les acteurs locaux, notamment les institutions et les agriculteurs. Dans un premier temps, j'ai effectué des visites à l'Office National de l'Assainissement, à la Direction des Ressources en Eau et à la Direction des Services Agricoles. Au cours de ces visites, j'ai pu recueillir des données sur les stations d'épuration de la région (tableau 2) et obtenir une vision d'ensemble des périmètres agricoles en aval de ces stations d'épuration. Un constat initial de ces visites a été l'absence d'une réutilisation formelle des eaux usées traitées dans la région. Les quatre stations d'épuration ont été construites entre 2012 et 2016, dans le but de collecter et de traiter les eaux usées de l'ensemble de la wilaya de Ghardaïa. Les procédés de traitement adoptés sont le lagunage naturel et le lagunage aéré. Ce système a été choisi par la Direction des ressources en eau en raison de son caractère extensif, particulièrement adapté aux conditions du Sahara, où la disponibilité des surfaces, l'ensoleillement abondant et les caractéristiques des eaux usées le rendent optimal. Par ailleurs,

dans cette région, le secteur industriel est peu développé, ce qui signifie que les stations sont principalement conçues pour traiter des eaux usées d'origine domestique.

Tableau 2 : description des 4 stations d'épuration de Ghardaïa (DRE, 2019)

Désignation	Station de traitement des eaux usées			
Wilaya	Ghardaïa			
Nom de STEP	Kef dokhane (Atteuf)	El Djorf (Guerrara)	Oued el bir (Berriane)	El-Menia
Date de mise en service	20/10/2012	01/02/2017	31/12/2015	01/06/2016
Procédé d'épuration	Lagunage naturel	Lagunage aéré	Lagunage aéré	Lagunage naturel
Capacité EQ/Hab.	331700	124812	60600	85484
Volume nominal m ³ /j	46400	13979	6800	33519
Volume réel m ³ /j	20000	6025	2931	5131
Taux de collecte (raccordement à la STEP)%	85	88	80	78
Volume annuel traité hm ³	7,15	2,5	1,87	3,8
Communes raccordées	Ghardaïa, Bounoura, Atteuf	Guerrara	Berriane	Menea, Hassi gara
Impact	Protection de la nappe, lutte contre les MTH et réutilisation en agriculture			

Suite à la collecte de données, j'ai entrepris des visites aux stations de traitement des eaux usées. J'ai eu l'occasion de visiter la Station d'Épuration (STEP) de Kef Eddoukane, située dans le chef-lieu de Ghardaïa, ainsi que la STEP de la région de Berriane, au nord de la ville de Ghardaïa, et enfin la STEP de la région de Guérara, comme illustré sur la figure (figure5). Sur le terrain, j'ai constaté l'absence d'une utilisation officielle des eaux usées traitées pour l'irrigation. Toutefois, les agriculteurs en aval des stations de traitement des eaux de Berriane et de Guerrara pratiquent une irrigation informelle avec ces eaux, notamment pendant les périodes de pointe telles que les mois de juin, juillet et août. Cette pratique a également été confirmée par les institutions locales.



Figure 11: photos représentant les stations d'épuration à Ghardaia

VII.5.2. La réutilisation des eaux usées est-elle importante à Ghardaïa ?

Les visites des exploitations agricoles dans l'ancienne oasis et ses extensions, ainsi que les discussions tenues avec les agriculteurs et les oumanas el sayel (les gestionnaires communautaires des ressources en eau dans l'ancienne oasis), ont mis en lumière la problématique de la pénurie d'eau dans la région (cf. Figure). Cette pénurie a entraîné plusieurs conséquences sur l'agriculture locale, notamment une réduction de la production des cultures maraichères la présence des conflits entre les agriculteurs notamment pour la gestion des forages collectifs.



Figure 12 : photos illustrant les conséquences de la pénurie de l'eau à Ghardaïa

Les échanges avec les institutions, en particulier la Direction des Ressources en Eau, ont révélé qu'une solution potentielle pour atténuer la problématique de la pénurie d'eau dans la région

consiste à réutiliser les eaux usées traitées en agriculture, en créant de nouveaux périmètres irrigués en aval des stations d'épuration en luttant contre la réutilisation des eaux usées brutes (figure13). Cette approche constitue l'un des objectifs principaux de la mise en place de ces stations d'épuration.



Figure 13 : photos illustrant le pompage illicite des eaux usées brutes à partir du collecteur pour l'irrigation dans la région de Guerrara

VII.5.3. Spécificité du terrain de Ghardaïa

Sur le terrain à Ghardaïa, un paradoxe se manifeste avec l'existence de trois systèmes d'assainissement différents à diverses échelles, chacun fonctionnant de manière distincte mais poursuivant un objectif commun : assurer l'assainissement et la réutilisation des eaux usées ainsi que des nutriments pour l'agriculture. Ces systèmes comprennent les toilettes sèches à l'échelle des parcelles, un système d'assainissement à sec ancestral émergeant, permettant le recyclage des déchets humains en tant qu'engrais biologiques pour l'agriculture. Le traitement décentralisé, quant à lui, repose sur un processus naturel à base de plantes aux capacités épuratoires, localisé dans la nouvelle ville de Tafielt. Il est recommandé d'encourager le remplacement des fosses septiques situées à l'intérieur des palmeraies par ce système biologique

durable. Enfin, les stations de traitement des eaux usées collectives représentent la troisième composante de cette diversité de systèmes d'assainissement (figure 14).

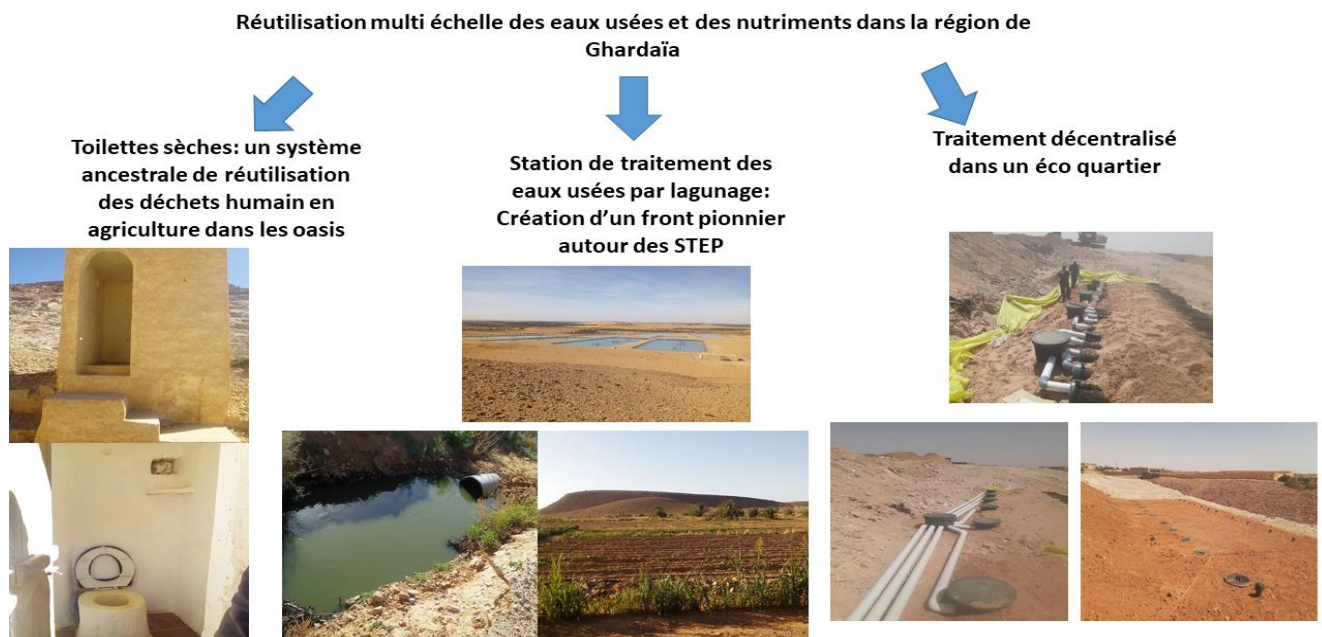


Figure 14 : dispositifs de traitement et de réutilisation des eaux usées et des nutriments à différentes échelles à Ghardaïa

VII.6. Cadre d'analyse

Nous avons établi dans cette thèse un cadre d'analyse pluridisciplinaire pour étudier la valorisation des eaux usées et des nutriments en agriculture à Ghardaïa. Ceci en tenant compte en premier lieu : la spécificité de la région d'étude (les villes du M'zab), et en deuxième lieu : la gestion des ressources naturelles dans ce contexte. On a vu d'après nos investigations sur le terrain que la communauté mozabite est une communauté basée sur le principe de sobriété et l'exploitation rationnelle de toutes ses ressources notamment en ce qui concerne les ressources en eau. En effet, ils ont mis en place tout un système hydraulique pour assurer l'approvisionnement en eau durant des longues périodes de Sécheresse. En troisième lieu, suivre l'évolution historique de réutilisation des eaux usées et des nutriments dans la région en passant des toilettes sèches : un système de valorisation de la matière fécale en agriculture, arrivant vers les stations de traitement des eaux usées.

Deux axes sont pris comme questions de recherche dans cette thèse :

Axe 1 : Etude de la place des toilettes sèches dans les oasis du M'zab : Valorisation des nutriments à échelle de l'exploitation agricole.

Lors des visites exploratoires à Ghardaïa en 2019, notamment dans les anciennes oasis des M'zab et ses extensions, notamment à Ben Isguen, la présence de constructions de toilettes sèches a été observée à la fois à l'intérieur des maisons secondaires de l'oasis et dans les ruelles extérieures. Les acteurs locaux expliquent que ces installations sont utilisées pour produire de l'engrais agricole à partir du compostage des matières fécales humaines. Le concept des toilettes sèches n'a jamais été traité dans les études antérieures, bien qu'il existe depuis des siècles. À l'exception de quelques mentions dans des ouvrages tels que Didillion et al. (1977) et Benyoucef (2010), qui en donnent une brève description sur ce système.

Ayant constaté le transfert de ce savoir-faire vers les nouvelles extensions oasiennes, une étude approfondie de ce système a été entreprise. À cet effet, un guide d'entretien a été élaboré pour : 1/ explorer l'origine historique de ces systèmes dans la région ; 2/ examiner le rôle de ces toilettes sèches dans la production agricole ; 3/ analyser le processus de leur transfert vers les extensions. De plus, une discussion sur la durabilité de ces systèmes après l'introduction de l'assainissement collectif a été menée. Afin de recueillir une perspective globale sur les toilettes sèches, le guide d'entretien a été appliqué dans différentes oasis de M'zab, notamment à Ben Isguen, El Atteuf, Guerrara et Berriane. Des entretiens ont été menés avec des agriculteurs, des représentants institutionnels et de la société civile (associations, guides touristiques), en mettant systématiquement en relation ces systèmes avec l'assainissement collectif et la réutilisation des eaux usées traitées.

Axe 2 : Diagnostique des périmètres agricoles en aval des stations de traitement des eaux usées : Réutilisation des eaux usées traitées et des nutriments à une échelle centralisée

Les investigations sur le terrain nous ont amenés à sélectionner un nouveau périmètre agricole situé en aval d'une station de traitement des eaux usées par lagunage aéré dans la région de Berriane, au nord du chef-lieu de la wilaya de Ghardaïa (cf. figure). Ce périmètre, d'une superficie de 300 hectares, a été spécifiquement désigné pour être irrigué par les eaux usées traitées. Les agriculteurs ont procédé à des installations opportunistes afin de bénéficier de l'irrigation avec les eaux usées brutes avant la mise en service de la station de traitement. Toutefois, même après la mise en service de la station, l'irrigation avec les eaux usées n'est pas autorisée à ce jour. Par conséquent, les agriculteurs ont entrepris des forages individuels. Ce site représente un cas d'étude idéal pour une recherche scientifique sur deux aspects.

Volet 1 : Analyse d'un front pionnier en lien avec la réutilisation des eaux usées.

En définition un front pionnier est La notion de frontière a été popularisée pour mettre en évidence l'importance du processus d'expansion vers l'ouest aux États-Unis (**Mikesell 1960**). Cette expansion est expliquée par la colonisation de nouveaux territoires vierges. En agriculture, une « frontière pionnière » désigne l'occupation de nouveaux territoires, auparavant inexploités, dans le but d'étendre l'agriculture productive (**Trottier & Perrier 2018**).

Ce cas d'étude représente un nouveau front pionnier agricole qui se base sur 3 composantes qui sont la disponibilité des eaux usées, la terre agricole et les eaux souterraine. Ce cas d'étude nous permet également d'étudier les facteurs sociaux et hydrauliques qui peuvent impacter la durabilité de ce front pionnier. Ces facteurs sont représentés par le rôle et place des institutionnels dans la gestion des périmètres de rivières dans la région. Pour analyser ce front pionnier, nous adoptons une méthodologie qui repose sur une revue de la littérature en amont afin d'obtenir une description du périmètre agricole (superficie, nombre d'agriculteurs, les données sur la station de traitement), des visites sur le terrain et des entretiens avec les parties prenantes notamment les agriculteurs et les institutionnels à savoir l'office nationale d'assainissement, la direction des ressources en eau, les services agricoles ...etc. L'objectif de l'enquête était de déterminer les opinions et positions des différentes institutions concernant la réutilisation des eaux usées dans la région.

Volet 2 : Etudier l'impact des eaux usées sur les ressources en eau souterraine

L'objectif du présent chapitre est d'étudier l'impact qualitatif des eaux usées sur les ressources en eaux de surface et souterraines par une infiltration possible des eaux usées traitées. Ceci va mener à conclure si on est dans cas de réutilisation indirecte des eaux usées ce qui questionne la fiabilité d'interdire de l'irrigation directe avec les eaux usées au cas de présence de connexion eaux usées, eaux de nappe

Cette étude est basée sur des méthodes de caractérisation hydrogéochimique, bactériologique, isotopique et les polluants émergent (les traces des médicaments dans l'eau des forages) des eaux usées de la station d'épuration à Berriane et des eaux de la nappe phréatique en aval de la STEP. Pour avoir un suivi régulier de la qualité d'eau, on a effectué des mesures 3 ans. On a pris un échantillon de 9 forages d'une profondeur qui varie de 50 à 80 m qui se trouve en aval de la station de traitement des eaux usées. On a pris en considération la distance des forages par rapport au rejet pour voir s'il un effet de distance sur la contamination des eaux souterraines par les eaux usées. Cette démarche peut donner un aperçu sur le rendement de la STEP et la

qualité des eaux usées traitées et également sur la durabilité de ce périmètre irrigué d'un point de vu contamination de la nappe et impact sur la santé humaine.

Plan de la thèse :

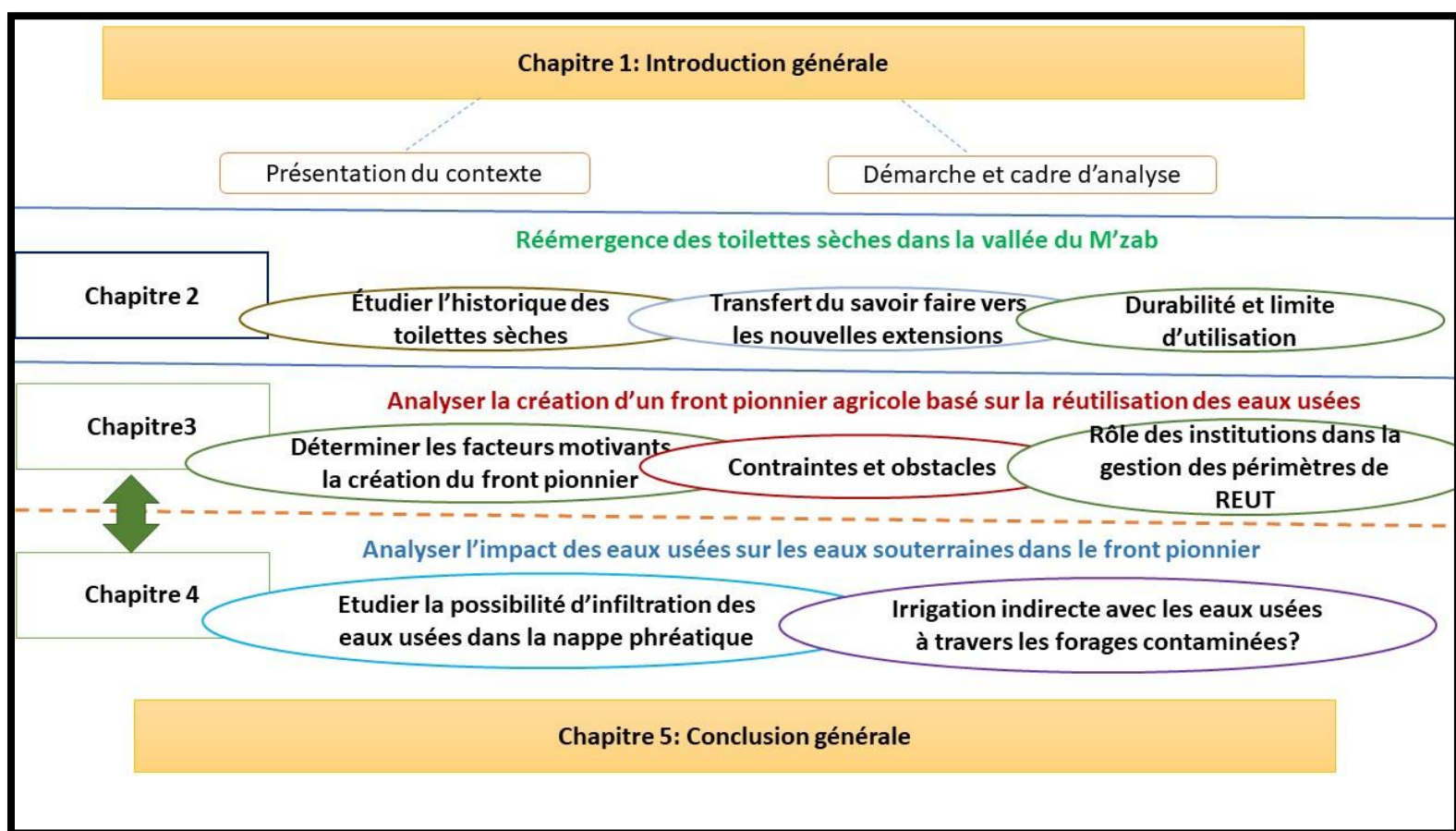


Figure 15 : Schéma du plan de la thèse avec les objectifs de chaque chapitre

La thèse est structurée en chapitres d'articles, dont deux ont déjà été publiés et le troisième est en cours d'élaboration. En plus des chapitres d'introduction générale et de conclusion générale.

- **Chapitre 1** : Introduction, Contexte, Problématique, Objectifs et Méthodologie de recherche.
- **Chapitre 2** : Réémergence des toilettes sèches et réutilisation des nutriments fécaux dans les villes du M'zab. C'est un chapitre publié sous format d'article de recherche en 2021
- **Chapitre 3** : Création d'un front pionnier basé sur la réutilisation des eaux usées dans le Sahara algérien : cas d'un périmètre irrigué à Ghardaïa. Il est publié sous format article de recherche en 2024

- **Chapitre 4** : Projet d'article en cours traitant de la problématique de l'impact de la nappe phréatique par l'infiltration des eaux usées.

- **Chapitre 5** : Conclusion générale comprenant un résumé des principaux résultats obtenus et les perspectives de la thèse.

Chapitre 2

Réémergence des toilettes sèches et réutilisation des nutriments fécaux dans les villes du M'zab

Ce chapitre a été publié sous forme d'article dans la revue : **Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development**

Re-emergence of dry toilets and fecal nutrient reuse in M'zab cities, Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development Vol 11 No 6, 983 doi: 10.2166/washdev.2021.115. Sara Bekaddour , Nassim Ait-Mouheb ,and Tarik Hartani.

Chapitre 2: Re-emergence of dry toilets and fecal nutrient reuse in M'zab cities

PREAMBULE

Ce chapitre analyse pour la première fois en Algérie, la question de la réutilisation de la matière fécale humaine compostée comme amendements agricole dans les zones arides notamment dans la vallée du M'zab dans la région de Ghardaïa. L'utilisation des excréments humains en agriculture est une pratique ancestrale et très courante dans plusieurs milieux ruraux dans le monde. Ceci se fait à travers la séparation à la source en utilisant les toilettes sèches « latrines à fosse ». Dans la vallée du M'zab à Ghardaïa, les toilettes sèches existent depuis le 11ème siècle. La raison qui nous amène à donner l'intérêt à ce type de système est son importance socio culturelle dans la région. Il servait tout d'abord comme un moyen d'économiser la consommation en eau. Il permettait également la protection de l'environnement oasien contre la pollution. Et enfin, elles assurent une source d'engrais riches en nutriments pour l'agriculture. Dans ce Chapitre article, on a traité la question d'un renouveau des toilettes sèches et de réutilisation des nutriments dans la région. Ceci à travers 3 partie. La première, un aperçu historique sur les toilettes sèches et la réutilisation du compost issu de ces dernières en décrivant les types des toilettes sèches, les méthodes de collecte des déchets humains de ces toilettes, la commercialisation du compost. La deuxième partie, on parle du déclin au recours à ces types des toilettes et également l'abandon de la réutilisation du compost humain. Ceci est venu en parallèle avec l'apparition des eaux profondes « l'exploitation de la nappe albienne » et ses conséquences sur l'oasis. La 3ème section est la réémergence de ces toilettes sèches à nouveau dans l'oasis et le transfert de ce savoir-faire vers les extensions oasiennes en faisant le lien avec la conséquence sur l'environnement en mettant en discussion la durabilité de ces systèmes face à la modernisation.

ABSTRACT

In the M'zab valley, dry toilets represent an ancestral dry sanitation system, serving as a source of fertilizer thanks to human excrement valorization. However, in the 20th century, local populations began to shun these systems. The objective of this article is to illustrate the importance of dry toilets on agricultural and environmental scales in ancient M'Zab, and the renewal of these systems in response to sanitation problems in the oasis after their decline. The hypothesis put forward is that dry toilets can act as a complementary system to conventional sanitation systems. Data were collected through interviews with the local population. Our results show that the use of dry toilets, and the resulting use of human excrement as fertilizer, has gone through three phases. First, a phase of strong recycling dynamics, followed by a second phase of decline in dry toilet use which is linked to the discovery of the Albian aquifer and flush toilet adoption. The third phase is characterized by dry toilet reuse in response to oasis degradation caused by sanitation and environmental problems. Some oasesians have taken the initiative to revert to dry toilets to ensure oasis system sustainability and to revive the practice of recycling human waste.

Key words: arid regions, dry toilets, human excreta, oasis, recycling, water and nutrient cycles

1. INTRODUCTION

In developing countries characterized by poor soil conditions and scarce water resources, human excreta used as fertilizer can address two problems: low food productivity and a lack of sanitation services (Sugihara 2020). Dry sanitation enables the treatment and recycling of excreta, i.e., to dispose of human urine and feces without water use (Peasy 2000). One of the most popular types of low-cost, on-site, dry sanitation systems is pit latrines (Peasy 2000). Pit latrines are common in rural and peri-urban areas in developing countries. They are considered as a closed-loop sustainable ecological sanitation 22% of the total global demand for phosphorus (Mihelcic et al. 2011). The use of human excreta to fertilize agricultural land can reduce the need for artificial fertilizers and would improve human excreta disposal efficiency through the use of composting toilet systems (Sugihara 2020).

In the M'zab valley, an Algerian Saharan region characterized by strong agricultural and social dynamics, dry toilets demonstrate the inhabitants' adaptation to water scarcity, while also providing a source of profitable organic fertilizer and ecological balance in a growing urban environment. Some authors have indeed mentioned these toilets in their books such as Didillon et al. (1977) and Benyoucef (2010). They gave a brief description of the model of dry toilet

used in the M'Zab valley. Despite the environmental, agricultural and economic role of these systems in the M'zab, no previous studies had been conducted on them.

In this paper, we will discuss the history of dry toilets and the reintroduction of this process. Our hypothesis is that the reintroduction of small-scale human waste recycling could help revitalize societies in the M'zab valley oases, and even beyond.

We put forward the idea that a model, which is respectful of the Saharan environment and economical in terms of water and financial resources, can be part of a future decentralized public policy designed to modernize the sanitation sub-sector in Algeria. This model could provide an alternative or complementary system to conventional human waste treatment.

2. MATERIALS AND METHODS

1.1. Study area

The M'zab valley is located in the northern Ghardaia region, which is located in the northern part of the Algerian Sahara. It is located south of the capital of Algeria (600 km) and occupies an area of 86,560 km² (Hamdani et al. 2012) (Figure 1). A population census from 1896 to 1966 shows that the population of the M'zab valley increased from 18,892 to 46,530 with a coefficient of variation equal to 2.46 (Josse 1970). Between 1966 and 2008, the population of the pentapolis almost multiplied by 3, with a variation rate of 1.13% per year (Maachou 2013). During the period 2008–2018, the population of the M'zab reached 196,019 inhabitants with an average annual growth rate varying between 2.14 and 3.58 (DSA 2021). In the 11th century, five towns called 'ksour' grew around the M'zab river (from upstream to downstream: Ghardaïa, Melika, Béni Isguen, Bounoura and El Atteuf), along with six dams and five palm groves (Cote 2002). Outside the valley, two other 'ksour' towns were founded in the 17th century: Guerrara in 1631, which is located north-east of the M'Zab valley, on the course of the Zegrir river, and Berriane in 1679 located 48 km north of the Sudan river (Didillion et al. 1977).

interviews we conducted, there are three former artisans who worked in the cleaning of dry toilets and in the marketing of human waste. The survey that was applied to all the actors in this study was designed to determine: the history of latrines and human waste

recycling; the means and methods of cleaning and emptying latrines; the collection and use of human waste in agriculture; the benefits of using human manure in agriculture; the crops most often fertilized with this manure; the problems associated with the transition from dry toilets to flush toilets; and finally the reasons for the return to dry toilets, and whether dry toilets could offer an alternative system to conventional sanitation systems in the future.

The questions asked to the actors during the interview sessions are listed in Table 1.

Table 1: Examples of questions to the actors in Ghardaia, 2019

actors	Number	Example of questions
Farmers	22	<ul style="list-style-type: none"> • how do you prepare human manure? • what is the difference between human manure and animal manure? which is better according to your experience? why?
The artisans (former dry toilet cleaning specialists)	3	<ul style="list-style-type: none"> • why did you choose to become a dry toilet cleaner? • what was the cleaning process for these dry toilets? at which cost?
associations and civil society	15	<ul style="list-style-type: none"> • What is the history of dry toilets in the M'Zab region? • why did the forefathers choose this sanitation concept? and what are its advantages and disadvantages • why was there a decline in the use of dry toilets? what were the consequences of this decline

2. RESULTS

2.1. Umbilical cord linking the domestic habitat and dry toilets in the M'zab

2.1.1. Ancient dynamics around dry toilets

In this section, through a chronological approach, we will attempt to shed some light on the importance of dry toilets in the ancient M'zab, by first describing them, and then by determining the processes involved in the cleaning, recycling and recovery of human waste from these toilets for use in agriculture.

Figure 2 is a timeline that was established after interviews with local actors (farmers, dignitaries, and tourist guides). It illustrates changes in the use of dry toilets by the local population. The reason for these changes can be summarized as the discovery of the deep groundwater (after 1950), its subsequent exploitation and its impact on the oasis environment.

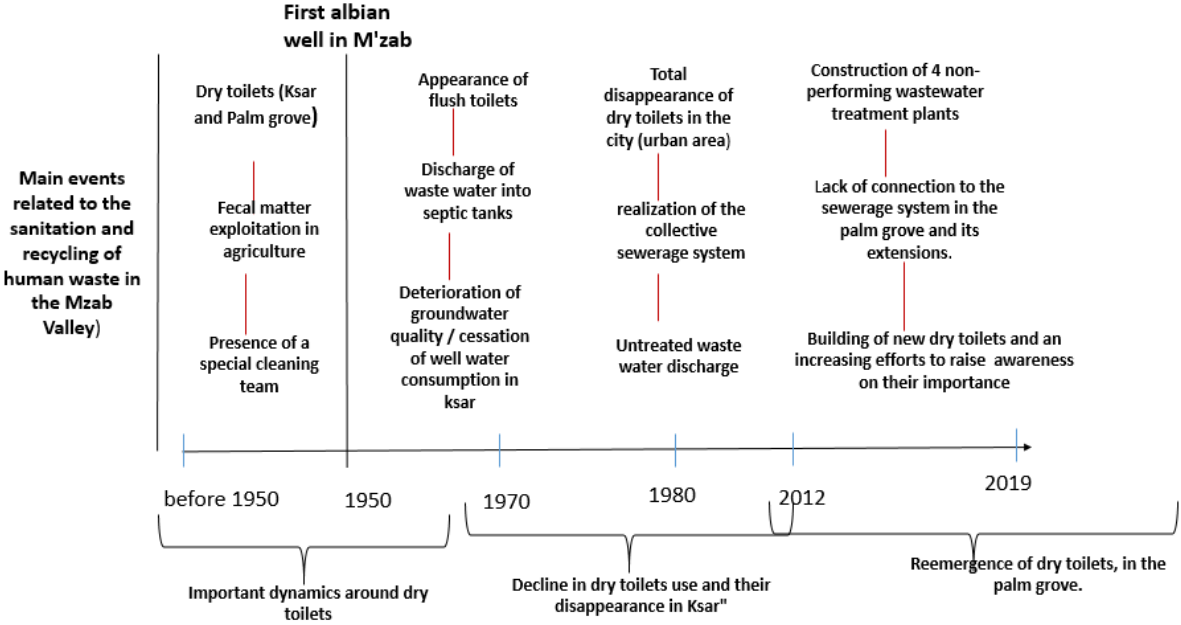


Figure 2: Chronology of the different phases of dry toilet use (according to interviews with the local population)

The availability of water offered the local population a level of comfort that has allowed them to gradually abandon dry toilets. These have been replaced by flush toilets, without any consideration of the long-term impacts on the oasis health (1970 to today).

In the M’Zab, dry toilets have been an integral part of the design and construction of Mozabite houses, which are called Ajmi or Goma (in the Berber language) since the foundation of the Mozabite cities and up to 1950, as shown in Figure 2.

Given its availability in the region, local stone is widely used in house construction, where it is the only material used for building walls, as it can withstand the compressive forces to which it is exposed (Adad 2008). Generally, the latrines are 1.8–2 m high; the slit leading to the pit, which acts as a fecal storage tank, is 60 cm long and the pit is nearly 1 m² (Figure 3).

The town planning rules defined by the local population, who belong to the Mozabite ethnic group, require that the width of the rooms in the house should not exceed 2 m and the height of the ceilings should not exceed 2.30 m (Didillion et al. 1977).



Figure 3: dry toilets architecture in the M'zab valley

There are private and public dry toilets in the region, of which there are more than 20 public and private dry toilets in the Beni Isguen palm grove.

- Private: in each house in the ksar, and in the secondary house located in the palm grove, there was (to this day) a dry toilet for each family. Figure 4(b) shows the dry toilets that exist in the heart of the Beni Isguen palm grove and other oases of the M'zab which are located in the secondary houses of the inhabitants. We counted 12 private dry toilets but there are more in the region.

- Public: they are located along the palm grove. Eight dry toilets were counted. They are built for collective use, i.e., anyone passing through the palm grove can use them. For example, the laborers of the palm grove can use these dry toilets. They have a double role: to preserve the palm grove by keeping it clean and to ensure the collection and use of a certain quantity of human manure as an organic soil improver. There are also public dry toilets next to the mosques for people who come to pray (Figure 4(a)).

The old dry toilets are mainly public ones built within the oasis. In addition, the new dry toilets are private built either by farmers on their farms or by owners of local tourist lodges. In the M'zab community, water plays an important role in the oasis context. It is a symbol of life, purity and blessing. Its scarcity has forced local populations to seek the most rational and ingenious ways of ensuring optimal management of this resource (Benyoucef 2010). As a result, dry toilets are used to minimize water consumption. Indeed, dry toilets used to be the only sanitation system in urban areas locally known as 'ksour' (fortified town) and in rural areas in 'the palm grove'. According to a former artisan collecting human waste from dry toilets, and

other farmers and local actors, recycling human waste for agricultural purposes was an ancient and common local practice since the foundation of the cities (Figure 2).



Figure 4: private and public dry toilets in M'zab Valley (a: private; b public)

As indicated by several of the people interviewed, the situation in the past was simple: gray water was collected in buckets, and then they carried it to the pits near the river that ran by the agricultural plots so that the trees could draw this water. As there were no detergents, this water could not do any damage to the trees. In addition, the washing of clothes was done on weekends in the oases where the used water was poured into the palm tree basins.

In urban agglomerations, dry toilet cleaning is traditionally carried out each year during the summer period, and at night. During this period, because of the great heat, the inhabitants prefer to live in their secondary houses in the palm grove. According to three former specialists in dry toilet cleaning: ‘the collection of human waste was done at night so as not to

disturb the inhabitants of the town'. The cleaning was carried out on a chain work basis by three to four workers. Each worker was responsible for a specific task: two people took turns to clean the pit, the third person was positioned at the pit exit to remove the waste matter and the fourth person was in charge of transporting this material to the palm grove (Figure 1). Money was one of the reasons given by the specialist workers for choosing this trade. However, as two former specialist workers say, 'it is a very difficult job that comes with mortal risks. When you are in a pit, and once you start to empty it, there are gas emissions; so you can't breathe, and you have to get out of the pit and breathe in fresh air to cope with the situation'. For this reason, it was mandatory to have two people in the pit to be able to take it in turns. In addition to paying the cleaning costs, offering a meal and a shower, it was customary for the owner of the house to offer perfume and soap to the workers because the people exercising this profession were mostly poor, according to interviews with local actors.

The management and commercialization of human manure, according to several farmers and local actors, can be done directly or indirectly. In the first case, the owner himself reuses the human waste collected from his house for his own farming purposes. In this case, he pays for the costs of cleaning and of transporting the waste to his farm. In the second case, the owner of the house did not need the manure, so he let the specialized workers manage the waste and sell it on to farmers. The owner linked the cost of selling the product to the price of cleaning by paying the specialized workers half the cost of cleaning and the other half in the form of human manure. The specialized workers sold it to supplement their income. There was a contract between the owner, the seller and the farmer for the collection of a certain amount of this manure. The intermediary buys the human waste from the owners and sells it to the farmers who ordered it. In this case, the specialist pit cleaners would only benefit from the cleaning costs.

2.1.2. Advantages

The dry toilet made it possible to collect human waste at a single, well-defined place, thus avoiding the dispersion of this waste into the environment and the resulting spread of diseases. Also, it was much more advantageous for the inhabitants who did not need to deal with the problem of sewage disposal, especially in urban agglomerations where the quantities of human waste were significant. In the past, this practice helped the water table protection, which is between 10 and 50 m deep depending on rainfall (Bouchair 2004), from domestic wastewater-related pollution. According to the local actors, what is much more problematic is the

installation of a wastewater treatment system requiring heavy investments, and even more so when it is ill-conceived and thus inefficient. They also added that the local context should have been studied more before implementing such a system. The hydro-chemical assessment of groundwater quality reveals excessive salinity (0.647 S·m⁻¹) due to discharge of untreated industrial wastewater in the M'zab valley, and specifically in the oasis of el Atteuf, which is located downstream of the valley (Baba Amer et al. 2016). These waters are also unsuitable for domestic consumption and sometimes even for irrigation because of their excessive salinity (Baba Amer et al. 2016). Local farmers also stated that 'human fertilizer is the best because humans are omnivorous and eat a lot of good quality, nutrient-rich food. In addition, it also prevents weeds from growing, which saves on weeding costs.' Human waste has the advantage of being inexpensive, as it offers savings in manure, transport and labor costs. It is also organic and available all year round, which ensures good yields. On the other hand, cattle manure or poultry manure is expensive as it has to be imported from other regions outside Ghardaia, and this means high transport costs.

2.2. Decline of dry toilets after the emergence of deep wells

The results of the interviews with all actors reveal that the transition from a circular system, based on the recycling of human waste in agricultural production, to a linear 'all-sewer' system is the result of a rational evolution. This trend was mainly due to population growth and the exploitation of wells in the Albian aquifer varying from 250 to 1,000 m in depth. It should be noted that the population in the M'zab valley increased from 18,000 in 1986 to 135,000 in 2002 (Cote 2002), and it was estimated to be 196,019 inhabitants in 2018. According to Abdellah Haba Aina, an agro-ecologist and former member of the local association for the environment protection of Beni Isguen, 'Before 1985, the only water supply source was the subsurface aquifer and the flood waters that enabled the recharge of the artificial water table.' Water was scarce and used to satisfy basic needs, which meant that dry toilets were mainly perceived as a way to save water rather than as a way of soil improvement.

In the M'zab valley, the palm grove was irrigated with water from the subsurface aquifer, contained in the Mio-Pliocene formations, which was fed by the rains and periodically raised by the infero-flow of the river (Josse 1970). However, the discovery of the Albian aquifer in the late 1930s (the first Albian borehole was drilled between 1937 and 1938) and the development of a modern hydraulic infrastructure resulted in significant economic and social transformations (Josse 1970). These transformations, which are confirmed

by the actors concerned by this study, reveal that the local population started to use water in abundance, and from the 1970s running water made its presence felt in almost all Mozabite houses, according to the statements of the inhabitants. These ‘modern wells’ provide considerable quantities of water compared to the modest volumes of the old Khetaras (traditional wells): without them, any urban growth would have been impossible (Josse 1970). However, the exploitation of the deep aquifer has a destabilizing effect and has undermined social water practices and cultures by causing ecological and environmental upheavals due to the difficulties involved in disposing of the enormous quantities of wastewater (Bensaad 2011).

According to local actors (farmers, environmental associations and tourist guides), this high water use is associated with hydraulic system modernization and the resulting use of flush toilets. This led the local population to abandon dry toilets in the M’zab valley. Subsequently, wastewater was disposed of in septic tanks or discharged into wells providing the local population’s drinking water. Dry toilets disappeared from the ‘ksour’ of the M’zab in the 1980s, except for those in the ancient palm grove of Beni Isguen, which still exist. However, the dynamics that used to govern recycling have all but disappeared in view of the small quantities of dry matter now available, and due to the emergence of chemical fertilizers in agriculture. As a result, high quantities of wastewater were discharged into the environment without any treatment prior to the construction of a collective sewerage system.

In the 2000s, according to the local Water Resources Administration, the state launched the study of a project to build the El Atteuf wastewater treatment plant, which was designed to receive all the wastewater from the valley. However, the old palm groves and their extensions within the Mzab valley are not connected to the collective sewerage system and that is why wastewater is disposed of in septic tanks. In Beni Isguen, the multiplication of tourist lodgings has amplified the use of non-standard septic tanks. The latter are septic tanks made in an artisanal way by the owners of the houses located in the palm groves, without any proper study. The wastewater collected in these tanks infiltrates into the water table. Concerning the sludge, it is collected and rejected in the public dumps.

2.3. Dry toilets in Beni Isguen: a revival or just a survival?

Despite the introduction of flush toilets, and in the absence of a collective sewage evacuation system in the palm grove, some farmers and local actors in the town of Beni Isguen have built new latrines in their farms. These initiatives aim to exploit human manure and to protect the oasis from pollution, namely pollution of the water table because the palm grove and its

extensions are not connected to the collective sanitation system. This situation has led to a multiplication of septic tanks in the heart of the palm grove. These septic tanks are built in an artisanal way. We put forward the hypothesis that the resulting re-emergence of dry toilets will play an important role in minimizing the quantities of domestic wastewater discharged. According to some members of the local community, i.e., ‘the notables of the region’, houses are built in the palm grove without planning permission, which has led to an increase in the number of septic tanks due to the absence of a sanitation network. It is worth noting that these notables are equally against the construction of a collective sanitation network in the palm grove. Their main argument for this refusal is: ‘the installation of a sewerage network will encourage people to build houses in the palm grove, which will degrade the palm grove because each new house means the removal of several palm trees. Moreover, there is a fear that flood waters might burst the sewerage pipes, and consequently, cause environmental damage’.

The local notables and Water Monetaries Omanas El Ma are the wise men of the region. They are in charge of managing the sharing of floodwaters among farmers according to rules drawn up by the community. They have taken several initiatives to raise the awareness of young farmers, and farmers operating in the extensions of the palm grove of Beni Isguen, about the Importance of dry toilets in rural and oasis environments (Figure 5). They have decided to take part in this awareness campaign because of their great influence on the local population who take into account the opinions of these wise people. There are farmers who have built new private dry toilets on their farms, and there are more under construction, which will result in 10 new dry toilets.



Figure 5: New dry toilets in Beni Isguen (2019)

A farmer in 'Ntissa' (an extension of the Beni Isguen palm grove) offers a concrete example of dry toilet usage and human excreta recycling. He owns 2 ha of farmland which is mainly taken up by date palms, fruit trees and horticultural crops. He only has accessed a subsurface aquifer for irrigation. He revived the use of dry toilets as a system that provides natural and organic fertilizer. He illustrates the modern example of a farmer who practices 100% organic farming based on the combination of small livestock and agriculture. As shown in Figure 6, he uses sawdust instead of sand as a drying agent in its latrine, and its pit design is different from the traditional ones shown in the previous figures. This farmer stated that the use of human manure is just one of several agro-ecological practices (manual weeding, use of mulching to avoid herbicides, crop rotation) he uses on his farm. He fertilizes using a compost made of animal manure (sheep, goat and poultry), plant debris and human manure. For the latter, he built a dry toilet in his garden and encourages visitors to use it. He then dries the waste using the sawdust, which also eliminates bad odors (Figure 6).



Figure 6: example of dry toilet use and recycled human excreta (May, 2019) (a,b: cultivation system, c,d: dry toilet and sawdust; e,f: compost

For the preparation of manure, he adopts anaerobic composting by digging a 1 m deep pit in the soil. Then he mixes human, animal and vegetable waste from his garden, adding lime to speed up the fermentation process, and he dampens this mix with water. Finally, he covers the mixture with plastic and lets it sit for 6–12 months (Figure 6). In addition to compost, he buys

bovine manure for fertilization. According to the farmer, who has a long experience in agriculture, the compost is a good fertilizer that is: easy to apply, reduces odors, improves soil structure and even if used in large quantities does not adversely affect the plant. Generally, human excrement is mixed inside the toilet with either soil or sand in order to dry it. However, some farmers use sawdust and ashes to eliminate bad odors and to dry the human excrement. According to the statements of those surveyed, the local inhabitants have two ways of using human waste as manure in agriculture. It is either used directly, after drying in a dedicated area of the farm for 20 days to a month, given the high temperatures in the region and the aridity of the area (Jenkins 2019). It is used to fertilize the land, especially for vegetable crops. Otherwise, anaerobic composting is performed for a period between 3 and 6 months or even up to a year during which the matter is mixed in with plant debris (leaves and tree trunks).

3. DISCUSSION

In the M'zab valley, dry toilets were a precious commodity in the Mozabites way of life. There, for centuries, they have helped to ensure an agricultural and ecological balance. They allow the optimization of human waste in agriculture, the protection of the population against diseases, as well as the protection of the environment and the aquifer from pollution. Thanks to the circular system offered by dry toilets, the inhabitants of the M'zab valley were able to avail of organic, low-cost, and locally produced manure to fertilize their agricultural plots and obtain higher yields. Dry toilets also have the advantage of allowing direct valorization of human waste after composting, without having to dry the material, thereby providing an organic fertilizer for agriculture (Koanda et al. 2015). A study was carried out in Ghana to determine the importance of human waste on soil fertility and agricultural production showed that human manure improved soil fertility and increased sorghum and maize yields (Cofie et al. 2005). 8.2 kg of nitrogen, 1.1 kg of phosphorus, 2.2 kg of potassium and 21.3 kg of carbon were found in 1 m³ of human manure (Cofie et al. 2005). Although human excreta have proven their potential as a source of nutrients for plants, they are still treated as waste to be disposed of by sewage treatment plants. The standards that sewage treatment plants must meet regarding the removal of nitrogen and phosphorous are increasingly demanding, which means higher energy and chemical needs (Spangberg et al. 2014). Therefore, the recycling of human waste can be considered as an alternative to wastewater treatment plants (Spangberg et al. 2014). They can offer an alternative small-scale system, i.e., instead of investing in the extension of collective networks, decentralized systems such as dry toilets could be installed in rural areas. For example, in the old oasis of Beni Isguen and its extensions, the sewerage network does not

reach this remote location, and the inhabitants have resorted to the use of artisanal septic tanks, especially the tourist lodgings which are numerous in the region. In some cases, effluent discharged from the septic tank contains pollutants that could have adverse effects on public health and the environment (Ninsiima 2019).

Nevertheless, if fecal material is used without composting, it can cause problems such as pathogens and heavy metals (Moya et al. 2019). Anaerobic composting is a very popular traditional method for the composting of feces and waste, as it offers many advantages. It protects the compost from adverse climatic conditions, minimizes nutrient losses caused by wind and high heat, and reduces the discomfort caused by flies (Nagy et al. 2019). In our case, people practice anaerobic composting because it eliminates odors while offering good easy-to-apply fertilizer that improves soil structure. Anaerobic composting can help balance the relationship between carbon and nitrogen when there is excess nitrogen (Heinonen- Tanski & Wijk-Sijbesma 2005). However, the introduction of human excreta management into the agricultural and food systems means paying particular attention to several aspects. These aspects are primarily: health security, soil protection, and the quality of nutrients provided by human excreta (Harder et al. 2020). In our case study, according to the ‘agricultural statistics service of the Ghardaia region’, the available agricultural area of the region has increased from 3,146 ha in 1984 to 58,508 ha in 2018. This makes the sustainability of dry toilets questionable, given that the small quantities of fertilizers currently provided by these toilets when compared to the fertilizer requirements of the cultivated areas. Nevertheless, the notables of the region, and the local oasis protection associations, want to revive this practice in rural areas, on a small scale, to protect the oasis and ensure the reestablishment of ancestral practices that are based on recycling. This effort to revive these ancestral systems comes after their almost total abandonment by the local population due to the arrival of modernization and to the abundance of available water thanks to the exploitation of the Albian aquifer. The decline in the use of dry toilets has led the local population to become more innovative in the field of waste treatment and they are considering the implementation of environmentally friendly treatment systems. Indeed, in Beni Isguen, they have three sanitation systems: conventional treatment by wastewater treatment plants, dry toilets in the palm grove and a decentralized system to treat wastewater using natural processes based on water filtering vegetation. Each system has its advantages and drawbacks.

The association of the three sanitation systems could be considered positive for the development of the oases, but there is a lack of expertise and adequate system monitoring to successfully

operate all three systems at once. In Beni Isguen, all these systems currently exist. If these three systems, and their potential association, were given greater consideration, it would help to ensure the protection of the existing oasis environment and to extend these oases, thereby improving agricultural production in the region. However, the acceptability of dry toilets by the younger generations, who became accustomed to flush toilets, is the main obstacle that could hinder their appropriation and development by future generations. Real dialog between the local population and the institutions must be fostered to ensure the development of a sanitation system that is adapted to the local context. What the local actors demand is the right to participate in discussions and to be able to offer their opinions on this kind of project. Unfortunately, especially in isolated oases, there is a lack of knowledge and support for the development of this type of system. In some countries (such as the United Kingdom, Sweden, Australia and the United States), specific certification processes or insurance systems have been developed for these dry toilet and fertilizer solutions, which have improved public perception of biosolids (Moya et al. 2019). The development of such a certification process could provide guarantees on the conformity of fertilizers produced from human excreta (Moya et al. 2019).

4. CONCLUSION

For centuries, the recycling of nutrients present in human excreta from dry toilets has been an important source of fertilizer for the M'zab oases. However, these ancestral systems, which were well established and well maintained to fulfill their roles in the agricultural domain, have been almost totally abandoned by the local populations due to the arrival of modernization and the availability of water in significant quantities from the deep Albian aquifer. Today, the agricultural systems, especially in the old oases, have become practically obsolete and are seriously threatened by urbanization that is transforming the old palm groves into anarchic settlements (Houichiti 2019). What the notables of the region are trying to do to is to encourage the rural population to install dry toilets on their farms to fight the ever-increasing numbers of septic tanks linked to uncontrolled urbanization. Nevertheless, dry toilets remain a tried and trusted solution that can both protect the old oasis from pollution while reducing the costs involved in connecting homes to the sewerage system. Through this case study, we were able to show the importance of dry toilets in the protection of an arid oasis, such as the Ghardaia region. However, the sustainability and acceptability of these systems by the future generations remain unknown because the construction of dry toilets is a private initiative taken by the local population without any collaboration with the local authorities. The coordination between relevant institutions (e.g., the sanitation office), local actors and scientific research should lead

to the adoption of dry toilets as an official small-scale alternative sanitation system. There will also be the possibility to export the use of these systems to other arid regions by adapting them to the context of each region. In view of this, it seems necessary to take into consideration several aspects such as the sanitary and environmental aspects by ensuring the elimination of all pathogens and pollutants before using human manure in agriculture.

Chapitre 3

Création d'un front pionnier basé sur la réutilisation des eaux usées dans le Sahara algérien : cas d'un périmètre irrigué à Ghardaïa

Ce chapitre a été publié sous forme d'article de recherche dans la revue
International journal of water ressources developpement :

A story of hope and frustration: a wastewater-based agricultural frontier in the Algerian Sahara. <https://doi.org/10.1080/07900627.2024.2311803>

Sara Bekaddour, Tarik Hartani , Pierre –Louis Mayaux, Nassim Ait-Mouheb

Chapitre 3: A story of hope and frustration: a wastewater-based agricultural frontier in the Algerian Sahara

PREAMBULE

Ce chapitre analyse le concept et les moteurs de l'installation d'un front pionnier agricole basé sur la réutilisation des eaux usées dans les nouveaux périmètres de mises en valeur dans les oasis arides à Ghardaïa. Ce front pionnier est localisé dans la région de Berriane à Ghardaïa en aval d'une station de traitement des eaux usées.

Pourquoi on parle d'un front pionnier ? Car, les agriculteurs ont colonisé un nouveau périmètre qui n'était jamais exploité avant pour créer une dynamique agricole basée sur l'irrigation avec les eaux usées. L'objectif de ce chapitre est d'analyser en premier lieu : les facteurs de motivation c'est-à-dire quels sont les différents avantages qui ont encouragé les agriculteurs à s'installer dans un tel périmètre. En deuxième lieu les contraintes et les obstacles que rencontrent les agriculteurs pour assurer la durabilité de ce périmètre. En dernier lieu : on a essayé de mettre la lumière sur le rôle des institutions dans la mise en œuvre des périmètres irrigués avec les eaux usées traitées. Pour réaliser ce travail, on a utilisé une méthodologie basée principalement sur la collecte des données, les observations sur terrains et les entretiens avec les acteurs locaux concernées. Ces acteurs sont les agriculteurs et les institutions (DRE, ONA, APC, DSA). Les résultats de ce travail montrent, premièrement, les facteurs encourageant les agriculteurs à s'installer dans ce nouveaux périmètre sont : 1/la réutilisation de l'eau s'est appuyée sur des pratiques anciennes, notamment l'utilisation agricole des déchets humains et l'irrigation de l'ancienne palmeraie à l'aide d'eaux usées brute. 2/ La facilité d'accès à la terre et aux eaux souterraines. 3/ l'acceptabilité des agriculteurs de l'irrigation avec les eaux usées.

Deuxièmement, l'expansion de la frontière basée sur les eaux usées à ses limites, liées à la gestion inefficace de la station d'épuration et au fait que la réutilisation des eaux usées n'a pas encore été officiellement autorisée. La principale contrainte est l'inefficacité de la gestion et du suivi de la station d'épuration des eaux usées, de sa conception à son exploitation, qui a eu un impact direct sur le projet de réutilisation. Ceci est dû au manque de partenariat entre les représentants des institutions et entre les institutions et les agriculteurs. Ceci questionne le devenir des périmètres de réutilisation des eau usées traitées dans la région et également dans le pays car notre cas d'étude représente l'image de la situation de la réutilisation des eaux usées traitées en Algérie.

ABSTRACT

This study explores how wastewater reshapes the dynamics of agricultural settlement in the Algerian Sahara. It also discusses farmers' hopes and frustrations around these dynamics. The study was carried out around the Berriane wastewater treatment facility. It is based on interviews with officials and farmers, a review of technical studies and direct field observations. We show how wastewater reuse regenerates traditional practices, such as the use of human waste as fertilizer and raw sewage to irrigate palm groves. We also discuss the problems that arise when the treatment plant is not managed properly, and the political ambivalence of State authorities regarding wastewater re-use. Our findings highlight the importance of interdisciplinary approaches that combine irrigation science, hydrology and policy studies.

Key words: Agricultural frontier, Algerian Sahara, arid region, water reuse, Berriane, Ghardaïa, wastewater governance.

1. INTRODUCTION

The term "frontier" became famous with the work of the American historian, Turner (1861-1932), who highlighted its significance for the American social formation (Mikesell 1960). According to Turner, the unique features of American society could largely be attributed to the availability of free land, which was appropriated in successive waves. He referred to the frontier as a "safety valve", which alleviated poverty and gave new opportunities to Eastern migrants. He also saw it as a means of constant moral rejuvenation for American society. Later, he highlighted its mythological aspect, describing the "frontier myth" as "a group of stories focused on a sprawling, unfettered terrain of limitless potential for the driven, inspired and self-reliant person to achieve prosperity", which meant that the presence of Native Americans could be ignored (Slotkin, 1974: 5). Thus, the frontier is inherently an amphibious concept, which amalgamates an objective geographical dimension - the large-scale synchronous agricultural expansion by independent farmers - with cultural imagery. A number of researchers have since used the term to investigate settlement patterns in other countries, for example: the colonisation of Hokkaido, Japan's northern most island, from the 1870s onwards (Kitayama et al. 2006); deforestation in the Brazilian Amazon (Carrero et al. 2019); and the interactions between irrigation programmes led by donors and farmers in the West Bank (Trottier & Perrier 2018). Agricultural frontiers emerge when agriculture spreads onto land that was previously uncultivated or used extensively. They radically change how farmers interact with land and water, which is not simply a matter of switching to high-value crops. In an agricultural frontier

zone, the tenure of and access to land and water are completely transformed (Trottier & Perrier, 2018).

In the Algerian Sahara, irrigation is essential. Without it, the land cannot produce sustainable yields (Bisson 2003). As a result, managing water resources is crucial for the social organisation of oasis communities, which largely depend on water availability over time and space (Bensaad 2011). In recent decades, access to the deep Albian aquifer and to available land has facilitated the development of new agricultural settlements outside the old oases. This has led to a quiet revolution in the region (Bisson 2003; Bensaad 2011). This expansion has been extensively supported by state infrastructure programmes with the aim of integrating the Sahara into the national economy. Adjustments have sought to promote intensive agricultural production in order to supply affordable products, especially fruit and vegetables, to the northern regions. This agri-food system involved the acquisition of untended farmland and the use of pumped groundwater (Hamamouche et al. 2018). Consequently, the main factor involved in the transformation of the oasis environment was making land and water more accessible (Hamamouche et al. 2015; Daoudi et al. 2021). The sustainability of extending irrigated crop production in arid areas is questionable given their reliance on non-renewable fossil water resources (Bessaoud et al., 2019). Over the last decade, the construction of numerous wastewater treatment plants (WWTP) has raised a new water-related issue: the reuse of treated wastewater (Bisson, 2003) for agricultural purposes. Wastewater reuse has two potential advantages. First, it may reduce the risk of contaminating groundwater caused by the discharge of wastewater. Second, it may reduce the cost to farmers of pumping groundwater (Bisson 2003).

Reclaimed wastewater has tremendous potential given the huge quantity available. According to the findings of Dubost et al. (2002), reclaimed urban wastewater from a population of 50,000 can help irrigate 300 hectares of intensively farmed land that produces fruit, vegetables and date palms. This would create an oasis that is self-sufficient in fruit and vegetables. To achieve food security by 2035, the Algerian water resources mobilisation strategy aims to irrigate 100,000 hectares with treated wastewater and drainage water (MRE, 2017). Although there are 40 operational wastewater treatment plants in the Algerian Sahara, there is no formal project for the reuse of treated wastewater (GIRE, 2018). According to the Algerian Office for National Irrigation and Drainage (2019), only two perimeters (Mleta and Henaya), both of which are in western Algeria (Tlemcen and Oran), are being developed for formal wastewater reuse. In the study area located in the Ghardaïa Region, three wastewater treatment plants have been set up.

They are designed to treat wastewater for agricultural purposes (Zegait and Remini 2018). Treated wastewater is typically used for irrigation in areas that are downstream of the WWTPs (Chabaca et al. 2017). The practice of reusing treated wastewater for agriculture is relatively new; formal reuse began in 2007 (Ait-Mouheb et al. 2020). The total irrigated area covers more than 11,000 hectares. It primarily consists of fruit trees, such as date palms and olive trees, and some cereals. The most well-known cases of managed water recycling schemes are in Hennaya-Tlemcen in the north-west and Guelma-Boucheougouf in the north-east, where 912 ha and 6,980 ha of land are cultivated, respectively (Ait-Mouheb et al. 2020). However, formal schemes to reuse treated wastewater have not yet been developed in the Saharan region.

This study is the first of its kind in Algeria to investigate the informal reuse of reclaimed wastewater in the Sahara. It draws on the case study of the irrigated area in Oued El Bir, downstream of the Berriane wastewater treatment plant and north of Ghardaïa, the district capital. A number of farmers have recently settled in this area. The aim of this paper is to establish the concept of a wastewater-based agricultural frontier. We will discuss how farmers perceive and use this opportunity. We also discuss the farmers' aspirations given the system's limitations, particularly those linked to wastewater governance.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study area

Our research site is in Berriane, a Mozabite town 40 km north of Ghardaïa, in the centre of the Algerian Sahara (Benyoucef, 2010) (Figure 1). The water supply is derived from different valleys, which flood the area. The Zargui Valley feeds the north-western section, while the

Lemkin and Sudan Valleys feed the north-eastern section (Khelifa and Remini, 2019).

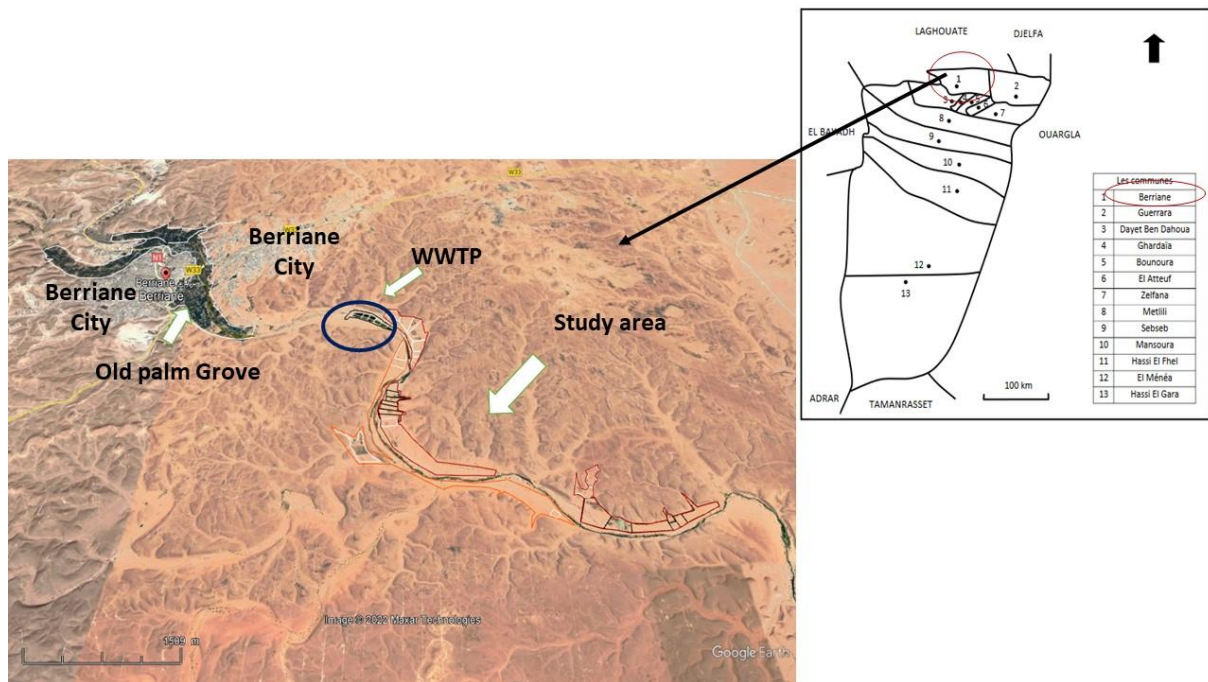


Figure 1: Map of Berriane (DPSB, 2017 in Houichiti, 2019) showing the study area (Google Earth, 2021).

Figure 1: Map of Ghardaïa and the study area (Berriane), circled in red. The image on the left shows the three agricultural zones in the study area.

Hamdani et al. (2012) reported that the region has hot dry summers, with considerable temperature fluctuations, high solar radiation and strong winds. The region is extremely arid, with less than 100 mm of annual rainfall and high summer temperatures of up to 50°C (Hamdani et al., 2012). Most of the water used to irrigate the palm trees comes from groundwater. Recharge primarily depends on rainwater infiltration. The "terminal complex" and "continental interlayer" aquifers, which form the "Albian aquifer," are both used at depths ranging from 250 to 1,000 m, depending on the location (Bouamer et al., 2019).

In 2013, the agricultural settlements in Oued El Bir started expanding to cover almost 300 hectares (Table 1). Although 89 farmers officially occupy the land, only 34 were actually farming in 2021 because they had boreholes for irrigation (Table 1), as reported by the Popular Communal Assembly (APC) in Berriane.

Table 1: Main agricultural characteristics of the study area (APC Berriane 2021)

Total irrigable area with wastewater (ha)	Number of land owners	Number of active farmers	Cropping system	Water resources	
				2009-2017	2017 -2021
300	89	34	Date palms, olive trees, grapes, fruit trees	Mostly untreated wastewater	Mostly phreatic aquifer

2.2. Research methodology

This work was conducted using the following methodology:

1- **A literature review:** based on previous research in the area and relevant documents provided by the Water Resources Directorate and the Agricultural Department of the Communal People's Assembly (APC). The documents describe the research location, with details of the settlement dynamics, area cultivated, the number of farmers and boreholes (see Table 1). Table 2 provides details of the main features of the wastewater treatment facility, including design and commissioning dates, the municipalities connected to it, the treatment capacity and limitations. The facility serves several municipalities in the Berriane district. The specific features of the WWTP are presented in the following section (Table 2).

Table 2: Main characteristics of the wastewater treatment plant (Water Resources Department, 2019)

Name	Purification process	Start of operation	Capacity (Population equivalent)	Current volume (m ³ /day)
Oued El Bir	Aerated lagoon	2021	60 600	2931

2- An observational analysis: field visits were carried out to delimit the study area, as well as to map and locate the farms. These visits also made it possible to identify the agricultural and irrigation practices (cropping system, water resources, irrigation techniques, etc). We also visited the treatment plant to determine its efficiency in relation to the agricultural settlements.

3- Interviews: after defining the study area and the key stakeholders, we conducted 20 interviews from October to December 2019 and March to June 2021, using both semi-structured and open approaches. Technical terminology was explained at first use. The interviews had a conventional academic structure and formatting. We used clear objective language, avoided biased or emotional language and checked grammatical accuracy and spelling carefully. Out of the 34 farmers active in the field, 15 were interviewed on the basis of their availability. Five further interviews were conducted with state officials from the Water Resources Department (DRE), which is responsible for constructing wastewater treatment plants; the National Sanitation Office (ONA), which manages and operates WWTPs; the agricultural services division, which oversees the management of agricultural perimeters; and, lastly, the Communal Popular Assembly (APC), the equivalent of a municipal council, which allocates agricultural land.

The aim of the survey was to determine the views and positions of the different institutions regarding wastewater reuse in the area. Table 3 presents the main questions. Each survey (for agricultural engineers and governmental representatives) was designed to gauge how the respondent perceived the risks and opportunities linked to wastewater. This study focuses on four official institutions:

1/ The Direction of Water Resources, the contracting authority responsible for wastewater treatment plants and irrigation projects involving wastewater reuse.

2/ The National Sanitation Office, responsible for operating the wastewater treatment plants.

3/ The communal people's assembly, which includes an agricultural service, in charge of distributing farmland and managing irrigated areas.

We included these institutions in our study sample because their primary responsibility is to supervise the development and management of wastewater treatment facilities.

Table 3: Main questions addressed to farmers and state officials in 2019 and 2021.

Actors	Number	Example of questions
Farmers	15	<ul style="list-style-type: none"> • Why did you choose to farm in this area? • How did you learn about reusing wastewater for agriculture? • As far as you know, what are the advantages of irrigating using wastewater? • Did you contact the institutions in charge to ask for information about wastewater reuse or did you ask for an authorisation to use wastewater?
Officials	5	<ul style="list-style-type: none"> • Was reuse one of the initial goals of building a WWTP? • If yes, what prevented the official use of treated wastewater for irrigation? • Have any farmers formally applied to use wastewater?

3. RESULTS

3.1. Water reuse builds on long-standing practices in the Algerian Oases

A timeline was established in 2019 with farmers and institutional stakeholders. It presents key historical milestones relating to water sanitation, treatment and reuse in the Berriane area, which ultimately facilitated the establishment of an agricultural frontier.

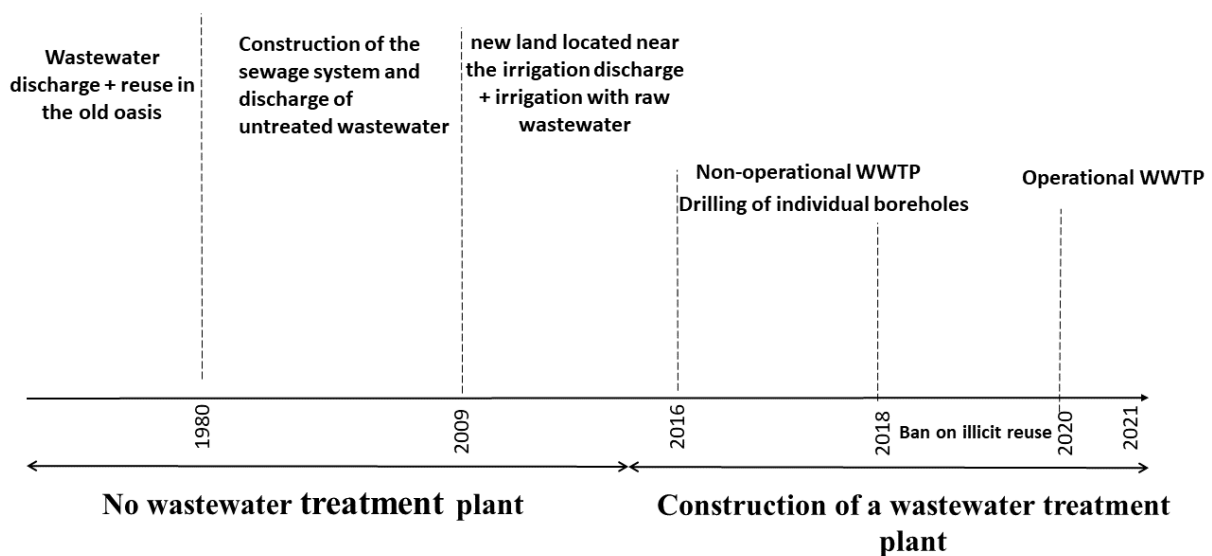


Figure 2: Timeline showing the history of sanitation, the reuse of wastewater in the old oasis of Berriane and its development

Phase 1: Before the 1980s, recycling human excreta with the use of dry toilets was a common agricultural practice (Bekaddour et al. 2021).

Additionally, untreated wastewater from Berriane flowed freely into the riverbed that ran through the old palm grove. Farmers in the old 300-hectare oasis reused the wastewater to irrigate all types of crops, including vegetables, fruit trees and date palms. It is important to note that the water was of domestic origin, given the absence of industrial activities in the region.

Phase 2: In the 1990s, a sewage collector was constructed to drain untreated sewage away from the city. The Water Resources Department, which is affiliated to the Ministry of Water Resources (Water Resources Department, 2019), made the decision to install the wastewater evacuation system. The main objective was to safeguard human health and preserve the oasis environment from contamination. Before the collector was installed, unprocessed wastewater was discharged in the oasis. It mixed with floodwater, thereby, contaminating the groundwater in the region (Water Resources Department, 2019). Oued El Bir was the area allocated for wastewater discharge. In order to secure land ownership and take advantage of the untreated wastewater around the discharge site, a small group of farmers started cultivating the land informally. They grew eucalyptus trees for beekeeping, which were destroyed as a result of unregulated grazing by livestock. Consequently, the eucalyptus plantations were abandoned. In 2009, the construction of a wastewater treatment plant on the discharge site was announced. According to the farmers and the authority responsible for agricultural services in Berriane Province (APC, 2019), the governor of Ghardaïa city announced the inauguration of the sewage disposal facility.

Phase 3: The farmers interviewed described how the growth of new settlements accelerated between 2009 and 2016, following the announcement of a future WWTP. Thus, a genuine agricultural frontier emerged downstream of the future plant. Meanwhile, farmers increased their informal use of raw wastewater for irrigation. They adopted the conventional system of oasis agriculture, the three-tiered farming system (date palms, fruit trees and market gardening) (Figure 2, Table 1). The plant was completed in 2016. According to the farmers interviewed, one of the main reasons for moving to the agricultural frontier was the availability of wastewater: *"To start with, we grew eucalyptus for beekeeping, then with the advent of the WWTP construction project, we started farming the Oued El Bir perimeter"*. They added, *"to irrigate, you just have to put the pump in the wastewater discharge in the river"*. Another farmer

explained, *"I dug a pit in the shape of a lake to store water near my farm to irrigate my palm trees"*.

Phase 4: From 2016 onwards, a total of 89 farmers were settled in the area, 34 of whom were active in 2021 (APC. 2021).

The construction of the WWTP was supervised by the Directorate of Water Resources under the auspices of the Ministry of Water Resources. The facility uses an aerated lagoon system, with a maximum capacity of 60,600 population equivalent (Water Resources Department, 2022). Nevertheless, the WWTP did not start actual operations until 2021 (see Figure 2). The reason for the delay was that the Directorate of Water Resources had outstanding bills to pay, in particular, the mandatory electricity charges. This payment was required before transferring the management of the WWTP to the National Sanitation Office, a department of the Ministry of Water Resources.

Since August 2018, the ban on reusing untreated wastewater has been strictly enforced following an outbreak of cholera due to water contamination in the Blida and Tipaza districts (Ait-Mouheb et al. 2020). Farmers and state officials have confirmed that anyone found illicitly reusing untreated wastewater will be prosecuted and their produce destroyed. Of the 89 farmers in the area, only 34 remain active after digging their own boreholes to extract groundwater at a depth ranging from 40 to 80 m (see Figure 2). Farmers without the means to extract groundwater have abandoned their farms. They used wastewater for irrigation to reduce their fertiliser and electricity bills, otherwise they could not afford to continue farming. The electricity bills are particularly high because the perimeter is off the grid, which means farmers need their own generators (see Figure 3). The farmers set up an irrigators' association and frequently ask the authorities to clarify the conditions required for using treated wastewater. Their main interest is to find out which types of crops can be irrigated with the treated water and how much it costs to use it.

The construction of the wastewater treatment plant was not the sole reason why farmers settled in the Oued El Bir area. Two additional factors also played an important role. First, farmers had already been irrigating with untreated wastewater near the discharge site. Second, local farmers had easy access to land and groundwater around the plant. According to the farmers interviewed, access to land was easy for two main reasons. First, the area in question does not belong to the 'Arch' tribe and, therefore, farmers could appropriate land without triggering any

conflict. Second, the Algerian law (83-18) grants full land ownership after a period of five years if the land is used in a productive way (Khiati 2008). The purpose of this law is to allow access to land ownership and encourage the development of land in the Sahara Saharan land (Khiati 2008). In this particular case, farmers invest their own resources to farm the land and the authorities intervene to regularise the situation. This demonstrates that the pioneer front is not solely based on the presence of wastewater, but on a combination of wastewater and the availability of land and groundwater.

3.2. Other factors that contributed to agricultural settlement

When farmers first settled in the area, they were largely drawn by the possibility of using reclaimed water, particularly untreated water. Indeed, our interviews revealed that farmers were drawn by the prospect of irrigating with wastewater, a practice with a longstanding history. All the farmers interviewed described how their ancestors used human excrement as a fertiliser and their grandparents irrigated the old oasis with raw sewage before the 1990s. Their farming systems were highly productive and health risks were low. The future wastewater treatment facility and local authority assurances that irrigation with treated wastewater would be permitted motivated farmers to settle.

Land availability encouraged settlers in the region. In 2013, the Communal People's Assembly (APC) officially delimited the perimeter, which was also an important factor. The occupation of new land is the outcome of the Algerian State's policy to liberalise access to land because it is keen to develop the Saharan regions. This is one of several legal and economic incentives for private national operators or investors (Daoudi et al. 2016). Lastly, the irrigation perimeter is in a river valley fed by several tributaries – the Balouh, Soudan and N'ssa rivers, which flow through the region. Farmers refer to this when they state, "We have water above (i.e. wastewater), as well as below the land (i.e. groundwater)." This explanation is often used to justify the development of irrigation schemes in low-lying areas (Bisson, 2003).

A representative of the Communal People's Assembly (APC) explained that a 300-hectare site below the WWTP had been created specifically to use the treated wastewater for irrigation. The Department of Water Resources (2021) highlighted that the aim of building the WWTP was to use reclaimed wastewater for agriculture. The WWTP was designed exclusively to receive domestic wastewater. All these factors encouraged farmers to settle in the area. Initially, only a small group of farmers developed farming activities. However, their numbers have increased steadily over time.

3.3.Constraints on wastewater-based agricultural development

Although farmers have formally requested to use the treated wastewater, the situation has been blocked since 2022. In 2021, farmers expressed their frustration and called into question the investment in a WWTP that is not working and fails to provide water for irrigation. They also expressed their frustration when they see a constant flow of water, which they cannot use. The main problem appears to be the poor management and monitoring of the wastewater treatment facility, which have impacted both its development and operation. The treatment plant was built in 2016. Yet, operations only began in 2021, owing to issues over the payment of electricity bills between the project proprietor (the Water Resources Department) and the treatment plant supervisor (the National Sanitation Office). The water treatment process failed to meet the level of efficiency required for water reuse because there was no oil separator nor tertiary treatment. According to the Department of Water Resources and the National Sanitation Office, the technical issues have arisen because the project feasibility study is incomplete. Underinvestment in feasibility studies is common in Algeria. The Ministry of Water Resources (MRE. 2017) reports that investment in sanitation is distributed as follows: 44% for the wastewater treatment plant, 48% for the network and a mere 8% for the project feasibility study (Figure 3).

The project was transferred from one institution to another with no coordination or communication between the two, which has caused problems (MRE. 2017) (Figure 3). The cooperation between the Water Resources Department, which oversees the project, and the National Sanitation Office, which is responsible for managing the wastewater treatment plant upon completion, has been unsatisfactory. The Direction of the Water Resources and the National Office of Sanitation recommend hosting meetings and workshops prior to conducting a feasibility study for a WWTP. This is to ensure that a properly designed treatment facility will be constructed in order to facilitate the swift development of a wastewater reuse scheme. Due to the lack of coordination between the National Sanitation Office, the Water Resources Department and the Department of the Environment, the properties of effluents discharged into the sanitation networks, including wastewater from industrial facilities, have not been monitored. This situation occurred despite the fact that the treatment plant was designed solely for domestic wastewater. The lack of institutional coordination raises the question of institutional leadership: who will be responsible for managing the project? (Bekaddour et al. 2021). The situation was confirmed by the Director of the National Sanitation Office in Ghardaïa, who stated that, in addition to the lack of inter-institutional coordination, human

resources and expertise were also lacking in this area. He suggests establishing a partnership between the university and relevant institutions to conduct scientific research to address the genuine issues.

Another constraint is linked to the operating costs and water pricing. Farmers state that their willingness to pay depends on the contract terms and, particularly, the potential income generated from crops irrigated with wastewater. Depending on the outcome, farmers will decide if they are willing and able to pay. The efficiency of the distribution network will have an impact on operating costs: it will cost more to pump water directly from the river than to distribute it along a well-designed network. It is worth noting that the average price per cubic metre in state perimeters managed by the National Office of Irrigation and Drainage is only £0.02, equivalent to 2.50 Algerian Dinar (Algeria's national currency) (DRE, 2021). State officials have confirmed that free wastewater might be distributed to farmers in the early years to build trust. To identify the existing treatment systems, conduct a technical analysis and scale the installations and networks, the Directorate of Water Resources will commission a consultancy to carry out a feasibility study. In addition, a qualitative analysis of the treated wastewater will also be conducted (DRE. 2020).

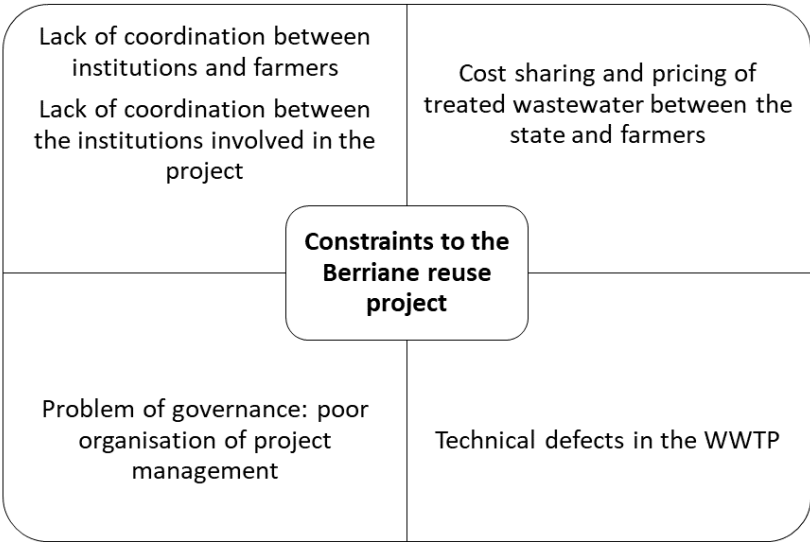


Figure 3: Summary diagram showing the problems undermining the reuse project in Berriane.

Alt Text Figure 3: This diagram illustrates some of the factors hindering the development of the treated wastewater reuse project in the study area.

4. DISCUSSION

The article demonstrates that farmers settled near a wastewater treatment plant because of the potential wastewater resource. Access to land and groundwater are also two key factors that encouraged them to settle. However, farmers did not start farming until the land property act came into force. It is important to note that the transfer of total ownership was facilitated by the 1983 Access to Agricultural Land Ownership (APFA) legislation for public land and the Decree 97-483 of 15/12/1997 for 40-year concession rights (Daoudi et al. 2016).

In the study region, when farmers secured their land tenure in 2015, they began irrigating with wastewater. However, the area's rapid expansion has been hampered by several obstacles. Initially, after the clampdown on untreated wastewater use, farmers were obliged to bore individual wells or transport untreated wastewater in tanks from the city to irrigate their crops. Second, the necessary infrastructure, such as electricity and farm tracks have not yet been completed. This infrastructure is crucial for the rapid growth of Saharan agriculture in Algeria, as shown by Amichi et al. (2018). Consequently, like other emerging sectors, the agricultural frontier, based on the formal and planned reuse of wastewater, relies heavily on substantial public resources. The farmers claim that the state agencies, DSA (Agricultural Services Department) and APC (Communal People's Assembly) have promised to provide electricity and farm tracks on condition that the farming activities in the perimeter are sufficient to justify the public investment.

The availability of irrigation water is limited. Despite groundwater extraction, the aquifer cannot supply enough water to meet crop requirements, particularly since an extensive area of land is now cultivated. Consequently, farmers are calling for the use of treated wastewater for irrigation. Although the reuse of treated water involves numerous challenges (Mizyed 2013), it is recognised as a strategic option for boosting the supply of irrigation water in arid and semi-arid regions. The effectiveness of any water reuse scheme depends not only on suitable technology, but also on the existence of institutional structures capable of ensuring the safe and efficient distribution and use of treated water (Lawrence et al., 2003).

The consultation process in our study has had some effects, underlining the importance of disseminating information and raising public awareness about the multifaceted nature of reuse within a formal system, by improving communication and awareness raising campaigns. Our consultation focused chiefly on shared actions that necessitate discussion and approval by all

stakeholders concerned by water reuse. Actions could include group discussions and joint approaches to find feasible solutions. The consultation process highlighted the need to include measures to enhance wastewater reuse as a significant component of a broader water management strategy (Saliba et al., 2019). Farmers have reported that using wastewater for irrigation has significant socioeconomic benefits, such as increased income and lower energy and fertiliser costs (assuming that there are no extra denitrification processes at the treatment plant). Furthermore, the use of wastewater is vital to develop local production and improve the standard of living for farmers (El Moussaoui et al. 2017). The use of wastewater in addition to conventional water sources, allows farmers to expand their irrigated area and diversify crop production. However, despite the high demand for the resource, wastewater reuse remains restricted in Berriane (Figure 3). This can largely be attributed to inadequate project management and poor coordination between the institutional actors involved in the resource reuse process (see Figure 3). The MRE 2017 report identifies key obstacles that hinder efficient and sustainable resource management in Algeria, including a lack of strategic institutional development and a shortage of qualified human resources.

In the next few decades, Algeria will have to adjust to the dwindling supply of renewable water resources as a result of structural changes (Hamiche et al. 2015). As the nation is currently grappling with a deficit of renewable water resources, the use of alternative sources should be considered (Hamiche et al. 2015).

The use of unconventional water sources (especially wastewater) will be an important strategic component of future water policies (Hamiche et al. 2015). In Algeria, there are specific discharge standards for the reuse of wastewater for agricultural purposes. They are outlined in the Executive Decree No. 93-160 (July 10, 1993) and Executive Decree No. 06-141 (April 19, 2006). A regulatory framework exists for the reuse of wastewater in agriculture, along with a list of crops and specific conditions for irrigation using treated wastewater. Details of this regulatory framework are provided in Executive Decree No. 07-149 (May 20, 2007) and the inter-ministerial order of January 2, 2012. Hannachi et al. (2014) suggest that these measures promote projects that use treated wastewater. Nonetheless, the Berriane case study demonstrates that the practical implementation of these schemes remains inadequate given the current legal framework.

5. CONCLUSION

The case of Berriane reveals the true value of wastewater as a resource in arid regions, even when it is untreated. As our study shows, wastewater reuse projects can generate high hopes for farmers, as well as deep disappointment. Reusing water in the Oued El Bir region has facilitated the expansion of irrigated land and reduced dependence on groundwater. Farmers settled in this previously undeveloped area in the hope that they could use wastewater. As a result, a significant agricultural frontier based on wastewater use has emerged. However, in 2023, after more than a decade of settlement, the treatment plant is still not operational. Simultaneously, the Algerian government no longer considers the use of untreated wastewater to be politically correct, which is why wastewater use is now severely restricted.

The main obstacle to the plant's effective operation appears to be the lack of inter-institutional coordination, particularly at the local level. National policies do not have an integrated approach. This is clearly illustrated by poor plant maintenance and the sanitation engineers lack training in the use of wastewater for agricultural purposes. In Berriane, plant managers admitted that they were not familiar with the national standards for wastewater treatment and did not have adequate technical training to manage lagoon-based treatment systems. In 2023, farmers continue to rely on their private wells to supply water. However, there is some promising news: the Department of Water Resources (part of the Ministry of Water Resources) has launched a feasibility study for an ambitious project to reuse treated wastewater in the region.

Farmers also lack the necessary expertise to irrigate using wastewater. For example, they lack knowledge on suitable crops, irrigation methods and maintenance. Unlike the commonly-held concerns described in the international literature on water reuse, our findings suggest that user acceptance of wastewater is not a issue. There is no particular need to "raise awareness" about the advantages of wastewater among users and consumers. Instead, the main social challenge is to help farmers optimise sustainable wastewater use.

Overall, this research shows how ambivalent the situation is regarding wastewater reuse: the resource is highly valued, yet its use is fraught with health risks, which also makes it a political issue. The development of wastewater reuse projects is a far from linear process. Our study discusses the challenges facing many projects, especially in Algeria. It considers ways to prevent future hopes from turning into yet another disappointment.

Chapitre 4

L'irrigation par les eaux souterraines en aval d'une lagune : quel impact des eaux usées sur le milieu

Projet article : Sara Bekaddour, Hartani Tarik, Leduc Christian, Ait-Mouheb Nassim

Chapitre 4 : L'irrigation par les eaux souterraines en aval d'une lagune : quel impact des eaux usées sur le milieu ?

PREAMBULE

Ce chapitre vient compléter le chapitre précédent qui a analysé principalement l'organisation de la création d'un nouveau front pionnier agricole autour des stations d'épuration des eaux usées à Berriane, en particulier l'historique de la création de ce front pionnier et les obstacles ainsi que les limites d'étude de ce cas. L'objectif du présent chapitre est d'étudier l'impact qualitatif des eaux usées sur les ressources en eaux de surface et souterraines par une infiltration possible des eaux usées traitées. Cette étude est basée sur des méthodes de caractérisation hydrogéochimique, bactériologique et isotopique des eaux usées de la station d'épuration à Berriane et des eaux de la nappe phréatique en aval de la STEP. La comparaison entre les eaux de la nappe et les eaux usées va permettre de détecter leur éventuelle connexion qui va nous permettre de confirmer ou pas l'infiltration des eaux usées dans l'aquifère phréatique. Ceci pourra nous donner une idée sur l'impact des eaux usées sur les eaux souterraines à savoir montrer la présence d'une contamination. Les principaux résultats indiquent que les isotopes stables d'oxygène 18 et de deutérium ne fournissent pas des informations discernables concernant un éventuel mélange entre les eaux usées et les eaux souterraines, suggérant ainsi que ces isotopes ne permettent pas de visualiser clairement la connexion entre les deux sources d'eau. L'analyse hydro chimique montre que les eaux des forages ont des faciès : chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne. L'évaluation des pathogènes (coliformes totaux, coliformes fécaux, streptocoque et E. coli) montre la contamination de certains forages. Pour pousser cette analyse, une autre méthode est en cours d'application. Il s'agit de l'analyse de la présence des polluants émergents (des traces de médicaments) dans l'aquifère phréatique. Cette méthode permet de donner un résultat précis sur la contamination des forages par les eaux souterraines

1. INTRODUCTION

Le changement climatique et les modifications des conditions agricoles qui en découlent augmentent la vulnérabilité de l'utilisation de l'eau à des fins agricoles. La réutilisation des eaux usées est une pratique courante dans le monde entier et est considérée comme une ressource en eau alternative dans un environnement agricole en mutation (**Jeong et al. 2016**). En raison de l'urbanisation rapide, la réutilisation indirecte des eaux usées, qui est le type de réutilisation des eaux usées agricoles principalement pratiqué, augmentera, ce qui peut entraîner des problèmes de réutilisation non planifiée (**Jeong et al. 2016**). La réutilisation non réglementée des eaux usées est pratiquée depuis des siècles dans de nombreuses régions du monde. Toutefois, le concept de réutilisation intégrée des eaux usées a récemment suscité une attention croissante en raison de la dégradation des ressources en eau douce résultant d'une élimination inappropriée des eaux usées, ainsi que des phénomènes de sécheresse et des prévisions de nouvelles périodes de sécheresse liées aux changements climatiques dans de nombreuses zones arides (**Adewumi et Oguntuase 2016**). La réutilisation des eaux usées traitées est une solution émergente pour faire face à la pénurie d'eau douce et à la contamination des eaux de surface dans le monde entier (**Manisha et al. 2023**).

L'infiltration des eaux usées est souvent une composante majeure de la recharge globale des aquifères autour des zones urbaines, en particulier dans les régions arides (**Foster et Chilton 2003**). Cependant, une telle recharge (avec les eaux usées) est souvent non planifiée (accidentelle) (**Foster et Chilton 2003**).

La recharge accidentelle ou non planifiée de la nappe phréatique par infiltration d'eaux usées fait référence au processus non intentionnel d'infiltration d'eaux usées dans les eaux souterraines et de réalimentation de la nappe phréatique (**Dillon et al. 2018**). Ce phénomène peut être dû à diverses raisons, telles que des systèmes de gestion des eaux usées inadéquats, des infrastructures défectueuses ou des conditions géologiques naturelles qui permettent aux eaux usées de s'infiltrer dans le sol. La recharge accidentelle présente des risques pour la qualité des eaux souterraines, car les polluants et les contaminants présents dans les eaux usées peuvent contaminer les aquifères, affectant potentiellement la disponibilité d'une eau potable sûre et ayant un impact sur l'environnement et la santé humaine. Il est donc important de prévenir la recharge accidentelle en mettant en œuvre des mesures appropriées de traitement des eaux usées, afin de garantir la protection et la préservation des ressources en eaux souterraines (**Dillon et al. 2018**).

Deux types de recharge des eaux souterraines sont couramment employés avec les eaux usées municipales traitées : la percolation sous des bassins de dispersion en surface et l'injection directe dans l'aquifère. Dans les climats arides où la pratique de la recharge des eaux souterraines est la plus nécessaire, la recharge s'effectuera par des moyens tels que les lits de rivières secs et les bassins de dispersion, et dans la plupart des situations, il y aura une zone non saturée entre la surface et la nappe (**Asano et Cutrivo 2004**).

Asano et Cutrivo (2004) ont souligné également les avantages de la recharge artificielle par les eaux usées traitées : (i) le coût de la recharge artificielle qui peut être inférieur à celui des réservoirs d'eau de surface équivalents. ; (ii) l'aquifère peut servir comme système de distribution naturel et peut réduire le besoin de canalisations de transmission ou de canaux pour l'eau de surface ; (iii) le traitement sol-aquifère (SAT) et le stockage souterrain peuvent éviter les problèmes de goût et d'odeur dus aux algues et à d'autres activités aquatiques, ainsi qu'à la pollution. Par ailleurs l'inclusion de la recharge des eaux souterraines dans un projet de réutilisation des eaux usées peut apporter des avantages psychologiques et esthétiques en raison de la transition entre les eaux usées municipales recyclées et les eaux souterraines. Cet aspect est particulièrement significatif lorsqu'il existe une possibilité d'augmenter des portions substantielles des approvisionnements en eau domestique ou potable (**Asano et Cutrivo 2004**).

La vallée du Mزاب se distingue par ses conditions climatiques arides et notamment la rareté des ressources en eau. Le système de gestion de l'eau du Mزاب a été développé depuis des siècles pour résoudre ce problème en exploitant efficacement les eaux de crue à deux fins : l'irrigation et la recharge de l'aquifère peu profond (**Taleb Bahmed et Bouzid-Lagha 2020**).

L'implantation de communautés reste largement conditionnée par la disponibilité de ressources en eau, parmi lesquelles les eaux usées émergent désormais comme un facteur déterminant dans l'installation des agriculteurs dans de nouveaux périmètres agricoles, situés en aval des stations d'épuration des eaux usées (STEP). Ceci est illustré par le cas du périmètre agricole d'Oued El Bir à Berraine, conçu spécifiquement pour être irrigué avec des eaux usées. Toutefois, suite à l'interdiction de l'irrigation avec ces eaux, les agriculteurs ont entrepris des forages peu profonds (de 50 à 80 mètres) à proximité des points de rejet, comme mentionné par Bekaddour et al. (2024). Cette situation soulève des interrogations quant à la contamination potentielle de ces forages par les eaux usées."A travers ce travail nous cherchons à évaluer l'impact qualitatif des eaux usées sur les ressources en eaux de surface et souterraines par une infiltration possible des eaux usées traitées. Cette étude est basée sur des méthodes de caractérisation

hydrogéochimique, bactériologique et isotopique des eaux usées de la station d'épuration à Berriane et des eaux de la nappe phréatique en aval de la STEP.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est située à Berriane, une ville mozabite située à 40 km au nord de Ghardaïa, au centre du Sahara algérien (Figure 1). L'alimentation en eau est assurée par plusieurs oueds en période de crue : l'oued de Zargui au nord-ouest, l'oued de Lemkin et l'oued du Soudan au nord-est (**Khelifa et Remini 2019**). Notre périmètre d'étude est nommé **Oued El Bir**. Il est localisé en aval d'une station de traitement des eaux usées et il constitue l'extension de l'ancienne palmeraie de Berriane (Figure 1). Selon les données collectées auprès des services agricoles de Berriane, le périmètre occupe une surface de 300 ha distribuée à 89 agriculteurs. Cependant, cette superficie n'est pas totalement exploitée par les agriculteurs. Selon le représentant des services agricole de l'APC (Assemblée populaire communale) de Berriane, ce périmètre devrait t bénéficier de l'irrigation avec les eaux usées traitées issues de la STEP.

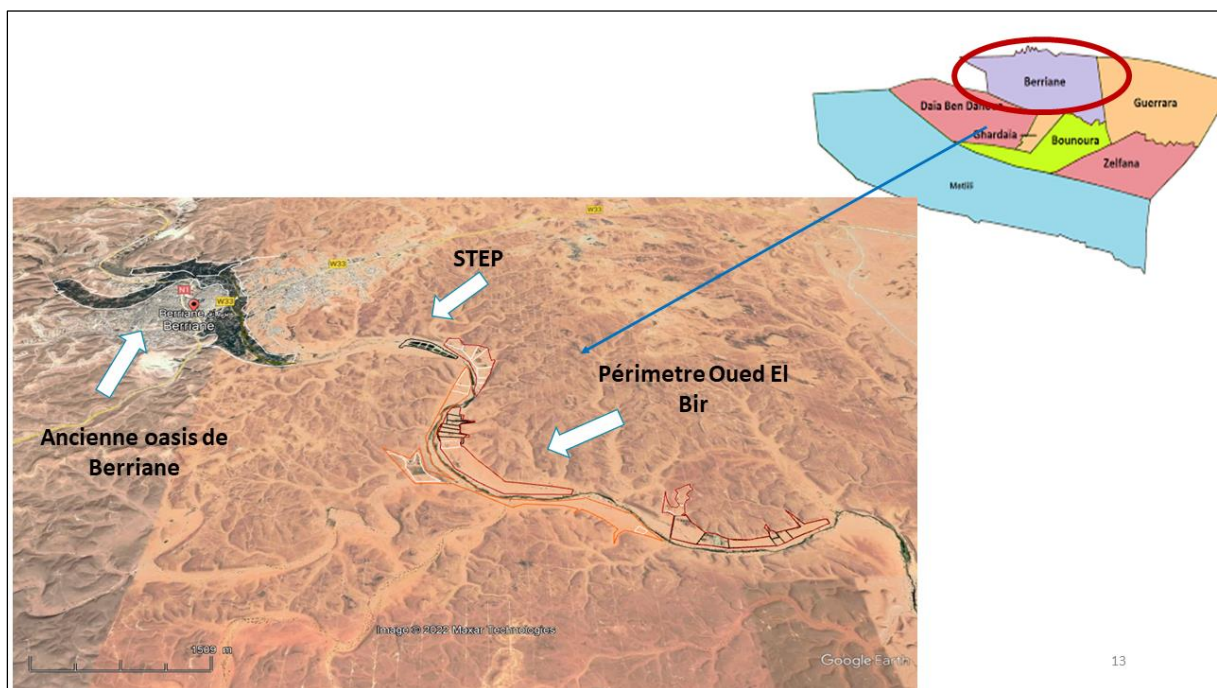


Figure 1 : Localisation du périmètre Oued El Bir – Berriane- Ghardaïa (Google earth2023)
(A droite : carte géographique de Ghardaïa. A gauche : localisation de périmètre étudié)

La région se caractérise par un climat chaud et sec en été, avec des variations importantes de la température diurne et nocturne, un rayonnement solaire intense et des vents forts (Hamdani et

al. 2012). Il s'agit d'une région extrêmement aride où les précipitations moyennes ne dépassent pas 100 mm par an et où les températures peuvent atteindre 50 °C en été. Les eaux souterraines sont la principale source d'irrigation des palmiers et la recharge des eaux souterraines se fait principalement par l'infiltration des eaux de pluie.

2.2. Hydrogéologie et ressource en eau dans la région

Les aquifères plus profonds du Complexe Terminal (CT) et du Continental Intercalaire (CI) sont également exploitées (constituant l'aquifère albien"). Leurs profondeurs varient entre 250 m et 1 000 m selon les endroits (Bouamer et al. 2019). La figure 2 montre les nappes qui alimentent la région du Chebka du M'zab dont Berriane fait partie. Selon Hakimi (2021), la dorsale du Mzab est l'équivalent géologique et géomorphologique du plateau de Tademaït.

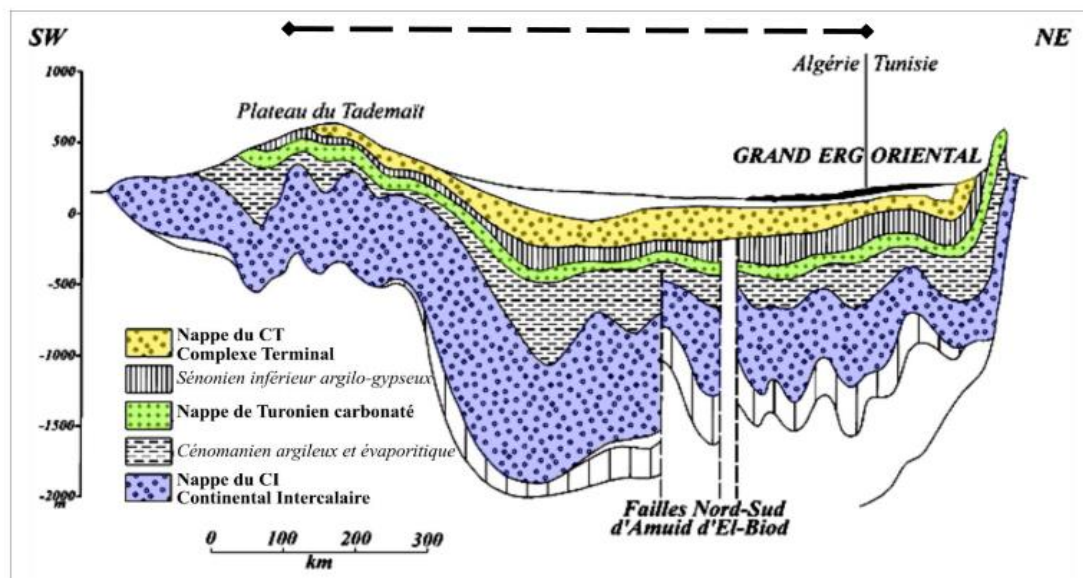


Figure 2 : Coupe hydrogéologique du domaine de SASS (Source : adaptée depuis Guendouz et al. 1997 in Hakimi 2021).

Dans notre zone d'étude, la nappe superficielle dite nappe phréatique est exploitée comme source d'irrigation. Cette dernière se trouve dans des dépôts quaternaires. Dans la dorsale du M'zab, Ces dépôts se localisent au fond de la vallée et ils peuvent atteindre 5 km de largeur (Figure 3). On trouve différents dépôts tels que : limon, gravier, conglomérat, sable fin parfois oxydés et consolidés. Ces remplissages quaternaires sont le plus souvent en contact direct avec les formations carbonatées cénomaniens-turonien érodées sur lesquelles ils reposent (**figure 3**) (Hakimi 2021)

Deux aquifères caractérisent la nappe phréatique dans la région du M'zab :

- L'aquifère alluvionnaire quaternaire : composé des alluvions, sables fin et grossiers, et également des poudingues en donnant à cet aquifère une porosité et une perméabilité ce qui favorise l'infiltration des eaux et l'écoulement souterrain. Ce remplissage de lit des oueds repose en général sur la barre carbonatée cénomano-turonienne avant d'atteindre les argiles, son épaisseur varie de 25 à 45 mètres (**Bendriou et Dddjeli 2011**).
- L'aquifère Céno-mano Turronien : Sa nature lithologique est de calcaire dolomitique massif d'une épaisseur de 40 à 100 mètres, grâce à sa perméabilité de fissure, il reçoit les eaux provenant de la surface directement ou par l'intermédiaire de l'aquifère alluvionnaire (**Bendriou et Dddjeli 2011**).

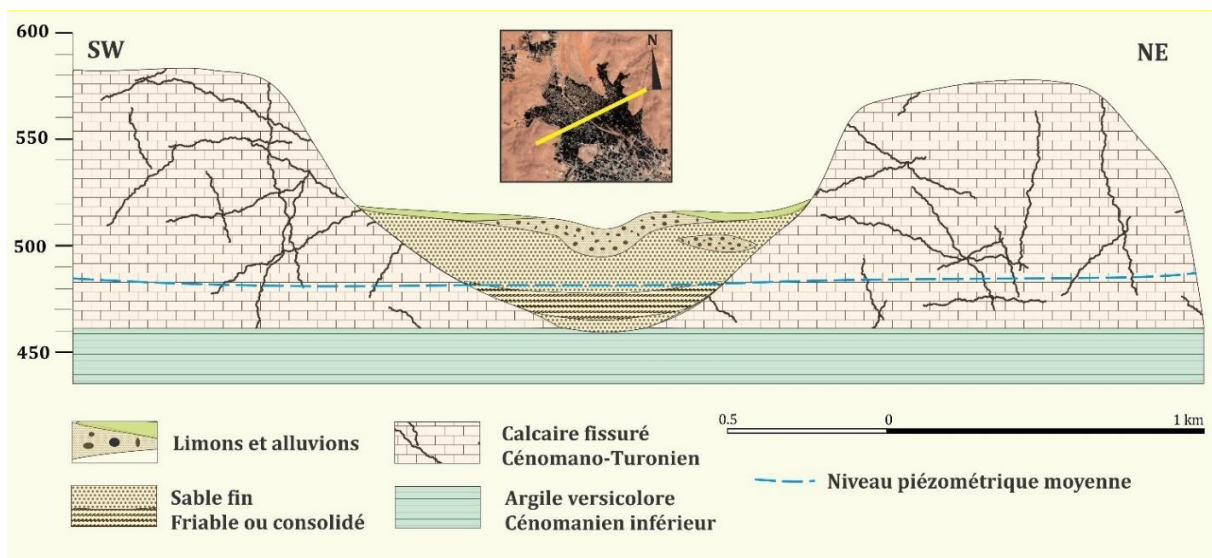


Figure 3 : Coupe géologique simplifiée au centre de la vallée du Mzab (Hakimi 2021).

2.3. Méthodologie

2.3.1. Echantillonnage et prélèvements

Trois visites sur le terrain ont été effectuées au cours du mois de juin 2021, juin 2022 et février 2023, où 9 échantillons d'eau souterraine et trois d'eau de surface (eaux usées) ont été collectés. La conductivité électrique, le pH et la température ont été mesurés sur terrain à l'aide d'un appareil portable multi paramètres de type HANNA. Puis, ces échantillons ont été transportés au laboratoire privé de contrôle de qualité à Ghardaïa (lab. sud), dans moins de 24 heures pour effectuer les mesures nécessaires.

L'échantillonnage est fait de sorte qu'on prend en considération la distance des forages par rapport à la STEP et également par rapport à l'oued comme c'est indiqué dans la figure suivante (Figure 3).

Echantillonnage des eaux souterraines

9 Forages de 9 exploitations ont été choisis pour effectuer cette étude. 3 points sont proche du pont de rejets de la STEP, 3 point sont un peu plus loin du rejet mais à proximité de l'oued, et 3 points sont plus loin du rejet et de l'oued. D'une manière générale, tous les forages réalisés dans ce périmètre se trouvent dans un rayon de moins de 1 km par rapport à l'oued où les eaux usées sont rejetées (figure 3).

Un prélèvement d'une eau d'un puits traditionnel (BFavt) a été effectué en amont de la STEP (hors périmètre d'étude) dont l'objectif est de comparer la qualité de ce puits avec la qualité des eaux des forages en aval de la STEP. Ce prélèvement va nous permettre de connaître s'il y a un changement de qualité des eaux de l'aquifère phréatique en aval de la STEP. Un dernier prélèvement s'agit d'une eau d'un forage albien (BFA) dont l'objectif est d'identifier s'il y a une infiltration d'origine albien dans la nappe phréatique. Le tableau suivant indique en détails les caractéristiques de forages choisis pour effectuer les prélèvements

Tableau 1 : Caractéristiques des forages de la nappe phréatique en aval de la STEP, le forage albien concernés par l'étude

Codage	Année de réalisation	Profondeur (m)	Niveau statique (m)
BF1	2017	51	30
BF2	2018	50	27
BF3	2019	60	35
BF4	2017	55	30
BF5	2016	66	39
BF6	2018	80	50
BF7	2018	83	43
BF8	2016	50	30
BF9	2020	40	35
Bfavt (puits traditionnel en amont de la STEP)	1900	40	35

Echantillonnage des eaux usées

Trois prélèvements des eaux usées ont été également effectués sur différents points de rejet pour évaluer l'impact d'épuration et de filtration naturels sur le rejet mais également pour comparer les mesures sur ces points avec celles des eaux. Ceci est dans l'objectif d'identifier d'éventuelle connexion entre les eaux usées et l'aquifère phréatique.



Figure 4 : points de prélèvements des eaux usées et des eaux de forages effectués dans la zone d'étude (BF : eau de forage, EU : Eau usée)

3. RESULTAS

3.1. Caractérisation hydrogéochimique des eaux de la nappe phréatique

3.1.1. Conductivité électrique (CE)

Afin de déterminer les caractéristiques physiques des eaux souterraines, un suivi des mesures de CE a été réalisé pendant les années 2021, 2022 et 2023 sur les eaux des forages phréatique en aval de la STEP, un forage albien, un puit traditionnel en amont de la STEP au niveau de l'ancienne oasis, et les eaux usées à l'entrée et la sortie de la STEP (**tableau 2**). La conductivité électrique présente des valeurs qui varient entre 1256 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) et 2890 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) pour les eaux des forages (de BF1 à BF9) et les eaux usées (de BEU1 à BEU3). Ces résultats montrent que

ces eaux usées et les eaux des forages sont très minéralisées ($1010 < CE < 3500 \mu S/cm$) (**Hakimi et al.2021**). L'irrigation avec ces eaux présente e risque de salinisation des sols.

Tableau 2 : mesures de la conductivité électrique des eaux de la nappe phréatique pour l'année 2021, 2022 et 2023

Nom	conductivité ($\mu S/cm$) 2021	conductivité ($\mu S/cm$) 2022	conductivité ($\mu S/cm$) 2023
BF1	2620	2850	2830
BF2	2530	2820	2890
BF3	2160	2410	2530
BF4	1950	2220	2250
BF5	2000	2230	2320
BF6	1530	1240	1256
BF7	1704	1920	1690
BF8	1930	2130	2180
BF9	1760	2000	2020
BEU1	1910	2200	2220
BEU 2	1890	2210	2270
BEU 3	1980	2240	2280

3.1.2. Faciès chimiques des eaux souterraines de la nappe phréatique

Dans cette étude, le diagramme de Piper a été utilisé pour analyser les processus géochimiques influençant la composition de l'eau et pour identifier les variations des faciès hydro chimiques de nos échantillons. Le diagramme de piper permet de regrouper les eaux qui ont les mêmes caractéristiques dans seul groupe selon leur composition chimique. En effet il pourra être un indicateur sur l'origine de la ressource en eau

Selon le diagramme de Piper, des structures similaires parmi tous les échantillons d'eau provenant des forages phréatiques du BF1 au BF 9 sont observées (figure 5). Comme indique le diagramme le faciès dominant de tous les points est chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne. Le diagramme nous indique qu'il n'y a pas de cations et d'anions dominants dans les eaux des forages de la nappe phréatique. Pour le forage albien (BFA) et les eaux usées (BEU 1, BEU2, et BEU3), le diagramme indique une dominance des cations potassium et sodium et l'anion sulfate pour le forage albien (BFA). Ce qui peut indiquer que les eaux usées et forage albien sont de la même origine. Selon **Moulla (2012)**, les eaux souterraines sont caractérisées par une dominance des sulfates et des chlorures équilibrés par le Ca et le Na.

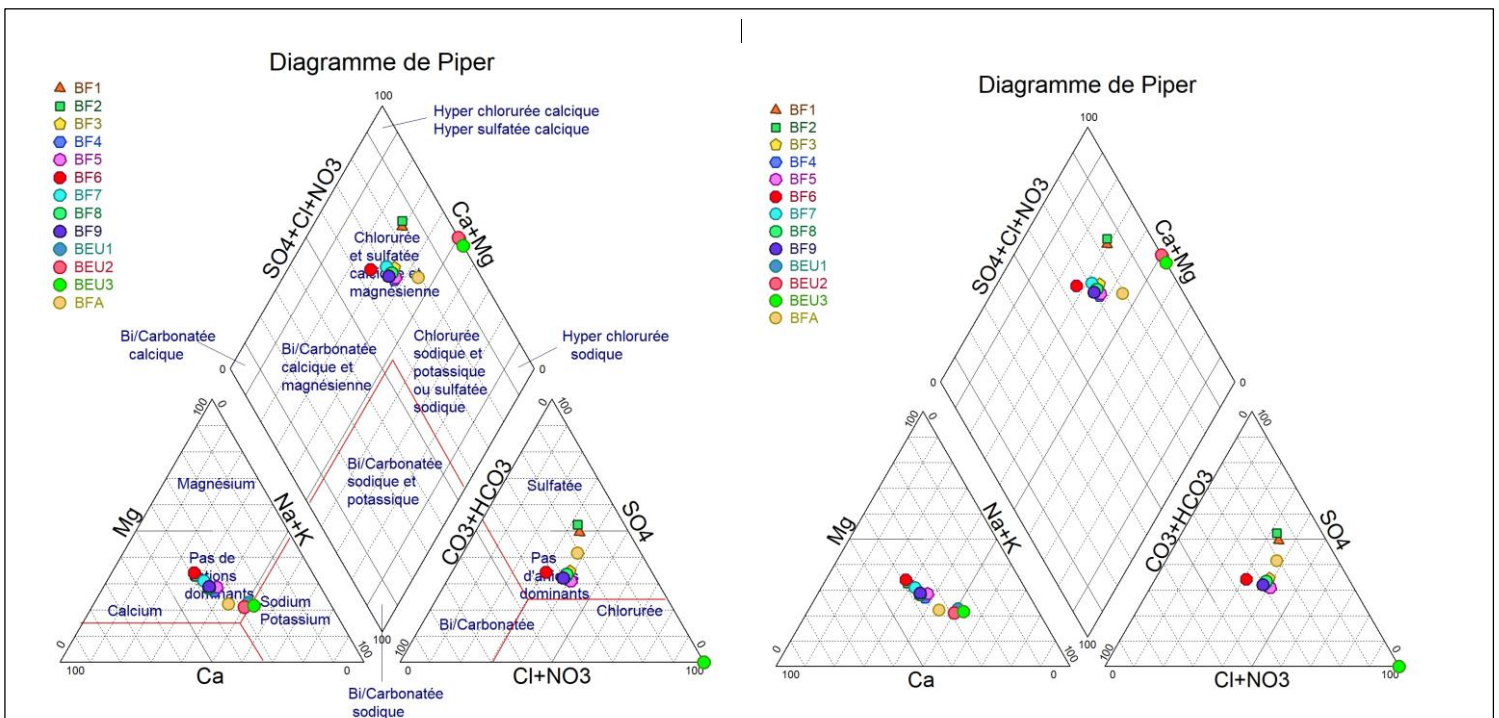


Figure 5 : diagramme de piper indiquant les faciès hydro chimiques des eaux des forages phréatiques, des eaux usées et de forage albien de la zone d'étude

3.2. Evaluation du rendement de la STEP de Berriane et la qualité biologique et microbiologique des eaux usées traitées

Avant de penser à l'impact des eaux usées traitées sur la nappe phréatique et la présence d'une éventuelle contamination de la nappe par les eaux usées, on devait évaluer le rendement de la station d'épuration en termes réutilisation des eaux usées traitées afin de savoir si les eaux traitées sont aptes pour l'irrigation selon la réglementation algérienne fixant les modalités de la réutilisation des eaux usées pour l'irrigation (tableau 3). Pour cela deux campagnes de mesures ont été réalisées entre 2021 et 2022. Ces mesures englobent les paramètres biologique (DBO, DCO, MES) et les indicateurs pathogènes à savoir : les coliformes fécaux et totaux, les streptocoques et E. Coli) (tableau4).

Tableau 3 : Normes microbiologiques algériennes de réutilisation et d'irrigation avec les eaux usées traitées selon le type de culture

GROUPES DE CULTURES	PARAMETRES MICROBIOLOGIQUES
	Coliformes fécaux (CFU/100ml)(moyenne géométrique)
Irrigation non restrictive	<100
Culture de produits pouvant être consommés crus.	
Légumes qui ne sont consommés que cuits.	<250
Légumes destinés à la conserverie ou à la transformation non alimentaire	
Arbres fruitiers (1).	Seuil recommandé <1000
Cultures et arbustes fourragers (2).	
Cultures céréalières.	
Cultures industrielles (3).	
Arbres forestiers.	
Plantes florales et ornementales	

Cultures du groupe précédent (CFU/100ml) utilisant l'irrigation localisée	pas de norme recommandée
---	---------------------------------

Pour rappel, la station de traitement par lagunage aérée à Berriane a été mise en service en 2021. Elle a une capacité de 60600 eq/Hab et elle assure le traitement de 2931m³/jrs

Tableau 4 : Résultats des mesures de paramètres microbiologique et biologique des eaux usées à l'entrée et à la sortie de la STEP des années 2021 et 2022

Campagne	2021				2022			
Code	Col. Tot.	Col. Féc.	E. coli	Strept. Féc.	Col,Tot	Col, Féc	E.coli	Strept Féc
BEU1 (entrée de STEP)	>1,4.10 ⁸	2,5.10 ⁴	3.10 ²	1,5.10 ⁴	>1,4.10 ⁶	70	1	2,5.10 ³
BEU2 (sortie de la STEP)	1,4.10 ⁵	2,5.10 ⁴	Absence	21	2,5.10 ⁴	7.10 ²	Absence	2.10 ²
BEU3 (Sortie de la STEP)	4,5.10 ⁵	4,5.10 ²	90	90	9,5.10 ⁴	4,5.10 ²	7	2,5.10 ⁴
	Paramètres biologiques (mg/l)							
	DBO	DCO	MES		DBO	DCO	MES	
BEU1 (entrée de STEP)	<2	399,98	139,34		50	400,06	150	
BEU2 sortie de la STEP)	17	133,28	61		47	204,29	12	
BEU3 (Sortie de la STEP)	18	146,61	28		43	238,33	14	
Normes algérienne de réutilisation des EUT	30	90	30		30	90	30	

Les résultats des paramètres biologiques obtenus pour l'an 2021 et l'an 2022 indiquent une amélioration de la qualité de l'eau à mesure qu'elle traverse la station de traitement des eaux usées, avec une réduction de la DCO, de la DBO5 et de la MES (tableau 4). En comparant ces

résultats avec les normes de réutilisation des eaux usées traitées en agriculture qui sont mentionnées **l'arrêté interministériel du 8 Safar 1433 correspondant au 2 janvier 2012 fixant les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation** avec les résultats des analyses obtenus on remarque que le DBO₅ est dans les normes de l'irrigation ce qui peut montrer l'efficacité de la STEP. Cependant la DCO est hors normes comme mentionnée dans le tableau à la sortie de la STEP. La MES est hors normes pour le BEU2 qui un point prélevé juste à la sortie de la STEP. Cependant au niveau du point BEU3, la valeur de la MES (28mg/l) est dans les normes de réutilisation des eaux usées traitées en agriculture. Sachant que le BEU3 est un prélèvement effectué après écoulement des eaux usées à une distance de 2 km environ. En conséquence on peut dire qu'il y a une sédimentation naturelle de la MES après écoulement des eaux usées traitées.

Pour les pathogènes on voit une augmentation des indicateurs E. Coli et des streptocoques dans le point BEU3. Ce point se localise à une distance de 3 km par rapport à l'entrée de la STEP. Cette augmentation est expliquée par la présence des oiseaux migratoires et des cheptels des ovins et des caprins dans le périmètre. Si l'on épand des eaux usées sur des sols extrêmement poreux, minces ou fissurés, avec une nappe phréatique proche de la surface (ou directement sous l'influence des eaux de surface), des agents pathogènes peuvent contaminer l'aquifère (OMS,2012). En ce qui concerne la réutilisation de eaux usées traitées en agriculture, cela dépend de types de cultures à mettre en place selon l'arrêté interministériel du 8 Safar 1433 correspondant au 2 janvier 2012 fixant les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation (Tableau 3). Cependant en cas d'utiliser de l'irrigation localisé, il n'y a pas de normes spécifiques recommandées pour l'irrigation de tout type de culture

3.3. Evaluation de la qualité microbiologique de la nappe phréatique

On a fait ces mesures pour compléter les mesures isotopiques et hydrogéochimique afin d'avoir une vision plus précise sur l'impact de l'eau usée sur la nappe. Notre objectif est de détecter la présence d'une contamination des forages par les eaux usées ou pas

Les résultats obtenus que ce soit pour l'année 2021 et l'année 2022 montrent la présence des pathogènes dans certains forages (Tableau 4 : les valeurs en jaune). En effet, on peut dire que les eaux usées traitées sont potentiellement une ressource de contamination des eaux de forages. A noter que les forages sont fermés donc il n'y a pas la possibilité d'avoir une contamination extérieure de ces forages. On a également observé comme résultat, l'absence d'une corrélation

entre la distance qui sépare les forages du rejet ou de l'Oued et le degré de contamination. Cependant, pour l'irrigation, une comparaison avec les normes algériennes d'irrigation avec les eaux usées traitées montre que ces eaux ne présentent aucun risque pour l'irrigation car elles ne dépassent pas le seuil recommandé par les normes algériennes de réutilisation des eaux usées en agriculture pour les types des cultures indiqué dans le tableau 5.

Tableau 5 : Résultats des analyses des pathogènes des forages qui sont localisés en aval de la STEP pour les années 2021,2022

Code	2021				2022			
	Col,Tot	Col, Féc	E.coli	Strept Féc	Col,Tot	Col, Féc	E.coli	Strept Féc
BF1	Absence	Absence	Absence	Absence	12	1	1	1
BF2	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
BF3	Absence	Absence	Absence	3	Absence	Absence	Absence	1
BF4	Absence	Absence	Absence	1	13	Absence	Absence	Absence
BF5	Absence	Absence	Absence	5	54	1	Absence	1
BF6	35	21	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
BF7	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
BF8	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence	Absence
BF9	12	10	4	4	54	Absence	Absence	1

En mettant au début comme hypothèse que la proximité des forages à l'oued où s'écoulent les eaux usées peut impacter la qualité de la nappe phréatique. Cependant les résultats trouvés ne valident pas cette hypothèse (**Figure 6**). Si on prend par exemple le BF3 qui est le plus proche de l'oued à une distance de 0,1 km, on observe qu'il y a des traces de contamination pour l'année 2021, et l'absence de cette dernière pour l'année 2022 (**Figure6, Tableau4**). Si on prend également le BF1 qui se localise à une distance de 0,30 km par rapport au rejet (**Figure6**), on voit que ce dernier n'est pas contaminé en 2021. Cependant on trouve des traces de contamination en 2022. Comme l'aquifère phréatique est peu étudié dans la région, on n'a pas des données sur l'écoulement des flux dans la nappe la vitesse d'infiltration par rapport à l'évaporation dans la région.

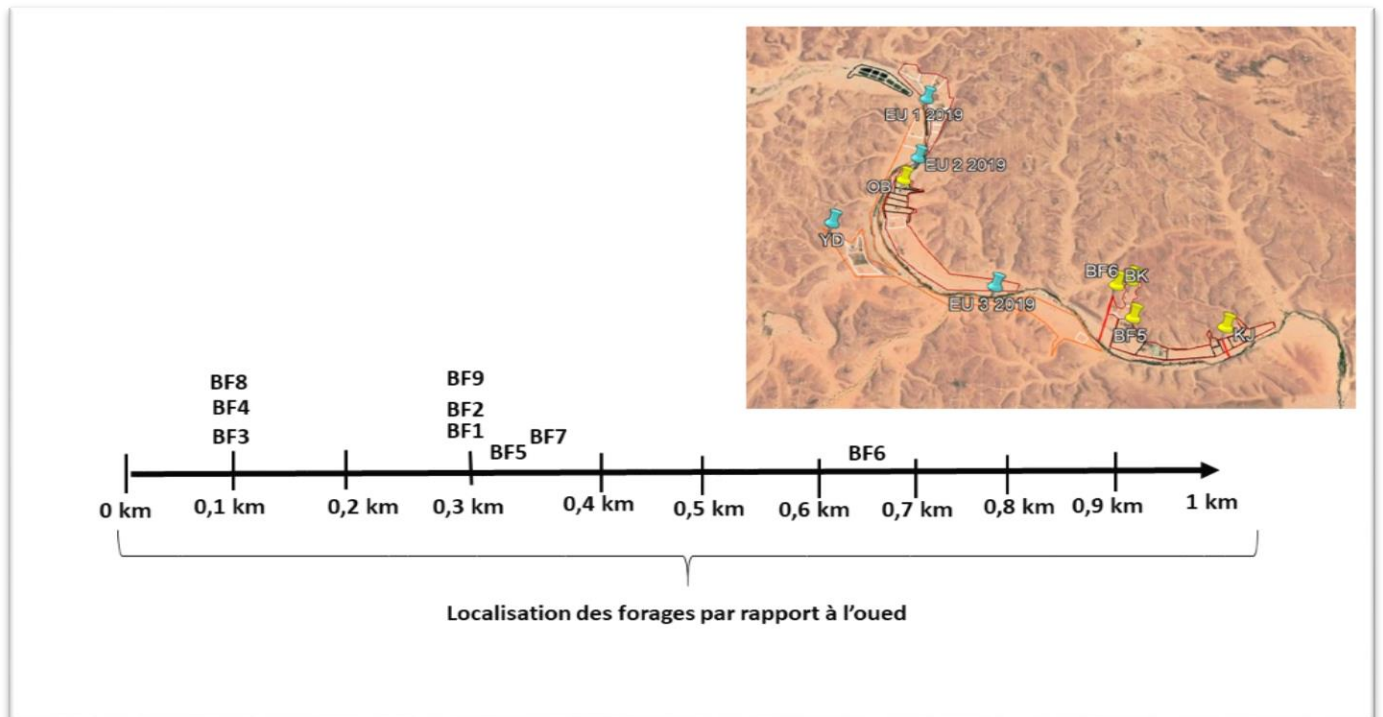


Figure 6 : la figure montre la distance entre la position des forages et l'oued qui est alimenté uniquement par le rejet des eaux usées

3.4. Mesures isotopiques : utilisation des isotopes stable de l'oxygène 18 et de deutérium pour étudier la possibilité de connexion eaux usées/ eau de nappe

Les données isotopiques et géochimiques sont utilisées pour montrer des variations d'une zone à l'autre, reflétant des différences dans la matrice de l'aquifère, les mécanismes de recharge, les directions d'écoulement des eaux souterraines, l'âge des eaux souterraines, les conditions de mélange des eaux souterraines et les connexions hydrauliques (Moulla et al.2012).

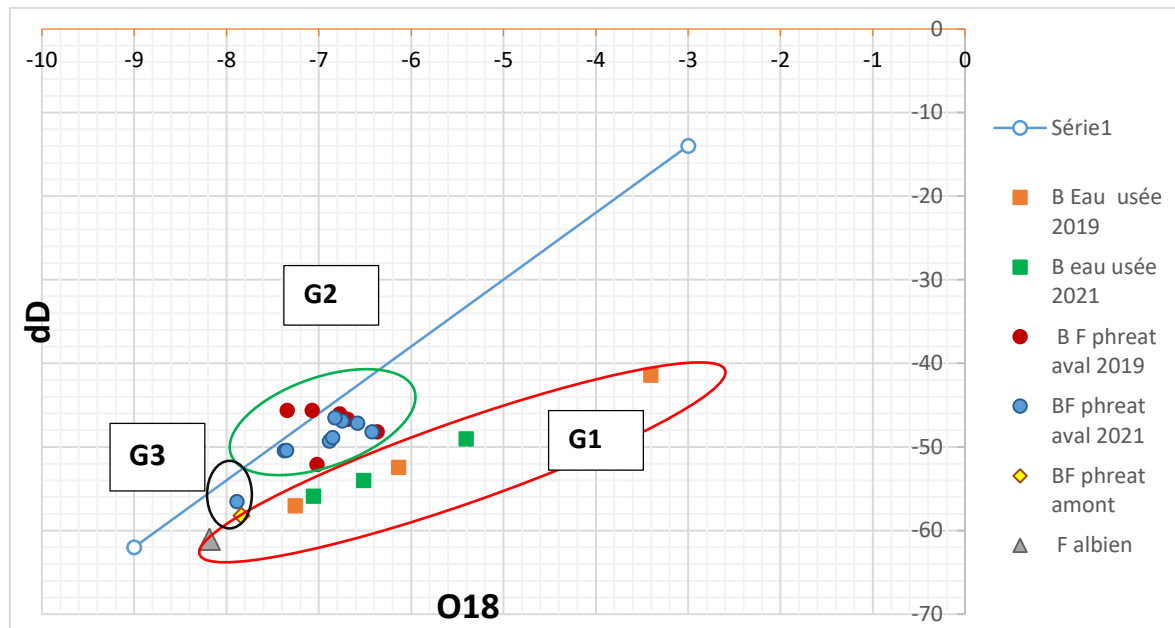


Figure 7 : diagramme montrant les résultats obtenus des isotopes de stables de l'oxygène (O18) en fonction de deutérium (dD) pour les eaux des forages

Le graphique au dessus (figure 7) représente le diagramme isotopique de l'oxygène 18 et de deutérium. Le graphique indique 3 groupes d'eaux. Dans le premier groupe (**G1**), les stables isotopes montrent une réelle évaporation pour tous les points des eaux de surface (eaux usées). Ils montrent également que l'eau du forage albien BFA, et l'eau de puits traditionnel localisé en amont de la STEP (BFavt) s'aligne sur la droite d'évaporation avec les eaux de surfaces. Cette évaporation est expliquée par présence d'un mélange des ressources en eau différentes (**Moulla et al.2019**). Le forage albien (BFA) a des caractéristiques isotopiques de ($\delta^{18}O = -8.2\%$, $\delta^2H = -62\%$) qui est différente de la composition isotopique moyenne de la pluie ($\delta^{18}O = -5.1\%$, $\delta^2H = -26\%$) (**Hakimi et al.2021**). Ces eaux sont pauvres en isotopes ce qui peut conclure que ce sont des eaux qui sont s'infiltré dans un passé plus froid (**Edmunds et al.2003** *In Hakimi et al.2021*). L'évaporation montre que l'origine des eaux usées de la ville de Berriane est l'eau albiennne. Pour le puit traditionnel, cela signifie qu'il y a un mélange eau albiennne, eaux phréatique donc une recharge de la nappe phréatique par les eaux albiennes. Cette recharge est expliquée par le fait que l'agriculteur pratique une mixte irrigation eaux de puits et de la nappe albiennne selon l'interview avec l'agriculteur. Ce qui implique l'infiltration de l'eau de l'albiennne vers la nappe phréatique. Selon la littérature, tous les points en dessous de la droite météorologique mondiale sont signe d'un fractionnement lors de l'évaporation (**Gaultier et al., 2003**).

Le deuxième groupe 5 (**G2**) représente les forages qui se trouvent en aval de la STEP (figure 6). Ces eaux peuvent représenter les eaux de la nappe calcaire, selon l'hydrogéologue Christian Leduc. Ce dernier explique également qu'on ne peut avoir à travers ces données isotopiques, un résultat montrant incontestable une infiltration des eaux usées vers l'aquifère phréatique.

Le troisième groupe (G3) est un groupe intermédiaire entre le premier groupe et le 2eme groupe. Le BF art est très proche de la droite de l'évaporation. En effet c'est un puits traditionnel qui se localise en amont de la STEP, dans l'ancienne oasis de Berriane. L'explication la plus pertinence pour ce cas est : l'agriculteur pratique l'irrigation avec l'eau albienne dans sa parcelle ce qui explique la présence d'un mélange eau albien, eau calcaire pour ce puits.

3.4.1. Effet du traitement des eaux usées par le lagunage sur l'oxygéné 18 et Le deutérium

Le diagramme isotopique en dessous présente les résultats isotopiques obtenus durant les années 2019 et 2021 du forage albien (BFA) et des eaux usées (BEU1, BEU2, BEU3) prélevés à différents points du rejet des eaux usées après sortie de la STEP. L'objectif est de voir l'effet du traitement des eaux usées sur la variabilité isotopique et également savoir si les isotopes de l'eau potable (albien) sont similaires à ceux des eaux usées traitées. Le diagramme isotopique montre que l'eau albienne et les eaux usées s'aligne sur la même droite qui représente la droite de l'évaporation. Ceci est un signe de fractionnement isotopique durant l'évaporation (**Gaultier et al., 2003**).

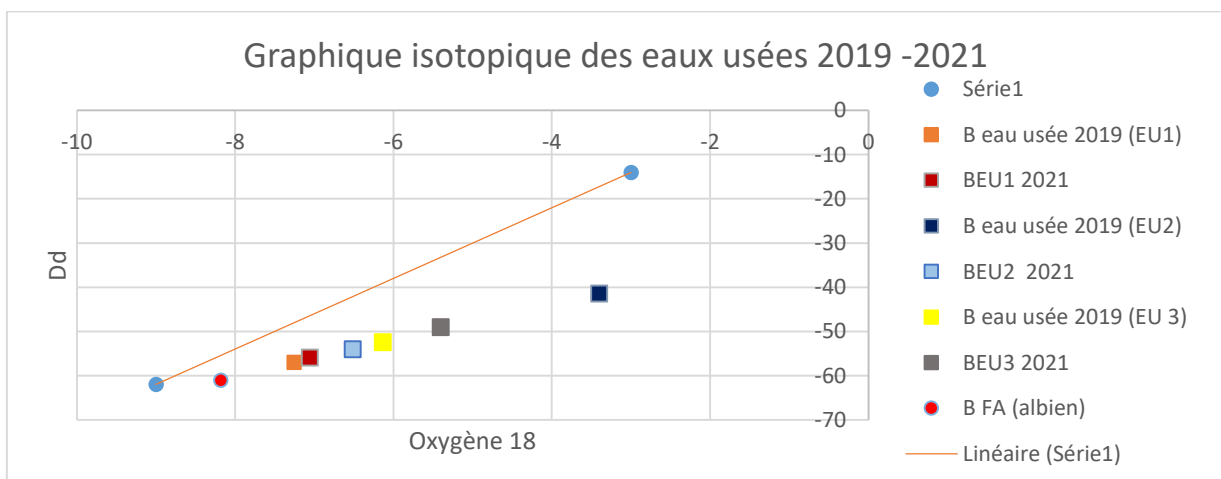


Figure 7 : diagramme montrant les résultats obtenus des isotopes de stables de l'oxygène (O18) en fonction de deutérium (dD) pour les eaux usées et le forage albien

4. DISCUSSION

Il est crucial d'assurer une gestion adéquate et une protection de tous les éléments constitutifs des ressources en eau afin d'assurer leur disponibilité et leur pérennité. Dans cette perspective, il est essentiel de mener des études sur les volumes d'eau, la dynamique des flux, la qualité et les risques de contamination (**Mahlangu et al. 2020**). Cette étude repose sur une approche méthodologique intégrant trois méthodes distinctes : l'hydrogéochimie de l'eau, les isotopes stables de l'oxygène 18 et du deutérium, ainsi qu'une caractérisation biologique et microbiologique de deux ressources en eau, à savoir les eaux usées et les eaux de nappe.

Cette approche de combinaison notamment de l'analyse hydrogéochimique et isotopique est très utilisée pour déterminer la liaison entre différentes sources d'eau, et produire également des connaissances sur la composition géochimique des eaux souterraines et sa composition (**Hakimi et al.2021, Saidani et al. 2023, Moulla et al.2012**). Elle a été utilisée également pour voir l'évolution de la qualité des eaux souterraines dans les régions influencées par les pratiques agricoles et le déversement des eaux usées (**Butler 2007**). Les isotopes stables par exemple peuvent être une méthode efficace d'estimation des taux d'infiltration des zones de captage petites possédant un système hydrogéologique simple (**Schilperoort et al.2007**).

L'hypothèse initiale postulait l'existence d'une éventuelle connexion entre les eaux de surface (en l'occurrence, les eaux usées dans notre cas d'étude) et les eaux de la nappe phréatique. La combinaison de ces trois méthodes s'est avérée pertinente, car elle a permis d'obtenir des informations sur la composition isotopique et hydrogéochimique de la nappe phréatique, une zone peu étudiée jusqu'à présent, comme indiqué par l'absence pratiquement totale d'études antérieures sur ses caractéristiques (**Hakimi et al., 2021**). Cependant, cette approche n'a pas confirmé de manière probante l'existence d'une connexion entre les eaux usées et les eaux de la nappe. D'autres approches d'analyses sont actuellement utilisées pour évaluer la contamination des ressources en eau douces dont parmi eux on l'analyse des contaminants émergents à savoir les polluants médicamenteux (**Ternes et al. 2010**). Cette approche est utilisée car Divers résidus pharmaceutiques sont rejetés par les effluents des stations d'épuration des eaux usées dont l'impact sur la qualité de l'eau des rivières est d'une grande importance pour l'évaluation des risques environnementaux (**Zhou et al.2009**).

5. CONCLUSION

Cette étude vise à démontrer la corrélation entre les eaux de surface, considérées comme les eaux usées dans le cadre de notre analyse, et les eaux souterraines de l'aquifère phréatique. Nous

avons mis comme hypothèse que la connexion entre ces deux ressources s'effectue par la percolation des eaux usées vers la nappe phréatique. De plus, cette recherche nous a permis d'évaluer la qualité hydrogéochimique, biologique et microbiologique de la nappe phréatique. Les résultats des mesures isotopiques, hydrogéochimiques, biologiques ne confirment pas la présence d'une éventuelle liaison entre les eaux usées et les eaux de la nappe phréatique. La qualité hydrogéochimique, biologique et microbiologique indique que les eaux provenant des forages destinés à l'irrigation sont conformes aux normes algériennes d'irrigation établies *par le Décret exécutif n° 07-149 du 3 Joumada El Oula 1428 correspondant au 20 mai 2007 fixant les modalités de concession d'utilisation des eaux usées épurées des fins d'irrigation*, sous l'hypothèse d'un mélange entre les eaux usées et les eaux de nappe.

L'évaluation de la relation entre les eaux usées et les eaux de la nappe requiert une surveillance périodique et continue. Diverses mesures supplémentaires s'avèrent nécessaires afin d'obtenir des résultats précis, notamment la mesure des isotopes des nitrates, du carbone 14 et du tritium. Une évaluation de la quantité d'eau usée traitée évaporée est également prévue pour déterminer avec précision la quantité réellement infiltrée dans la nappe. Afin de pousser l'analyse de scénario de connexion entre les usées et la nappe phréatique, des mesures des polluants émergents (polluant médicamenteux) sont en cours pour confirmer notre hypothèse de départ. Cette méthode permet de détecter la présence des traces de médicaments dans les eaux douces. Ces polluants médicamenteux qui sont présentes dans les eaux usées ne peuvent être éliminés durant le traitement des eaux usées. On a fait une première analyse sur un échantillon d'eau de forage dans notre périmètre d'étude. Le résultat révèle la présence de 15 médicaments de l'eau. Une campagne de mesure plus large sera effectuée prochainement pour confirmer la première analyse et également confirmer l'hypothèse d'infiltration des eaux usées dans la nappe phréatique.

Conclusion générale

Chapitre 5 : Conclusion générale

I. Principaux résultats de cette thèse

Au cours du XXe siècle, Ghardaïa a connu une révolution dans l'utilisation des ressources, attribuable à l'introduction de l'énergie (par le biais du pompage) et à l'accès à la nappe profonde (nappe albienne) à partir des années 1945. Cette révolution a engendré une transformation radicale du comportement des habitants de la région. L'eau est devenue largement disponible, entraînant une transition de l'utilisation très rationnelle d'une petite quantité d'eau à l'exploitation d'une eau artésienne très abondante, avec des débits dépassant 21 l/s (**Benasaad, 2011**). Cet accès accru à l'eau a eu un double impact. Le premier, positif, a favorisé l'expansion de la superficie agricole et l'exploitation de nouvelles terres, conduisant ainsi à une diversification de la production agricole. Cela a généré d'importants revenus pour les agriculteurs, en particulier avec l'avènement de l'agriculture entrepreneuriale. Le deuxième impact, négatif, a donné lieu à la production d'une nouvelle ressource en eau : les eaux usées non traitées. Ces dernières ont eu des répercussions négatives sur la qualité de la nappe phréatique, notamment avant la mise en place de l'assainissement collectif. Pour remédier à cela, l'État a mis en place quatre stations de traitement des eaux usées par lagunage depuis 2012.

Notre recherche s'est concentrée sur les oasis et leurs extensions, en se fondant sur une nouvelle ressource intégrée dans le bilan hydrique : la réutilisation des eaux usées et des nutriments en milieu aride. Deux systèmes distincts de recyclage des eaux et des nutriments ont été analysés individuellement dans les oasis de Ghardaïa et leurs extensions. Cependant, ils peuvent être associés dans une approche d'économie circulaire. Il s'agit d'abord de la production d'engrais naturels à partir de matière fécale humaine, à l'aide de toilettes sèches. En second lieu, la réutilisation des eaux usées traitées en sortie des stations de traitement des eaux usées, a été examinée tout en prenant en considération la place des institutions dans la gestion des projets de réutilisation des eaux usées traitées

À Ghardaïa, au sein de la communauté mozabite en particulier, la gestion des ressources naturelles et le recyclage de divers types de déchets au sein des oasis représentent des éléments essentiels de la résilience des habitants dans un contexte aride fragile. À travers le système millénaire de recharge et de partage des eaux de crue (**Saidani et al. 2022**) ainsi que la pratique ancienne de la réutilisation des excréments humains en agriculture au moyen de toilettes sèches (**Bekaddour et al. 2021**), ces communautés ont su maintenir un équilibre écologique et environnemental au fil des siècles. Cet équilibre s'est manifesté par l'élimination efficace de la

matière fécale, utilisée comme engrais naturel, assurant ainsi la protection de l'oasis et de la nappe phréatique contre la contamination, ainsi que la prévention de la transmission de maladies. Cependant, ces initiatives demeurent l'œuvre de la société civile, représentée par les notables de la région et les associations, car les toilettes sèches ne bénéficient pas actuellement de la reconnaissance des institutions étatiques. Il convient de noter que ce système présente des limites à Ghardaia, notamment en l'absence de données sur les composants des engrais produits à partir de matière fécale, en particulier en ce qui concerne l'élimination des pathogènes, constituant un facteur de risque pour la santé des agriculteurs. De plus, notre étude ne s'est pas appuyée sur une approche quantitative permettant de déterminer la contribution de ce fumier humain à la production agricole au sein de l'oasis.

Dans la seconde partie de cette thèse, notre attention s'est portée sur l'étude de la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture au sein des oasis, en se concentrant particulièrement sur la région de Berriane, l'une des oasis mozabites.

À Berriane, en aval de la station de traitement, un nouveau périmètre agricole a émergé dans le but de bénéficier de l'irrigation avec les eaux usées traitées. Les agriculteurs expliquent leur installation dans cette nouvelle terre, qualifiée de "front pionnier", en mettant en avant trois facteurs : 1/ l'utilisation des toilettes sèches dans l'ancienne oasis par eux et leurs ancêtres, établissant ainsi un lien entre l'utilisation des excréments humains et les eaux usées. 2/ la disponibilité de la terre. Et. Ceci s'explique par le fait que le périmètre se trouve dans un lit d'oued. L'analyse du front pionnier de la réutilisation des eaux usées nous a permis de comprendre la situation des périmètres de réutilisation en Algérie, caractérisée par des contraintes institutionnelles telles que l'absence d'un organisme spécifique de gestion des périmètres de réutilisation. De plus, l'un des principaux obstacles au bon fonctionnement des stations de traitement des eaux usées semble être le manque de coordination interinstitutionnelle, notamment au niveau local. Ces contraintes ralentissent la mise en œuvre de la stratégie du ministère, qui considère la réutilisation des eaux usées traitées comme une ressource cruciale pour l'économie nationale (MRE, 2017). Par ailleurs, afin d'évaluer la durabilité de ces périmètres, nous avons adopté une approche intégrant plusieurs types d'analyses hydrogéochimiques, bactériologiques, isotopiques et de polluants émergents. Ces mesures visent à détecter la présence d'eaux usées dans la nappe phréatique par le biais du processus d'infiltration des eaux usées vers les eaux souterraines. Les premiers résultats, en particulier ceux concernant les polluants émergents, révèlent la présence de traces de médicaments dans les forages situés à proximité des points de rejet des eaux usées. Cette

constatation remet fortement en question l'interdiction de la réutilisation directe des eaux usées traitées.

II. Réutilisation des eaux usées et des nutriments dans la vallée du M'zab : Concept d'économie circulaire

La circularité de l'eau et des déchets est l'une de pratiques ancestrales dans la vallée du M'zab. Ceci est démontré clairement par le système de partage des eaux de crues dont l'un de ces composantes est les puits capteurs qui sont des ouvrages qui permettent la recharge de la nappe phréatique (**Saidani et al.2022**). Cette technique permet au agriculteur d'assurer un approvisionnement en eau pour plusieurs années. Aujourd'hui, les systèmes alimentaires, énergétiques et hydriques contemporains émergent des avancées technologiques, des méthodes et des politiques élaborées pour répondre aux besoins spécifiques de chaque secteur (tel que l'énergie ou l'agriculture). Les déchets générés par chaque secteur sont habituellement gérés de manière distincte, et les systèmes de production associés aux FEW (Food, Energy, Water) ont traditionnellement considéré la pollution et les déchets comme des externalités simplement dispersées dans l'environnement environnant (**Davis et al.2016**). L'économie circulaire émerge en tant que concept régénératif visant à minimiser les émissions, à s'appuyer sur des sources d'énergie renouvelable, et à éliminer les déchets grâce à la conception de systèmes en boucle fermée et à la réutilisation des matériaux et des ressources. La mise en œuvre de pratiques d'économie circulaire au sein des systèmes agricoles, grands consommateurs de ressources, s'avère essentielle pour atténuer les conséquences environnementales des modèles actuellement linéaires. En tant que composante renouvelable de l'économie circulaire, la bio-économie facilite la production de ressources biologiques renouvelables, telles que la biomasse, qui se transforme en nutriments, produits bio-sources et bioénergie. L'usage d'eaux usées agro-industrielles recyclées dans les activités agricoles, notamment l'irrigation (**Rodias et al.2020**).

La réutilisation des eaux usées et des nutriments, allant des toilettes sèches en tant que systèmes ancestraux de gestion des déchets jusqu'à l'introduction des nouvelles technologies de traitement des eaux usées à grande échelle, constitue un exemple concret de circularité des eaux et des nutriments. Les toilettes sèches ont redéfini la nature des déchets humains au M'zab, où ils ne sont pas considérés comme des déchets, mais comme une source de fertilisant biologique et économique. Cette pratique de réutilisation permet l'élimination efficace des excréments humains dans l'oasis. Cependant c'est un pratique qui a été un peu abandonné et à travers cette thèse on a évalué la prémisse de renouveau au tour de la protection de l'environnement. La généralisation de ce système dans les oasis, elle peut contribuer à limiter la prolifération des

fosses septiques en l'absence d'assainissement collectif et pourrait également réduire les coûts de raccordement aux réseaux collectifs.

En ce qui concerne les eaux usées traitées produites par les stations de traitement des eaux usées, elles constituent une ressource précieuse dans ces zones arides, où l'accès à l'eau souterraine pour l'irrigation est coûteux. À titre d'exemple, les stations d'épuration de Berriane et de Guerrara, qui produisent respectivement plus de 2000 m³/j chacune, sont destinées à l'irrigation de 700 hectares au total, comme le rapporte la Direction des Ressources en Eau de Ghardaïa en 2023. En outre, cette ressource peut également être exploitée pour la recharge artificielle de la nappe phréatique. Les analyses de l'eau effectuées à Berriane en aval de la station, notamment la détection des polluants émergents, révèlent l'infiltration des eaux usées dans les forages de la nappe phréatique. Toutefois, la quantité exacte infiltrée demeure inconnue. Cependant, pour parvenir à une gestion efficace des eaux et des nutriments et pour boucler la boucle, éliminant ainsi la notion de déchets dans la région, plusieurs mesures doivent être prises en considération. Selon l'expérience sur le terrain, il est impératif d'instaurer un dialogue impliquant plusieurs acteurs et des approches participatives afin d'harmoniser les perspectives des parties prenantes. Ce dialogue doit aboutir à des décisions applicables sur le terrain, visant à une exploitation optimale des ressources existantes.

III. Perspectives

Face aux défis rencontrés dans le traitement et la réutilisation des eaux usées en Algérie, en particulier dans les oasis du Sud, il est impératif de prendre en compte de nouvelles considérations pour progresser dans ce secteur. Le cas de Ghardaïa illustre une base solide qui pourrait favoriser le développement de l'assainissement et de la réutilisation des eaux usées. Cette base comprend divers systèmes en dehors des réseaux d'assainissement collectif, notamment les toilettes sèches. De plus, des traitements à échelle décentralisée sont également disponibles. Cependant, la mise en place de ces systèmes reste principalement une initiative privée, échappant souvent à l'attention des institutions. Ceci nous amène à envisager les perspectives suivantes.

III.1. Implication des acteurs locaux pour la mise en place des projets

À Ghardaïa, en particulier au sein de la communauté mozabite, l'un des principes fondamentaux de la structure sociale est la concertation et le partage, qui imprègnent la vie quotidienne de cette communauté. Ces principes sont également appliqués dans la gestion des ressources naturelles des oasis, notamment à travers un système communautaire de partage et de gestion

des ressources en eau, qu'elles soient de surface ou souterraines, afin d'assurer une répartition équitable entre tous les bénéficiaires (Saidani et al. 2023). De plus, la gestion des déchets dans les oasis est assurée par l'utilisation de toilettes sèches et le recyclage des débris végétaux. Toutes ces pratiques ont été mises en œuvre pour répondre aux défis spécifiques de la région, notamment la topographie, le climat hyper-aride et la rareté des ressources. Par conséquent, il est essentiel que les autorités locales concertent avec les acteurs locaux pour élaborer ensemble des réflexions sur la mise en œuvre de projets de traitement et de réutilisation adaptés au contexte oasien, en particulier pour le traitement et la valorisation des eaux usées des zones éloignées et des sites touristiques situés dans l'oasis. Prendre en compte le contexte spécifique de la région en engageant une concertation avec les parties prenantes locales en vue de l'élaboration d'un projet de traitement et de réutilisation des eaux usées.

III.2. Instauration de systèmes de traitement décentralisés

Approfondir la réflexion sur l'implantation de systèmes de traitement décentralisés par les autorités locales revêt une importance capitale. Ces systèmes sont en mesure d'assurer simultanément le traitement des petits effluents et la réutilisation de l'eau traitée pour la création d'espaces verts, notamment dans un contexte hyper-aride. Il convient de noter l'existence d'initiatives privées visant à mettre en place un système de traitement décentralisé, telles que l'expérience de traitement des eaux usées par la technique de phytoépuration dans l'éco-quartier de Tafilelt, en vue de réutiliser les eaux usées traitées pour irriguer et créer une ceinture verte autour de l'éco-quartier. Cependant, ce système est actuellement à l'arrêt en raison du manque d'expertise pour améliorer ses performances. Dans le cadre de notre projet de recherche, un système de traitement décentralisé a été mis en place dans l'éco-quartier en collaboration avec la Fondation Amidoule, propriétaire du quartier Tafilelt à Ghardaïa, des chercheurs de l'ENSA et de l'INRAE, ainsi que l'entreprise ENVIROSTEP Algérie. Ce système assure le traitement des eaux usées de deux écoles et l'irrigation d'une parcelle expérimentale de 2500 m². Cette expérience, toujours en cours, a été favorablement accueillie par les acteurs locaux, notamment les gîtes touristiques dans l'oasis. C'est pourquoi les institutions et les responsables dans le domaine des eaux usées doivent collaborer pour trouver des solutions innovantes adaptées au contexte topographique et socio-culturel de la région. Dans l'ancienne oasis de Ben Isguen, des analyses de la qualité de l'eau de certains puits traditionnels ont révélé la présence de coliformes, en raison de l'absence de réseau d'assainissement et de l'utilisation de fosses septiques. Il est à noter que les *Oumanas el Sayel*, qui sont les gestionnaires de l'eau dans l'oasis, ainsi que les associations œuvrant pour la protection des oasis, s'opposent au passage du réseau

d'assainissement collectif à l'intérieur des oasis, considérant que cela constitue un risque pour la durabilité de l'oasis.

III.3. Amélioration du rendement des STEP et suivi de la qualité de l'eau

Il est primordial d'adopter une approche rigoureuse dans la gestion et l'entretien des stations de traitement des eaux usées. Cela implique un suivi continu de la qualité des eaux usées traitées à travers la réalisation régulière de diverses analyses, notamment bactériologiques et de polluants émergents. Cette démarche vise à préserver la santé des utilisateurs et à prévenir la contamination des eaux souterraines.

III.4. Valorisation des résultats de recherche pour un développement de la filière

L'implication de la recherche scientifique dans la mise en œuvre de projets revêt une importance cruciale pour le développement local d'un pays. Au cours de cette thèse, nous avons observé que la recherche est souvent déconnectée du processus de développement. Or, la recherche scientifique dans le domaine de la réutilisation des eaux usées peut générer diverses connaissances. À titre d'exemple, cette étude met en lumière plusieurs aspects. Tout d'abord, elle met en évidence la coexistence de différents systèmes de traitement et de réutilisation des eaux usées, en identifiant les points forts et les limites de chacun de ces systèmes, et propose des perspectives pour leur amélioration future. Deuxièmement, elle contribue à la production de connaissances sur la qualité des eaux usées et son impact sur l'environnement, à travers diverses mesures qui peuvent être utilisées par les institutions locales pour améliorer les performances des stations d'épuration. Troisièmement, elle souligne l'organisation d'ateliers participatifs réunissant différents acteurs, notamment les institutions et les agriculteurs, afin d'examiner la situation de la réutilisation des eaux à Ghardaïa. Pour ces acteurs, il s'agit d'une première expérience qui leur permet de se rassembler autour d'une même table pour discuter du sujet et identifier les principaux obstacles rencontrés dans un projet de réutilisation des eaux (COSTEA. 2023).

Productions scientifique

1- Articles : publication dans des revues de **catégorie A**

- **The re-emergence of dry toilets and fecal nutrient reuse in ancient M'Zab** » Journal of water sanitation and hygiene for development DOI : 10.2166/washdev.2021.115. Auteurs: Sara Bekaddour, Nassim Ait-Mouheb, Tarik Hartani
- **A story of hope and frustrations: a wastewater-based agricultural frontier in the Algerian Sahara.** International journal for water resources development. <https://doi.org/10.1080/07900627.2024.2311803> Auteurs : Sara Bekaddour, Tarik Hartani, Pierre -Louis Mayaux, Nassim Ait-Mouheb

2- Conférences scientifiques internationales

- **Unlocking the reclaimed wastewater reuse in a pioneer front, in Berriane, Algeria.** Internationale «3rd Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration- sousse-Tunisie » du 10 au 13 juin 2021. Auteurs : Sara Bekaddour, Nassim Ait-Mouheb, Tarik Hartani
- **The challenges of water reuse in an Algerian oasis pioneer front:** Sara Bekaddour, Tarik Hartani Nassim Ait-Mouheb , Pierre-louis.mayaux. 13th IWA International Conference on Water Reclamation and Reuse, Chennai - Inde du 15 au 19 janvier 2023
- **Water Reuse in Algerian Oasis Region: Institutional Management Bottlenecks and Demonstration of Operational Feasibility.** Conference: WARMS-2024: water resources management and sustainability: solutions for arid regions At: Dubai, United Arab Emirates. **Sara Bekaddour, Tarik Hartani, Pierre-Louis.mayaux, Nassim Ait-Mouheb .**

Autres activités

- Membre d'un projet de : Mise en place d'un démonstrateur décentralisé de traitement et de réutilisation des eaux usées au niveau d'un Eco quartier « Tafilelt »
- Formation intensive sur la réutilisation des eaux usées assurée par IAM Zaragose-Espagne
- Formation sur la facilitation et l'approche participative assurée par le Lisode-Montpellier – France

- Formation sur la rédaction des guides pratiques et des policy brief assurée par le CIRAD - Tunisie
- Production des capsules vidéos sur la réutilisation multi échelle des eaux usées et des nutriments à Ghardaïa (en cours)
- Animation des ateliers participatifs sur la reutilisation des eaux usées dans le cadre du projet COSTEA

Références bibliographiques

Référence bibliographiques

Ababsa N., Kribaa M., Ouldjaoui A., Tamrabet L., Addad D., Hallaire V., 2019. Long-term effects of wastewater reuse on hydro physicals characteristics of grassland grown soil in semi-arid Algeria. *Journal of King Saud University - Science*: 1-23.

Adad M.C.,2008. La participation de la population à son habitat: Cas d'un nouveau Ksar au M'zab. *Science et technologie*, 28: 67-76.

Adewumi, J. R., & Oguntuase, A. M. (2016). Planning of wastewater reuse programme in Nigeria. *Consilience*, (15), 1-33.

Agricultural Services Directorate (direction des service agricole).2021. Statistical yearbook 2018 (Annuaire statistiques année 2018), pp 1- 214

Ait-Mouheb, N., Mayaux, P. L., Mateo-Sagasta, J., Hartani, T., & Molle, B. (2020). Water reuse: A resource for Mediterranean agriculture. In *Water resources in the Mediterranean region* (pp. 107-136) doi:10.1016/b978-0-12-818086-0

Aldo, S. B. (2013). Effect of irrigation with treated wastewater on soil chemical properties and infiltration rate Effect of irrigation with treated wastewater on soil chemical properties and infiltration rate. *Journal of Environmental Management* , 133, 45-50.

Amichi, F., Bouarfa, S., Kuper, M., & Caron, P. (2020). From oasis archipelago to pioneering eldorado in Algeria's Sahara. *Irrigation and Drainage*, 69, 168-176.

Anderson J., 2000. The environmental benefits of water recycling and reuse. *Water sciences and technologies:water supply*, 3 (4):1-10.

Baba Amer Z., Taleb Bahmed M., Bouchlaghem S. 2016. Impact of industrial waste on the quality of ground water in the M'Zab valley and Evaluation of the salinity of the ground water used for irrigation in the region of El Atteuf, South Algerian. *Advances in Environmental Biology*, 10(6),.12-20.

Bahmed, A. T., & Bouzid-Lagha, S. (2020). Quantitative analysis and efficiency assessment of floodwater harvesting system in arid region: case of Touzouz ephemeral stream—Mzab Valley. *Water resources*, 47(1), 54-64.

Bahri, A., 1999. AGRICULTURAL REUSE OF WASTEWATER AND GLOBAL WATER MANAGEMENT. *Water Science and Technology*, Volume 40, pp. 339-346.

Bekaddour, S., Ait-Mouheb, N., & Hartani, T. (2021). Re-emergence of dry toilets and fecal nutrient reuse in M'zab cities. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 11(6), 983-993 <https://doi.org/10.2166/washdev.2021.115>

Bekaddour, S., Ait-Mouheb, N., & Hartani, T. (2021). Unlocking the reclaimed wastewater reuse in a pioneer front, in Berriane, Algeria. In *3rd Euro-Mediterranean conference for environmental integration*.

Benmihoub, A., Akli, S., Ameer, F., Oulmane, A., Faysse, N., Mokrani, M., & Belhadi, A. (2022). The emerging saffron value chain in the M'Zab valley–Southern Algeria: an analysis of ongoing dynamics and strategic development options. *New Medit*, 21(5), 117-133.

Bensaad A., 2011. l'eau et ses enjeux au Sahara. Editions Krthala, paris, 274 p.

Bensalah I., Yousfi B., Mena N. et Bougattoucha Z. 2018. Urbanization of the M'zab Valley and the urban sprawl of the palm grove of Ghardaïa (Algeria): a threatened oasis heritage (Urbanisation de la vallée du M'zab et mitage de la palmeraie de Ghardaïa (Algérie) : un patrimoine oasien menacé). *Belgeo* 2, pp.1-17. DOI : 10.4000/belgeo.24469

Benyoucef B. 2010. The M'zab: a millenary journey (le M'zab: un parcours millénaire), Alger:

Bessaoud O., Pellissier J.P., Rolland J-P., Khechimi W., 2019. Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie. [Rapport de recherche] CIHEAM-IAMM. 2019, pp.82. fhal-02137632f

Bessaoud, O., Pellissier, J. P., Rolland, J. P., & Khechimi, W. (2019). *Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie* (Doctoral dissertation, CIHEAM-IAMM).

Bisson, J. (2003). *Mythes et réalités d'un désert convoité : le Sahara*. Paris : L'Harmattan 243P.

Bouamar K., Remini B., Habi M., Rezzag K. 2019. The effects of the flood of October 2008 on the water quality in the M'zab valley (Algeria). *Journal of land and water development*, 40, pp. 173–180. DOI: 10.2478/jwld-2019-0019

Bouchaala L., Charchar N., Gherib A.E., 2017. Ressources hydriques : Traitement et réutilisation des eaux usées en Algérie. *Algerian journal of arid environment*, vol.7, n. 1, pp. (84-95)

Bouchahm, N., Chaib, W., Drouiche, A., Zahi, F., Hamzaoui, W., Salemkour, N., ... & Djabri, L. (2013). CARACTERISATION ET CARTOGRAPHIE DES SITES DE REMONTEE DANS

LA REGION DE L'OUED RIGH (BAS SAHARA ALGERIEN). *J Algérien des Régions arides*, 76-88.

Bouchair, A. 2004. Decline of urban ecosystem of Mzab valley. *Building and Environment*, 39(6), 719–732. doi:10.1016/j.buildenv.2003.12.001

Bouhenna, A., et al. (2015). Situation de la réutilisation des eaux épurées en agriculture saharienne : Cas de la cuvette. *Algerian journal of arid environment*, 5(2), 39-49

Butler II, T. W. (2007). Application of multiple geochemical indicators, including the stable isotopes of water, to differentiate water quality evolution in a region influenced by various agricultural practices and domestic wastewater treatment and disposal. *Science of the total environment*, 388(1-3), 149-167.

Candela L., Fabregat S., Josa A., Suriol S., Vigués N., Mas J., 2007. Assessment of soil and acourse (Girona, Spain). *Science of the Total Environment*, 374: 26-35

Carrero, G. C., Fearnside, P. M., do Valle, D. R., & de Souza Alves, C. (2020). Deforestation trajectories on a development frontier in the Brazilian Amazon: 35 years of settlement colonization, policy and economic shifts, and land accumulation. *Environmental management*, 66(6), 966-984. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01354-w>

Carrillo-Rivera, J. J., Varsányi, I., Kovács, L. Ó., & Cardona, A. (2007). Tracing groundwater flow systems with hydrogeochemistry in contrasting geological environments. *Water, Air, and Soil Pollution*, 184, 77-103.

Chabaca, N. M., Kettab, A., Nakib, M., Karef, S., Benziada, S., Benmamar, S., ... & Djillali, Y. (2017). The lagunage for the purification of waste water in the Sahara: an approach integrated into the environmental conditions. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, 3(2).

Chen W., Frankenberger W.T., 2008. Soil enzyme activities of long-term reclaimed wastewater-irrigated soils. *Journal of Environmental Quality*, 37: 36-42.

Chenini, F. (2011). Overview of new practices in the reclaimed water reuses in the Mediterranean countries. *Waste Water Treatment and Reuse in the Mediterranean Region*, 43-62.

Chmielewská, E. (2022). History and presence of water sanitation.

Cirelli, G. L., Consoli, S., Licciardello, F., Aiello, R., Giuffrida, F., & Leonardi, C. (2012). Treated municipal wastewater reuse in vegetable production. *Agricultural Water Management*, 104, 163-170.

Cisneros B., J., Drechsel P., Koné D., Bahri A., Raschid-Sally L., et Qadir M., 2010. Utilisation des eaux usées, des boues et des excréta dans les pays en développement : Un aperçu
Cofie O., Kranjac-Berisavljevic G., Pay Drechsel. 2005. The use of human waste for peri-urban agriculture in Northern Ghana. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 20(2), pp. 73-80.

Cote M. 2002. A city fills its valley: Ghardaïa (une ville remplit sa vallée). *Méditerranée*, 3 (99) :107-110. Doi : <https://doi.org/10.3406/medit.2002.3270>

Cote M., 1998. Des oasis malades de trop d'eau. *Secheresse*, 2 (9) : 123-126.

Daoudi, A., & Colin, J. P. (2016, March). Land policy and land markets on the agricultural frontier in arid Algeria. In *proc. The 17th Annual Land and Poverty Conference 2016: Scaling up Responsible Land Governance* (pp. 1-26).

Daoudi, A., Colin, J. P., & Baroud, K. (2021). La politique de mise en valeur des terres arides en Algérie: une lecture en termes d'équité. *Cahiers Agricultures*, 30, 4.

Davis, K. F., Gephart, J. A., Emery, K. A., Leach, A. M., Galloway, J. N., & D'Odorico, P. (2016). Meeting future food demand with current agricultural resources. *Global Environmental Change*, 39, 125-132

Didillion J.M., Didillion H., Donnadiou C., Donnadiou P. 1977. Living in the desert : Mozabite houses. Belgique : Pierre Mardaga editeur, 254 pages.

Dillon, P., Pavelic, P., Palma Nava, A., & Weiping, W. (2018). Advances in multi-stage planning and implementing managed aquifer recharge for integrated water management. *Sustainable Water Resources Management*, 4, 145-151.

Drouiche, N., Ghaffour, N., Naceur, M. W., Lounici, H., & Drouiche, M., 2012. Towards sustainable water management in Algeria. *Desalination and Water Treatment*, 50(1-3): 272–284

Dubost, D., & Moguedet, G. (2002). La révolution hydraulique dans les oasis impose une nouvelle gestion de l'eau dans les zones urbaines. *Méditerranée*, 99(3), 15-20.

Edmunds, W. M., Guendouz, A. H., Mamou, A., Moulla, A., Shand, P., & Zouari, K. (2003). Groundwater evolution in the Continental Intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicators. *Applied geochemistry*, 18(6), 805-822.

El Faïz M. 1997. A treaty of fertilizers according to the "Book of Nabataean Agriculture"(Un traité des engrais d'après le « Livre de l'Agriculture Nabatéenne »). *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée* ,1, pp 5-25; doi.org/10.1016/j.watres.2020.115601.

El Moussaoui, T., Wahbi, S., Mandi, L., Masi, S., & Ouazzani, N. (2018). Reuse study of sustainable wastewater in agroforestry domain of Marrakesh city. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(3), 288-293. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2017.08.004>

Elmeddahi Y., Mahmoudi H., Issaadi A., Goosen M.F.A., 2015. Analysis of treated wastewater and feasibility for reuse in irrigation: a case study from Chlef, Algeria. *Desalination and water treatment: 1-11*

Faour-Klingbeil, D. T. (2018). The Impact of Climate Change on Raw and Untreated Wastewater Use for Agriculture, Especially in Arid Regions: A Review. *Foodborne Pathogens and Disease* , 15, 61-72.

Felin E. (1908). Etude sur la législation des eaux dans la Chebka du Mزاب. Administrative printing Mauguin A., Blida, 160 p.

Food and agricultural organisation, 2005. Methodes de compstage au niveau de l'exploitation agricole. Document de travail sur les terres et les eaux, Rome : 1- 48

Foster, S. S. D., & Chilton, P. J. (2003). Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 358(1440), 1957-1972.

Friedler E.,2001. Water reuse ,an integral part of water resources management: Israel as a case study. *Water Policy*, 3 : 29–39.

Garcia, X., & Pargament, D. (2015). Reusing wastewater to cope with water scarcity: Economic, social and environmental considerations for decision-making. *Resources, Conservation and Recycling*, 101, 154-166.

GIRE, agence nationale de gestion intégrée des ressources en eau.

Guendouz, A., Moulla, A. S., Edmunds, W. M., Shand, P., Poole, J., Zouari, K., & Mamou, A. (1997, April). Palaeoclimatic information contained in groundwaters of the Grand Erg Oriental,

North Africa. In *Isotope Techniques in the Study of Past and Current Environmental Changes in the Hydrosphere and the Atmosphere. Proceedings of Vienna Symposium* (p. 555).

Hakimi, Y. (2022). Caractérisation des eaux de l'aquifère du Continental Intercalaire au droit de la dorsale de Mzab, Nord du Sahara Algérien: Approche géochimique et isotopique multi-traceurs ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$, ^{14}C , ^{36}Cl , Gaz Nobles).

Hakimi, Y., Orban, P., Deschamps, P., & Brouyere, S. (2021). Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in the Continental Intercalaire aquifer system: Insights from Mzab Ridge and surrounding regions, North of the Algerian Sahara. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 34, 100791.

Hamamouche M.F., Kuper M., Amichi H., Lejars C., Ghodbani T., 20018. New reading of Saharan agricultural transformation: Continuities of ancient oases and their extensions (Algeria). *World Development*, 107: 210–223

Hamamouche M.F., Kuper M., Lejars C., 2015. Émancipation des jeunes des oasis du Sahara algérien par le déverrouillage de l'accès à la terre et à l'eau. *Cah Agric*, 24 (6): 412-419

Hamamouche, M. F., Kuper, M., Amichi, H., Lejars, C., & Ghodbani, T. (2018). New reading of Saharan agricultural transformation: Continuities of ancient oases and their extensions (Algeria). *World Development*, 107, 210-223.

Hamamouche, M.F., Kuper, M., Lejars, C. (2015). Émancipation des jeunes des oasis du Sahara algérien par le déverrouillage de l'accès à la terre et à l'eau. *Cah. Agric.*, 24 (6), 412-419.

Hamdani1 M., Bekkouche S.M.A., Benouaz T., M.K. Cherier M.K.2012. Study and Effect of Orientation Two Room of Buildings Located in Ghardaïa, Algeria. *Energy Procedia*, 18, 632: 639. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.076>

Hamiche, A. M., Stambouli, A. B., & Flazi, S. (2015). A review on the water and energy sectors in Algeria: Current forecasts, scenario and sustainability issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 261-276.

Hamilton, A. J., Stagnitti, F., Xiong, X., Kreidl, S. L., Benke, K. K., & Maher, P. (2007). Wastewater irrigation: the state of play. *Vadose zone journal*, 6(4), 823-840.

Hannachi, A. (2018). The stakes of the reuse of liquid waste in Batna (Algeria). *Larhyss Journal*, 34, 51-68

Harder R., Wielemaker, R., Molander, S., Öberg, G. 2020. Reframing human excreta management as part of food and farming systems, *Water Research*, 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115601>

Heinonen-Tanski H., Wijk-Sijbesma C. 2005. Human excreta for plant production. *Bioresource Technology*, pp.1-9. doi:10.1016/j.biortech.2003.10.036

Houichiti R. 2019. Dynamics of agriculture and food security in the Ghardaïa region (Algerian Northern Sahara). PhD thesis. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département des Sciences Agronomiques. Université Kasdi Merbah-Ouargla (Algerie), 186 p.

HOUICHITI, R. (2018). *Dynamique de l'agriculture et sécurité alimentaire dans la région de Ghardaïa (Sahara septentrional algérien)* (Doctoral dissertation).

Idda, S., Bonté, B., Kuper, M., & Mansour, H. (2021). Revealing the Foggara as a Living Irrigation System through an Institutional Analysis. *International Journal of the Commons*, 15(1), 431-448.

Jenkins J. 2019. *The humanure handbook*, Grove city : Nutshell, , 300 pages

Jeong, H., Kim, H., & Jang, T. (2016). Irrigation water quality standards for indirect wastewater reuse in agriculture: a contribution toward sustainable wastewater reuse in South Korea. *Water*, 8(4), 169.

Josse R. 1970. Urban growth in the Sahara: Ghardaïa, *Cahiers d'outre-mer*,89, pp. 46-72. <https://doi.org/10.3406/caoum.1970.2536>

Kellis, M., Kalavrouziotis, I. K., & Gikas, P. (2013). Review of wastewater reuse in the Mediterranean countries, focusing on regulations and policies for municipal and industrial applications. *Global NEST Journal*, 15(3), 333-350.

Keraita B., Jimenez B., Drechsel P., 2008. Extent and implications of agricultural reuse of untreated, partly treated and diluted wastewater in developing countries. *Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 3 (58):1-16.

Kettab, A. (2001). Les ressources en eau en Algérie: stratégies, enjeux et vision. *Desalination*, 136(1-3), 25-33.

Khelifa A., Remini B., 2019. The sharing of flood water in the ksours of Ghardaia and Berriane (Algeria) hydraulic study. *GeoScience Engineering*, 2 : 44 – 57.

Khelifa, A., & Remini, B. (2019). The sharing of flood waters in the Ksours of Ghardaïa and Berriane (Algeria) hydraulic study. *GeoScience Engineering*, 65(2), 44-57.

Khezzani, B., & Bouchemal, S. (2018). Variations in groundwater levels and quality due to agricultural over-exploitation in an arid environment: the phreatic aquifer of the Souf oasis (Algerian Sahara). *Environmental Earth Sciences*, 77(4). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7329-2>

Khiati, M. (2008). *Agriculture algérienne*. Éditions ANEP. 251 p.

Kitayama, S., Ishii, K., Imada, T., Takemura, K., & Ramaswamy, J. (2006). Voluntary settlement and the spirit of independence: Evidence from Japan's "northern frontier." *Journal of Personality and Social Psychology*, 91(3), 369–384. doi:10.1037/0022-3514.91.3.369

Koanda A., Bayard R., Naquin P., Jean G., Bévalot F., Bottineli C. Gourdon R. 2015. Co-composting of solid residues from mobile dry toilets in the presence of green waste (Co-compostage de résidus solides de toilettes sèches mobiles en présence de déchets verts). *Déchets Sciences et Techniques*, 68, 41-53. DOI: 10.4267/dechets-sciences-techniques.183

Kouzmine, Y., & Avocat, H. (2007, November). L'eau et les territoires sahariens en Algérie, Mutations et enjeux. In *Colloque International Eau, Ville et Environnement* (p. 255p).

Langergraber G., Muellegger E. 2005. Ecological Sanitation: A way to solve global sanitation problems. *Environment International*, 31, pp. 433-444. DOI: [10.1016/j.envint.2004.08.006](https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.08.006)

Iavrinité S., Zapater-Pereyra M., et Mancini M.L., 2017. Water Scarcity and Wastewater Reuse Standards in Southern Europe: Focus on Agriculture. *Water Air Soil Pollut*: 228: 251.

Lawrence, P., Adham, S., & Barrott, L. (2003). Ensuring water re-use projects succeed— institutional and technical issues for treated wastewater re-use. *Desalination*, 152(1-3), 291-298. doi:10.1016/s0011-9164(02)01076-

Lazarova V., Bahri A., 2005. Water reuse for irrigation: Agriculture, landscapes, Turf Grass. CRS Press, USA, 432 p.

Lazarova, V., Cirelli, G., Jeffrey, P., Salgot, M., Icekson, N., & Brissaud, F. (2000). Enhancement of integrated water management and water reuse in Europe and the Middle East. *Water Science and Technology*, 42(1-2), 193-202.

- Levidow, L., Zaccaria, D., Maia, R., Vivas, E., Todorovic, M., & Scardigno, A. (2014). Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. *Agricultural Water Management*, *146*, 84-94.
- Lofrano, G., & Brown, J. (2010). Wastewater management through the ages: A history of mankind. *Science of the Total Environment*, *408*(22), 5254-5264.
- Maachou H.M.2013. The M'zab: from the Pentapolis to the Metropolis (le M'zab: de la Pentapole à la Métropole). *Urbanisme, Bulletins des science géographique*, *28*, pp. 63-70
- Mahlangu, S., Lorentz, S., Diamond, R., & Dippenaar, M. (2020). Surface water-groundwater interaction using tritium and stable water isotopes: A case study of Middelburg, South Africa. *Journal of African Earth Sciences*, *171*, 103886.
- Manisha, M., Verma, K., Ramesh, N., Anirudha, T. P., Santrupt, R. M., & Rao, L. (2023). Water, sanitation, and hygiene implications of large-scale recycling of treated municipal wastewater in semi-arid regions. *Science of the Total Environment*, *904*, 166631.
- Metcalf and Eddy, Inc, Asano, T., Burton, F. L., Leverenz, H., Tsuchihashi, R., & Tchobanoglous, G. (2007). *Water reuse* (pp. 6-15). United States of America: McGraw-Hill Professional Publishing.
- Mihelcic, J. R., Fry, L. M., & Shaw, R. 2011. Global potential of phosphorus recovery from human urine and feces. *Chemosphere*, *84*(6), 832-839. doi:10.1016/j.chemosphere.2011.02.046
- Mikesell, M. W. (1960). Comparative studies in frontier history. *Annals of the Association of American Geographers*, *50*(1), 62-74.
- Ministry of Water Resources and the Environment (MRE). 2017. Report on the strategy of the water resources and environment sector "Horizon 2035": 1-77
- Mizyed, N. R. (2013). Challenges to treated wastewater reuse in arid and semi-arid areas. *Environmental science & policy*, *25*, 186-195.
- Moulias, D. (1927). *L'eau dans les oasis sahariennes...* Carbonel.
- Moulla, A. S., Guendouz, A., Cherchali, M. H., Chaid, Z., & Ouarezki, S. (2012). Updated geochemical and isotopic data from the Continental Intercalaire aquifer in the Great Occidental Erg sub-basin (south-western Algeria). *Quaternary international*, *257*, 64-73.

Moya, B., Parker, A., & Sakrabani, R. 2019. Challenges to the use of fertilisers derived from human excreta: The case of vegetable exports from Kenya to Europe and influence of certification systems. *Food Policy*, 85,pp. 72–78. doi:10.1016/j.foodpol.2019.05.001

Moza M. et Ghosn A., 2013. états des lieux du secteur de l'eau en Algérie . Institut de prospective économique du monde méditerranéen : 1-27.

Nagy J., Zseni A., Tóth A.J. 2019. The utilization of human excreta and human urine in the agriculture as a fertilizer. El Basyouni M., Al-Gayar O, Momtaz R.I, Shawket I.M. (Edited by), Proceedings of Architecture, Engineering and Technologies, Cairo, Egypt, 1-9.

Ofori, S., Puškáčová, A., Růžicková, I., & Wanner, J. (2021). Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. *Science of The Total Environment*, 760, 144026.

Ouled Belkhir C., Remini B. 2016. Cleanup and valuation of waters of the aquifer of M'zab Valley (Algeria). *Journal of water and land development*, 29, 23–29. DOI 10.35180/gse-2019-0011

Peasey A. (2000). Health Aspects of Dry Sanitation with Waste Reuse Peasey. Rapport, *WELL (water and environmental health London and Loughborough*, pp.1-48

Pereira, L. S., Oweis, T., & Zairi, A. (2002). Irrigation management under water scarcity. *Agricultural water management*, 57(3), 175-206.

Person, L. S. (1985). The American Eve: Miscegenation and a Feminist Frontier Fiction. *American Quarterly*, 37(5), 668-685.

Po, M., Nancarrow, B. E., & Kaercher, J. D. (2003). *Literature review of factors influencing public perceptions of water reuse* (Vol. 54, No. 3, pp. 1-44). Perth: CSIRO Land and Water.

Prasad Devkota G., Pandey M.K., Krishna Maharjan S . 2019. Urine Diversion Dry Toilet: A Narrative Review on Gaps and Problems and its Transformation. *European Journal of Behavioral Sciences*, 2(3), pp.10-19

Qadir M., Scott C.A., 2009. Contraintes non pathogènes liées à l'irrigation des eaux usées.

Rebai, A. O., Hartani, T., Chabaca, M. N., & Kuper, M. (2017). Une innovation incrémentielle: la conception et la diffusion d'un pivot d'irrigation artisanal dans le Souf (Sahara algérien). *Cahiers Agricultures*, 26(3), 35005.

Remini, B. (2010). La problématique de l'eau en Algérie du nord. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, (8).

Rijsberman F.R., 2006. Water scarcity: Fact or fiction. *Agricultural Water Management*, 80 : 5-22.

Rodias, E., Aivazidou, E., Achillas, C., Aidonis, D., & Bochtis, D. (2020). Water-energy-nutrients synergies in the agrifood sector: A circular economy framework. *Energies*, 14(1), 159.

Rodias, E., Aivazidou, E., Achillas, C., Aidonis, D., & Bochtis, D. (2020). Water-energy-nutrients synergies in the agrifood sector: A circular economy framework. *Energies*, 14(1), 159.

Rubin, R. (1991). Settlement and agriculture on an ancient desert frontier. *Geographical Review*, 197-205.

Rusan, M. J. M., Hinnawi, S., & Rousan, L. (2007). Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Desalination*, 215(1-3), 143-152.

Saidani, A. M., Kuper, M., Hamamouche, F. M., & Benmihoub, A. (2022). Reinventing the wheel: adapting a traditional circular irrigation system to 'modern' agricultural extensions in Algeria's Sahara. *New Medit*, 21(5), 35-53.

Saidani, M. A., Aslekar, U., Kuper, M., & Kemerink-Seyoum, J. (2023). Sharing difficult waters: Community-based groundwater recharge and use in Algeria and India.

Saliba, R., Callieris, R., D'Agostino, D., Roma, R., & Scardigno, A. (2018). Stakeholders' attitude towards the reuse of treated wastewater for irrigation in Mediterranean agriculture. *Agricultural Water Management*, 204, 60–68. doi:10.1016/j.agwat.2018.03.036

Schilperoort, R. P., Meijer, H. A., Flamink, C. M., & Clemens, F. H. (2007). Changes in isotope ratios during domestic wastewater production. *Water science and technology*, 55(4), 93-101.

Schilperoort, R. P., Meijer, H. A., Flamink, C. M., & Clemens, F. H. (2007). Changes in isotope ratios during domestic wastewater production. *Water science and technology*, 55(4), 93-101.

Slotkin, Richard (1973). *Regeneration Through Violence: The Mythology of the American Frontier, 1600-1860*. Middleton: Wesleyan University Press. p. 5

- Spangberg, J., Tidåker, P., & Jönsson, H. 2014. Environmental impact of recycling nutrients in human excreta to agriculture compared with enhanced wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, 493, 209–219. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.05.123
- Sugihara, R. 2020. Reuse of Human Excreta in Developing Countries: *Agricultural Fertilization Optimization*. *Consilience*, (22), 58- 64
<https://doi.org/10.7916/consilience.vi22.6732>
- Ternes, T., & von Gunten, U. (2010). Editorial to special issue in Water Research. Emerging contaminants in water. *Water Research*, 44(2), 351-351.
- Thabet M., 2002.la petite agriculture irriguée face aux changements climatiques : Cas de la zone aride du sud tunisien. *Larhyss Journal*, 34 :183-197
- Trottier, J., & Perrier, J. (2018). Water driven Palestinian agricultural frontiers: The global ramifications of transforming local irrigation. *Journal of Political Ecology*, 25(1), 292.
- Vázquez-Suñé, E., Carrera, J., Tubau, I., Sánchez-Vila, X., & Soler, A. (2010). An approach to identify urban groundwater recharge. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(10), 2085-2097
- Wade Miller G., 2006. Inetgrated concepts in water reuse: managing global water needs. *Desalinisation*, 187: 65-75.
- White, K. S., & Farrell, A. D. (2001). Structure of anxiety symptoms in urban children: Competing factor models of Revised Children's Manifest Anxiety Scale. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 69(2), 333.
- Zegait R and Remini B. (2018). Characterisation of Treated Wastewater of M'Zab Valley for Reuse in Irrigation (Southern Algeria). *International Journal of Engineering Research in Africa*,40: 70-88. doi:10.4028/www.scientific.net/JERA.40.
- Zhou, J. L., Zhang, Z. L., Banks, E., Grover, D., & Jiang, J. (2009). Pharmaceutical residues in wastewater treatment works effluents and their impact on receiving river water. *Journal of Hazardous Materials*, 166(2-3), 655-661.
- Zhu, C., & Schwartz, F. W. (2011). Hydrogeochemical processes and controls on water quality and water management. *Elements*, 7(3), 169-174.

Résumé

Le développement démographique et les changements climatiques, se manifestant par de longues périodes de sécheresse, exercent une pression croissante sur les ressources en eau conventionnelles. Afin d'assurer la sécurité alimentaire d'une population en croissance, l'extraction des ressources en eau continue de s'accroître. Cette surexploitation des ressources en eau, notamment souterraines, est très répandue dans les zones arides et semi-arides, dont l'Algérie fait partie. Le recours à une ressource non conventionnelle, telle que les eaux usées traitées, est une solution alternative pour faire face à la pénurie d'eau.

Dans l'objectif de dresser un diagnostic de la situation de la réutilisation des eaux usées dans le sud de l'Algérie, cette thèse a pris comme exemple d'étude les oasis de Ghardaïa au sud de l'Algérie. Une approche multidisciplinaire basée sur une étude hydrosociologique et hydrotechnique a été élaborée pour analyser la réutilisation des eaux usées et des nutriments dans les oasis de M'Zab à Ghardaïa. Nos résultats montrent, en premier lieu, la persistance d'une pratique traditionnelle du recyclage des déchets humains en matière fertilisante à travers l'utilisation des toilettes sèches dans les anciennes oasis du M'zab. Cette pratique s'est étendue vers les nouvelles extensions, expliquée par le fait que l'utilisation des toilettes sèches permet de fournir un engrais biologique à faible coût et assure la protection de l'environnement oasien en luttant contre la contamination de la nappe phréatique.

En deuxième lieu, cette thèse a abordé l'émergence d'un nouveau front pionnier agricole en aval d'une station de traitement agricole. Ce front a été motivé par la présence d'une ressource en eau permanente, les eaux usées traitées, ainsi que la disponibilité de la terre et des eaux souterraines proches de la surface. Cependant, l'interdiction de la réutilisation des eaux usées traitées par les autorités demeure une contrainte majeure pour le développement d'un périmètre

agricole, expliquée par le manque de coordination entre les institutions et l'absence d'un organisme dédié à la gestion des périmètres irrigués par les eaux usées traitées.

Afin d'évaluer la durabilité de cette zone, des analyses hydro chimiques, microbiologiques et isotopiques ont été réalisées. Ces investigations visaient à détecter une éventuelle infiltration des eaux usées dans la nappe phréatique, ainsi qu'à identifier une éventuelle contamination. Des traces de pathogènes ont été détectées dans certains forages. Toutefois, la méthode utilisée n'a pas permis de quantifier avec précision les volumes d'eau potentiellement infiltrés, le cas échéant. Elle a néanmoins permis de surveiller et d'évaluer la qualité de la nappe phréatique et des eaux usées contribuant ainsi à la création d'une base de données pour cette région.

Par ailleurs, une nouvelle approche analytique est en cours de développement, portant sur l'étude des contaminants émergents. Cette démarche vise à approfondir l'étude et à fournir des informations précises sur les mécanismes d'infiltration des eaux usées dans la nappe phréatique. À travers cette thèse, nous aspirons également à ouvrir de nouvelles perspectives de recherche et de réflexion sur la réutilisation des ressources non conventionnelles, en mettant en lumière leur importance multidimensionnelle.

Mots clés : Algérie-Berriane-Eaux usées- M'Zab-Réutilisation-Zones arides

Abstract

The demographic growth and climate change, characterized by prolonged periods of drought, exert an increasing pressure on conventional water resources. In order to ensure food security for a growing population, the extraction of water resources continues to escalate. This overexploitation of water resources, particularly groundwater, is highly prevalent in arid and semi-arid regions, including Algeria. Turning to unconventional resources, such as treated wastewater, emerges as an alternative solution to address water scarcity.

With the aim of assessing the situation of wastewater reuse in southern Algeria, this thesis took the oasis of Ghardaia in the south of Algeria as a case study. A multidisciplinary approach, grounded in hydro-sociological and hydrotechnical studies, was developed to analyze the reuse of wastewater and nutrients in the M'Zab oasis in Ghardaia.

Our findings reveal, firstly, the persistence of a traditional practice of recycling human waste into fertilizing material through the use of dry toilets in the ancient oases of M'zab. This practice has extended to new extensions, explained by the fact that the use of dry toilets provides a low-

cost biological fertilizer and ensures environmental protection in the oasis by combating contamination of the water table.

Secondly, the thesis addressed the emergence of a new agricultural pioneer front downstream of an agricultural treatment station. This front was supported by the presence of a permanent water resource—treated wastewater—and the availability of land and groundwater close to the surface. However, the prohibition of the reuse of treated wastewater by authorities remains a major constraint for the development of an agricultural perimeter, explained by the lack of coordination between institutions and the absence of an organization dedicated to the management of perimeters irrigated with treated wastewater.

To assess the sustainability of this area, hydrochemical, microbiological, and isotopic analyses were conducted. These investigations aimed to detect potential wastewater infiltration into the groundwater and to identify possible contamination. Traces of pathogens were detected in certain boreholes. However, the method employed did not allow for precise quantification of the volumes of potentially infiltrated water, if any. Nonetheless, it facilitated the monitoring and evaluation of the quality of both the groundwater and wastewater, thereby contributing to the creation of a database for this region.

Furthermore, a new analytical approach is currently under development, focusing on the study of emerging contaminants. This initiative aims to deepen the investigation and provide precise information on the mechanisms of wastewater infiltration into the groundwater. Through this thesis, we also aim to open new avenues for research and reflection on the reuse of non-conventional resources, highlighting their multidimensional importance.

Keywords: Algeria, Berriane, Wastewater, M’Zab, Reuse, Arid zones.

ملخص

تعمل التطورات الديموغرافية وتغيرات المناخ، التي تتجلى في فترات طويلة من الجفاف، على تزايد الضغط على الموارد المائية التقليدية. ومن أجل ضمان الأمن الغذائي لسكان متزايدة، فإن استخراج الموارد المائية مستمر في التزايد. وهذا الاستنزاف المفرط للموارد المائية، ولا سيما تلك الجوفية، شائع للغاية في المناطق الجافة وشبه الجافة، التي تشمل الجزائر. يمكن أن يكون اللجوء إلى موارد غير تقليدية، مثل مياه الصرف الصحي المعالجة، حلاً بديلاً لمواجهة نقص المياه.

بهدف وضع تشخيص لوضع إعادة استخدام مياه الصرف الصحي في جنوب الجزائر، اتخذت هذه الرسالة كمنهج للدراسة واحات غرداية في جنوب الجزائر. تم تطوير نهج متعدد التخصصات قائم على دراسة هيدروسوسبيولوجية وهيدرولوجية وتقنية

لتحليل إعادة استخدام مياه الصرف الصحي والعناصر الغذائية في واحات المزاب في غرداية. تظهر نتائجنا أولاً، استمرار ممارسة التدوير التقليدية للفضلات البشرية كمادة مسمدة من خلال استخدام المراحيض الجافة في واحات المزاب القديمة. امتدت هذه الممارسة إلى التوسعات الجديدة، مما يفسره حقيقة أن استخدام المراحيض الجافة يوفر سماداً بيولوجياً بتكلفة منخفضة ويضمن حماية البيئة الواحية من خلال مكافحة المياه الجوفية.

في المرتبة الثانية، تناولت هذه الرسالة ظهور جبهة جديدة للزراعة الرائدة في مصب محطة معالجة زراعية. وقد تم تحفيز هذه الجبهة بوجود مورد مستدام للمياه، وهي المياه الصرفة المعالجة، بالإضافة إلى توافر الأراضي والمياه الجوفية القريبة من السطح. ومع ذلك، فإن حظر إعادة استخدام المياه الصرفة المعالجة من قبل السلطات يظل عائقاً رئيسياً أمام تطوير مساحة زراعية، مما يُفسر بالنقص في التنسيق بين المؤسسات وغياب جهة مخصصة لإدارة المساحات الزراعية المروية بالمياه الصرفة المعالجة.

لتقييم استدامة هذه المنطقة، تم إجراء تحاليل هيدروكيميائية وميكروبيولوجية ونظائرية. هدفت هذه الدراسات إلى الكشف عن احتمالية تسرب مياه الصرف الصحي إلى المياه الجوفية وتحديد أي تلوث محتمل. تم رصد آثار لمسببات الأمراض في بعض الآبار. ومع ذلك، لم تُمكن الطريقة المستخدمة من تحديد الكميات الدقيقة للمياه التي قد تكون تسربت، إن وجدت. ومع ذلك، ساهمت هذه الطريقة في مراقبة وتقييم جودة كل من المياه الجوفية ومياه الصرف الصحي، مما أدى إلى إنشاء قاعدة بيانات لهذه المنطقة.

علاوة على ذلك، يجري حالياً تطوير نهج تحليلي جديد يركز على دراسة الملوثات الناشئة. يهدف هذا النهج إلى تعميق الدراسة وتوفير معلومات دقيقة حول آليات تسرب مياه الصرف الصحي إلى المياه الجوفية. من خلال هذه الأطروحة، نسعى أيضاً إلى فتح آفاق جديدة للبحث والتفكير في إعادة استخدام الموارد غير التقليدية، مع تسليط الضوء على أهميتها متعددة الأبعاد.

الكلمات الرئيسية: الجزائر - بريان - مياه الصرف الصحي - المزاب - إعادة الاستخدام - المناطق الجافة

