



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DE 20 AOÛT 1955 - SKIKDA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de :

Master

Filière Génie des Procédés

Spécialité Ingénierie et gestion de l'eau

Apport des données Sentinel-2 et CHIRPS au suivi de l'évolution de la surface en eau du barrage Zit Emba (2020-2025)

Réalisé par :

- Asma TIFOUTI
- Faten BENYOUCEF

Soutenu le 06/07/2026, devant le jury suivant :

N°	Nom et Prénom	Grade	Établissement d'affiliation	Qualité
1	Fayza MEKHALIF	MCB	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Encadrant
2	Hanifa CHOUIT	MCB	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Co-encadrant
3	Mahdi CHIHA	Pr	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Président
4	Sara BATTAZ	MCB	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Examineur
5	Hafida BOULAKRAH	MAA	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Examineur

Année Universitaire 2025- 2026.

Remerciements

Avant tout, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers Dieu Tout-Puissant pour nous avoir donné la force, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail de recherche.

*Nos plus sincères remerciements s'adressent à nos encadreuses, **Dr MEKHALIF Fayza** et **Dr CHOUIT Hanifa** pour leur confiance, leurs conseils précieux, leur disponibilité constante et leurs orientations rigoureuses qui ont été déterminantes tout au long de l'élaboration de ce mémoire.*

*Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance aux **membres du jury de soutenance**, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail et pour le temps qu'ils consacreront à l'examen de cette recherche.*

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à l'ensemble de nos enseignants, du cycle primaire jusqu'à l'université, pour leur dévouement, la qualité de leur enseignement et tout le savoir qu'ils nous ont transmis au fil de notre parcours académique.

Dédicace

Louange à Dieu, le Tout-Puissant, par qui les volontés s'accomplissent et par qui les cœurs trouvent le repos. C'est par Sa grâce que les efforts se transforment en succès, et que les épreuves deviennent des leçons de vie. À Lui, le Très-Haut, toute ma gratitude.

Je dédie cette réalisation, fruit d'un long cheminement, à ceux qui ont façonné mon être et soutenu mes pas :

*À **mes parents**... mes étoiles guident. À **mon père**, mon premier pilier, dont l'exemple de droiture et de force a tracé ma voie. À **ma mère**, mon refuge et mon âme, dont les prières ont été la lumière qui a dissipé mes incertitudes. Ce succès est le vôtre, bien avant d'être le mien.*

*À **mes chers frères, Hamza et Youssef**... mes alliés indéfectibles. Merci d'avoir été mes complices, mes conseillers et les témoins privilégiés de mon évolution. Votre présence à mes côtés est une force qui transforme chaque défi en une étape franchissable.*

*À la nouvelle génération de mon cœur, **Taouba Al-Abrar et Zaid Zakaria**... vous êtes l'espoir et la promesse de demain. Puisse ce parcours vous inspirer à poursuivre vos propres rêves avec audace, persévérance et une foi inébranlable.*

*À mes précieuses amies, **Lina et Assala**... compagnes de lutte et confidentes de mes rêves. À travers les années, nous avons partagé les doutes et les victoires, tissant un lien qui transcende l'amitié pour devenir une fraternité d'âme. Ce succès est aussi le fruit de notre solidarité.*

À ceux qui nous ont quittés, mais qui habitent nos mémoires... votre absence est un silence qui résonne, mais votre souvenir est une boussole qui continue de m'orienter vers l'excellence. Je vous dédie cet accomplissement comme une offrande de respect et un hommage éternel à votre bonté.

Enfin, ce projet marque la fin d'un chapitre et le début d'une nouvelle aventure. Je referme cette page avec fierté, consciente que chaque difficulté surmontée a été un pas de plus vers ma véritable essence.

Asma

Dédicace

Je dédie ce modeste travail,

À mes très chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leur soutien constant et leurs précieuses prières. Que Dieu les protège et les récompense pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.

À mon père, modèle de courage, de sagesse et de persévérance. Merci pour tes conseils et les valeurs que tu m'as transmises.

À ma mère, source de tendresse, de patience et d'encouragement. Merci pour ton affection et ton soutien indéfectible.

*À mon cher frère **Yacine**, à son épouse et à leurs enfants **Youcef** et **Youmna** pour leur présence, leur affection et leurs encouragements.*

*À mes sœurs, Noudjoud et Hind pour leur affection, leurs encouragements
Et leur soutien. Je leur exprime toute ma gratitude et leur souhaite bonheur,
santé et réussite*

*À toute ma famille, à mes amis et à toutes les personnes qui m'ont soutenu de
près ou de loin tout au long de mon parcours universitaire.*

Enfin, je dédie ce travail à tous ceux qui aspirent au savoir et à l'excellence.

Avec toute ma reconnaissance et mon profond respect

Faten

Résumé

Cette étude vise à suivre l'évolution spatio-temporelle de la surface en eau du barrage de Zit Emba à l'aide des techniques de télédétection. L'analyse repose sur l'exploitation des images satellitaires Sentinel-2 ainsi que des données de précipitations CHIRPS. L'indice MNDWI a été utilisé pour extraire et cartographier les surfaces en eau, tandis que les séries temporelles ont permis d'évaluer leur dynamique en relation avec les variations pluviométriques. Les résultats montrent que les fluctuations de la surface en eau du barrage sont fortement influencées par la variabilité des précipitations, avec une augmentation du plan d'eau durant les périodes humides et une diminution lors des périodes sèches. Cette approche confirme l'intérêt de la télédétection et des données satellitaires comme outils efficaces pour le suivi des ressources hydriques et l'aide à la gestion durable des barrages.

Mots clés : Barrage de Zit Emba ; Télédétection ; MNDWI ; CHIRPS ; Précipitations ; Surface en eau ; Ressources hydriques ; Sentinel-2 ; Google Earth Engine.

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى متابعة التطور الزمني والمكاني للمسطح المائي لسد زيت العنبة باستعمال تقنيات الاستشعار عن بعد. اعتمدت الدراسة على صور الأقمار الصناعية Landsat و Sentinel-2، بالإضافة إلى بيانات التساقط المطري CHIRPS. وتم استخدام مؤشر MNDWI لاستخراج المسطحات المائية ورسم خرائطها، كما استُخدمت السلاسل الزمنية لتحليل ديناميكيتها وعلاقتها بتغيرات التساقط المطري. أظهرت النتائج أن مساحة المياه في السد تتأثر بشكل واضح بالتذبذب في كميات الأمطار، حيث تزداد خلال الفترات الرطبة وتتناقص خلال الفترات الجافة. وتبرز هذه الدراسة أهمية الاستشعار عن بعد والبيانات الفضائية كأدوات فعالة لمراقبة الموارد المائية ودعم الإدارة المستدامة للسود.

الكلمات المفتاحية: سد زيت العنبة، الاستشعار عن بعد، مؤشر MNDWI، بيانات CHIRPS، التساقط المطري، المسطحات المائية، الموارد المائية، Sentinel-2، Google Earth Engine.

Abstract

This study aims to monitor the spatio-temporal evolution of the water surface area of the Zit Emba Dam using remote sensing techniques. The analysis is based on Sentinel-2 satellite imagery, along with CHIRPS precipitation data. The Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) was applied to extract and map water bodies, while time-series analysis was used to assess their dynamics in relation to rainfall variability. The results indicate that changes in the dam's water surface area are strongly influenced by precipitation fluctuations, with an increase during wet periods and a decrease during dry periods. This study highlights the effectiveness of remote sensing and satellite data as valuable tools for water resource monitoring and sustainable dam management.

Keywords: Zit Emba Dam; Remote Sensing; MNDWI; CHIRPS; Precipitation; Water Surface Area; Water Resources; Sentinel-2; Google Earth Engine.

Liste des tableaux

N°	Tableaux	Page
I.1	Répartition des ressources en eau renouvelables et non renouvelables par région	06
I.2	Répartition des principaux barrages algériens par région géographique (Ouest, Centre, Est)	10
II.1	Récapitulatif des caractéristiques des principaux instruments satellitaires pour le suivi des ressources en eau.	22
II.2	Les 7 directions régionales de l'ANRH	33
III.1	Liste des barrages.	37
IV.1	Superficies maximales et minimales durant la période 2020-2025	64

Liste des figures

N°	Figure	Page
I.1	Carte des bassins hydrographiques en Algérie	04
I.2	Potentiel des eaux souterraines en Algérie	05
I.3	Les types de précipitation	12
II.1	Présentation schématique du processus général de la télédétection.	20
II.2	Le satellite Landsat 8/9 équipé de l'instrument OLI.	23
II.3	Satellite Sentinel-2 utilisé pour l'observation de la surface terrestre.	24
III.1	Vu aérienne du barrage de Zit Emba	38
IV.1	Evolution saisonnière de la surface de l'eau du barrage Zit Emba (ha) et des précipitations mensuelles (mm) au cours de l'année 2020.	50
IV.2	Evolution mensuelle de la surface en eau (ha) en relation avec la précipitation (mm) au cours de l'année 2020	50
IV.3	Evolution saisonnière de la surface de l'eau du barrage Zit Emba (ha) et des précipitations mensuelles (mm) au cours de l'année 2022.	52
IV.4	Evolution mensuelle de la surface en eau (ha) en relation avec la précipitation (mm) au cours de l'année 2021.	52
IV.5	Evolution saisonnière de la surface de l'eau du barrage Zit Emba (ha) et des précipitations mensuelles (mm) au cours de l'année 2022.	54
IV.6	Evolution mensuelle de la surface en eau (ha) en relation avec la précipitation (mm) au cours de l'année 2022.	54
IV.7	Evolution saisonnière de la surface de l'eau du barrage Zit Emba (ha) et des précipitations mensuelles (mm) au cours de l'année 2023.	55
IV.8	Evolution mensuelle de la surface en eau (ha) en relation avec la précipitation (mm) au cours de l'année 2023.	56
IV.9	Evolution saisonnière de la surface de l'eau du barrage Zit Emba (ha) et des précipitations mensuelles (mm) au cours de l'année 2024.	58
IV.10	Evolution mensuelle de la surface en eau (ha) en relation avec la précipitation (mm) au cours de l'année 2024.	58
IV.11	Evolution saisonnière de la surface de l'eau du barrage Zit Emba (ha) et des précipitations mensuelles (mm) au cours de l'année 2025.	60
IV.12	Evolution mensuelle de la surface en eau (ha) en relation avec la précipitation (mm) au cours de l'année 2025.	61

IV.13	Evolution mensuelle de la superficie en eau du barrage Zit Emba (2020-2025).	63
IV.14	Cartographie de la dynamique saisonniere de la superficie en eau du barrage Zit Emba (2020-2025).	65
IV.15	Evolution des precipitations mensuelles (2020-2025).	66

Liste des abréviations

AEP	Alimentation en eau potable
ANBT	Agence Nationale des Barrages et Transferts
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
AWEI	Automated Water Extraction Index
AWEInsh	Automated Water Extraction Index (Non-Shadow) Adapté aux environnements non ombragés
AWEIsh	Automated Water Extraction Index (Shadow) Adapté aux environnements ombragés
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations
CI	Continental Intercalaire
CT	Complexe Terminal
DRC	Direction régionale Centre
DRE	Direction Régionale Est
DRO	Direction Régionale Ouest
DRSE	Direction régionale Sud – Est
DRSO	Direction Régionale Sud- Ouest
GEE	Google Earth Engine
GIRE	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GPM	Global Precipitation Measurement
JPEG	Joint Photographic Experts Group
MNDWI	Modified Normalised Difference Water Index
MSI	MultiSpectral Instrument
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDWI	Normalized Difference Water Index
NIR	Near Infra Rouge
OLI	Operational Land Imager
ONM	Office National de la Météorologie
PNG	Portable Network Graphics

QGIS	Quantum Geographic Information System
SAR	Synthetic Aperture Radar
SASS	Système Aquifère du Sahara Septentrional
SIG	System Information Géographique
SWIR	Short -Wave InfraRed
TIFF	Tagged Image File Forma
USGS	United States Geological Survey

Table des matières

Résumé.....	I
Liste des tableaux.....	II
Liste des figures.....	III
Liste des abréviations.....	V
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Contexte hydrique de l'Algérie et rôle des barrages dans la gestion des ressources en eau	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Ressources en eau en Algérie.....	3
I.2.1 Eaux de surface.....	4
I.2.2 Eaux souterraines.....	4
I.2.3 Les ressources en eau non conventionnelles.....	5
I.2.4 Répartition spatiale et disponibilité des ressources en eau.....	5
I.2.5 Les principaux usages de l'eau.....	6
I.2.6 Contraintes et défis.....	7
I.3 Les barrages en Algérie.....	8
I.3.1 Définition et classification.....	8
I.3.1.1 Définition.....	8
I.3.1.2 Classification des barrages.....	8
I.3.2 Fonctions des barrages.....	9
I.3.3 Évolution du parc national.....	9
I.3.4 Importance des barrages pour la sécurité hydrique.....	10
I.3.5 Contraintes des barrages algériens.....	10
I.4 Les précipitations et leur rôle dans l'alimentation des barrages.....	11
I.4.1 Définition des précipitations.....	12
I.4.2 Types de précipitations.....	12
I.4.3 Variabilité des pluies en Algérie.....	13
I.4.4 Effets du changement climatique sur les précipitations.....	13
I.4.5 Contribution des précipitations au remplissage des barrages.....	14
I.4.6 Impact des sécheresses.....	15
I.5 Gestion durable des ressources en eau en Algérie.....	15
I.5.1 Gestion intégrée des ressources en eau.....	16

I.5.2 Stratégies nationales	16
I.5.3 Adaptation des ressources en eau aux changements climatiques	17
I.5.4 Perspectives.....	17
I.6 Conclusion.....	18
CHAPITRE II : Fondements théoriques de la télédétection appliquée au suivi	
des ressources en eau	
II.1 Introduction.....	19
II.2 Principes généraux de la télédétection	19
II.2.1 Définition	20
II.2.2 Composantes système de télédétection	20
II.2.3 Rayonnement électromagnétique	21
II.2.4 Signature spectrale de l'eau.....	21
II.3 Satellites d'observation de la Terre	22
II.3.1 Landsat.....	23
II.3.2 Sentinel.....	23
II.3.3 GPM.....	24
II.3.4 CHIRPS	24
II.4 Applications de la télédétection aux ressources en eau.....	25
II.4.1 Suivi des barrages	25
II.4.2 Surveillance des sécheresses	25
II.4.3 Détection des inondations.....	26
II.4.4 Gestion des ressources en eau	26
II.4.5 Changement climatique	27
II.5 Indices de détection des surfaces en eau	27
II.5.1 MNDWI	27
II.5.2 NDWI.....	28
II.5.3 AWEI.....	28
II.5.4 Comparaison des indices de détection des surfaces en eau	29
II.6 Télédétection et suivi des précipitations.....	29
II.6.1 Cycle hydrologique et précipitations	30
II.6.2 Estimation satellitaire des pluies	30
II.6.3 Séries temporelles	31
II.6.4 Relation entre les précipitations et la surface en eau	31
II.7 Complémentarité entre données satellitaires et mesures au sol.....	32
II.7.1 Stations conventionnelles	32

II.7.2 Rôle de l'ANRH et de l'ANBT.....	32
II.7.3 Validation des données	33
II.8 Cadre réglementaire algérien.....	34
II.8.1 Loi sur l'eau	34
II.8.2 Gestion durable des ressources en eau.....	34
II.9 Conclusion	34

CHAPITRE III : Matériels et Méthodes

III.1 Introduction	36
III.2 Présentation de la zone d'étude.....	36
III.2.1 Cadre hydrologique de la wilaya de Skikda.....	36
III.2.2 Situation géographique du barrage de Zit Emba.....	37
III.2.3 Caractéristiques techniques du barrage	38
III.2.4 Justification du choix de la zone d'étude.....	38
III.2.5 Période d'étude.....	39
III.3 Données et outils utilisés	39
III.3.1 Données satellitaires	39
III.3.1.1 Images Sentinel-2.....	39
III.3.2 Données pluviométriques.....	40
III.3.2.1 Produit CHIRPS.....	40
III.3.3 Indices spectraux utilisés.....	40
III.3.4 Outils de traitement et d'analyse.....	41
III.3.4.1 Google Earth Engine (GEE)	41
III.3.4.2 QGIS.....	41
III.3.4.3 Outils complémentaires de gestion et de mise en forme des données	42
III.3.4.4 Microsoft Excel	42
III.4 Méthodologie adoptée.....	42
III.4.1 Prétraitement des images satellitaires	43
III.4.2 Calcul des indices spectraux de détection de l'eau	43
III.4.3 Extraction de la superficie du barrage.....	44
III.4.4 Extraction des données pluviométriques.....	44
III.4.5 Élaboration des séries temporelles.....	45
III.4.6 Analyse de la relation entre les précipitations et la superficie du barrage...	45
III.5 Difficultés et limites de l'étude.....	45
III.5.1 Couverture nuageuse des images satellitaires	45
III.5.2 Résolution spatiale des données satellitaires	46

III.5.3 Limites des données pluviométriques CHIRPS.....	46
III.5.4 Complexité du fonctionnement hydrologique du barrage.....	46
III.5.5 Absence de validation par des mesures in situ	47
III.6 Conclusion	47
CHAPITRE IV : Résultats et Discussion	
IV.1 Introduction	49
IV.2 Analyse spatio-temporelle de la surface en eau du barrage.....	49
IV.2.1 Année 2020	49
IV.2.1.1 Résultats	49
IV.2.1.2 Discussion	51
IV.2.2 Année 2021	51
IV.2.2.1 Résultats.....	51
IV.2.2.2 Discussion	53
IV.2.3	53
Année 2022.....	
IV.2.3.1 Résultats	53
IV.2.3.2 Discussion.....	55
IV.2.4 Année 2023	55
IV.2.4.1 Résultats.....	55
IV.2.4.2 Discussion	56
IV.2.5 Année 2024	57
IV.2.5.1 Résultats.....	57
IV.2.5.2 Discussion	59
IV.2.6 Année 2025	59
IV.2.6.1 Résultats	59
IV.2.6.2 Discussion	61
IV.3 Analyse globale de l'évolution du barrage durant la période 2020-2025	62
IV.3.1 Évolution interannuelle de la surface en eau	62
IV.3.2 Variations saisonnières de la surface en eau.....	63
IV.3.3 Comparaison des superficies maximales et minimales.....	64
IV.3.4 Tendence générale observée entre 2020 et 2025	64
IV.4 Relation entre les précipitations et la superficie du barrage	65
IV.4.1 Influence des précipitations sur l'évolution de la surface en eau	65
IV.4.2 Mise en évidence du décalage temporel (Time Lag).....	66

IV.4.3 Rôle des autres facteurs hydrologiques.....	67
IV.4.4 Comportement hydrologique global du barrage.....	67
IV.4.5 Synthèse des relations pluie-superficie	67
IV.5 Confrontation des résultats de télédétection avec les données de la Direction des Ressources en Eau (DRE)	68
IV.5.1 Comparaison des tendances observées	69
IV.5.2 Correspondance entre les années humides et les années déficitaires	69
IV.5.3 Sources possibles de différences entre les deux approches	69
IV.5.4 Validation indirecte de la méthodologie adoptée	69
IV.6. Discussion générale des résultats à la lumière de la littérature scientifique	70
IV.6.1 Variabilité de la surface en eau et influence des précipitations	70
IV.6.2 Apport de la télédétection dans le suivi des ressources en eau.....	70
IV.6.3 Pertinence du MNDWI pour la détection des surfaces en eau	71
IV.6.4 Limites de l'approche adoptée	71
IV.6.5 Implications pour la gestion des ressources en eau.....	72
IV.6.6 Perspectives de recherche	72
IV.7 Conclusion.....	73
Conclusion générale	75
Références bibliographies	76
Annexe I.....	84
Annexe II	86

INTRODUCTION

Introduction générale

La gestion des ressources en eau constitue aujourd'hui un enjeu stratégique majeur, particulièrement dans les régions semi-arides et méditerranéennes où la disponibilité hydrique est fortement contrainte par la variabilité climatique et l'intensification des périodes de sécheresse. En Algérie, cette problématique est d'autant plus critique que la demande en eau augmente de manière continue sous l'effet de la croissance démographique, de l'urbanisation et du développement agricole [1].

Dans ce contexte, les barrages jouent un rôle fondamental dans la régulation et le stockage des eaux de surface. Ils représentent une infrastructure clé permettant d'assurer l'approvisionnement en eau potable et de soutenir les besoins en irrigation. Toutefois, la gestion classique de ces ressources, basée uniquement sur les mesures in situ, présente des limites importantes en termes de couverture spatiale, de fréquence d'acquisition et de réactivité face aux dynamiques hydrologiques [2].

Ainsi, l'intégration des technologies de télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) s'impose comme une approche scientifique performante [3]. Les images satellitaires, notamment celles de Sentinel-2, permettent de suivre l'évolution des surfaces en eau à travers des indices spectraux tels que le MNDWI [4]. Par ailleurs, les produits pluviométriques satellitaires, comme CHIRPS, offrent des données temporelles précises permettant d'analyser les relations entre les précipitations et les variations des ressources en eau de surface.

Dans ce cadre, les données utilisées dans cette étude proviennent également de sources institutionnelles fiables, notamment la Direction des Ressources en Eau (DRE), organisme chargé de la collecte, de la centralisation et du suivi des données hydrologiques à l'échelle nationale et régionale, ce qui renforce la robustesse et la crédibilité des analyses réalisées.

Ce travail s'inscrit ainsi dans une approche intégrée combinant observations in situ et données satellitaires, afin de mieux comprendre la dynamique des ressources en eau et de proposer des outils d'aide à la décision en faveur d'une gestion durable et optimisée de ces ressources vitales.

Afin de répondre à cette problématique et d'atteindre les objectifs fixés, le présent mémoire est structuré en quatre chapitres complémentaires.

INTRODUCTION

Le premier chapitre présente le contexte hydrique de l'Algérie ainsi que le rôle des barrages dans la gestion des ressources en eau.

Le deuxième chapitre est consacré aux fondements théoriques de la télédétection, aux systèmes d'information géographique et aux principaux indices spectraux utilisés pour le suivi des surfaces en eau.

Le troisième chapitre décrit la zone d'étude, les données mobilisées ainsi que la méthodologie adoptée pour le traitement et l'analyse des informations.

Enfin, le quatrième chapitre présente les résultats obtenus, leur interprétation et leur discussion, avant de dégager les principales conclusions et perspectives de cette étude.

CHAPITRE I :

Contexte hydrique de l'Algérie et rôle des barrages dans la gestion des ressources en eau

I.1 Introduction

L'eau est une ressource vitale pour le développement économique, social et environnemental. En raison de la rareté croissante des ressources hydriques, aggravée par les changements climatiques et l'augmentation de la demande, leur gestion durable constitue un enjeu majeur [6].

En Algérie, la répartition inégale des ressources en eau et l'irrégularité des précipitations accentue les risques de stress hydrique [7].

Dans ce contexte, les barrages jouent un rôle essentiel dans la mobilisation et la régulation des eaux de surface pour répondre aux besoins en eau potable, en irrigation et en protection contre les inondations.

Ce chapitre présente le contexte hydrique de l'Algérie et souligne l'importance des barrages dans la gestion durable des ressources en eau.

I.2 Ressources en eau en Algérie

Les ressources en eau en Algérie constituent un élément fondamental du développement économique, social et environnemental du pays [6]. Située dans une zone à climat majoritairement aride et semi-aride, l'Algérie dispose de ressources hydriques relativement limitées et inégalement réparties dans l'espace et dans le temps.

Leur disponibilité dépend principalement des précipitations, des conditions climatiques, des caractéristiques géologiques et des aménagements hydrauliques réalisés pour leur mobilisation et leur gestion.

Les ressources en eau algériennes se répartissent en deux grandes catégories : les eaux de surface et les eaux souterraines. Les eaux de surface comprennent les oueds, les barrages et les retenues collinaires alimentés essentiellement par les précipitations. Quant aux eaux souterraines, elles sont constituées des nappes phréatiques et des grands aquifères profonds, notamment ceux du Sahara, qui représentent une réserve stratégique pour l'approvisionnement en eau [7].

Cependant, l'Algérie fait face à un stress hydrique croissant sous l'effet de plusieurs facteurs, notamment la variabilité climatique, les sécheresses récurrentes, la croissance démographique, l'urbanisation rapide et l'augmentation des besoins agricoles et industriels [6] [7].

CHAPITRE I : Contexte hydrique de l'Algérie et rôle des barrages dans la gestion des ressources en eau

Cette situation impose une gestion intégrée et durable des ressources en eau afin de garantir leur préservation et leur disponibilité pour les générations futures.

I.2.1 Eaux de surface

Les eaux de surface regroupent l'ensemble des ressources hydriques circulant ou stockées à la surface du sol. Elles comprennent principalement les oueds, les cours d'eau temporaires, les barrages et les retenues collinaires [8].

Ces ressources sont concentrées essentiellement dans le nord du pays (Voir la Figure I.1), où les précipitations sont plus abondantes.

Les barrages jouent un rôle majeur dans la mobilisation de ces eaux en assurant leur stockage pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation agricole, l'industrie et la production d'énergie hydroélectrique.

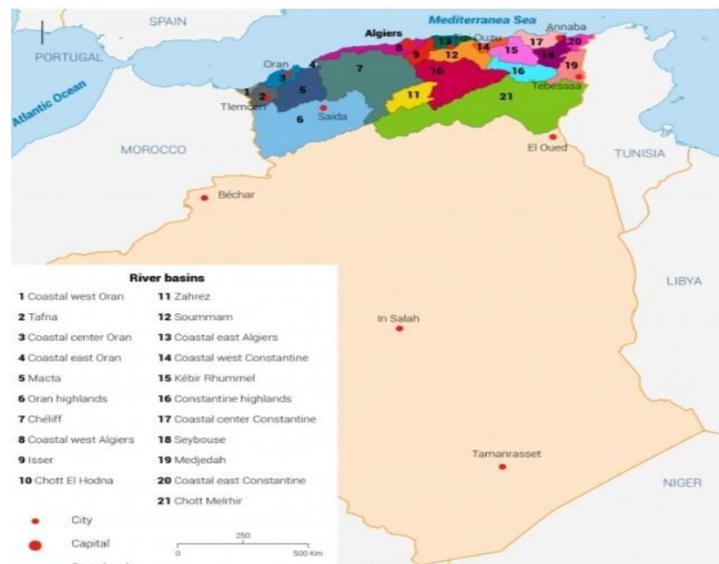


Figure I.1: Carte des bassins hydrographiques en Algérie [9].

I.2.2 Eaux souterraines

Les eaux souterraines représentent une composante essentielle des ressources hydriques nationales. Elles sont stockées dans des formations géologiques appelées aquifères et constituent une source importante d'alimentation en eau potable et d'irrigation [10].

L'Algérie dispose de vastes réserves d'eaux souterraines, notamment dans les régions sahariennes comme le montre la Figure I.2. Les principaux systèmes aquifères sont

CHAPITRE I : Contexte hydrique de l'Algérie et rôle des barrages dans la gestion des ressources en eau

le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT), qui forment ensemble le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS).

Ces réserves jouent un rôle stratégique dans le développement socio-économique des régions du Sud

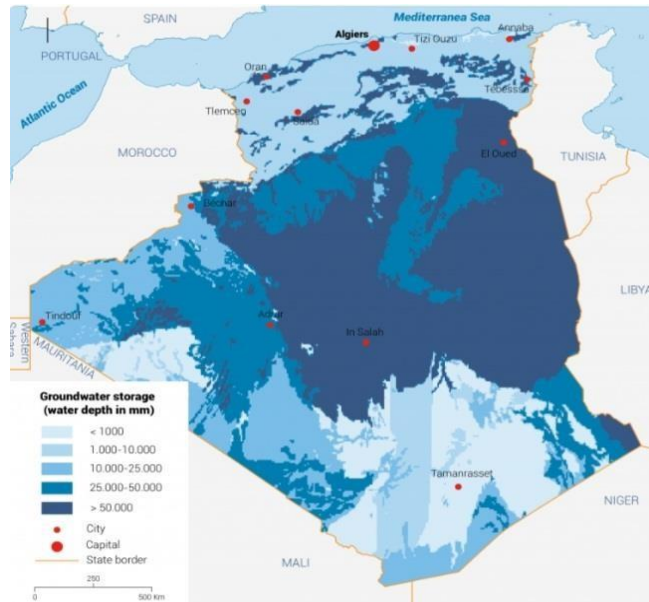


Figure I.2 : Potentiel des eaux souterraines en Algérie[9].

I.2.3 Les ressources en eau non conventionnelles

Face à la raréfaction des ressources conventionnelles, l'Algérie développe des ressources en eau non conventionnelles afin de renforcer la sécurité hydrique. Celles-ci comprennent principalement le dessalement de l'eau de mer et la réutilisation des eaux usées épurées. Le dessalement constitue aujourd'hui une source importante d'alimentation en eau potable pour les grandes villes côtières, tandis que la réutilisation des eaux traitées représente une solution prometteuse pour l'irrigation et la préservation des ressources naturelles[11].

I.2.4 Répartition spatiale et disponibilité des ressources en eau

La répartition des ressources en eau en Algérie est fortement inégale. Les régions du Nord, qui représentent environ 10 % du territoire national, concentrent la majorité des ressources hydriques grâce à des précipitations relativement abondantes. À l'inverse, le Sahara, qui couvre plus de 80 % de la superficie du pays, dispose principalement de ressources souterraines et connaît une très faible pluviométrie[12].

CHAPITRE I : Contexte hydrique de l'Algérie et rôle des barrages dans la gestion des ressources en eau

Cette disparité spatiale est accentuée par la variabilité climatique interannuelle. Certaines années sont marquées par des précipitations abondantes alors que d'autres connaissent des déficits pluviométriques importants. Cette irrégularité influence directement les volumes d'eau mobilisables dans les barrages et les nappes souterraines.

Par ailleurs, la disponibilité en eau par habitant a considérablement diminué au cours des dernières décennies en raison de la croissance démographique et de l'augmentation des besoins socio-économiques. Cette situation place l'Algérie parmi les pays soumis à un stress hydrique significatif, ce qui nécessite une gestion rationnelle et durable des ressources disponibles [12].

Tableau I .1: Répartition des ressources en eau renouvelables et non renouvelables par région [9].

Ressources en eau	Volume (milliards de m ³)	Région
Eaux de surface renouvelables	11	Nord et Sud
Eaux souterraines renouvelables	2,5	Nord
Eaux souterraines non renouvelables	6,1	Sud

I.2.5 Les principaux usages de l'eau

L'eau constitue une ressource essentielle au développement des sociétés et intervient dans de nombreux secteurs d'activité. Ses principaux usages peuvent être classés comme suit[8] [12]:

- ✓ **L'alimentation en eau potable (AEP)** : destinée à la consommation humaine ainsi qu'aux usages domestiques (boisson, cuisine, hygiène et assainissement).
- ✓ **L'agriculture** : l'irrigation représente le principal usage de l'eau à l'échelle mondiale. Elle est indispensable à la production agricole et à la sécurité alimentaire, particulièrement dans les régions arides et semi-arides comme l'Algérie.
- ✓ **L'industrie** : L'eau est utilisée dans les procédés de fabrication, le refroidissement des installations, le nettoyage des équipements et la production d'énergie.
- ✓ **La production d'énergie** : Elle intervient dans les centrales hydroélectriques pour produire de l'électricité, ainsi que dans le refroidissement des centrales thermiques.

CHAPITRE I : Contexte hydrique de l'Algérie et rôle des barrages dans la gestion des ressources en eau

- ✓ **Les usages environnementaux** : l'eau est indispensable au maintien des écosystèmes aquatiques, à la préservation de la biodiversité et au soutien des débits écologiques des cours d'eau.
- ✓ **Les loisirs et le tourisme** : les ressources en eau sont exploitées pour les activités récréatives telles que la pêche, les sports nautiques, le tourisme et l'aménagement des espaces naturels.

La gestion durable des ressources en eau doit permettre de concilier ces différents usages tout en assurant la préservation de la ressource pour les générations futures.

Dans un contexte marqué par le changement climatique et la raréfaction de l'eau, une utilisation rationnelle et intégrée devient indispensable, notamment en Algérie

I.2.6 Contraintes et défis

La gestion des ressources en eau constitue un enjeu majeur en Algérie en raison de la pression croissante exercée sur cette ressource limitée.

Malgré les efforts de mobilisation et de valorisation des ressources hydriques, plusieurs contraintes entravent leur gestion durable. Parmi les principales difficultés figurent la rareté des précipitations, les épisodes de sécheresse récurrents, les effets du changement climatique ainsi que la forte variabilité spatiale et temporelle des ressources en eau[13].

Par ailleurs, la croissance démographique, l'urbanisation et le développement des activités agricoles et industrielles entraînent une augmentation continue de la demande en eau[14].

La pollution des eaux de surface et souterraines, les pertes dans les réseaux de distribution et l'envasement des barrages aggravent également la pression sur les ressources disponibles.

Face à ces défis, l'adoption de stratégies intégrées de gestion et de préservation des ressources en eau est indispensable pour garantir la sécurité hydrique et soutenir le développement socio-économique du pays[15].

I.3 Les barrages en Algérie

I.3.1 Définition et classification

I.3.1.1 Définition

Un barrage est un ouvrage hydraulique construit en travers d'un cours d'eau dans le but de retenir, stocker ou réguler les écoulements d'eau. Il permet la création d'une retenue artificielle destinée à satisfaire divers besoins, notamment l'alimentation en eau potable, l'irrigation agricole, la production d'énergie hydroélectrique et la protection contre les inondations[16].

Les barrages constituent ainsi des infrastructures stratégiques pour la mobilisation et la gestion durable des ressources hydriques[16].

I. 3.1. 2Classification des barrages

Les barrages peuvent être classés selon différents critères, tels que leur conception structurale, les matériaux utilisés pour leur construction, leur fonction principale ou encore leur hauteur[17]. Cette classification permet d'identifier les caractéristiques techniques de chaque type d'ouvrage et de sélectionner la solution la plus adaptée aux contraintes du site et aux objectifs du projet.

Selon leur structure, on distingue le barrage-poids, qui résistent à la poussée de l'eau grâce à leur masse, les barrages-voûtes, qui transmettent les efforts aux versants rocheux par effet de voûte, ainsi que les barrages à contreforts, dont la stabilité est assurée par un ensemble de contreforts réduisant la quantité de béton nécessaire[18].

Selon les matériaux de construction, les barrages se répartissent en barrages en béton, barrages en remblais (en terre ou en enrochements) et barrages mixtes, qui associent plusieurs matériaux afin d'optimiser les performances de l'ouvrage en fonction des conditions géologiques et hydrauliques.

Selon leur fonction, les barrages peuvent être destinés au stockage de l'eau, à la dérivation des débits, à la régulation des écoulements, à la production d'énergie hydroélectrique, à la protection contre les crues, à l'irrigation ou encore à des usages multiples, combinant plusieurs de ces fonctions[18].

CHAPITRE I : Contexte hydrique de l'Algérie et rôle des barrages dans la gestion des ressources en eau

Enfin, selon leur hauteur, les barrages sont généralement classés en petits barrages (moins de 15 m), barrages moyens (15 à 50 m) et grands barrages (plus de 50 m).

Ainsi, la classification des barrages constitue un outil fondamental pour la conception, le dimensionnement et la gestion des ouvrages hydrauliques, en tenant compte des caractéristiques du site, des besoins en eau et des exigences techniques et environnementales. Cette approche est particulièrement importante dans les pays soumis à une forte variabilité climatique, comme l'Algérie, où les barrages jouent un rôle essentiel dans la mobilisation et la sécurisation des ressources en eau[17] [18].

I.3.2 Fonctions des barrages

Les barrages remplissent plusieurs fonctions essentielles dans la gestion des ressources hydriques. Leurs principaux usages sont[19]:

- **L'alimentation en eau potable** : ils assurent le stockage et l'approvisionnement en eau destinée à la consommation des populations urbaines et rurales.
- **L'irrigation agricole** : ils fournissent l'eau nécessaire aux cultures, contribuant ainsi à l'amélioration de la production agricole et à la sécurité alimentaire.
- **La production d'énergie hydroélectrique** : certains barrages permettent de produire de l'électricité grâce à la force de l'eau.
- **La protection contre les inondations** : ils régulent les débits des cours d'eau et limitent les risques de crues en aval.
- **Les usages industriels et environnementaux** : ils alimentent diverses activités industrielles et contribuent au maintien des débits écologiques nécessaires à la préservation des écosystèmes aquatiques.

I.3.3 Évolution du parc national

Depuis l'indépendance, l'Algérie a engagé d'importants programmes d'investissement dans le secteur hydraulique afin de renforcer la mobilisation des ressources en eau.

Le nombre de barrages a connu une croissance significative, passant de quelques ouvrages à plusieurs dizaines de barrages répartis principalement dans les régions septentrionales du pays (Voir le Tableau I.2).

CHAPITRE I : Contexte hydrique de l'Algérie et rôle des barrages dans la gestion des ressources en eau

Cette évolution reflète la volonté des pouvoirs publics d'améliorer la sécurité hydrique et de répondre à l'augmentation des besoins en eau liée à la croissance démographique et au développement économique[20]

Tableau I.2 : Répartition des principaux barrages algériens par région géographique (Ouest, Centre, Est) [20].

Région	Wilayas principales	Exemples de principaux barrages
Ouest	Tlemcen, sidi bel abbés, mascara, Mostaganem, Relizane, Tiaret	Barrage Bakhadda (Tiaret), Barrage Sarno (Mostaganem), Barrage Cheurfa (Mascara), Barrage Beni Bahdel (Tlemcen)
Centre	Alger, Tipaza, Bejaïa, Boumerdèse, Tiziouzo, Médéa	Barrage KoudiatAcerdoune (Bouira), Barrage Taksebt (Tizi Ouzou), Barrage Beni Amrane (Boumerdès), Barrage Djorf Ettorba (Bejaïa)
Est	Jijel, Skikda, Mila Sétif, El Tarf	Barrage Zit El Emba (Skikda), Barrage Boussiaba (Jijel), Barrage Guenitra (Skikda), Barrage Cheffia (El Tarf)

I.3.4 Importance des barrages pour la sécurité hydrique

La sécurité hydrique correspond à la capacité d'un pays à garantir un accès durable à une eau de qualité et en quantité suffisante pour satisfaire les besoins domestiques, agricoles, industriels et environnementaux [20].

En Algérie, les barrages jouent un rôle déterminant dans l'atteinte de cet objectif en assurant le stockage et la régulation des eaux de surface. Ils permettent de réduire les effets des sécheresses, de sécuriser l'alimentation en eau potable et de soutenir le développement socio-économique.

Ainsi, les barrages constituent un pilier fondamental de la politique nationale de gestion des ressources hydriques [20].

I.3.5 Contraintes des barrages algériens

La gestion des ressources hydriques en Algérie fait face à plusieurs défis structurels qui compromettent la disponibilité et la durabilité de l'eau.

La croissance démographique et le développement socio-économique engendrent une augmentation continue des besoins en eau dans les secteurs domestique, agricole et industriel[21].

CHAPITRE I : Contexte hydrique de l'Algérie et rôle des barrages dans la gestion des ressources en eau

Par ailleurs, la pollution des eaux de surface et souterraines, résultant des rejets urbains, industriels et agricoles, altère la qualité des ressources disponibles et accroît les coûts de traitement[22].

La surexploitation des nappes souterraines constitue également une contrainte majeure, entraînant une baisse des niveaux piézométriques et une dégradation progressive des aquifères. À cela s'ajoutent les épisodes récurrents de sécheresse qui réduisent les apports aux barrages et accentuent les déficits hydriques.

Enfin, les effets du changement climatique, caractérisés par la diminution des précipitations et l'augmentation des températures, aggravent le stress hydrique et représentent une menace croissante pour la sécurité hydrique du pays[22].

I.4 Les précipitations et leur rôle dans l'alimentation des barrages

Les précipitations constituent la principale source d'alimentation des barrages. Elles comprennent l'ensemble des eaux provenant de l'atmosphère sous forme de pluie, de neige ou de grêle[23].

Après leur chute, une partie de ces eaux s'infiltré dans le sol pour alimenter les nappes souterraines, tandis qu'une autre partie s'écoule à la surface sous forme de ruissellement vers les oueds et les cours d'eau, qui alimentent directement les retenues des barrages [23].

L'importance des précipitations dans le remplissage des barrages dépend de leur quantité, de leur intensité, de leur répartition spatiale et temporelle ainsi que des caractéristiques du bassin versant.

Des précipitations abondantes favorisent l'augmentation des apports hydriques et le remplissage des retenues, alors que les périodes de sécheresse entraînent une diminution des écoulements et une baisse des volumes stockés.

Dans un pays semi-aride comme l'Algérie, les précipitations jouent un rôle déterminant dans la mobilisation des ressources en eau de surface. La forte variabilité climatique observée d'une année à l'autre influence directement le niveau de remplissage des barrages et, par conséquent, la disponibilité de l'eau destinée aux usages domestiques, agricoles et industriels[24].

I.4.1 Définition des précipitations

Les précipitations désignent l'ensemble des formes d'eau qui tombent de l'atmosphère vers la surface terrestre sous l'effet de la gravité. Elles résultent de la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère lorsque les conditions météorologiques deviennent favorables à la formation de gouttelettes ou de cristaux de glace [25].

Les précipitations représentent l'un des éléments fondamentaux du cycle de l'eau, puis qu'elles assurent le transfert de l'eau atmosphérique vers les milieux continentaux. Leur quantité, leur intensité et leur répartition dans le temps influencent directement la disponibilité des ressources hydriques [25].

I.4.2 Types de précipitations



Figure I.3 : Les types de précipitation [26].

Les précipitations peuvent être classées selon les mécanismes atmosphériques qui sont à l'origine de leur formation [27].

a) Les précipitations convectives

Les précipitations convectives résultent du réchauffement intense de la surface terrestre, qui provoque l'ascension rapide de masses d'air chaud et humide. En se

CHAPITRE I : Contexte hydrique de l'Algérie et rôle des barrages dans la gestion des ressources en eau

refroidissant en altitude, la vapeur d'eau se condense et forme des nuages susceptibles de produire des pluies souvent intenses mais de courte durée.

b) Les précipitations orographiques

Les précipitations orographiques se produisent lorsqu'une masse d'air humide rencontre un relief montagneux. L'air est alors contraint de s'élever, ce qui entraîne son refroidissement et la condensation de la vapeur d'eau. Ce type de précipitation est fréquent dans les régions montagneuses du Tell et de l'Atlas.

c) Les précipitations frontales

Les précipitations frontales sont associées à la rencontre de masses d'air de températures différentes. L'air chaud, plus léger, s'élève au-dessus de l'air froid, favorisant ainsi la condensation et la formation de précipitations généralement étendues et relativement durables.

I.4.3 Variabilité des pluies en Algérie

Les précipitations en Algérie se caractérisent par une forte variabilité spatiale et temporelle, résultant des particularités climatiques et géographiques du pays. Cette variabilité se manifeste par une répartition inégale des pluies dans l'espace et dans le temps, avec une diminution progressive des quantités de précipitations du nord vers le sud.

Les régions côtières et montagneuses du nord reçoivent généralement plus de 600 mm de pluie par an, tandis que les régions sahariennes enregistrent souvent moins de 100 mm par an. À cette disparité spatiale s'ajoute une importante irrégularité interannuelle ainsi qu'une concentration des précipitations durant la saison froide.

Cette situation influence directement la disponibilité des ressources en eau, le remplissage des barrages et la recharge des nappes souterraines, constituant ainsi un enjeu majeur pour la sécurité hydrique et la gestion durable des ressources en eau en Algérie [28].

I.4.4 Effets du changement climatique sur les précipitations

Le changement climatique modifie significativement les régimes de précipitations en affectant leur quantité, leur répartition dans le temps et leur distribution géographique.

CHAPITRE I : Contexte hydrique de l'Algérie et rôle des barrages dans la gestion des ressources en eau

L'élévation des températures renforce l'évaporation et perturbe le cycle hydrologique, ce qui entraîne une augmentation de la variabilité pluviométrique. Cette évolution se traduit par une alternance plus marquée entre des épisodes de sécheresse prolongée et des événements de précipitations intenses [29].

En Algérie, les effets du changement climatique se manifestent par une tendance à la baisse des précipitations moyennes annuelles ainsi qu'une irrégularité accrue des pluies.

Cette situation réduit les apports en eau de surface, limite la recharge des nappes souterraines et affecte le remplissage des barrages. Par conséquent, ces changements accentuent la vulnérabilité des ressources hydriques et renforcent les défis liés à leur gestion durable dans un contexte de demande croissante en eau [29].

I.4.5 Contribution des précipitations au remplissage des barrages

Les précipitations constituent la principale source d'alimentation des barrages en Algérie. Elles jouent un rôle fondamental dans la mobilisation des ressources en eau de surface à travers le ruissellement des eaux de pluie vers les oueds et les cours d'eau qui alimentent les retenues de barrages [30].

La quantité d'eau stockée dans un barrage dépend directement de l'intensité, de la durée et de la répartition spatiale des précipitations au sein de son bassin versant.

Lors d'épisodes pluvieux importants, une partie de l'eau précipitée s'infiltré dans le sol tandis qu'une autre partie s'écoule à la surface sous forme de ruissellement [31]. Ce ruissellement converge vers le réseau hydrographique et contribue à l'augmentation des débits des oueds, favorisant ainsi le remplissage des retenues. L'efficacité de cette contribution dépend de plusieurs facteurs tels que la nature des sols, la couverture végétale, la topographie du bassin versant et les conditions climatiques.

La relation entre les précipitations et le remplissage des barrages n'est cependant pas toujours proportionnelle. Une faible pluie répartie sur une longue période peut favoriser l'infiltration et produire un ruissellement limité, alors qu'une pluie intense et de courte durée peut générer des volumes importants d'eau de surface. De même, les périodes de sécheresse prolongée réduisent considérablement les apports hydriques vers les barrages et entraînent une baisse du niveau des retenues [32].

CHAPITRE I : Contexte hydrique de l'Algérie et rôle des barrages dans la gestion des ressources en eau

En Algérie, la forte variabilité climatique influence directement les taux de remplissage des barrages. Les années humides se caractérisent généralement par une augmentation significative des volumes stockés, tandis que les années sèches provoquent une diminution des réserves en eau. Cette dépendance aux précipitations rend la gestion des barrages particulièrement sensible aux effets du changement climatique et aux fluctuations pluviométriques.

Par ailleurs, les précipitations extrêmes peuvent avoir des effets contradictoires. Bien qu'elles contribuent à l'augmentation rapide des réserves d'eau, elles favorisent également l'érosion des sols et le transport de sédiments vers les retenues. L'accumulation de ces sédiments entraîne progressivement l'envasement des barrages, réduisant leur capacité de stockage et leur efficacité hydraulique [32].

I.4.6 Impact des sécheresses

La sécheresse constitue l'un des principaux facteurs limitant la disponibilité des ressources en eau en Algérie. Elle se traduit par une diminution prolongée des précipitations, entraînant une baisse des écoulements de surface, une réduction de la recharge des nappes souterraines et une diminution des volumes stockés dans les barrages. Cette situation affecte directement l'alimentation en eau potable, les activités agricoles et les différents usages économiques de l'eau [33].

Sur le plan hydraulique, la sécheresse provoque une baisse significative des apports aux barrages, réduisant ainsi leur taux de remplissage et leur capacité à satisfaire la demande croissante en eau. Les périodes de sécheresse récurrentes observées ces dernières décennies en Algérie ont accentué la pression sur les ressources hydriques et augmenté les risques de pénurie, notamment dans les régions semi-arides et arides [33].

Face à ces défis, une gestion intégrée et durable des ressources en eau apparaît indispensable. Elle repose notamment sur l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau, le développement des ressources non conventionnelles et le renforcement des capacités de stockage afin de mieux faire face aux effets du changement climatique [34].

I.5 Gestion durable des ressources en eau en Algérie

La gestion durable des ressources en eau constitue un enjeu majeur pour l'Algérie en raison de la rareté de cette ressource, de l'augmentation de la demande et des effets du changement climatique [35].

Face à ces défis, les autorités publiques ont mis en place différentes stratégies visant à assurer une utilisation rationnelle et équilibrée des ressources hydriques tout en garantissant leur disponibilité pour les générations futures [35].

I.5.1 Gestion intégrée des ressources en eau

La gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) est une approche qui vise à coordonner le développement et la gestion de l'eau, des terres et des ressources associées afin d'optimiser les bénéfices économiques et sociaux sans compromettre la durabilité des écosystèmes [36].

En Algérie, cette approche repose sur une planification à l'échelle des bassins hydrographiques et sur la prise en compte des interactions entre les différents secteurs utilisateurs de l'eau. Elle favorise une gestion plus efficace des ressources disponibles, une meilleure répartition des usages et une réduction des conflits liés à l'exploitation de l'eau [36].

I.5.2 Stratégies nationales

La stratégie nationale de gestion des ressources en eau en Algérie vise à garantir la sécurité hydrique du pays à travers la mobilisation, la protection et la valorisation durable des ressources en eau. Elle repose sur plusieurs axes, notamment la construction de barrages, le développement du dessalement de l'eau de mer, la réutilisation des eaux usées épurées, la modernisation des réseaux de distribution et la réduction des pertes d'eau [37].

Cette stratégie accorde également une importance particulière à la préservation de la qualité des ressources hydriques et à l'adaptation aux effets du changement climatique. Son objectif principal est d'assurer un approvisionnement durable en eau pour les différents secteurs tout en répondant à l'augmentation de la demande [37].

L'interconnexion consiste à relier plusieurs barrages par des systèmes de transfert d'eau permettant de redistribuer les ressources selon les besoins.

CHAPITRE I : Contexte hydrique de l'Algérie et rôle des barrages dans la gestion des ressources en eau

Cette stratégie présente plusieurs avantages:

- Optimisation de la gestion des ressources disponibles;
- Compensation des déficits régionaux;
- Sécurisation de l'alimentation en eau potable;
- Réduction de la vulnérabilité aux sécheresses

En Algérie, plusieurs projets d'interconnexion ont été réalisés afin d'améliorer la gestion des ressources hydriques à l'échelle nationale.

I.5.3 Adaptation des ressources en eau aux changements climatiques

L'adaptation au changement climatique dans le secteur de l'eau consiste à mettre en œuvre des mesures visant à réduire la vulnérabilité des ressources hydriques face aux effets du réchauffement climatique.

En Algérie, cette adaptation repose sur le renforcement des capacités de stockage de l'eau par les barrages, le développement du dessalement de l'eau de mer, l'amélioration de l'efficacité des réseaux de distribution, la réutilisation des eaux usées traitées et la promotion des techniques d'économie d'eau, notamment dans l'agriculture.

Ces actions permettent de limiter les impacts de la baisse des précipitations, de l'augmentation des sécheresses et de la variabilité climatique sur la disponibilité des ressources en eau.

I.5.4 Perspectives

Les perspectives de la gestion des ressources en eau en Algérie s'orientent vers le renforcement de la sécurité hydrique à travers une approche durable et intégrée.

Elles reposent sur la poursuite de la mobilisation des ressources conventionnelles et non conventionnelles, notamment par la construction de nouveaux barrages, l'extension des capacités de dessalement de l'eau de mer et le développement de la réutilisation des eaux usées traitées.

Par ailleurs, l'amélioration de l'efficacité des réseaux de distribution, la réduction des pertes d'eau et l'adoption de technologies innovantes constituent des priorités pour optimiser la gestion des ressources disponibles.

CHAPITRE I : Contexte hydrique de l'Algérie et rôle des barrages dans la gestion des ressources en eau

Ces perspectives visent également à renforcer l'adaptation aux effets du changement climatique et à garantir une gestion durable de l'eau pour les générations futures.

I.6 Conclusion

En Algérie, la rareté des ressources hydriques et leur répartition irrégulière renforcent l'importance des barrages dans la gestion de l'eau. Ces ouvrages assurent l'alimentation en eau potable, l'irrigation et la protection contre les crues.

Cependant, leur fonctionnement est affecté par l'envasement, l'évaporation et les sécheresses récurrentes.

Dans ce contexte, la télédétection satellitaire apparaît comme un outil efficace pour le suivi et la gestion durable des ressources en eau.

Le chapitre suivant présente ses principes et ses principales applications dans le domaine hydrique.

CHAPITRE II :

**Fondements théoriques de la
télédétection appliquée au
suivi des ressources en eau**

CHAPITRE II : Fondements théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau

II.1 Introduction

Dans un contexte de stress hydrique et de variabilité climatique, le suivi des ressources en eau devient un enjeu majeur, en particulier dans les zones arides et semi-arides. Les méthodes classiques de mesure in situ, bien qu'importantes, restent limitées par leur faible couverture spatiale et leur caractère discontinu.

La télédétection s'impose ainsi comme une alternative efficace, permettant l'observation des surfaces en eau à grande échelle, de manière répétitive et objective. Grâce aux données satellitaires, il devient possible de suivre l'évolution des plans d'eau et d'analyser leur dynamique spatio-temporelle avec une bonne précision [38].

Ce chapitre présente les bases théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau, en mettant l'accent sur les principes fondamentaux, les systèmes utilisés et les principales méthodes d'analyse.

II.2 Principes généraux de la télédétection

Selon la Figure II.1 la télédétection constitue une méthode d'observation de la surface terrestre basée sur l'analyse du rayonnement électromagnétique, sans contact direct avec les objets étudiés. Elle repose sur l'interaction entre une source d'énergie, généralement solaire, et les différentes surfaces naturelles, dont les réponses spectrales varient selon leurs propriétés physiques et biochimiques. Le signal réfléchi est ensuite capté par des capteurs embarqués sur des satellites, puis transformé en données numériques exploitables.

Cette approche permet une discrimination efficace des couvertures du sol, notamment les surfaces en eau, grâce à leurs signatures spectrales spécifiques. Ainsi, la télédétection s'impose comme un outil essentiel pour l'analyse spatiale et temporelle des ressources hydriques, en offrant une vision synoptique et continue des dynamiques environnementales [38].

CHAPITRE II : Fondements théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau

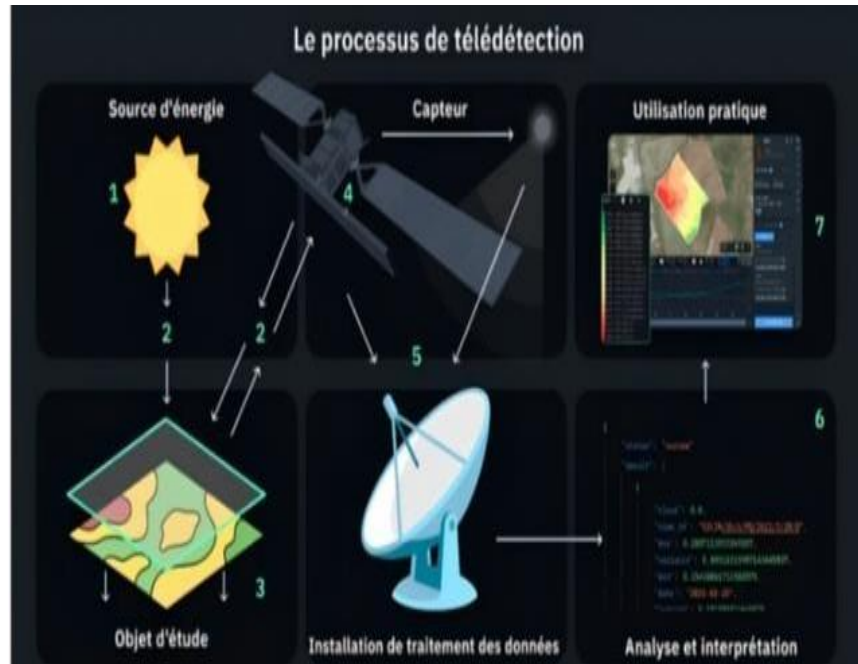


Figure II.1 : Présentation schématique du processus général de la télédétection[38].

II.2.1 Définition

La télédétection est une discipline scientifique et une technique d'acquisition d'informations sur la surface terrestre sans contact direct avec les objets étudiés. Elle repose sur l'enregistrement, le traitement et l'analyse du rayonnement électromagnétique émis, réfléchi ou diffusé par les différentes surfaces naturelles et artificielles. Ce signal est capté par des capteurs embarqués sur des satellites, des avions ou des drones, puis converti en données numériques exploitables [39] [40].

Grâce à ses principes physiques, la télédétection permet d'identifier et de caractériser les objets à partir de leurs signatures spectrales, qui varient selon leurs propriétés biophysiques et chimiques. Elle offre ainsi une vision synoptique, répétitive et multiscale de la surface terrestre, ce qui en fait un outil essentiel dans de nombreux domaines tels que la gestion des ressources en eau, l'agriculture, l'aménagement du territoire et le suivi environnemental [39] [40].

II.2.2 Composantes d'un système de télédétection

Un système de télédétection repose sur un ensemble d'éléments interdépendants assurant l'acquisition, la transmission et le traitement de l'information sur la surface terrestre. On distingue classiquement quatre composantes principales [39] [40].

CHAPITRE II : Fondements théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau

La première composante est la source d'énergie, généralement le Soleil dans le cas de la télédétection passive. Cette énergie constitue le signal initial qui interagit avec les objets observés.

La deuxième composante correspond à l'atmosphère, qui joue un rôle de milieu de propagation. Elle peut modifier le signal par absorption, diffusion ou réflexion, influençant ainsi la qualité de l'information reçue.

La troisième composante est la cible, c'est-à-dire les objets ou surfaces terrestres observés (eau, sols, végétation). Chaque cible possède une réponse spectrale spécifique en fonction de ses propriétés physiques.

Enfin, la quatrième composante est le capteur, embarqué sur une plateforme (satellite, avion ou drone), qui enregistre le rayonnement réfléchi ou émis et le transforme en données numériques exploitables pour l'analyse.

L'ensemble de ces composantes fonctionne de manière intégrée afin de produire une information géographique cohérente, exploitable dans le suivi environnemental et la gestion des ressources naturelles.

II.2.3 Rayonnement électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique constitue le support physique fondamental de la télédétection. Il correspond à une forme d'énergie qui se propage sous forme d'ondes, caractérisées par leur longueur d'onde et leur fréquence. Dans le cadre des applications de télédétection, ce rayonnement est soit d'origine solaire, soit émis par des capteurs actifs, et il interagit avec les surfaces terrestres à travers des phénomènes d'absorption, de réflexion et de diffusion. Ces interactions dépendent des propriétés physico-chimiques des objets observés, ce qui permet de différencier les types de couverture du sol, notamment les surfaces en eau. Ainsi, l'analyse du rayonnement électromagnétique est essentielle pour l'interprétation des images satellitaires et le suivi des ressources naturelles [41].

II.2.4 Signature spectrale de l'eau

La signature spectrale de l'eau correspond au comportement spécifique de cette dernière face au rayonnement électromagnétique selon les différentes longueurs d'onde. En télédétection, l'eau se distingue par une forte absorption dans les domaines du proche infrarouge (NIR) et de l'infrarouge à ondes courtes (SWIR), ce qui se traduit par des

CHAPITRE II : Fondements théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau

valeurs de réflectance très faibles dans ces bandes spectrales. À l'inverse, elle peut présenter une réflectance légèrement plus élevée dans le domaine du visible, notamment dans le bleu et le vert, en fonction de sa turbidité et de la présence de matières en suspension [42].

Cette caractéristique permet de différencier efficacement les surfaces en eau des autres types de couverture du sol, tels que la végétation ou les sols nus, qui présentent des comportements spectraux nettement différents. Ainsi, la signature spectrale de l'eau constitue un élément clé dans l'application des indices spectraux (NDWI, MNDWI) et dans l'extraction des surfaces hydriques à partir d'images satellitaires [42].

II.3 Satellites d'observation de la Terre

Les satellites d'observation de la Terre sont des systèmes spatiaux conçus pour collecter des informations sur la surface terrestre à l'aide de capteurs embarqués. Ils permettent l'acquisition continue de données couvrant de vastes zones géographiques et offrent ainsi une vision globale des phénomènes naturels et environnementaux. Grâce aux progrès technologiques, ces satellites fournissent des images de plus en plus précises, facilitant l'étude de l'occupation du sol, de la végétation, des ressources en eau et des changements environnementaux. Dans le domaine hydrologique, ils constituent un outil essentiel pour le suivi des plans d'eau et l'analyse de leur évolution spatio-temporelle (voir le Tableau II.1) [43].

Tableau II.1 : Récapitulatif des caractéristiques des principaux instruments satellitaires pour le suivi des ressources en eau [43].

Plateforme / Instrument	Application	Résolution temporelle	Résolution spatiale
Landsat 8/9 (OLI)	Cartographie des surfaces en eau, NDWI	16 jours	30 m
Sentinel-2 (MSI)	Surface en eau haute résolution, végétation	5 jours	10-60 m
GPM	Estimation de l'intensité des précipitations	3 heures	~10 km
CHIRPS	Cumul des précipitations (journalier, mensuel)	Journalier, mensuel	~5 km

CHAPITRE II : Fondements théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau

II.3.1 Landsat

Le programme Landsat est l'un des programmes les plus importants dans le domaine de l'observation de la Terre. Mis en place en 1972, il fournit une série continue d'images satellitaires permettant le suivi des changements environnementaux à long terme. Les satellites Landsat sont équipés de capteurs multispectraux qui enregistrent les informations dans différentes bandes du spectre électromagnétique. Grâce à leur résolution spatiale de 30 m et à la disponibilité gratuite de leurs données, ils sont largement utilisés dans les études environnementales et hydrologiques. Dans le cadre du suivi des ressources en eau, les images Landsat permettent d'identifier et de cartographier les surfaces en eau ainsi que d'analyser leur évolution spatio-temporelle (Voir la Figure II.2) [44].



Figure II.2: Le satellite Landsat 8/9 équipé de l'instrument OLI [45].

II.3.2 Sentinel

Le satellite Sentinel-2 appartient au programme européen Copernicus dédié à l'observation de la Terre. Il est composé de deux satellites, Sentinel-2A et Sentinel-2B, équipés d'un capteur multispectral capable d'acquérir des images dans plusieurs bandes spectrales (Voir la Figure II.3). Grâce à sa résolution spatiale élevée de 10 m pour certaines bandes et à sa fréquence de revisite de quelques jours, Sentinel-2 fournit des données précises et régulières pour le suivi de l'environnement. Dans le domaine des ressources en eau, il est particulièrement utilisé pour la cartographie des surfaces en eau et l'analyse de leur évolution grâce à l'application d'indices spectraux tels que le NDWI et le MNDWI [46].

CHAPITRE II : Fondements théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau

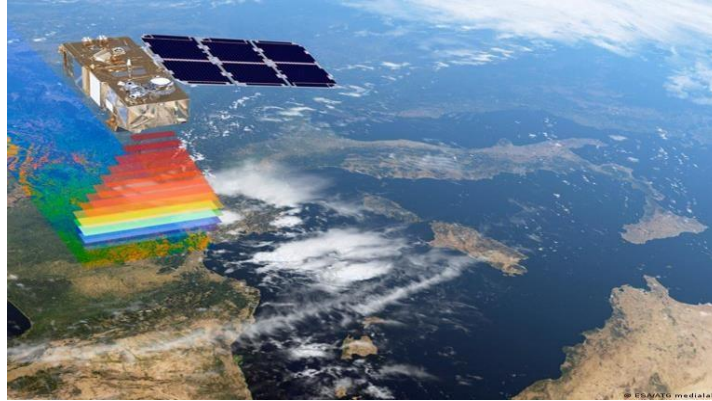


Figure II .3 : Satellite Sentinel-2 utilisé pour l'observation de la surface terrestre[45].

II.3.3 GPM

Le programme GPM (Global Precipitation Measurement) est une mission satellitaire internationale dédiée à l'observation et à l'estimation des précipitations à l'échelle mondiale. Il fournit des données quasi continues sur les pluies grâce à l'utilisation de capteurs embarqués sur plusieurs satellites. Ces données permettent de suivre la distribution spatiale et temporelle des précipitations avec une bonne précision, même dans les régions où les stations météorologiques sont peu nombreuses. Dans le domaine hydrologique, les données GPM sont largement utilisées pour l'étude des régimes pluviométriques, l'évaluation des ressources en eau et l'analyse de l'influence des précipitations sur la dynamique des plans d'eau et des barrages [47].

II.3.4 CHIRPS

CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations) est un produit de données pluviométriques qui combine les estimations satellitaires avec les observations des stations météorologiques afin de fournir des informations fiables sur les précipitations. Il offre une couverture spatiale étendue et une longue série temporelle, ce qui en fait une source de données largement utilisée dans les études climatiques et hydrologiques. Grâce à sa bonne résolution spatiale et temporelle, CHIRPS permet d'analyser la variabilité des précipitations et leur influence sur les ressources en eau [48].

Dans cette étude, les données CHIRPS ont été utilisées pour évaluer l'évolution des précipitations et examiner leur relation avec les variations de la surface en eau du barrage de Zit Emba.

CHAPITRE II : Fondements théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau

II.4 Applications de la télédétection aux ressources en eau

La télédétection joue un rôle essentiel dans la gestion et le suivi des ressources en eau grâce à sa capacité à fournir des observations régulières sur de vastes territoires. Les données satellitaires permettent d'identifier et de cartographier les surfaces en eau, de suivre leur évolution dans le temps et d'évaluer les effets des conditions climatiques sur leur dynamique. Elles sont également utilisées pour le suivi des barrages, des lacs, des cours d'eau et des zones humides, ainsi que pour l'analyse des précipitations, des sécheresses et des inondations. Grâce à la disponibilité croissante des images satellitaires et des outils de traitement, la télédétection constitue aujourd'hui un moyen efficace et économique pour la surveillance et la gestion durable des ressources hydriques [49].

II.4.1 Suivi des barrages

Le suivi des barrages par télédétection constitue une approche efficace pour l'évaluation continue des ressources en eau de surface. Les images satellitaires permettent de cartographier avec précision l'étendue des plans d'eau et de suivre leurs variations spatio-temporelles en fonction des conditions climatiques et de l'exploitation hydrique. Grâce aux capteurs multi spectraux, il est possible de détecter les surfaces en eau à travers des indices spectraux adaptés, facilitant ainsi l'analyse de l'évolution des volumes stockés [50].

Cette méthode présente un intérêt particulier dans les régions où les données in situ sont limitées ou irrégulières. Elle offre une vision globale et régulière de l'état des barrages, permettant d'identifier les périodes de remplissage et de vidange, ainsi que d'évaluer l'impact des sécheresses et des précipitations sur la disponibilité des ressources en eau [50].

II.4.2 Surveillance des sécheresses

La surveillance des sécheresses par télédétection repose sur l'analyse continue des variables environnementales sensibles au déficit hydrique, telles que la couverture végétale, l'humidité des sols, les précipitations et l'état des surfaces en eau. Les données satellitaires permettent de détecter précocement les anomalies climatiques en comparant les conditions actuelles aux moyennes historiques, offrant ainsi une vision dynamique de l'évolution des périodes de sécheresse [51].

CHAPITRE II : Fondements théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau

Cette approche est particulièrement efficace grâce à l'intégration de différents produits satellitaires (indices de végétation, données pluviométriques et imagerie multi spectrale), qui permettent de caractériser l'intensité, la durée et l'étendue spatiale des sécheresses. Dans ce contexte, la télédétection constitue un outil essentiel pour le suivi hydrologique et la gestion proactive des ressources en eau, notamment dans les régions arides et semi-arides [51].

II.4.3 Détection des inondations

La détection des inondations par télédétection repose sur l'exploitation des images satellitaires pour identifier rapidement les zones temporairement recouvertes par l'eau. Les capteurs optiques et radar permettent de suivre l'extension des surfaces inondées, même en présence de conditions météorologiques défavorables, notamment grâce à la capacité des systèmes radar à traverser les nuages [52].

L'analyse des signatures spectrales et des variations de réflectance permet de distinguer les zones inondées des surfaces non touchées, en particulier à travers l'utilisation d'indices hydrologiques adaptés. Cette approche offre une information rapide et fiable sur l'étendue et la dynamique des inondations, ce qui est essentiel pour la gestion des risques, la protection des populations et la planification des interventions d'urgence [52].

II.4.4 Gestion des ressources en eau

La gestion des ressources en eau par télédétection s'appuie sur l'exploitation de données satellitaires afin d'assurer un suivi global, régulier et objectif du cycle hydrologique. Cette approche permet d'évaluer la disponibilité des ressources en eau de surface, de suivre l'évolution des barrages et des lacs, et d'analyser l'impact des variations climatiques sur leur dynamique [53].

En intégrant les informations issues de différentes sources (imagerie multi spectrale, données pluviométriques et séries temporelles), la télédétection offre une vision cohérente de l'état des ressources hydriques. Elle constitue ainsi un outil d'aide à la décision pour la planification, la préservation et l'utilisation durable de l'eau, notamment dans les zones soumises à un stress hydrique important [53].

CHAPITRE II : Fondements théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau

II.4.5 Changement climatique

Le changement climatique exerce une influence directe sur la disponibilité et la répartition des ressources en eau à l'échelle régionale et mondiale. L'augmentation des températures, la modification des régimes de précipitations et la fréquence accrue des événements extrêmes entraînent des perturbations significatives du cycle hydrologique. Dans ce contexte, la télédétection constitue un outil essentiel pour suivre ces évolutions de manière continue et spatialisée [54].

Grâce aux données satellitaires, il est possible d'observer les tendances à long terme liées à la diminution ou à la variabilité des surfaces en eau, ainsi que les anomalies pluviométriques et les modifications de l'occupation du sol. Cette approche permet d'objectiver les impacts du changement climatique sur les systèmes hydriques et de fournir des indicateurs fiables pour l'analyse et l'adaptation des stratégies de gestion de l'eau [54].

II.5 Indices de détection des surfaces en eau

La détection des surfaces en eau à partir des images satellitaires repose principalement sur l'utilisation d'indices spectraux, qui permettent de discriminer efficacement l'eau des autres types de couverture du sol. Ces indices exploitent les différences de réflectance entre les bandes spectrales, notamment dans le visible, le proche infrarouge (NIR) et le moyen infrarouge (SWIR), où l'eau présente généralement une forte absorption.

Parmi les indices les plus utilisés figurent le NDWI (Normalized Difference Water Index), le MNDWI (Modified NDWI) et d'autres variantes adaptées aux conditions locales et aux capteurs utilisés. Ces méthodes permettent une extraction rapide et fiable des surfaces en eau, facilitant ainsi le suivi des barrages, des lacs et des zones humides. Elles constituent aujourd'hui un outil fondamental dans les études hydrologiques basées sur la télédétection [55] [56].

II.5.1 MNDWI

Le MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) est un indice spectral utilisé en télédétection pour la détection et la cartographie des surfaces en eau. Il a été développé afin d'améliorer la discrimination entre l'eau et les autres types de couverture

CHAPITRE II : Fondements théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau

du sol, notamment les zones urbaines et les sols nus, qui peuvent parfois être confondus avec l'eau dans les indices classiques.

Cet indice est calculé à partir des bandes du vert et du moyen infrarouge (SWIR), selon la formule normalisée: $(\text{Green} - \text{SWIR}) / (\text{Green} + \text{SWIR})$. L'eau présente généralement des valeurs positives ou élevées de MNDWI, tandis que les surfaces terrestres affichent des valeurs plus faibles voire négatives.

Grâce à sa robustesse, le MNDWI est largement utilisé dans les études hydrologiques pour l'extraction des plans d'eau, le suivi des variations des barrages et l'analyse des changements spatio-temporels des ressources en eau [55].

II.5.2 NDWI

Le NDWI (Normalized Difference Water Index) est un indice spectral couramment utilisé en télédétection pour l'identification des surfaces en eau. Il repose sur l'exploitation des différences de réflectance entre le proche infrarouge (NIR) et le vert, deux bandes du spectre électromagnétique particulièrement sensibles aux variations des milieux hydriques.

L'eau se caractérise par une forte absorption dans le proche infrarouge et une réflectance relativement plus élevée dans le domaine du vert, ce qui permet de la distinguer des autres types de couverture du sol tels que la végétation et les sols nus. Le NDWI est généralement calculé selon la formule $(\text{Green} - \text{NIR}) / (\text{Green} + \text{NIR})$, où les valeurs positives indiquent la présence probable d'eau [56].

Cet indice est largement utilisé dans les applications hydrologiques pour la cartographie des plans d'eau, le suivi des barrages et l'analyse des variations spatio-temporelles des ressources en eau.

II.5.3 AWEI

L'AWEI (Automated Water Extraction Index) est un indice spectral développé pour améliorer l'extraction automatique des surfaces en eau à partir des images satellitaires. Il a été conçu afin de réduire les confusions fréquentes entre l'eau et d'autres surfaces ayant des signatures spectrales similaires, notamment les zones d'ombre, les sols humides et certaines surfaces urbaines.

Cet indice combine plusieurs bandes spectrales, notamment le visible et l'infrarouge, pour renforcer le contraste entre l'eau et les autres éléments du paysage. Il

CHAPITRE II : Fondements théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau

existe sous deux formes principales : AWEIsh (adapté aux environnements ombragés) et AWEInsh (adapté aux environnements non ombragés), ce qui permet une meilleure robustesse selon les conditions d'observation [57].

Grâce à sa performance, l'AWEI est largement utilisé dans les études hydrologiques pour la cartographie des plans d'eau, le suivi des barrages et la détection précise des variations des surfaces en eau.

II.5.4 Comparaison des indices de détection des surfaces en eau

Dans le cadre de l'extraction des surfaces en eau, plusieurs indices spectraux sont utilisés en télédétection, notamment le NDWI, le MNDWI et l'AWEI. Leur efficacité varie en fonction du type d'environnement, de la qualité des images et de la présence de perturbations telles que les zones urbaines, les sols humides ou les ombres.

Le NDWI est l'un des indices les plus anciens et les plus utilisés, mais il présente parfois des limites dans les zones urbanisées où certaines surfaces peuvent être confondues avec l'eau. L'AWEI améliore la discrimination des pixels d'eau en intégrant davantage de bandes spectrales et en réduisant les effets des ombres, ce qui le rend plus robuste dans des conditions complexes. Cependant, il peut être plus sensible aux paramètres de calibration et au choix des seuils [56].

Dans cette étude, le MNDWI a été privilégié pour l'extraction des surfaces en eau, en raison de sa bonne capacité à éliminer les interférences des sols nus et des zones bâties, ainsi que de sa fiabilité dans les environnements semi-arides [55]. Son utilisation permet d'obtenir une classification plus précise des plans d'eau et d'assurer un suivi cohérent des variations spatio-temporelles du barrage de Zit Ema.

II.6 Télédétection et suivi des précipitations

La télédétection joue un rôle important dans le suivi des précipitations, en particulier dans les régions où le réseau de stations météorologiques est insuffisant ou spatialement discontinu. Les satellites permettent d'estimer la distribution des pluies à différentes échelles spatio-temporelles, en se basant sur l'analyse du rayonnement infrarouge et micro-ondes émis ou réfléchi par les systèmes nuageux.

Ces observations satellitaires sont généralement intégrées dans des produits climatiques comme GPM ou CHIRPS, qui combinent données satellitaires et mesures au

CHAPITRE II : Fondements théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau

sol afin d'améliorer la précision des estimations pluviométriques. Dans le domaine hydrologique, ces données sont essentielles pour analyser la variabilité des précipitations, comprendre leur influence sur les ressources en eau et établir des relations entre pluie et évolution des surfaces en eau des barrages et des bassins versants [58] [59].

II.6.1 Cycle hydrologique et précipitations

Le cycle hydrologique constitue le cadre fondamental de compréhension de la dynamique des précipitations et de leur redistribution dans les différents compartiments du système terrestre. Les précipitations représentent l'un des principaux forçages d'entrée, assurant l'alimentation des eaux de surface et des réserves souterraines [60].

Dans ce contexte, la télédétection permet de suivre spatialement et temporellement la formation, la distribution et l'intensité des précipitations à travers des capteurs satellitaires spécialisés. Ces observations contribuent à mieux comprendre les déséquilibres hydrologiques, notamment les épisodes de sécheresse ou d'excès pluviométrique [60].

L'intégration des données satellitaires dans l'analyse du cycle hydrologique permet ainsi d'établir des relations directes entre la variabilité des précipitations et les fluctuations des ressources en eau, en particulier au niveau des barrages et des bassins versants [60].

II.6.2 Estimation satellitaire des pluies

L'estimation satellitaire des précipitations repose sur l'analyse des signaux émis ou réfléchis par les systèmes nuageux dans différentes portions du spectre électromagnétique, notamment les bandes infrarouges et micro-ondes. Ces informations permettent de déduire indirectement l'intensité et la distribution spatiale des pluies, même dans les zones dépourvues de stations météorologiques.

Les produits satellitaires tels que GPM ou CHIRPS combinent généralement plusieurs sources de données afin d'améliorer la précision des estimations, en intégrant à la fois des observations satellitaires et des mesures au sol lorsqu'elles sont disponibles. Cette approche hybride permet de réduire les incertitudes et d'assurer une meilleure continuité des séries pluviométriques [58] [59].

CHAPITRE II : Fondements théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau

Dans les études hydrologiques, ces données sont essentielles pour analyser la variabilité des précipitations, suivre les événements extrêmes et comprendre leur impact sur les ressources en eau de surface, notamment les barrages et les bassins versants.

II.6.3 Séries temporelles

Les séries temporelles constituent un outil fondamental en télédétection pour analyser l'évolution des variables environnementales dans le temps. Elles correspondent à une succession d'observations réalisées à intervalles réguliers, permettant de suivre les dynamiques spatio-temporelles des phénomènes naturels tels que les précipitations, la couverture végétale ou les surfaces en eau [61].

Dans le domaine hydrologique, l'analyse des séries temporelles permet d'identifier les tendances, les variations saisonnières ainsi que les anomalies liées aux événements climatiques extrêmes comme les sécheresses ou les fortes pluies. L'intégration des données satellitaires dans ce type d'analyse offre une vision continue et cohérente de l'évolution des ressources en eau [61].

Ainsi, les séries temporelles constituent un support essentiel pour la compréhension des interactions entre climat et hydrologie, et pour l'aide à la décision dans la gestion durable des ressources hydriques [61].

II.6.4 Relation entre les précipitations et la surface en eau

La relation entre les précipitations et la surface en eau constitue un élément fondamental dans l'analyse hydrologique des bassins versants et des retenues artificielles. Les précipitations représentent la principale source d'alimentation des plans d'eau, influençant directement leur extension spatiale et leur niveau de stockage.

Une augmentation des précipitations entraîne généralement une hausse des apports en eau, ce qui se traduit par une expansion des surfaces des barrages et des lacs. À l'inverse, en période de faible pluviométrie ou de sécheresse, une réduction des apports hydriques provoque une régression notable de ces surfaces. Cette dynamique est également modulée par des facteurs tels que l'évaporation, l'infiltration et la gestion hydraulique des ouvrages [50] [51].

Dans ce contexte, l'intégration des données satellitaires de précipitations (CHIRPS) et des indices de détection de l'eau (MNDWI) permet d'analyser de manière fine la

CHAPITRE II : Fondements théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau

corrélation entre les variations climatiques et la réponse hydrologique des surfaces en eau, notamment au niveau des barrages [55] [58].

II.7 Complémentarité entre données satellitaires et mesures au sol

II.7.1 Stations conventionnelles

Les stations conventionnelles représentent des dispositifs de mesure in situ utilisés pour enregistrer directement les paramètres hydrométéorologiques tels que les précipitations, la température, l'humidité ou encore le niveau des eaux. Elles fournissent des données précises et fiables à l'échelle locale, ce qui en fait une référence essentielle dans les études climatiques et hydrologiques. Toutefois, leur couverture spatiale reste souvent limitée, notamment dans les zones peu accessibles, ce qui engendre des discontinuités dans les observations.

Dans ce contexte, elles sont généralement utilisées en complément des données satellitaires afin d'assurer une meilleure validation et une analyse plus robuste des phénomènes hydrologiques [62].

II.7.2 Rôle de l'ANRH et de l'ANBT

En Algérie, la gestion des ressources en eau repose sur l'intervention de plusieurs institutions spécialisées, notamment l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) et l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT), qui jouent un rôle complémentaire dans la connaissance et l'exploitation du système hydrique.

L'ANRH est chargée de la collecte, du traitement et de la diffusion des données hydrologiques et hydrogéologiques. Elle assure le suivi des nappes souterraines, des eaux de surface ainsi que des paramètres climatiques associés, constituant ainsi une base de données essentielle pour la planification et la recherche dans le domaine de l'eau. Les missions de l'ANRH sont réparties sur le territoire national à travers sept directions régionales, comme illustre dans le Tableau II.2 ci-dessous [63].

CHAPITRE II : Fondements théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau

Tableau II .2 : Les 7 directions régionales de l'ANRH [63].

Direction régionale	Wilaya de rattachement
Direction régionale Centre (DRC)	Blida
Direction régionale Est (DRE)	Constantine
Direction régionale Ouest (DRO)	Oran
Direction régionale Sud - Est (DRSE)	Ouargla
Direction régionale Sud- Ouest (DRSO)	Adrar
Direction régionale des Hauts plateaux Est	Djelfa
Direction régionale des Hauts plateaux Ouest	Saïda

De son côté, l'ANBT est responsable de la gestion, de l'exploitation et de la maintenance des barrages et des ouvrages de transfert. Elle assure le suivi des volumes stockés, la sécurité des infrastructures hydrauliques et la régulation des ressources en eau destinées à l'alimentation, à l'irrigation et à l'industrie [64].

La complémentarité entre ces deux organismes permet une meilleure gouvernance des ressources en eau, en combinant les données de terrain, les observations institutionnelles et les apports de la télédétection pour une gestion durable et intégrée.

II.7.3 Validation des données

La validation des données constitue une étape essentielle dans toute analyse hydrologique basée sur la télédétection. Elle consiste à vérifier la fiabilité et la cohérence des informations issues des capteurs satellitaires en les comparant aux mesures de référence obtenues au sol ou auprès de bases de données institutionnelles [65].

Cette démarche permet d'évaluer les incertitudes associées aux produits satellitaires, notamment celles liées aux erreurs de capteur, aux conditions atmosphériques ou aux méthodes de traitement. Les données in situ, telles que celles issues des stations conventionnelles, sont généralement utilisées comme référence pour ajuster et calibrer les résultats obtenus [65].

CHAPITRE II : Fondements théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau

Ainsi, la validation garantit la robustesse des analyses et renforce la crédibilité des résultats, en particulier dans les études de suivi des ressources en eau, où la précision des estimations est déterminante pour la prise de décision et la gestion durable des systèmes hydriques.

II.8 Cadre réglementaire algérien

II.8.1 Loi sur l'eau

La gestion des ressources en eau en Algérie est encadrée par un cadre juridique fondamental, principalement défini par la loi n° 05-12 du 4 août 2005 relative à l'eau. Cette loi constitue le texte de référence en matière de gouvernance hydrique, en fixant les principes relatifs à la protection, à la valorisation et à l'utilisation durable des ressources en eau. Elle organise également les modalités de gestion des eaux de surface et souterraines, la prévention de la pollution ainsi que la régulation des usages à travers une approche intégrée par bassin hydrographique. Ainsi, ce dispositif législatif joue un rôle central dans la préservation des ressources hydriques et dans l'assurance de leur exploitation rationnelle et durable [66].

II.8.2 Gestion durable des ressources en eau

La gestion durable des ressources en eau repose sur une approche intégrée visant à assurer l'équilibre entre les besoins socio-économiques actuels et la préservation des ressources pour les générations futures. Elle s'appuie sur une utilisation rationnelle de l'eau, en tenant compte des limites quantitatives et qualitatives des ressources disponibles, ainsi que des contraintes environnementales et climatiques [67].

Dans ce cadre, la planification hydrique intègre des outils modernes tels que la télédétection et les systèmes d'information géographique, permettant un suivi précis et continu des ressources en eau. Cette approche favorise une meilleure connaissance des dynamiques hydrologiques, notamment l'évolution des barrages, des nappes souterraines et des précipitations [67].

II.9 Conclusion

Ce chapitre a présenté les bases théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau. Il a mis en évidence les principes fondamentaux du rayonnement

CHAPITRE II : Fondements théoriques de la télédétection appliquée au suivi des ressources en eau

électromagnétique, les systèmes satellitaires (Landsat, Sentinel-2) ainsi que les principales données climatiques (GPM, CHIRPS).

Il a également souligné l'intérêt des indices spectraux (NDWI, MNDWI, AWEI) pour la détection des surfaces en eau et leur rôle dans l'analyse des phénomènes hydrologiques tels que les sécheresses et les inondations. Enfin, l'importance de la complémentarité entre données satellitaires et mesures de terrain a été mise en avant pour garantir la fiabilité des résultats.

Chapitre III :

Matériels et Méthodes

III.1 Introduction

L'étude de la dynamique spatio-temporelle des ressources en eau constitue un enjeu majeur dans un contexte marqué par la variabilité climatique et l'augmentation des besoins en eau. Les barrages représentent des infrastructures stratégiques pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation agricole et la régulation des crues. Leur suivi régulier est donc indispensable afin d'assurer une gestion durable des ressources hydriques [68].

Dans cette perspective, les techniques de télédétection offrent des outils performants pour l'observation et l'analyse de l'évolution des surfaces en eau. Grâce à la disponibilité croissante des images satellitaires et des plateformes de traitement en ligne, il est désormais possible d'effectuer un suivi continu des réservoirs avec une précision spatiale satisfaisante et à moindre coût[69].

Le présent chapitre décrit le cadre méthodologique adopté pour étudier l'influence de la variabilité pluviométrique sur l'évolution de la surface en eau du barrage de ZitEmba (Bekkouche Lakhdar), situé dans la wilaya de Skikda. Après une présentation de la zone d'étude et de ses principales caractéristiques hydrologiques, les différentes données utilisées ainsi que les outils de traitement mobilisés sont exposés.

Enfin, la méthodologie mise en œuvre pour l'extraction des superficies du plan d'eau et l'analyse de leur relation avec les précipitations est détaillée.

III.2 Présentation de la zone d'étude

III.2.1 Cadre hydrologique de la wilaya de Skikda

La wilaya de Skikda est située dans le Nord-Est algérien et s'étend sur une superficie d'environ 4 138 km². Elle bénéficie d'un climat méditerranéen caractérisé par des hivers relativement humides et des étés chauds et secs. Les précipitations annuelles présentent une forte variabilité spatiale et temporelle, avec des cumuls pouvant dépasser 1 000 mm dans certaines zones montagneuses [70].

La région dispose d'un potentiel hydrique important reposant sur des ressources superficielles et souterraines. Les ressources superficielles sont principalement constituées par les oueds, les retenues collinaires et plusieurs barrages stratégiques tels que les barrages de Guenitra, Béni Zid, Zerdaza et Zit Emba (Bekkouche Lakhdar) (voir Tableau I.1). Ces infrastructures jouent un rôle essentiel dans l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation et la protection contre les crues [70].

Tableau III.1 : Liste des barrages [70].

Barrage	Alimentation Principale	Localisation	Capacité (millions de m³)
Guenitra	OumToub, SidiMezghiche, Skikda	Oum Toub	89 - 125
Zit Emba	Skikda, Azzaba, Djendel, Ain Charchar	Bekkouche Lakhdar	97 - 120
Béni Zide	Collo, Béni Zide, Kerkra, Cheraia	Béni Zide	39 - 50
Zerdaza	Zardaza, El Harrouch, AinBouziane	Zardaza	9 - 20

Par ailleurs, les nappes alluviales associées aux principaux cours d'eau constituent une ressource complémentaire importante pour les besoins domestiques et agricoles. Toutefois, la pression croissante exercée sur les ressources hydriques, combinée aux effets du changement climatique, rend nécessaire le développement de méthodes de suivi et de gestion plus performantes.

III.2.2 Situation géographique du barrage de Zit Emba

Le barrage de Zit Emba, également connu sous le nom de barrage Bekkouche Lakhdar, est situé dans la commune de Bekkouche Lakhdar, relevant de la daïra de Ben Azzouz, au sud-est de la wilaya de Skikda. Il appartient au bassin hydrographique de l'Oued El Hammam, lui-même intégré au système hydrographique de l'Oued El Kebir [71].

La retenue est implantée dans une région présentant une vocation essentiellement agricole, tout en assurant l'alimentation en eau de plusieurs agglomérations de la wilaya. Sa position stratégique confère au barrage un rôle majeur dans la sécurisation des ressources hydriques du Nord-est algérien [71].

Le bassin versant associé au barrage est soumis à une variabilité pluviométrique importante, ce qui influence directement le régime de remplissage du réservoir et justifie l'intérêt d'un suivi régulier de son évolution à l'aide des techniques de télédétection.



Figure III.1 : Vu aérienne du barrage de Zit Emba [71].

III.2.3 Caractéristiques techniques du barrage

Le barrage de Zit Emba est un ouvrage en remblai de terre construit sur l'Oued El Hammam. Il constitue l'un des principaux ouvrages hydrauliques de la wilaya de Skikda.

Les principales caractéristiques techniques du barrage sont résumées comme suit [72] :

- Type de barrage : barrage en remblai de terre ;
- Oued alimentateur : Oued El Hammam ;
- Hauteur maximale : 52 m ;
- Longueur de la crête : 640 m ;
- Capacité totale de stockage : environ 116,59 hm³ ;
- Fonction principale : alimentation en eau potable, irrigation et régulation des crues.

Ces caractéristiques confèrent au barrage une importance stratégique pour la gestion des ressources en eau dans la région de Skikda.

III.2.4 Justification du choix de la zone d'étude

Le choix du barrage de Zit Emba comme zone d'étude repose sur plusieurs considérations hydrologiques et socio-économiques.

D'une part, cet ouvrage représente une source essentielle d'approvisionnement en eau pour plusieurs communes de la wilaya de Skikda et participe au développement des activités agricoles de la région. D'autre part, le bassin versant du barrage est particulièrement sensible aux fluctuations climatiques, notamment à la variabilité des précipitations observée ces dernières années [71].

Chapitre III : Matériels et Méthodes

Par ailleurs, l'absence de données régulières sur l'évolution spatiale de la surface en eau du réservoir renforce l'intérêt de recourir aux techniques de télédétection. Les images satellitaires permettent en effet d'assurer un suivi continu de la dynamique du plan d'eau et de mieux comprendre les interactions entre les précipitations et le comportement hydrologique du barrage [70].

Ainsi, le barrage de Zit Emba constitue un site particulièrement pertinent pour l'application des méthodes de télédétection dans le domaine de la gestion intégrée des ressources en eau.

III.2.5 Période d'étude

La période d'étude retenue s'étend de 2020 à 2025, soit six années hydrologiques consécutives. Ce choix permet de disposer d'une série temporelle suffisamment longue pour analyser les variations interannuelles de la superficie du plan d'eau et leur relation avec la variabilité pluviométrique.

Cette période couvre différentes conditions hydrologiques caractérisées par l'alternance d'années relativement humides et d'années plus sèches, offrant ainsi un cadre favorable à l'étude de la réponse du réservoir aux fluctuations climatiques.

La disponibilité continue des données satellitaires Sentinel-2, complétées ponctuellement par les images Landsat 8 et Landsat 9, ainsi que des données pluviométriques, constitue également un facteur déterminant dans le choix de cette période d'analyse.

III.3 Données et outils utilisés

III.3.1 Données satellitaires

III.3.1.1 Images Sentinel-2

Les images satellitaires Sentinel-2 constituent la principale source de données utilisée dans cette étude. Ces images sont fournies gratuitement dans le cadre du programme européen Copernicus et acquises par les satellites Sentinel-2A et Sentinel-2B [46].

Le choix de Sentinel-2 est principalement motivé par sa haute résolution spatiale, atteignant 10 m pour certaines bandes spectrales du visible et du proche infrarouge [46]. Cette résolution permet de délimiter avec une plus grande précision les contours du plan d'eau et d'améliorer l'estimation de la superficie du barrage de Zit Emba.

Chapitre III : Matériels et Méthodes

Par ailleurs, la fréquence élevée de revisite des satellites Sentinel-2 offre la possibilité d'assurer un suivi régulier de la dynamique du réservoir et de disposer d'un nombre important d'images exploitables durant la période d'étude (2020-2025).

Les images Sentinel-2 ont ainsi constitué la source principale utilisée pour le calcul des indices spectraux et pour l'extraction des superficies du plan d'eau.

III.3.2 Données pluviométriques

III.3.2.1 Produit CHIRPS

L'analyse de la relation entre les précipitations et l'évolution de la superficie du barrage a nécessité l'utilisation de données pluviométriques spatialisées.

Dans cette étude, les précipitations ont été obtenues à partir du produit CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations), développé par le Climate Hazards Center de l'Université de Californie à Santa Barbara [58].

CHIRPS combine des estimations issues de l'imagerie satellitaire avec des observations de stations météorologiques au sol, permettant ainsi de produire des séries de précipitations présentant une résolution spatiale d'environ $0,05^\circ$ (environ 5 km) [58].

Ce produit est largement utilisé dans les études hydrologiques et climatiques en raison de sa couverture temporelle étendue et de sa bonne représentation des variations spatiales des précipitations [58].

Les données CHIRPS ont été exploitées pour établir les séries mensuelles et annuelles des précipitations sur le bassin versant du barrage de Zit El Emba durant la période 2020-2025.

III.3.3 Indices spectraux utilisés

Trois indices spectraux de détection des surfaces en eau ont été étudiés dans le cadre de ce travail : le NDWI (Normalised Difference Water Index), le MNDWI (Modified Normalised Difference Water Index) et l'AWEI (Automated Water Extraction Index) [55].

Le NDWI constitue l'un des indices les plus utilisés pour la détection des plans d'eau à partir des images multispectrales. Toutefois, sa capacité à distinguer l'eau des autres surfaces peut être limitée dans certains environnements.

L'indice AWEI a été développé afin de réduire les erreurs liées aux ombres et aux surfaces sombres susceptibles d'être confondues avec l'eau.

Chapitre III : Matériels et Méthodes

Le MNDWI, basé sur l'utilisation des bandes vertes et infrarouges à courte longueur d'onde (SWIR), améliore la discrimination des surfaces en eau et réduit l'influence des zones bâties et des sols nus.

Une analyse comparative des trois indices a été réalisée sur plusieurs dates représentatives. Les résultats obtenus ont montré que le MNDWI fournit les meilleures performances pour l'identification de la surface en eau du barrage de ZitEmba.

Par conséquent, le MNDWI a été retenu comme indice principal pour l'ensemble des calculs, des tableaux et des représentations graphiques présentés dans cette étude. Les indices NDWI et AWEI ont été utilisés uniquement à des fins de comparaison méthodologique [55].

III.3.4 Outils de traitement et d'analyse

III.3.4.1 Google Earth Engine (GEE)

Google Earth Engine (GEE) constitue la principale plateforme de traitement utilisée dans cette étude. Il s'agit d'un environnement de calcul en nuage permettant l'accès direct à de vastes archives d'images satellitaires et de données climatiques [73].

Cette plateforme a permis de réaliser l'ensemble des opérations de prétraitement, notamment le filtrage des nuages, le calcul des indices spectraux (NDWI, MNDWI et AWEI), l'extraction des superficies du barrage et la constitution des séries temporelles correspondantes.

L'utilisation de Google Earth Engine présente plusieurs avantages, parmi lesquels la rapidité de traitement, la reproductibilité des résultats et la possibilité de traiter un grand volume de données sans nécessiter d'importantes ressources informatiques locales [73].

III.3.4.2 QGIS

Le logiciel QGIS a été utilisé pour la visualisation et la représentation cartographique des résultats obtenus [74].

Les données exportées depuis Google Earth Engine ont été intégrées dans l'environnement SIG de QGIS afin de produire les cartes thématiques illustrant la localisation du barrage, les limites de la zone d'étude ainsi que les variations de la surface en eau observées au cours de la période étudiée [74].

Grâce à ses fonctionnalités de traitement raster et vectoriel, QGIS a également permis d'améliorer la présentation finale des résultats cartographiques.

III.3.4.3 Outils complémentaires de gestion et de mise en forme des données

En complément des logiciels principaux utilisés dans cette étude, plusieurs outils numériques ont été mobilisés afin de faciliter l'organisation, la conversion et la présentation des résultats obtenus.

La plateforme **Cloud Converta** a été utilisée pour convertir certains fichiers image exportés depuis **Google Earth Engine** du format TIFF vers des formats plus adaptés à l'intégration dans le manuscrit final (PNG ou JPEG), tout en optimisant la taille des fichiers pour faciliter leur manipulation.

Le service **Google Drive** a été employé comme espace de stockage et de sauvegarde des données extraites de Google Earth Engine, permettant une organisation structurée des fichiers et un partage simplifié des résultats entre les différentes étapes du travail.

De plus, l'application **InShot** a été employée durant la phase finale d'élaboration des figures et des cartes. Elle a contribué à l'amélioration de la qualité visuelle des illustrations grâce à l'ajout de titres, à l'harmonisation des couleurs, à l'intégration d'échelles graphiques et à l'optimisation de leur présentation avant leur insertion dans le mémoire.

III.3.4.4 Microsoft Excel

Microsoft Excel a été utilisé pour l'organisation des données numériques, la construction des séries chronologiques et la réalisation des représentations graphiques.

Ce logiciel a également servi à analyser la relation entre les précipitations et l'évolution de la superficie du barrage, à travers différentes représentations statistiques permettant de mettre en évidence les tendances observées durant la période d'étude.

III.4 Méthodologie adoptée

La méthodologie adoptée dans cette étude repose sur une approche intégrée combinant les techniques de télédétection, les systèmes d'information géographique et l'analyse statistique. La démarche générale consiste à extraire l'évolution de la surface en eau du barrage de Zit Emba à partir des images satellitaires, puis à étudier son comportement en relation avec la variabilité des précipitations observées sur le bassin versant.

Chapitre III : Matériels et Méthodes

L'ensemble du traitement a été réalisé à l'aide de la plateforme Google Earth Engine, tandis que les opérations de représentation cartographique et d'analyse graphique ont été effectuées respectivement sous QGIS et Microsoft Excel.

La méthodologie mise en œuvre comprend plusieurs étapes successives, allant du prétraitement des images jusqu'à l'analyse de la relation entre les précipitations et la superficie du réservoir.

III.4.1 Prétraitement des images satellitaires

Avant toute exploitation, les images satellitaires ont fait l'objet d'un ensemble d'opérations de prétraitement destinées à améliorer leur qualité et à garantir la fiabilité des résultats obtenus.

Les images Sentinel-2 ont constitué la principale source d'information utilisée dans cette étude. Toutefois, lorsque certaines acquisitions présentaient une couverture nuageuse importante ou une qualité insuffisante, des images Landsat-8 ou Landsat-9 ont été utilisées en remplacement.

- Le prétraitement comprenait principalement :
- La sélection des images correspondant à la période d'étude (2020-2025) ;
- Le filtrage des scènes présentant une couverture nuageuse excessive ;
- L'application des masques de qualité afin d'éliminer les pixels affectés par les nuages et leurs ombres ;
- Le découpage des images à la zone d'étude correspondant au barrage de Zit Emba et à son environnement immédiat.

Ces opérations ont permis d'obtenir des images homogènes et adaptées aux traitements ultérieurs.

III.4.2 Calcul des indices spectraux de détection de l'eau

Afin d'identifier les surfaces en eau du barrage, trois indices spectraux ont été calculés à partir des images satellitaires : le NDWI (Normalised Difference Water Index), le MNDWI (Modified Normalised Difference Water Index) et l'AWEI (Automated Water Extraction Index).

Le NDWI exploite les différences de réflectance entre la bande verte et la bande du proche infrarouge afin de mettre en évidence les surfaces en eau.

Chapitre III : Matériels et Méthodes

Le MNDWI constitue une amélioration du NDWI. En remplaçant la bande proche infrarouge par la bande infrarouge à courte longueur d'onde (SWIR), cet indice permet une meilleure discrimination entre l'eau et les autres types d'occupation du sol, notamment les zones bâties et les sols nus.

L'indice AWEI a également été calculé afin d'évaluer sa capacité à réduire les confusions liées aux ombres et aux surfaces sombres.

Une analyse comparative réalisée sur plusieurs dates représentatives a montré que le MNDWI fournit les résultats les plus satisfaisants pour la détection de la surface en eau du barrage de Zit Emba. Par conséquent, cet indice a été retenu comme indicateur principal pour l'ensemble des traitements et des analyses effectués dans cette étude.

III.4.3 Extraction de la superficie du barrage

La détermination de la superficie du barrage a été réalisée à partir des cartes issues du calcul du MNDWI.

Après le calcul de l'indice, un seuil de séparation a été appliqué afin de distinguer les pixels correspondant à l'eau des autres classes d'occupation du sol. Les zones identifiées comme appartenant au plan d'eau ont ensuite été converties en polygones, permettant ainsi de délimiter avec précision les contours du réservoir.

La superficie du barrage a été automatiquement calculée pour chaque date d'observation et exprimée en hectare (ha). Les valeurs obtenues ont ensuite été enregistrées sous forme de séries chronologiques couvrant l'ensemble de la période d'étude.

Cette approche a permis de suivre les variations saisonnières et interannuelles de la surface en eau du barrage de Zit Emba entre 2020 et 2025.

III.4.4 Extraction des données pluviométriques

Les précipitations ont été obtenues à partir du produit CHIRPS, qui fournit des estimations spatialisées des pluies à l'échelle mondiale.

Les séries pluviométriques correspondant au bassin versant du barrage ont été extraites pour la période 2020-2025. Les données journalières ont ensuite été agrégées en cumuls mensuels et annuels afin de permettre leur comparaison avec les variations observées de la surface en eau du réservoir.

Chapitre III : Matériels et Méthodes

L'utilisation des données CHIRPS présente l'avantage de fournir une couverture continue dans le temps et dans l'espace, particulièrement utile dans les régions où les mesures in situ sont limitées ou incomplètes.

III.4.5 Élaboration des séries temporelles

Les superficies extraites à partir des images satellitaires ainsi que les données pluviométriques issues du produit CHIRPS ont été organisées sous forme de séries temporelles.

Ces séries permettent de visualiser l'évolution du réservoir au cours du temps et de mettre en évidence les périodes de remplissage et de diminution de la surface en eau.

Les données ont été exportées vers Microsoft Excel afin de construire les tableaux récapitulatifs et les représentations graphiques nécessaires à l'interprétation des résultats.

III.4.6 Analyse de la relation entre les précipitations et la superficie du barrage

L'analyse de la relation entre les précipitations et l'évolution de la surface en eau du barrage a été réalisée à partir des séries temporelles obtenues.

La comparaison des variations pluviométriques et des fluctuations de la superficie du réservoir a permis d'évaluer l'influence des apports météorologiques sur le comportement hydrologique du barrage.

Dans la mesure où la réponse du réservoir aux précipitations n'est pas immédiate, l'analyse a également pris en considération un décalage temporel (time lag) entre les épisodes pluvieux et les variations observées de la surface en eau.

Cette approche permet de mieux représenter le fonctionnement hydrologique du bassin versant et d'identifier les délais nécessaires au transfert des eaux de pluie vers le réservoir.

Les résultats obtenus serviront à interpréter la dynamique du barrage et à mettre en évidence l'importance de la pluviométrie dans l'évolution de son niveau de remplissage.

III.5 Difficultés et limites de l'étude

Malgré les avantages offerts par les techniques de télédétection pour le suivi des ressources en eau, certaines contraintes méthodologiques et techniques peuvent influencer la précision des résultats obtenus dans cette étude.

III.5.1 Couverture nuageuse des images satellitaires

L'une des principales difficultés rencontrées concerne la présence des nuages et de leurs ombres sur certaines images satellitaires. Ces perturbations peuvent masquer partiellement ou totalement la surface du barrage et rendre certaines acquisitions inexploitable.

Bien que les procédures de filtrage et de masquage appliquées dans Google EarthEngine permettent de limiter cet effet, certaines dates d'observation ont dû être remplacées par des images acquises à des dates voisines ou par des images Landsat complémentaires. Cette situation peut introduire de légères incertitudes dans les séries temporelles établies.

III.5.2 Résolution spatiale des données satellitaires

Les images Sentinel-2 utilisées dans cette étude offrent une résolution spatiale élevée de 10 m, ce qui permet une bonne délimitation des contours du plan d'eau. Toutefois, les images Landsat-8 et Landsat-9 utilisées en complément possèdent une résolution de 30 m, susceptible de réduire la précision de la détection des limites du réservoir, notamment dans les zones présentant des contours irréguliers ou des variations de faible amplitude.

Cette différence de résolution constitue une source potentielle d'incertitude lors de la comparaison de certaines superficies extraites à partir de capteurs différents.

III.5.3 Limites des données pluviométriques CHIRPS

Les données CHIRPS utilisées pour l'estimation des précipitations représentent des produits spatialisés dérivés d'observations satellitaires et de données de stations météorologiques au sol. Malgré leur large utilisation dans les études hydrologiques, ces données demeurent des estimations indirectes et peuvent présenter des écarts par rapport aux précipitations réellement enregistrées localement.

Par ailleurs, la résolution spatiale du produit CHIRPS (environ 5 km) peut ne pas permettre de représenter avec précision certaines variations pluviométriques locales à l'intérieur du bassin versant du barrage de Zit Emba.

III.5.4 Complexité du fonctionnement hydrologique du barrage

L'évolution de la surface en eau du barrage ne dépend pas exclusivement des précipitations. D'autres facteurs interviennent également, notamment [71] :

- Les pertes par évaporation ;
- L'infiltration vers les formations géologiques environnantes ;
- Les prélèvements destinés à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation ;
- Les caractéristiques physiques du bassin versant ;
- Les temps de transfert des eaux de ruissellement vers le réservoir.

Par conséquent, la relation entre la pluviométrie et la superficie du barrage demeure complexe et ne peut être expliquée uniquement par les variations des précipitations.

III.5.5 Absence de validation par des mesures in situ

La présente étude repose essentiellement sur des données issues de la télédétection et des produits climatiques satellitaires. En l'absence de mesures de terrain telles que les niveaux d'eau du barrage, les débits entrants ou les données pluviométriques enregistrées par des stations locales, il n'a pas été possible de procéder à une validation directe des résultats obtenus.

Cette absence de données de référence constitue une limite importante qui devra être prise en considération lors de l'interprétation des résultats.

Malgré ces contraintes, l'approche adoptée reste particulièrement pertinente pour l'analyse des tendances spatio-temporelles de la dynamique du barrage et fournit des informations utiles pour la gestion des ressources en eau à l'échelle régionale.

III.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter l'ensemble des éléments méthodologiques mis en œuvre pour étudier l'influence de la variabilité pluviométrique sur l'évolution de la surface en eau du barrage de Zit Emba durant la période 2020-2025.

Après avoir décrit les principales caractéristiques hydrologiques et géographiques de la zone d'étude, les différentes données mobilisées ont été présentées. L'étude s'est principalement appuyée sur les images Sentinel-2, ainsi que sur les données pluviométriques issues du produit CHIRPS.

Chapitre III : Matériels et Méthodes

Le traitement des données a été réalisé à l'aide de la plateforme Google Earth Engine, tandis que les opérations de cartographie et d'analyse graphique ont été effectuées respectivement sous QGIS et Microsoft Excel. Une analyse comparative des indices NDWI, MNDWI et AWEI a permis d'identifier le MNDWI comme l'indicateur le plus performant pour la détection des surfaces en eau du barrage.

La méthodologie adoptée a permis d'établir des séries temporelles de la superficie du réservoir et des précipitations, constituant ainsi la base nécessaire à l'analyse de la relation entre les fluctuations pluviométriques et la dynamique du barrage.

Enfin, les limites inhérentes aux données satellitaires et aux produits climatiques utilisés ont été discutées, mettant en évidence la nécessité d'intégrer, dans de futurs travaux, des observations de terrain afin d'améliorer la précision des analyses.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation, à l'analyse et à la discussion des résultats obtenus, en mettant en évidence l'évolution spatio-temporelle de la surface en eau du barrage de Zit Emba et son lien avec la variabilité des précipitations observées sur le bassin versant.

CHAPITRE IV :

Résultats et Discussion

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

IV.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'interprétation des résultats obtenus à partir des traitements réalisés sur les images satellitaires et les données pluviométriques durant la période 2020-2025.

L'analyse repose principalement sur les superficies en eau extraites à l'aide de l'indice MNDWI, appliqué aux images Sentinel-2. Les précipitations ont été obtenues à partir du produit CHIRPS et confrontées aux données hydrologiques disponibles auprès de la Direction des Ressources en Eau (DRE) de la wilaya de Skikda.

L'objectif principal est de mettre en évidence l'évolution spatio-temporelle de la surface en eau du barrage de Zit Emba et d'évaluer l'influence de la variabilité pluviométrique sur son comportement hydrologique. Une attention particulière est accordée au décalage temporel existant entre les épisodes pluvieux et la réponse du réservoir.

Les résultats sont présentés successivement pour chaque année d'étude, avant de proposer une analyse globale des tendances observées sur l'ensemble de la période considérée.

IV.2 Analyse spatio-temporelle de la surface en eau du barrage

IV.2.1 Année 2020

IV.2.1.1 Résultats

L'analyse des images satellitaires traitées à l'aide du MNDWI (voir Figure IV.1) met en évidence une variabilité saisonnière marquée de la surface en eau du barrage de Zit Emba durant l'année 2020.

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

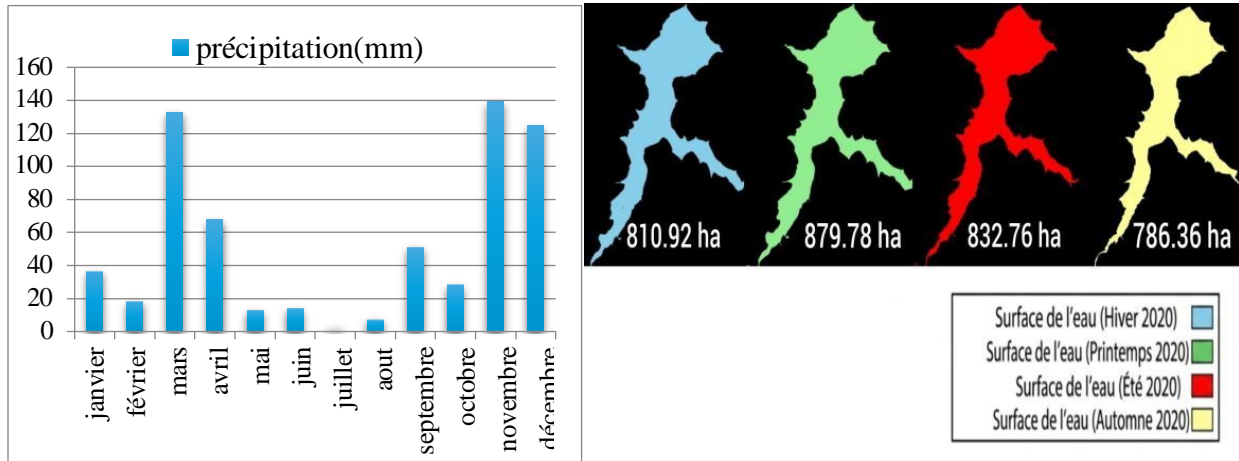


Figure IV.1 : Evolution saisonnière de la surface de l'eau du barrage Zit Emba (ha) et des précipitations mensuelles (mm) au cours de l'année 2020.

Les superficies les plus importantes ont été observées au cours de l'hiver et du printemps, périodes caractérisées par des conditions hydrologiques favorables et des apports pluviométriques relativement élevés. La superficie maximale annuelle a été enregistrée au mois d'avril avec 890,48 ha. À partir du début de l'été, une diminution progressive de la surface en eau est observée, se poursuivant durant l'automne pour atteindre son minimum annuel au mois de novembre avec 757,61 ha.

L'analyse des données pluviométriques montre une distribution saisonnière typique du climat méditerranéen, avec des précipitations plus abondantes durant les mois d'hiver et de printemps, suivies d'une période estivale marquée par une forte réduction des cumuls pluviométriques.

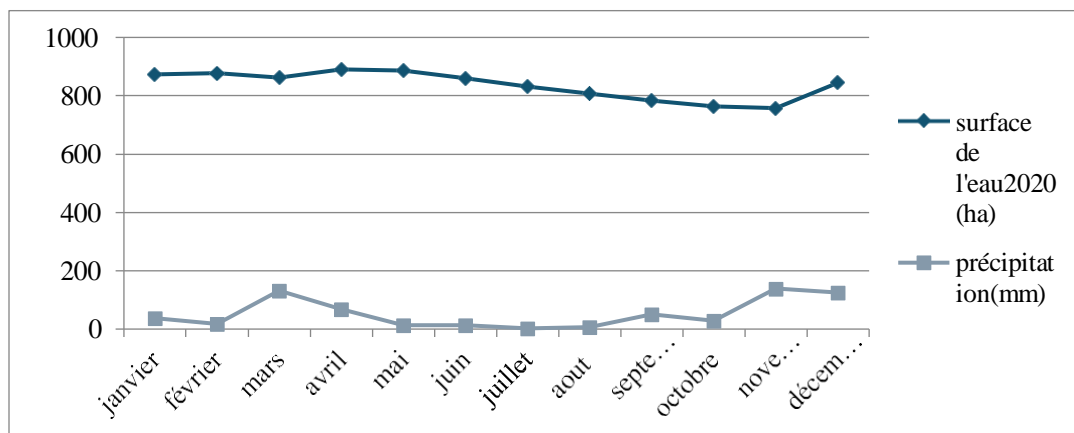


Figure IV.2 : Evolution mensuelle de la surface en eau (ha) en relation avec la précipitation (mm) au cours de l'année 2020

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

Selon la Figure IV.2, la comparaison des courbes mensuelles de la superficie du barrage et des précipitations met en évidence une évolution globalement similaire des deux variables, bien qu'un léger décalage temporel soit observé entre les épisodes pluvieux et la réponse du plan d'eau.

IV.2.1.2 Discussion

Les résultats obtenus pour l'année 2020 traduisent le bon état hydrologique du barrage au début de la période d'étude. Les fortes superficies observées au printemps sont directement liées aux apports générés par les précipitations hivernales et printanières.

La diminution progressive enregistrée à partir de l'été peut être attribuée à la combinaison de plusieurs facteurs, notamment la réduction des précipitations, l'augmentation des pertes par évaporation sous l'effet des températures élevées, ainsi que les prélèvements destinés à l'alimentation en eau potable et aux besoins agricoles[71].

Le décalage observé entre la reprise des précipitations et l'augmentation effective de la surface en eau confirme que la réponse du barrage n'est pas instantanée. Une partie des premières pluies est d'abord mobilisée pour la ré-humectation des sols du bassin versant avant de contribuer au ruissellement vers la retenue.

La comparaison avec les données hydrologiques disponibles auprès de la Direction des Ressources en Eau montre une bonne cohérence entre les résultats issus de la télédétection et l'évolution réelle du barrage (Voir Annexe I), confirmant ainsi la pertinence de l'approche méthodologique adoptée.

IV.2.2 Année 2021

IV.2.2.1 Résultats

L'analyse des images satellitaires traitées par l'indice MNDWI met en évidence une diminution progressive de la surface en eau du barrage de Zit Emba au cours de l'année 2021 par rapport à l'année précédente (Voir Figure IV.3).

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

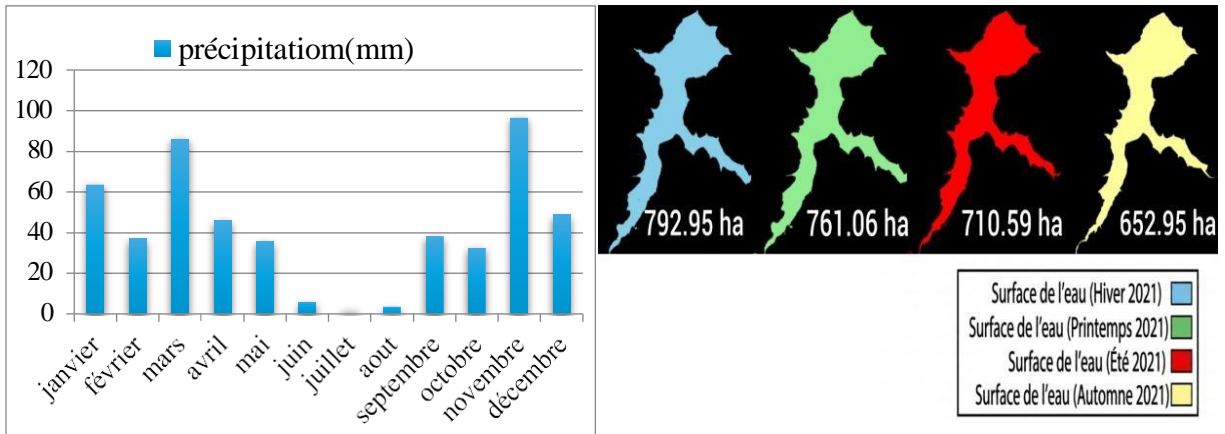


Figure IV.3: Evolution saisonnière de la surface de l'eau du barrage Zit Emba (ha) et des précipitations mensuelles (mm) au cours de l'année 2021.

Les superficies les plus importantes sont observées durant la saison hivernale, avec un maximum annuel enregistré au mois de février, atteignant 770,51 ha. À partir du printemps, une tendance générale à la diminution du plan d'eau est observée, laquelle s'accroît durant l'été et se poursuit jusqu'à la fin de l'année. La superficie minimale annuelle est enregistrée au mois de décembre avec 640,73 ha.

L'analyse des précipitations montre une répartition saisonnière caractérisée par des cumuls relativement élevés en hiver et au début du printemps, tandis que les mois estivaux présentent de faibles quantités de pluie, voire une quasi-absence de précipitations.

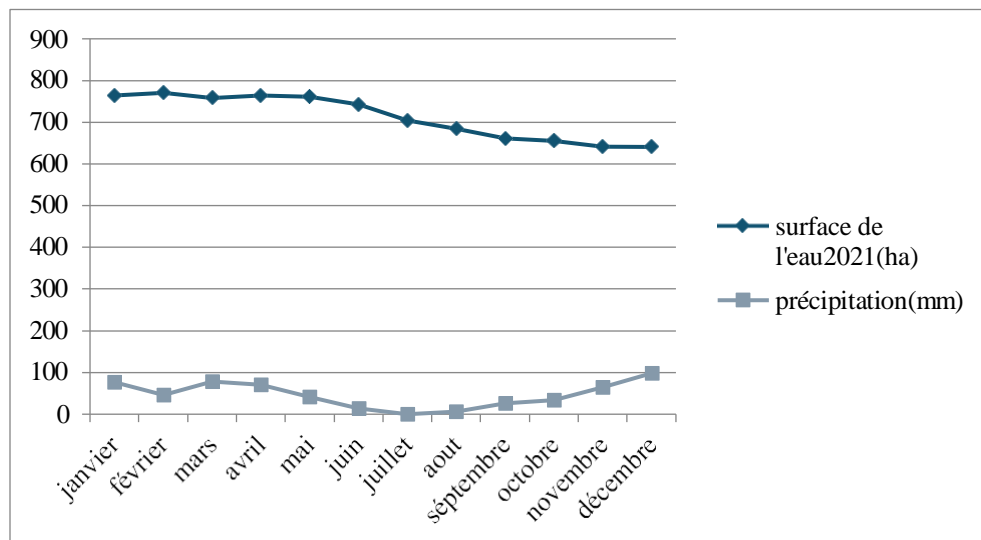


Figure IV.4 : Evolution mensuelle de la surface en eau (ha) en relation avec la précipitation (mm) au cours de l'année 2021.

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

La comparaison des séries mensuelles de la superficie du barrage et des précipitations met en évidence une relation globale positive entre les deux variables. Toutefois, la réponse du réservoir aux épisodes pluvieux n'apparaît pas immédiate et semble marquée par un décalage temporel.

IV.2.2.2 Discussion

La diminution observée de la surface en eau en 2021 traduit une réduction progressive du stock hydrique disponible dans le barrage par rapport à l'année 2020.

Les superficies maximales enregistrées au début de l'année s'expliquent par les apports générés par les précipitations hivernales, tandis que le recul observé à partir de l'été résulte de la combinaison de plusieurs facteurs hydrologiques. Parmi ceux-ci figurent la diminution des précipitations, les pertes par évaporation liées aux températures estivales élevées ainsi que les prélèvements destinés à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation[71].

Malgré la reprise des précipitations en fin d'année, la surface du barrage ne retrouve pas immédiatement son niveau antérieur. Ce comportement confirme l'existence d'un temps de réponse du bassin versant et souligne l'importance des processus de stockage temporaire et de réhumectation des sols avant que les apports n'atteignent effectivement la retenue.

Les résultats obtenus par télédétection présentent une bonne cohérence avec les informations hydrologiques disponibles, ce qui confirme la fiabilité de la méthodologie adoptée.

IV.2.3 Année 2022

IV.2.3.1 Résultats

Les résultats obtenus à partir du MNDWI montrent une poursuite de la diminution de la surface en eau du barrage de Zit Emba au cours de l'année 2022 comme le montre la FigureIV.5.

Les superficies les plus élevées sont observées durant l'hiver, avec une surface moyenne saisonnière de 648,90 ha, suivie du printemps avec 634,62 ha. Une diminution plus marquée apparaît durant l'été (565,62 ha), tandis que la saison automnale présente les valeurs les plus faibles avec seulement 481,80 ha.

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

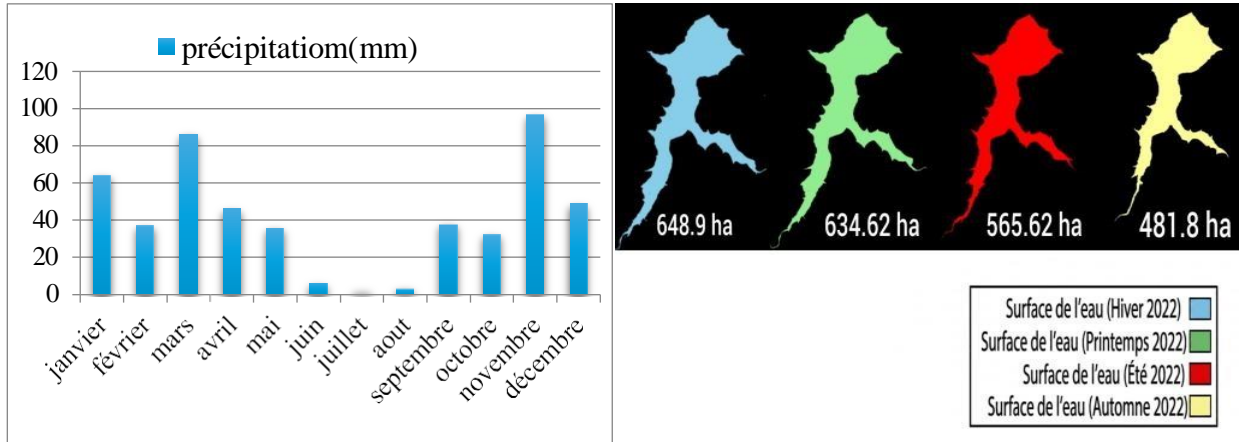


Figure IV.5 : Evolution saisonnière de la surface de l'eau du barrage Zit Emba (ha) et des précipitations mensuelles (mm) au cours de l'année 2022.

L'analyse visuelle des images satellitaires met en évidence un rétrécissement progressif du plan d'eau, particulièrement visible durant l'été et l'automne, où la surface en eau se concentre essentiellement dans la partie inférieure du réservoir.

Les données pluviométriques montrent une forte variabilité au cours de l'année. Les cumuls les plus élevés sont enregistrés en mars (86,35 mm) et en novembre (96,75 mm), alors que les mois estivaux présentent des valeurs très faibles, comprises entre 2,41 et 5,75 mm

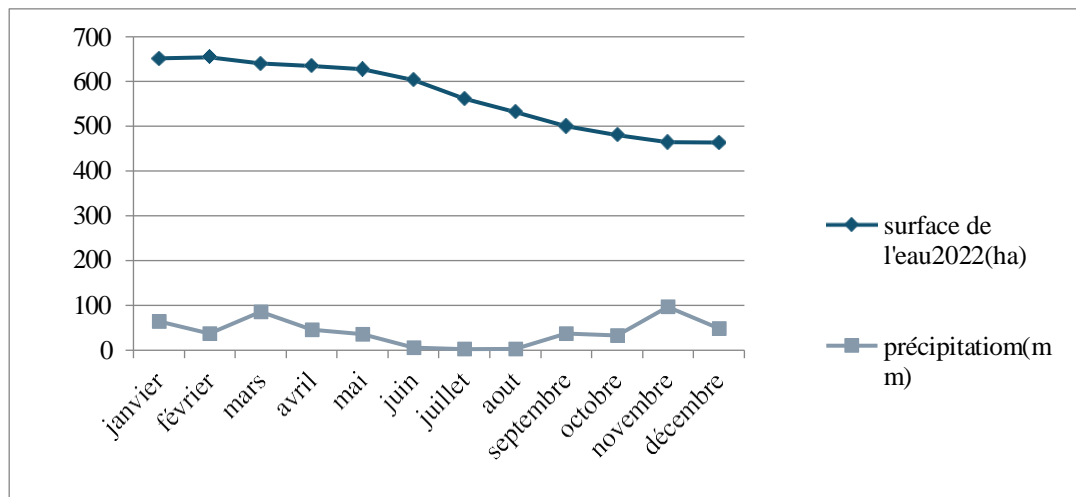


Figure IV.6 : Evolution mensuelle de la surface en eau (ha) en relation avec la précipitation (mm) au cours de l'année 2022.

L'évolution mensuelle révèle une tendance générale à la diminution de la superficie du barrage tout au long de l'année telle qu'illustre par la Figure IV.6, malgré certains épisodes pluvieux importants enregistrés en fin d'année.

IV.2.3.2 Discussion

L'année 2022 marque une accentuation du déficit hydrique observé depuis le début de la période d'étude. Malgré l'existence de plusieurs épisodes pluvieux significatifs, la superficie du barrage continue de diminuer progressivement.

Cette situation suggère que les apports générés par les précipitations n'ont pas été suffisants pour compenser les pertes hydriques subies par le réservoir. L'évaporation estivale, les prélèvements destinés à l'irrigation et à l'alimentation en eau potable ainsi que la diminution des apports effectifs au barrage ont probablement contribué à cette évolution.

Par ailleurs, l'absence d'une reprise notable de la surface en eau après les précipitations importantes de novembre met en évidence l'existence d'un décalage temporel entre les pluies et la réponse du barrage. Cette réponse différée traduit la complexité du fonctionnement hydrologique du bassin versant.

Les résultats obtenus montrent également que les fluctuations de la superficie du barrage ne dépendent pas uniquement de la variabilité pluviométrique, mais résultent d'une combinaison de facteurs climatiques et anthropiques[75].

IV.2.4 Année 2023

IV.2.4.1 Résultats :

L'analyse des images satellitaires traitées à l'aide du MNDWI indique une poursuite de la variabilité saisonnière de la surface en eau du barrage de Zit Emba au cours de l'année 2023. Toutefois, les superficies observées restent globalement inférieures à celles enregistrées durant les premières années de la période d'étude (Voir la Figure IV.7).

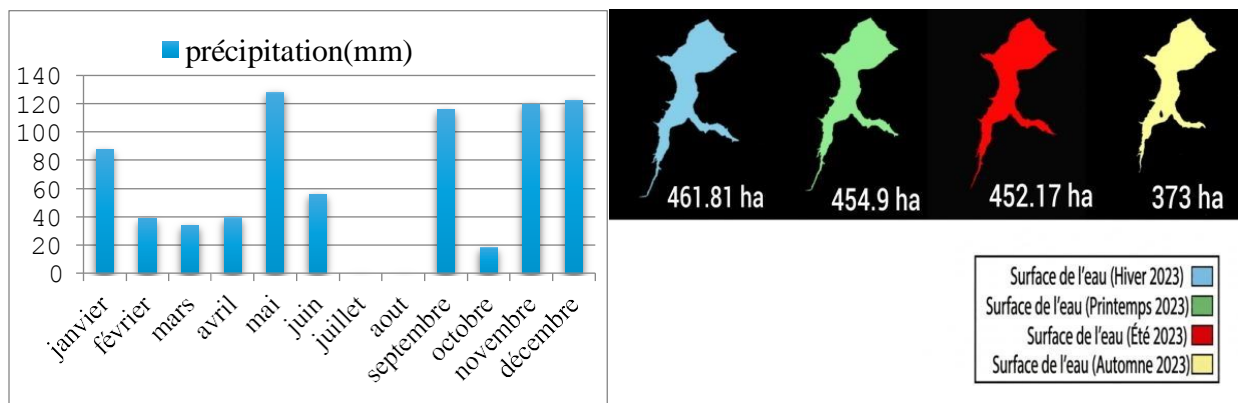


Figure IV.7 : Evolution saisonnière de la surface de l'eau du barrage Zit Emba (ha) et des précipitations mensuelles (mm) au cours de l'année 2023.

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

Les plus fortes superficies sont observées durant l'hiver et le début du printemps, périodes correspondant aux apports hydriques les plus importants. À l'inverse, une diminution progressive de la surface du réservoir est enregistrée à partir de la fin du printemps et se poursuit tout au long de la saison estivale.

L'analyse cartographique met en évidence une rétraction progressive du plan d'eau, particulièrement visible au niveau des marges du réservoir. Les variations spatiales observées traduisent une réduction du volume stocké durant les périodes de faibles précipitations.

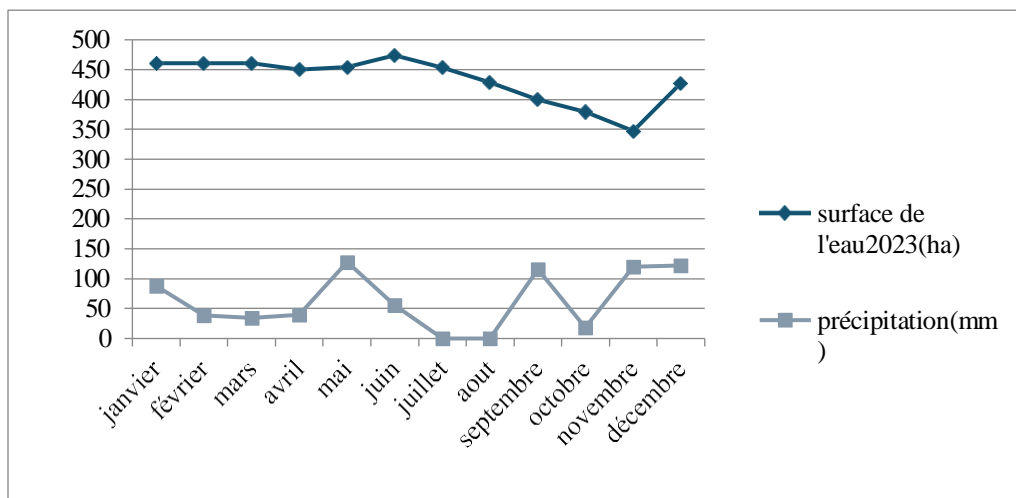


Figure IV.8: Evolution mensuelle de la surface en eau (ha) en relation avec la précipitation (mm) au cours de l'année 2023.

D'après la Figure IV.8 les données pluviométriques montrent une distribution saisonnière caractéristique du climat méditerranéen, avec des cumuls plus élevés durant les mois humides et une forte diminution des précipitations au cours de l'été. Les séries temporelles mettent en évidence une correspondance générale entre l'évolution des précipitations et celle de la superficie du barrage, bien que les variations des deux paramètres ne soient pas simultanées.

IV.2.4.2 Discussion

Les résultats obtenus pour l'année 2023 confirment la tendance à la diminution progressive des superficies en eau observée depuis 2021. Malgré les apports enregistrés durant les saisons humides, la reconstitution du stock hydrique du barrage demeure limitée.

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

Cette évolution peut être attribuée à la combinaison de plusieurs facteurs, notamment la variabilité interannuelle des précipitations, l'augmentation des pertes par évaporation durant la période estivale ainsi que les prélèvements liés aux différents usages de l'eau. Ces facteurs contribuent à réduire progressivement les réserves disponibles au sein du réservoir.

Par ailleurs, les résultats mettent en évidence l'existence d'un décalage temporel entre les épisodes pluvieux et la réponse du barrage[76]. Les premières précipitations ne se traduisent pas immédiatement par une augmentation de la surface en eau, une partie des apports étant d'abord mobilisée pour la ré-humectation des sols et la reconstitution des écoulements au sein du bassin versant.

La cohérence observée entre les résultats issus de la télédétection et les données hydrologiques disponibles confirme la capacité du MNDWI à assurer un suivi fiable de l'évolution du barrage de Zit Emba. Les résultats obtenus soulignent également que la dynamique du réservoir dépend non seulement des précipitations, mais également de l'ensemble des processus hydrologiques intervenant à l'échelle du bassin versant.

IV.2.5 Année 2024

IV.2.5.1 Résultats

L'analyse des images satellitaires traitées à l'aide de l'indice MNDWI révèle que l'année 2024 se caractérise par une forte variabilité de la surface en eau du barrage de ZitEmba conformément à la Figure IV.9. Les résultats montrent une poursuite des fluctuations saisonnières observées au cours des années précédentes, avec des superficies plus importantes durant les périodes humides et une réduction progressive du plan d'eau pendant les mois les plus secs.

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

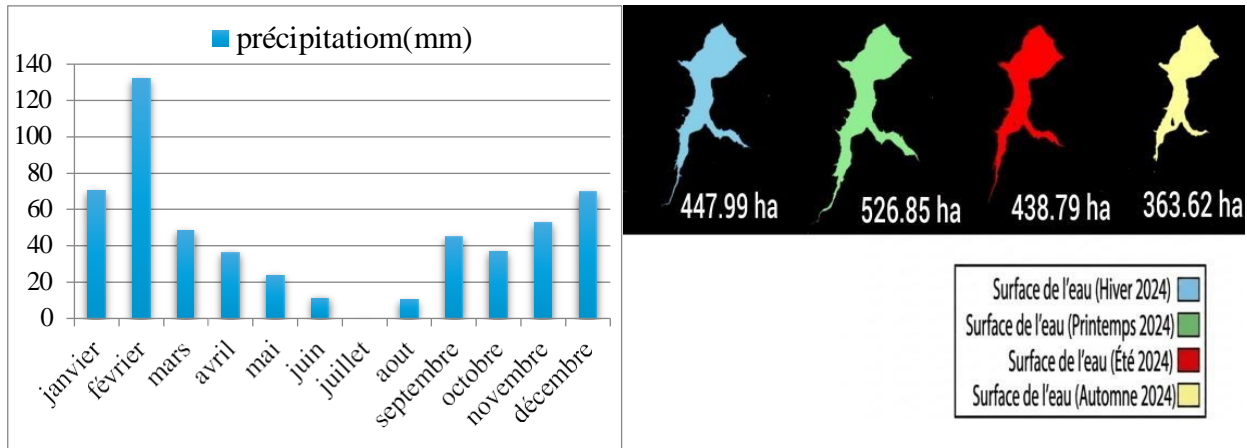


Figure IV.9: Evolution saisonnière de la surface de l'eau du barrage Zit Emba (ha) et des précipitations mensuelles (mm) au cours de l'année 2024.

Les superficies maximales sont enregistrées au cours de l'hiver et du début du printemps, périodes associées aux principaux apports pluviométriques. À partir de la fin du printemps, une diminution progressive de la surface en eau est observée, laquelle devient plus marquée durant la saison estivale. Les superficies minimales sont atteintes vers la fin de l'été et au début de l'automne, traduisant un affaiblissement du stock hydrique du réservoir.

L'analyse cartographique met en évidence une rétraction importante des bordures du plan d'eau au cours des périodes sèches. Les variations spatiales observées montrent que les secteurs périphériques du réservoir sont les plus sensibles aux fluctuations saisonnières.

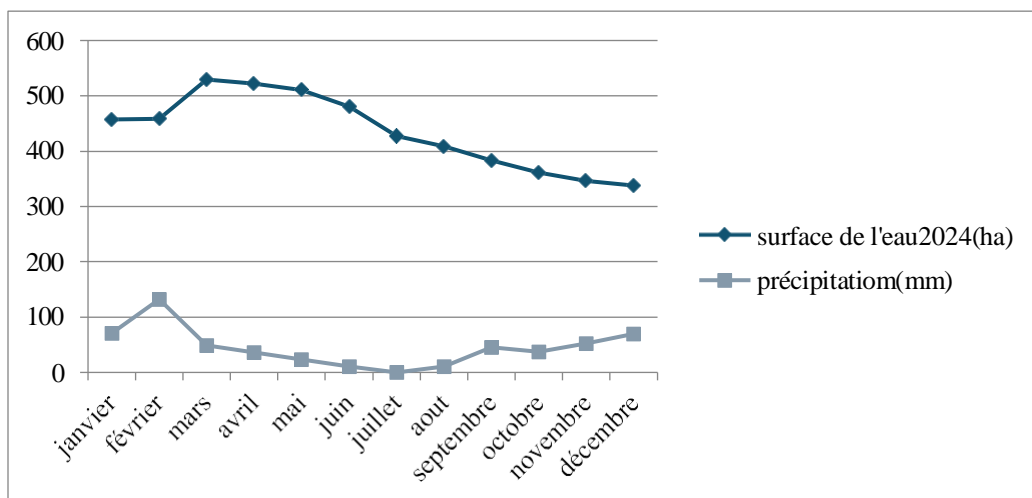


Figure IV.10: Evolution mensuelle de la surface en eau (ha) en relation avec la précipitation (mm) au cours de l'année 2024.

Les données pluviométriques obtenues à partir du produit CHIRPS indiquent une répartition irrégulière des précipitations au cours de l'année. Les cumuls les plus élevés sont

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

concentrés durant les saisons hivernale et automnale, alors que les mois estivaux présentent des valeurs très faibles. La comparaison des séries temporelles montre une relation globale entre les précipitations et la superficie du barrage, bien que cette relation soit marquée par un décalage temporel variable (Voir la Figure IV.10).

IV.2.5.2 Discussion

Les résultats obtenus pour l'année 2024 confirment la sensibilité du barrage de Zit Emba aux variations climatiques saisonnières. La diminution progressive de la surface en eau observée durant les périodes sèches traduit l'effet combiné de plusieurs processus hydrologiques agissant simultanément sur le réservoir[75].

La réduction des précipitations durant la saison estivale, associée à l'augmentation des pertes par évaporation sous l'effet des températures élevées, contribue à la baisse du niveau de remplissage du barrage. À cela s'ajoutent les prélèvements destinés à l'alimentation en eau potable et aux besoins agricoles, susceptibles d'accentuer la diminution du stock disponible[71].

Par ailleurs, la réponse du réservoir aux épisodes pluvieux ne s'effectue pas de manière instantanée. Les résultats mettent en évidence l'existence d'un temps de réponse du bassin versant, traduisant le rôle des processus de rétention, d'infiltration et de transfert des eaux avant leur arrivée dans la retenue.

La comparaison entre les résultats issus de la télédétection et les données hydrologiques disponibles montre une cohérence satisfaisante, confirmant la pertinence de l'utilisation du MNDWI pour le suivi de la dynamique du barrage.

D'une manière générale, l'année 2024 illustre la complexité du fonctionnement hydrologique du système étudié et met en évidence que l'évolution de la surface en eau du barrage résulte de l'interaction entre les conditions climatiques, les caractéristiques du bassin versant et les différents usages de la ressource en eau.

IV.2.6 Année 2025

IV.2.6.1 Résultats

Au vu de la Figure IV .11, l'analyse des images satellitaires traitées à l'aide de l'indice MNDWI met en relief la poursuite de la dynamique saisonnière caractéristique du barrage de Zit

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

Emba au cours de l'année 2025. Comme pour les années précédentes, les variations de la surface en eau sont fortement influencées par la distribution temporelle des précipitations

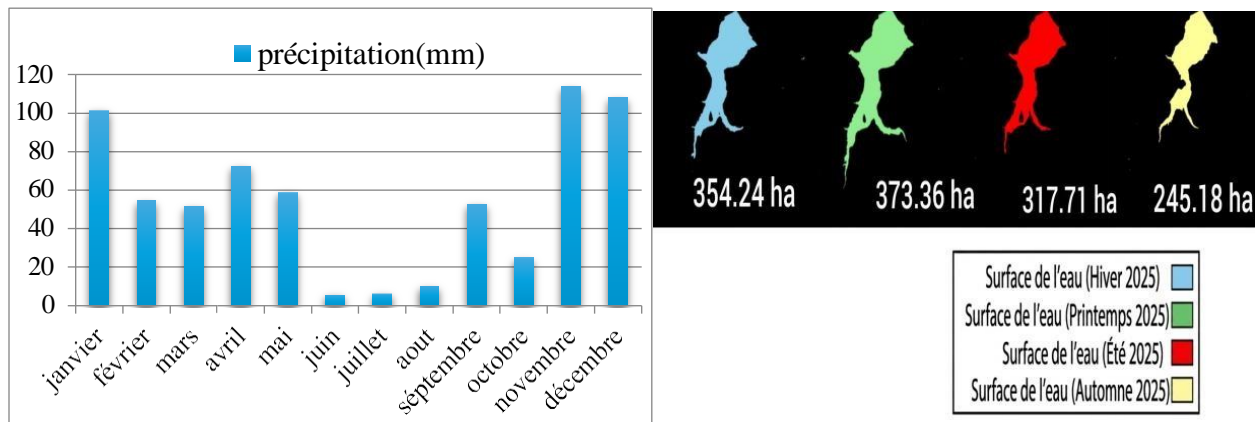


Figure IV.11: Evolution saisonnière de la surface de l'eau du barrage Zit Emba (ha) et des précipitations mensuelles (mm) au cours de l'année 2025.

Les superficies les plus importantes sont observées durant la saison hivernale et au début du printemps, périodes correspondant aux principaux apports hydriques du bassin versant. En revanche, une diminution progressive de la surface du réservoir est enregistrée à partir de la fin du printemps et devient plus marquée durant les mois estivaux.

L'analyse cartographique des différentes saisons met en évidence une réduction des zones périphériques du plan d'eau au cours des périodes sèches, tandis que les surfaces les plus profondes demeurent relativement stables. Les variations spatiales observées traduisent une forte sensibilité du réservoir aux fluctuations des apports hydriques.

Les données pluviométriques extraites du produit CHIRPS montrent une répartition irrégulière des précipitations au cours de l'année. Les plus fortes valeurs sont enregistrées durant les mois humides, alors que les mois d'été se caractérisent par des précipitations très faibles.

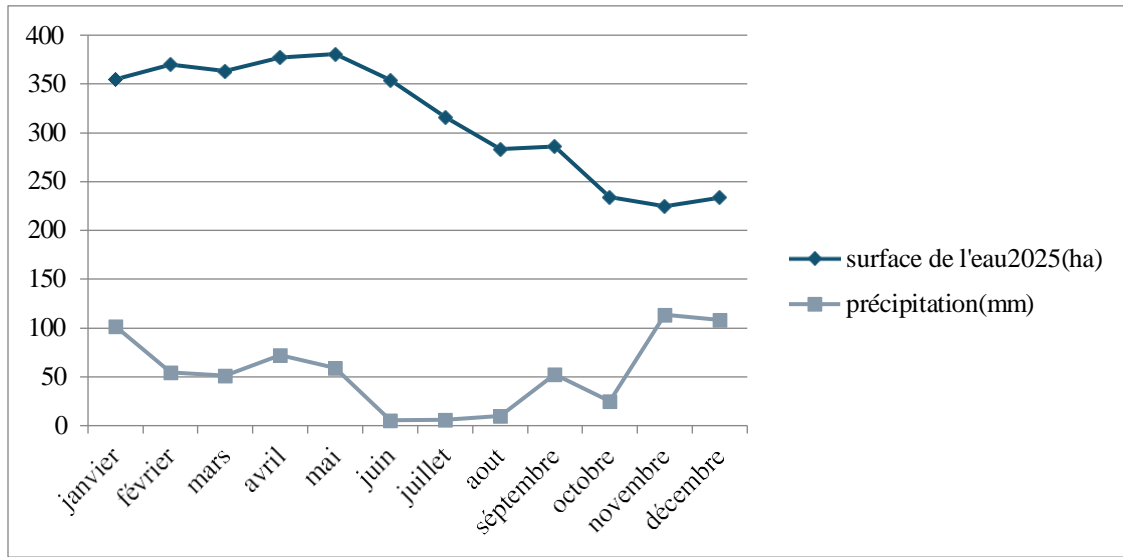


Figure IV.12: Evolution mensuelle de la surface en eau (ha) en relation avec la précipitation (mm) au cours de l'année 2025.

La comparaison des séries temporelles de la superficie du barrage et des précipitations met en évidence une évolution générale cohérente entre les deux variables. Toutefois, les variations de la surface en eau ne suivent pas immédiatement les épisodes pluvieux, ce qui confirme l'existence d'un décalage temporel dans la réponse hydrologique du réservoir (Voir la Figure IV.12).

IV.2.6.2 Discussion

Les résultats obtenus pour l'année 2025 confirment les tendances observées au cours des années précédentes et mettent en évidence la forte dépendance du barrage de ZitEmba aux conditions climatiques régionales.

Les variations saisonnières observées traduisent l'influence directe des précipitations sur les apports du bassin versant. Néanmoins, la réponse du réservoir reste conditionnée par d'autres facteurs susceptibles de moduler son comportement hydrologique, notamment l'évaporation, les prélèvements anthropiques et les caractéristiques physiques du bassin versant[71].

Le décalage temporel observé entre les précipitations et l'évolution de la surface en eau confirme que le remplissage du barrage constitue un processus progressif[76]. Les premières précipitations contribuent d'abord à la réhumectation des sols et à la recharge des écoulements superficiels avant d'alimenter effectivement la retenue.

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

La cohérence observée entre les résultats obtenus par télédétection et les informations hydrologiques disponibles confirme la fiabilité de l'approche méthodologique adoptée. L'utilisation du MNDWI associée aux images Sentinel-2 s'est révélée particulièrement adaptée au suivi de la dynamique du barrage de ZitEmba.

D'une manière générale, l'année 2025 vient confirmer les tendances mises en évidence depuis 2020 et souligne l'intérêt des techniques de télédétection pour l'évaluation de la variabilité spatio-temporelle des ressources en eau de surface.

IV.3 Analyse globale de l'évolution du barrage durant la période 2020-2025

IV.3.1 Évolution interannuelle de la surface en eau

L'analyse des résultats obtenus entre 2020 et 2025 met en évidence une variabilité interannuelle importante de la surface en eau du barrage de ZitEmba.

Les superficies maximales observées au cours de chaque année montrent une tendance générale à la diminution du stock hydrique disponible. Les plus fortes superficies ont été enregistrées au début de la période d'étude, notamment en 2020 avec une superficie de 890,48 ha, tandis que les années suivantes présentent des valeurs progressivement plus faibles (l'année 2021 avec 770,51 ha et l'année 2022 avec 654,11 ha) (Voir la Figure IV.13), traduisant une réduction de la capacité de remplissage du réservoir.

Cette évolution témoigne de la forte sensibilité du barrage aux fluctuations climatiques et aux variations des apports hydriques du bassin versant. Les différences observées d'une année à l'autre reflètent la variabilité des précipitations ainsi que l'influence d'autres facteurs hydrologiques susceptibles d'affecter le fonctionnement du réservoir.

L'analyse interannuelle met également en évidence une augmentation de l'amplitude des variations entre les superficies maximales et minimales, traduisant une plus grande vulnérabilité du barrage aux épisodes de déficit hydrique.

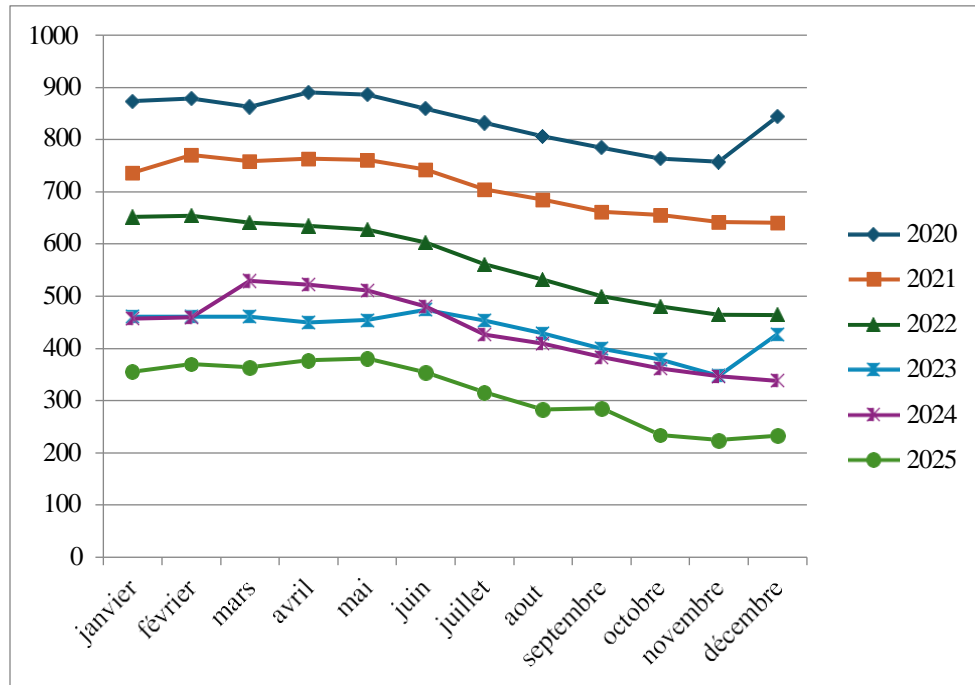


Figure IV.13: Evolution mensuelle de la superficie en eau du barrage Zit Emba (2020-2025).

IV.3.2 Variations saisonnières de la surface en eau

L'évolution saisonnière du barrage de Zit Emba présente un comportement relativement régulier sur l'ensemble de la période étudiée.

Les superficies les plus importantes sont généralement observées durant l'hiver et le printemps, périodes correspondant aux principaux apports pluviométriques enregistrés sur le bassin versant. À l'inverse, les plus faibles superficies sont systématiquement enregistrées au cours de l'été et au début de l'automne.

Cette dynamique saisonnière traduit le fonctionnement classique des réservoirs localisés en climat méditerranéen, caractérisé par une alternance entre une période humide favorable au remplissage et une période sèche marquée par une diminution progressive des réserves en eau.

Les résultats obtenus montrent également que la réponse du barrage aux précipitations n'est pas instantanée. Les effets des épisodes pluvieux se manifestent généralement avec un certain décalage temporel, lié au temps nécessaire au transfert des eaux au sein du bassin versant.

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

IV.3.3 Comparaison des superficies maximales et minimales

La comparaison des superficies extrêmes enregistrées au cours de la période 2020-2025 met en évidence des différences importantes entre les années (voir tableau IV.1).

Tableau IV.1: Superficies maximales et minimales durant la période 2020-2025

Année	Superficie maximale (ha)	Mois	Superficie minimale (ha)	Mois	Amplitude (ha)
2020	890,48	Avril	757,61	Novembre	132,87
2021	770,51	Février	640,73	Décembre	129,78
2022	654,11	Février	463,88	Décembre	190,28
2023	473,97	Juin	347,44	Novembre	126,53
2024	529,46	Mars	337,79	Décembre	141,67
2025	380,68	Mai	224,72	Novembre	175,91

Les superficies maximales correspondent généralement aux périodes suivant les épisodes pluvieux les plus importants, alors que les superficies minimales sont observées à la fin de la saison estivale, lorsque les apports sont réduits et que les pertes par évaporation deviennent plus importantes.

L'écart entre les valeurs maximales et minimales constitue un indicateur pertinent de la dynamique du barrage et de sa sensibilité aux variations climatiques. Les années présentant les amplitudes les plus importantes traduisent des contrastes hydrologiques plus marqués, tandis que les amplitudes plus faibles peuvent refléter une diminution globale des ressources disponibles.

IV.3.4 Tendances générale observée entre 2020 et 2025

L'ensemble des résultats obtenus met en évidence une tendance générale caractérisée par une diminution progressive des superficies en eau du barrage de ZitEmba au cours de la période étudiée comme le montre la Figure IV.14.

Cette évolution suggère une réduction des ressources mobilisables dans le réservoir et met en évidence la vulnérabilité du système face aux variations climatiques. Les fluctuations observées ne peuvent toutefois être attribuées exclusivement aux précipitations, car le

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

fonctionnement du barrage résulte également de l'interaction de plusieurs facteurs hydrologiques et anthropiques.

Ainsi, l'évolution de la surface en eau du barrage apparaît comme la conséquence d'un équilibre complexe entre les apports générés par les précipitations, les pertes par évaporation, les prélèvements destinés aux différents usages ainsi que les caractéristiques propres au bassin versant[71].

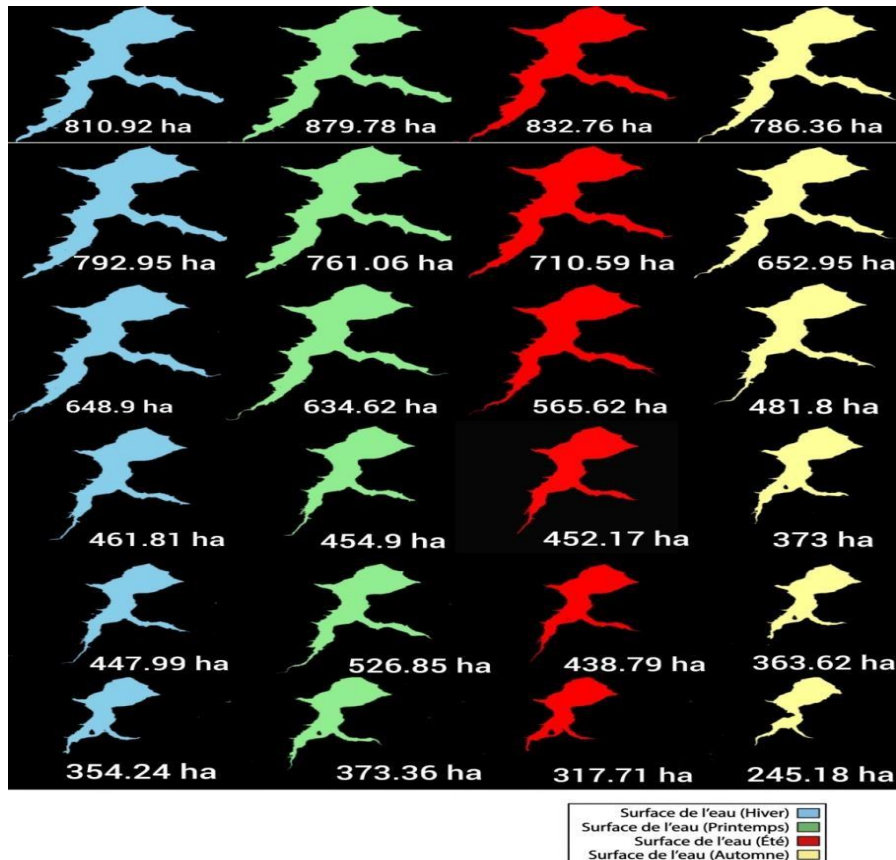


Figure IV.14 : Cartographie de la dynamique saisonnière de la superficie en eau du barrage Zit Emba (2020-2025).

IV.4 Relation entre les précipitations et la superficie du barrage

IV.4.1 Influence des précipitations sur l'évolution de la surface en eau

L'analyse conjointe des données pluviométriques issues du produit CHIRPS (Voir la Figure IV.15) et des superficies du barrage extraites à partir du MNDWI met en évidence l'existence d'une relation étroite entre les précipitations et l'évolution de la surface en eau du barrage de Zit Emba.

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

D'une manière générale, les périodes caractérisées par des cumuls pluviométriques élevés correspondent aux phases de remplissage du réservoir, tandis que les périodes de faibles précipitations sont associées à une diminution progressive de la superficie du plan d'eau.

Les saisons hivernale et printanière, qui concentrent la majeure partie des précipitations annuelles, favorisent l'augmentation des apports hydriques au barrage et contribuent au maintien de niveaux de remplissage relativement élevés. À l'inverse, la période estivale se caractérise par une forte réduction des précipitations, entraînant une diminution progressive de la surface en eau.

Les résultats obtenus montrent ainsi que la pluviométrie constitue l'un des principaux facteurs contrôlant la dynamique du réservoir.

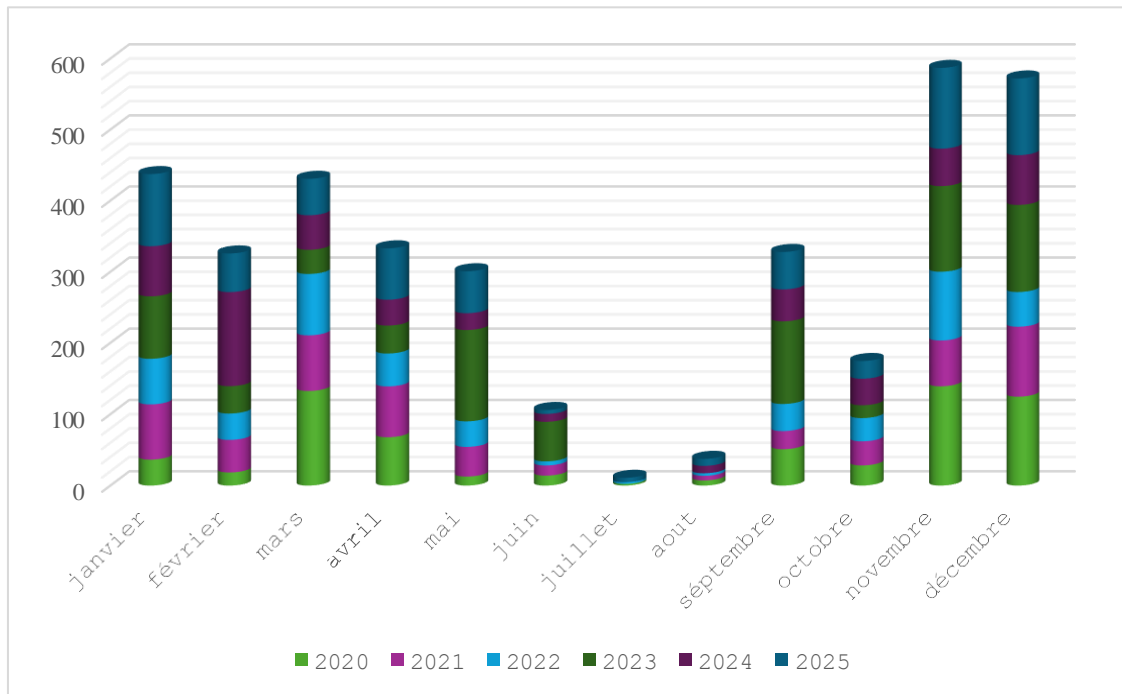


Figure IV.15 : Evolution des précipitations mensuelles (2020-2025).

IV.4.2 Mise en évidence du décalage temporel (Time Lag)

L'analyse des séries temporelles révèle que les variations de la surface en eau du barrage ne suivent pas instantanément les fluctuations des précipitations.

En effet, un décalage temporel est observé entre les épisodes pluvieux et la réponse du réservoir. Les augmentations de superficie apparaissent généralement après un certain délai nécessaire au transfert des eaux au sein du bassin versant [76].

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

Ce comportement s'explique par plusieurs processus hydrologiques, notamment [71] :

- L'interception des précipitations par la végétation ;
- L'infiltration d'une partie des eaux dans le sol ;
- La ré-humectation préalable des sols après les périodes sèches ;
- Le temps nécessaire au ruissellement et au transfert des eaux vers la retenue.

Ainsi, les premières précipitations enregistrées après une longue période de sécheresse ne produisent pas systématiquement une augmentation immédiate de la surface du barrage.

IV.4.3 Rôle des autres facteurs hydrologiques

Bien que les précipitations constituent le principal facteur de remplissage du barrage, l'évolution de la surface en eau dépend également d'autres processus susceptibles de modifier le bilan hydrique du réservoir. Parmi ces facteurs figurent [75] :

- Les pertes par évaporation, particulièrement importantes durant la saison estivale ;
- Les prélèvements destinés à l'alimentation en eau potable et à l'irrigation ;
- Les caractéristiques géomorphologiques du bassin versant ;
- Les écoulements souterrains et les phénomènes d'infiltration ;
- La répartition saisonnière des précipitations.

Par conséquent, deux années présentant des cumuls pluviométriques comparables peuvent parfois conduire à des réponses hydrologiques différentes du barrage.

IV.4.4 Comportement hydrologique global du barrage

Les résultats obtenus mettent en évidence le fonctionnement typique d'un réservoir localisé dans un environnement méditerranéen.

Le barrage de Zit Emba présente un cycle annuel caractérisé par [76] :

1. Une phase de remplissage durant l'hiver et le printemps, liée aux précipitations abondantes;
2. Une phase de transition à la fin du printemps ;
3. Une phase de diminution progressive des réserves durant l'été et le début de l'automne ;
4. Une reprise progressive du remplissage avec le retour des pluies automnales et hivernales.

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

Ce cycle hydrologique se répète d'une année à l'autre, bien que son intensité varie en fonction des conditions climatiques et des apports effectivement reçus par le bassin versant.

IV.4.5 Synthèse des relations pluie-superficie

L'ensemble des résultats obtenus confirme que la superficie du barrage de ZitEmba constitue un indicateur pertinent de la disponibilité des ressources en eau de surface.

Les variations observées par télédétection reflètent globalement les fluctuations du régime pluviométrique régional. Toutefois, la réponse du réservoir reste modulée par plusieurs facteurs hydrologiques et anthropiques qui influencent le bilan hydrique global du système [75].

Ainsi, l'utilisation combinée des données satellitaires et des données pluviométriques permet d'améliorer la compréhension du fonctionnement du barrage et constitue un outil d'aide à la gestion durable des ressources en eau.

IV.5 Confrontation des résultats de télédétection avec les données de la Direction des Ressources en Eau (DRE)

IV.5.1 Comparaison des tendances observées

Afin d'évaluer la cohérence des résultats obtenus par télédétection, les variations de la surface en eau du barrage de Zit Emba ont été confrontées aux informations hydrologiques fournies par la Direction des Ressources en Eau (DRE) de la wilaya de Skikda.

Les données disponibles concernent principalement les volumes stockés, les taux de remplissage, les apports annuels ainsi que certaines informations relatives à l'exploitation du barrage. Ces données constituent une référence importante pour apprécier la représentativité des résultats issus des images satellitaires.

La comparaison met en évidence une évolution globale similaire entre les superficies extraites à partir du MNDWI et les variations des paramètres hydrologiques enregistrés par la DRE. Les périodes caractérisées par des niveaux de remplissage élevés correspondent généralement aux années présentant les plus grandes superficies en eau, tandis que les périodes de diminution des réserves sont également accompagnées d'une réduction du plan d'eau observé par télédétection.

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

Cette concordance générale confirme la capacité des techniques de télédétection à reproduire les principales tendances du fonctionnement du barrage.

IV.5.2. Correspondance entre les années humides et les années déficitaires

L'analyse comparative montre que les années caractérisées par des apports importants et des taux de remplissage élevés correspondent aux périodes où les superficies extraites à partir des images satellitaires atteignent leurs valeurs maximales.

Inversement, les années marquées par une diminution des apports hydriques et une baisse du volume stocké présentent également des superficies plus faibles[71].

Cette cohérence entre les observations satellitaires et les données officielles traduit la sensibilité du plan d'eau aux fluctuations du bilan hydrologique du barrage.

IV.5.3 Sources possibles de différences entre les deux approches

Malgré la cohérence générale observée, certaines différences peuvent exister entre les résultats issus de la télédétection et les données fournies par la DRE.

Ces écarts peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs :

- La différence entre les paramètres comparés, la télédétection mesurant principalement la surface en eau alors que la DRE dispose de données volumétriques ;
- Les variations de la morphologie du réservoir, qui peuvent modifier la relation entre surface et volume ;
- Les différences de dates entre les acquisitions satellitaires et les mesures effectuées sur le terrain ;
- Les incertitudes associées aux traitements des images et aux données hydrologiques ;
- Les effets des prélèvements, des pertes par évaporation et des apports non directement observables à partir des images satellitaires.

Par conséquent, les éventuelles différences observées ne remettent pas en cause la validité des résultats, mais traduisent la complémentarité des deux approches.

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

IV.5.4 Validation indirecte de la méthodologie adoptée

La confrontation des résultats obtenus par télédétection avec les données de la Direction des Ressources en Eau met en évidence une cohérence satisfaisante entre les deux sources d'information.

Cette concordance constitue une validation indirecte de la méthodologie mise en œuvre dans cette étude. Elle confirme que l'utilisation combinée des images Sentinel-2 et de l'indice MNDWI permet de suivre efficacement les variations de la surface en eau du barrage de Zit Emba.

Les résultats obtenus montrent ainsi que la télédétection représente un outil complémentaire particulièrement utile pour le suivi des ressources en eau, notamment dans les contextes où les mesures de terrain sont limitées ou difficilement accessibles.

IV.6 Discussion générale des résultats à la lumière de la littérature scientifique

IV.6.1 Variabilité de la surface en eau et influence des précipitations

Les résultats obtenus au cours de la période 2020-2025 montrent que la dynamique de la surface en eau du barrage de Zit Emba est fortement influencée par la variabilité des précipitations. Les phases d'augmentation de la superficie du plan d'eau coïncident généralement avec les périodes humides, tandis que les diminutions les plus importantes sont observées durant les saisons caractérisées par un déficit pluviométrique.

Ce comportement est conforme au fonctionnement hydrologique des réservoirs situés en climat méditerranéen, où les ressources en eau présentent une forte variabilité saisonnière. Des observations similaires ont été rapportées dans plusieurs études consacrées au suivi des barrages par télédétection, lesquelles montrent que les fluctuations des plans d'eau sont étroitement liées aux conditions climatiques et aux apports du bassin versant[75].

Toutefois, les résultats obtenus indiquent que la réponse du barrage aux épisodes pluvieux n'est pas immédiate. L'existence d'un décalage temporel entre les précipitations et l'évolution de la surface en eau traduit la complexité des processus hydrologiques intervenant au sein du bassin versant, notamment l'infiltration, le stockage temporaire dans les sols et le temps nécessaire au transfert des eaux vers la retenue[76].

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

IV.6.2 Apport de la télédétection dans le suivi des ressources en eau

Les résultats obtenus confirment l'intérêt des techniques de télédétection pour le suivi spatio-temporel des ressources en eau de surface.

L'utilisation des images Sentinel-2 a permis d'obtenir une délimitation précise du plan d'eau grâce à leur résolution spatiale de 10 m[46].

Ces observations rejoignent les conclusions de nombreux travaux scientifiques qui soulignent l'importance croissante de la télédétection dans la surveillance des réservoirs et la gestion des ressources hydriques, en particulier dans les régions où les mesures de terrain sont limitées.

Par ailleurs, l'utilisation de la plateforme Google EarthEngine a permis d'automatiser les traitements, de réduire le temps d'analyse et d'améliorer la reproductibilité de la méthodologie adoptée.

IV.6.3 Pertinence du MNDWI pour la détection des surfaces en eau

L'analyse comparative réalisée entre les indices NDWI, AWEI et MNDWI a montré que le MNDWI fournit les résultats les plus satisfaisants pour la détection de la surface en eau du barrage de Zit Emba.

Ce résultat est cohérent, qui a démontré que le remplacement du proche infrarouge par la bande SWIR permet d'améliorer la discrimination entre les surfaces en eau et les autres types d'occupation du sol[55].

Dans le cas du barrage de ZitEmba, le MNDWI a permis de réduire les confusions observées au niveau des sols nus et des zones périphériques du réservoir, ce qui a conduit à une meilleure délimitation des contours du plan d'eau[55].

Les résultats obtenus sont également en accord avec plusieurs études récentes menées dans des environnements semi-arides et méditerranéens, où le MNDWI est fréquemment considéré comme l'un des indices les plus performants pour le suivi des ressources en eau [55].

IV.6.4 Limites de l'approche adoptée

Malgré les résultats satisfaisants obtenus, certaines limites doivent être prises en considération.

L'absence de mesures de terrain permettant de valider directement les superficies extraites constitue l'une des principales contraintes de cette étude. De plus, les données pluviométriques CHIRPS utilisées représentent des estimations spatialisées qui peuvent différer localement des valeurs réellement enregistrées.

Par ailleurs, la télédétection permet essentiellement d'observer la surface du plan d'eau sans fournir directement des informations sur les volumes stockés, les débits entrants ou les pertes réelles par évaporation.

Enfin, l'évolution du barrage dépend de nombreux facteurs qui n'ont pas été quantifiés dans cette étude, notamment les prélèvements anthropiques, les écoulements souterrains et les variations des besoins en eau.

IV.6.5. Implications pour la gestion des ressources en eau

Les résultats obtenus mettent en évidence l'intérêt des approches fondées sur la télédétection pour la surveillance des barrages et l'aide à la décision dans le domaine de la gestion des ressources en eau[77].

La possibilité de suivre régulièrement l'évolution des superficies en eau permet d'identifier rapidement les périodes de déficit hydrique et d'anticiper les situations susceptibles d'affecter l'alimentation en eau des différents secteurs utilisateurs.

Dans un contexte marqué par la variabilité climatique et l'augmentation des pressions exercées sur les ressources hydriques, les outils de télédétection apparaissent comme des solutions complémentaires aux réseaux classiques de mesure et peuvent contribuer à améliorer les stratégies de gestion durable de l'eau.

IV.6.6. Perspectives de recherche

Les travaux futurs pourraient être orientés vers :

- L'intégration de données altimétriques ou bathymétriques afin d'estimer les volumes stockés ;

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

- L'utilisation d'images radar Sentinel-1 pour limiter l'influence de la couverture nuageuse ;
- L'application de modèles statistiques permettant de quantifier la relation entre les précipitations et la surface en eau ;
- L'intégration des données de température et d'évaporation dans le bilan hydrologique du barrage ;
- L'extension de l'approche à d'autres barrages de la wilaya de Skikda afin de réaliser des analyses comparatives à l'échelle régionale.

IV.7 Conclusion

L'analyse des résultats obtenus au cours de la période 2020-2025 a permis de mettre en évidence la dynamique spatio-temporelle de la surface en eau du barrage de Zit Emba ainsi que son évolution en fonction des variations pluviométriques.

Les traitements réalisés à partir des images Sentinel-2, ont permis de suivre avec précision les fluctuations saisonnières et interannuelles du plan d'eau. L'application de l'indice MNDWI s'est révélée particulièrement adaptée à la détection des surfaces en eau, fournissant des résultats cohérents avec les caractéristiques hydrologiques du barrage.

L'étude a montré que les superficies les plus importantes sont généralement observées durant les saisons humides, alors que les valeurs minimales correspondent aux périodes estivales caractérisées par de faibles précipitations et une augmentation des pertes hydriques. Les résultats ont également mis en évidence l'existence d'un décalage temporel entre les épisodes pluvieux et la réponse du réservoir, traduisant la complexité des processus hydrologiques intervenant au niveau du bassin versant.

La confrontation des résultats issus de la télédétection avec les données de la Direction des Ressources en Eau a montré une cohérence satisfaisante entre les tendances observées, confirmant ainsi la pertinence de la méthodologie adoptée.

Par ailleurs, la discussion des résultats à la lumière de la littérature scientifique a permis de souligner l'intérêt croissant des techniques de télédétection pour le suivi des ressources en eau et leur contribution potentielle à l'amélioration des stratégies de gestion durable des barrages.

CHAPITRE IV : Résultats et Discussion

Malgré certaines limites liées à l'absence de mesures directes sur le terrain et aux contraintes inhérentes aux données satellitaires, l'approche développée dans cette étude a permis d'obtenir une vision globale du comportement hydrologique du barrage de Zit Emba.

Les résultats obtenus confirment ainsi l'intérêt de l'intégration des données de télédétection et des données climatiques dans l'analyse des ressources en eau de surface et ouvrent des perspectives prometteuses pour le développement de systèmes de suivi plus performants à l'échelle régionale.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Au terme de cette étude, il ressort que la télédétection constitue un outil performant et fiable pour le suivi spatio-temporel des ressources en eau. L'exploitation des images satellitaires Sentinel-2 à travers l'indice MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) a permis de mettre en évidence l'évolution des surfaces en eau du barrage de Zit Emba au cours de la période étudiée. Parallèlement, les données de précipitations issues du produit satellitaire CHIRPS ont permis d'analyser la variabilité pluviométrique et son influence sur la dynamique du plan d'eau.

Les résultats obtenus montrent que les variations de la surface en eau sont étroitement liées aux fluctuations des précipitations. Les périodes caractérisées par des apports pluviométriques importants correspondent généralement à une augmentation de la superficie du plan d'eau, tandis que les périodes de déficit pluviométrique se traduisent par une diminution de cette dernière. L'analyse des séries temporelles a ainsi permis de mieux comprendre le comportement hydrologique du barrage et son évolution au fil du temps.

Par ailleurs, l'intégration des données satellitaires avec les informations hydrologiques fournies par la Direction des Ressources en Eau (DRE) a contribué à renforcer la fiabilité des analyses et à valider les résultats obtenus. Cette complémentarité entre données de terrain et observations satellitaires met en évidence l'intérêt d'une approche intégrée pour le suivi et l'évaluation des ressources hydriques.

En conclusion, cette étude confirme l'importance de la télédétection et des données climatiques satellitaires comme outils d'aide à la surveillance des barrages et à la gestion des ressources en eau. L'approche adoptée offre une méthode efficace, rapide et peu coûteuse pour le suivi des variations des surfaces en eau. Les résultats obtenus peuvent ainsi contribuer à améliorer la prise de décision en matière de gestion durable des ressources hydriques et à mieux faire face aux défis liés à la variabilité climatique et à la pression croissante exercée sur les ressources en eau.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Boutouatou, F., Mebarki, A., Laignel, B., & Nouaceur, Z. (2025). Water balance and hydropluviometric variability of dams in Eastern Algeria. *Water Supply*, 25(1), 83–101.
- [2]. Berredjem, A. F., & Boumaiza, A. (2024). Managing water demand and supply under siltation challenges: Integrated strategies for the Hammam Debagh reservoir in Guelma Province, Eastern Algeria. *International Journal of Innovative Technologies in Social Science*, (3(43)).
- [3]. Tabet, A. A., Abdaoui, G. R., & Layeb, H. (2023). Automatic extraction of build-up areas from bare land using Sentinel 2A imagery in El Khroub city, Algeria. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, 92, 1-22..
- [4]. Fekir, Y., (2025). Contribution of optical and radar remote sensing to the monitoring of wetland dynamics in western Algeria. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 12(5), 8795.
- [5]. Bounab, R., Boutaghane, H., Boulmaiz, T., & Trambly, Y. (2025). Comparison of Machine Learning Algorithms for Daily Runoff Forecasting with Global Rainfall Products in Algeria. *Atmosphere*, 16(2), 213.
- [6]. Otmane, A., Baba-Hamed, K., Bouanani, A., & Kebir, L. W. (2026). Mise en évidence de la sécheresse par l'étude de la variabilité climatique dans le bassin versant de l'oued Mekerra (Nord-Ouest algérien) [Highlighting drought by the study of climate variability in the Mekerra watershed (Northwestern Algeria)]. *Milieux*, 12(01).
- [7]. Atbi, A., Kendouci, M. A., & Mebarki, S. (2025). Enhancing water resources management in the Algerian Sahara using machine learning algorithms. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11(4), 1-15.
- [8]. GIZ/BGR/OSS, 2016. *Projet CREM: Etude d'évaluation du secteur de l'eau en Algérie, Etat des Lieux*.
- [9]. Chabour, N., Mebrouk, N., Hassani, I. H., Upton, K., Ó Dochartaigh, B. É., & Bellwood-Howard, I. (2018). *Africa Groundwater Atlas: Hydrogeology of Algeria*. British Geological Survey.
- [10]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2009. *Groundwater Management in Algeria: Draft Synthesis Report*.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [11]. Mozas M and Ghosn A, 2013. *État des lieux du secteur de l'eau en Algérie*. IPAMED.
- [12]. Hamiche A, Stambouli A and Flazi S, 2016. 'A review on the water and energy sectors in Algeria: Current forecasts, scenario and sustainability issues'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41:261-276.
- [13]. Bouchentouf, S., & Benabdeli, K. (2025). Assessing the impact of economic growth and water stress on per capita freshwater availability: An econometric analysis of Algeria (1990–2020). *Journal of Money and Business Economics*, 9(1), 114-126.
- [14]. Belmeziti, A., M'hammedi Bouzina, A., & De Gouvello, B. (2025). Emergence of a new paradigm of water supply through adaptation strategies of the intermittent system in Algerian residential buildings. *Cities*, 158, 105657.
- [15]. Zeggagh, A., & Garcia, S. (2025). The hidden costs of drinking water rationing in water-stressed Mediterranean countries: Evidence from Algeria (Working Paper BETA #2025-19). Bureau d'économie théorique et appliquée (BETA).
- [16]. Remini, B., & Bensafia, D. (2002). Siltation of dams in arid regions: Algerian examples. Département des Sciences de l'Eau et Environnement, Faculté de Technologie, Université Blida1.
- [17]. Djaferkhodja, H. (2024). Maîtrise des Crues [Support de cours]. Département d'Hydraulique, Université de Bouira.
- [18]. Ben Hamaidouche, W., & Bedira, F. (2022). Classification des barrages [Document de cours]. Département de Génie Civil, Université Mohamed Boudiaf - M'sila.
- [19]. Benslimane, M. A., & Belarbi, Y. (2023). Les barrages [Présentation]. Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen.
- [20]. Ouamane, A., Sekkour, I., & Athmani, B. (2021). Mobilisation des eaux de surface: Commentaires généraux sur les barrages en Algérie dans le passé, le présent et le futur.
- [21]. Berhail, S., & Katipoğlu, O. M. (2024). Exploring hydrological and meteorological drought trends in Northeast Algeria: implications for water resource management. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(11), 9689–9712.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [22]. Rais, M., Gherissi, R., Rezagui, D., & Boufekane, A. (2025). Temporal assessment of surface water quality in a semiarid environment: trends and implications from a case study of the Hammam Boughrara dam, Northwestern Algeria. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 10(8), 2401–2429.
- [23]. Benkhaled, A., & Bouziane, M. T. (2016). Le bassin-versant de la seyhouse (Algérie orientale) [Thèse de doctorat]. Université Frères Mentouri - Constantine 1.
- [24]. Dakhlaoui, H., & Trambly, Y. (2018). Climate change impacts on water resources in North African basins. In MISTRALS-ENVIMED Research Project.
- [25]. Université du Québec à Montréal (UQAM). (2019). Précipitations [Diapositives de cours]. Département des Sciences de la Terre et de l'Atmosphère.
- [26]. Aquaportail. (s.d.). *Les types de précipitations*. <https://www.aquaportail.com>
- [27]. Saroha, J. (2020). 18 Atmospheric moisture IV: Forms and types of precipitation. In e-Adhyayan. <https://ebooks.inflibnet>.
- [28]. Regad, N., & Tatar, H. (2025). Tendances et variabilité pluviométriques dans une région semi-aride : Études du cas du bassin versant de Timgad. *Sciences & Technologie D*, (52), 1-15.
- [29]. Taïbi, S., Anza, F. Z. H., & Zeroual, S. (2024). Etude de l'impact des changements climatiques sur la disponibilité des ressources en eau basée sur les simulations du modèle climatique régional RCA4 : cas du bassin de Ain DALIA (Algérie). *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, 10(1).
- [30]. Athmani, B., & Gouissi, F. (2022). Mobilisation des eaux de surface : Aperçu général sur les barrages en Algérie, passé, présent et futur. CORE.
- [31]. Toumi, S., Meddi, M., & Boucefiane, A. (2021). Variabilité climatique et impact sur les ressources en eau en Algérie. *Revue des Sciences de l'Eau*, 34(2), 145-162.
- [32]. Zeroual, A., Bouabdelli, S., & Meddi, M. (2023). Changement climatique et ressources en eau en Algérie : État des lieux et perspectives. *Journal Algérien des Régions Arides*, 17(1), 12-28.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [33]. Mekdessi, N., Khodja, A., & Benamar, A. (2022). Impact de la sécheresse sur les ressources en eau de surface en Algérie : Cas du bassin versant de la Macta. *Revue des Sciences de l'Eau*, 35(1), 45-62.
- [34]. Remini, B., Hallouche, W., & Kechad, R. (2021). Gestion intégrée des ressources en eau en Algérie face aux changements climatiques : Défis et perspectives. *Journal Algérien des Régions Arides*, 15(2), 89-104.
- [35]. ScienceDirect. (2024). Towards sustainable water management in Algeria.
- [36]. Laradji, Y., Yebdri, D., & Korichi, K. (2025). Integrated management of water resources in the Mina watershed (North West of Algeria). *Water Practice and Technology*, 20(5), 1338-1353.
- [37]. Abdessalam, F., Redjem, K., & Baddou, A. (2025). Water resources in Algeria: Factors of the problem and the adopted and possible solutions. *Journal of Advanced Economic Research*, 10(1), 368-380.
- [38]. Hami, A., Dairi, S., Mechentel, E., Abida, H., & Zenati, N. (2026). Mapping groundwater potential zones using GIS and AHP in a semi arid watershed: A case study of the Medjerda basin, northeastern Algeria. *Journal of African Earth Sciences*, 239, 106128.
- [39]. Fekir, Y., Cherouati, B., Khalladi, R., Anteur, D., & Hamadouche, M. A. (2025). Contribution of optical and radar remote sensing to the monitoring of wetland dynamics in western Algeria. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 12(5), 8795–8806.
- [40]. Mallem, S. E., Tatar, H., & Boultif, M. (2023). A diachronic analysis of the vegetation cover in a spate irrigation perimeter - Case study: The El Feidh region, Biskra, Algeria. *Revue Roumaine de Géographie*, 69(1), 61-72.
- [41]. Kergomard, C. (1990). La télédétection aérospatiale: une introduction. Cours de télédétection, Ecole Normale Supérieure Paris.
- [42]. Dekker, A. G., Malthus, T. J., Wijnen, M. M., & Seyhan, E. (1992). The effect of spectral bandwidth and positioning on the spectral signature analysis of inland waters. *Remote Sensing of Environment*, 41(2–3), 211–225.
- [43]. Jensen, J. R. (2015). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective* (4th ed.). Pearson Education.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIES

- [44]. Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., ... & Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154–172.
- [45]. Agence Spatiale Européenne (ESA), 2024.
- [46]. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36.
- [47]. Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K., & Iguchi, T. (2014). The Global Precipitation Measurement Mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(5), 701–722.
- [48]. Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations—A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066.
- [49]. McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432
- [50]. Yao, F., Wang, J., Yang, K., Wang, C., Walter, B. A., & Crétaux, J. F. (2019). Lake and reservoir extent mapping in the high-elevation Tibetan Plateau with Sentinel-1 SAR observations and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 11(17), 1974.
- [51]. Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418–422.
- [52]. Mason, D. C., Speck, R., Devereux, B., Schumann, G. J. P., Neal, J. C., & Bates, P. D. (2010). Flood detection in urban areas using TerraSAR-X. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(2), 882–894.
- [53]. Melesse, A. M., Weng, Q., Thenkabail, P. S., & Senay, G. B. (2007). Remote sensing sensors and applications in environmental resources mapping and modelling. *Sensors*, 7(12), 3209–3241.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIES

- [54]. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., et al. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
- [55]. Xu, H. (2006). Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033.
- [56]. McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432.
- [57]. Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35.
- [58]. Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations—A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 150066.
- [59]. Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K., & Iguchi, T. (2014). The Global Precipitation Measurement Mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(5), 701–722.
- [60]. Ward, R. C., & Robinson, M. (2000). *Principles of Hydrology* (4th ed.). London: McGraw-Hill.
- [61]. Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., & Culvenor, D. (2010). Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 106–115.
- [62]. WMO (World Meteorological Organization). (2018). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (WMO-No. 8). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [63]. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. (2024). *Présentation de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH)*. Consulté sur le site officiel de l'ANRH.
- [64]. Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT). (2005). Décret exécutif n° 05-101 du 23 mars 2005 portant réaménagement du statut de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts. Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire
- [65]. Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices* (3rd ed.). CRC Press.
- [66]. République Algérienne Démocratique et Populaire. (2005). Loi n° 05-12 du 4 août 2005 relative à l'eau. Journal officiel de la République algérienne démocratique et populaire, n° 60, 4 septembre 2005
- [67]. Loucks, D. P., & Van Beek, E. (2017). *Water Resource Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Applications*. Springer.
- [68]. Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (5th ed.). Sage Publications.
- [69]. Jensen, J. R. (2015). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective* (4th ed.). Pearson.
- [70]. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). (2023). *Les ressources en eau de la wilaya de Skikda*. Alger : ANRH.
- [71]. Direction des Ressources en Eau de la Wilaya de Skikda (DRE). (2023). *Rapport annuel sur les ressources en eau de la wilaya de Skikda*. Skikda, Algérie.
- [72]. Belhadj, M. Z. (2007). *Étude hydrologique et environnementale du barrage de Zit-Emba*. Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT).
- [73]. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27.
- [74]. QGIS Development Team. (2024). *QGIS Geographic Information System (Version 3.x)* [Logiciel]. QGIS Association.

[75]. Loucks, D. P., & Van Beek, E. (2017). Water Resource Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Applications. Springer.

[76]. Ward, R. C., & Robinson, M. (2000). Principles of Hydrology (4th ed.). McGraw-Hill.

[77]. Global Water Partnership (GWP), 2000. Integrated Water Resources Management (IWRM), TAC Background Paper No. 4. Stockholm: GWP.