

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE
N° :.....



DOMAINE : TECHNOLOGIE
FILIERE :HYDRAULIQUE
OPTION : HYDRAULIQUE URBAINE

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par : HALTALI Yasmine

DJEDDI Wafa

Intitulé

**Evaluation et suivi de la qualité physico-chimique
des eaux de surface à l'aide d'utilisation de
télédétection et de SIG**

Etude de cas : Barrage de Telesdit Wilaya de Bouira

Soutenu devant le jury composé de :

MAHDI Djallal	Université de M'sila	Président
MOKHTARI Elhadj	Université de M'sila	Encadreur
MERZOUK Belkacem	Université de M'sila	Co-Encadreur
DOUGHA Mostafa	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2023/2024



Remerciement

La première et la dernière chose est pour Allah qui nous a donné la capacité suffisante pour terminer ce travail.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers nos encadrateurs, Monsieur Elhadj Mokhtari et Monsieur Belkacem Merzouk, pour leurs conseils et encouragements qui ont contribué à finaliser ce travail.

Comme nous tenons à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'examiner et juger notre travail.

Un merci particulier à tous ceux qui m'ont soutenu pour terminer ce travail.





Dédicace

Tout d'abord, nous remercions le Dieu, notre créateur de nous donner la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste. Nous dédions ce travail à nos mères, la source de tendresse et de lumière qui guide nos routes, qu'elles nous emmènent sur les chemins de la réussite. Nous leur exprimons notre gratitude pour tous les sacrifices consentis, leurs précieux conseils, leur assistance et leur présence dans nos vies. A nos pères qu'ils nous les remercient énormément pour ses efforts, ses conseils et sa surveillance.

*A nos chers frères et sœurs (Hiba, islam et Amina)
(Safinez Abd Allah et Mohammed)*

A nos meilleures amies (Soundous Nada ikram) (chaima rabab ghalia)

A tout ce que nous connaissons sans exception

A tous nos enseignants sans exception.

Haltali Yasmine et Djeddi Wafa

En fin 'n'offre nos bénédictions à tous ceux qui m'ont soutenu dans

l'accomplissement de ce travail .

SOMMAIRE

	Page
Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Introduction générale	I
Chapitre I. Généralités sur la qualité des eaux	
I.1. Définition de l'eau.....	01
I.2. L'importance de l'eau.....	01
I.3. Cycle hydrologique.....	01
I.4. Les réservoirs d'eau.....	02
1.4.1 La biosphère.....	02
1.4.2 Les eaux continentales.....	02
1.4.3 Atmosphère.....	02
I.5. La répartition des sources d'eau sur terre.....	02
I.6. Utilisations et consommation de l'eau.....	03
I.6.1. Usages domestiques.....	03
I.6.2 Usages agricoles.....	03
I.6.3. Usages industriels.....	03
I.7. La pollution de l'eau.....	04
I.8. Paramètres des mesures de la qualité de l'eau.....	05
I.8.1. Paramètres physico-chimiques.....	05
I.8.2. Paramètres microbiologiques.....	07
I.9. Normes des paramètres physico-chimiques de l'eau potable.....	08
I.10. Conclusion.....	09
Chapitre II. Présentation de la région d'étude	
Introduction.....	10
II.1. Présentation de la région d'étude.....	10
II.1.1. Présentation et localisation du barrage Tilesdit.....	10
II.1.2. Historique de réalisation du barrage.....	12
II.1.3. Géologie, hydrogéologie et géomorphologie de la région.....	13

II.1.3.1. Structure géologique.....	13
II.1.3.2. Hydrogéologie.....	13
II.1.3.3. Géomorphologie et topographie du bassin.....	13
II.1.4. Climatologie de site du barrage.....	14
II.14.1. Température de l'air.....	14
II.1.4.2. Les précipitations.....	14
II.1.4.3. Régime des vents.....	14
II.1.5. Caractéristique hydro chimique d'eau.....	14
Conclusion.....	15

Chapitre III. Utilisation de SIG et de la télédétection dans l'évaluation de la qualité des eaux

III.1. Introduction.....	16
III.2. Matériel et Protocole.....	16
III.3. Système d'Information Géographique.....	18
III.3.1. Historique.....	18
III.3.2. Définitions et concepts associés.....	18
III.3.3. Objectifs des SIG.....	19
III.4. SIG et gestion intégrée de la qualité de l'eau(GIRE)	19
III.4.1. Définition de La Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE).....	19
III.5. Relation entre la GIRE et les SIG.....	20
III.5.1. SIG, un outil d'aide à la décision.....	20
III.6. Télédétection.....	21
III.6.1. Généralités et définitions.....	21
III.6.2. Bref historique.....	21
III.6.3. Applications de la télédétection.....	21
III.6.4. Principes de la télédétection.....	22
III.6.5. Objectif de la télédétection.....	23
III.7. Caractéristiques des images.....	23
III.8. Les types de résolutions.....	23
III.8.1. La résolution spatiale.....	23
III.8.2. Résolution radiométrique.....	24
III.8.3. Résolution spectrale.....	24

III.8.4. Résolution temporelle ou répétitivité.....	24
III.9. Télésurveillance de la qualité de l'eau.....	26
III.9.1. Bases de la télédétection de la qualité de l'eau.....	26
III.9.2. Interférences atmosphériques.....	26
III.10. Acquisition et traitement des données satellitaires.....	27
Conclusion.....	33
Chapitre IV. Résultats et discussions	
Introduction.....	34
IV .1. Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau du barrage.....	34
IV.2. Recherche de loi de corrélation.....	35
IV.2.1. La turbidité.....	35
IV.2.2. La salinité.....	40
IV.2.3. Les matières en suspension.....	44
IV.3. La variation spatio-temporelle des paramètres de qualité des eaux du barrage....	49
IV.3.1. La turbidité.....	50
IV.3.2.La salinité.....	51
IV.3.3. Les matières en suspension.....	54
Conclusion.....	56
Conclusion générale.....	58
Références bibliographiques	

Résumé

La qualité de l'eau en Algérie suscite des préoccupations majeures. Les eaux de surface et souterraines sont fréquemment contaminées par les rejets de déchets urbains et industriels, et les barrages s'ensavent progressivement, engendrant des défis écologiques et environnementaux. De nombreuses techniques existent pour évaluer les paramètres de qualité de l'eau des barrages et quantifier les éléments physiques et chimiques (température, pH, salinité, conductivité, turbidité, matières en suspension), ainsi que plusieurs indicateurs de charge polluante. Notre étude visait à illustrer l'importance de la télédétection et des SIG pour évaluer la turbidité, les matières en suspension et la salinité dans le barrage de Telesdit. Ces technologies permettent une surveillance rigoureuse, assurant ainsi une gestion efficace et durable des ressources en eau. Nous avons obtenu trois modèles de régression pour quantifier la turbidité, la salinité et les matières en suspension dans le lac du barrage, avec des coefficients de détermination très élevés. Ensuite, nous avons utilisé ces modèles pour produire des cartes thématiques à l'échelle spatio-temporelle. Les cartes thématiques produites ont révélé la variation spatio-temporelle des paramètres, nous permettant d'obtenir une vue d'ensemble de la distribution spatiale et temporelle de chaque paramètre sur l'ensemble du lac de barrage.

Mots clés : Paramètres physico-chimiques, télédétection, SIG , Barrage Telesdit.

Abstract

Water quality in Algeria is a concerning issue. Surface and groundwater are often polluted due to the discharge of urban and industrial waste, and dams gradually silt up, causing ecological and environmental problems. Various techniques exist to evaluate water quality parameters of dams and quantify physical and chemical elements (temperature, pH, salinity, conductivity, turbidity, suspended solids, transparency), as well as several pollution load indicators. Our study aimed to illustrate the importance of remote sensing and GIS for assessing turbidity, suspended solids, and salinity in the Telesdit Dam. These technologies allow for rigorous monitoring, ensuring effective and sustainable management of water resources. We developed three regression models to quantify turbidity, salinity, and suspended solids in the dam's lake, with very high coefficients of determination. Subsequently, we used these models to produce spatio-temporal thematic maps. The thematic maps produced revealed the spatio-temporal variation of the parameters, providing an overview of the spatial and temporal distribution of each parameter across the entire dam lake.

Keywords : Physico-chemical parameters, remote sensing, GIS, Telesdit Dam.

ملخص

جودة المياه في الجزائر قضية مقلقة. غالبًا ما تتلوث المياه السطحية والجوفية بسبب تصريف النفايات الحضرية والصناعية، وتتراكم الأوحال تدريجيًا في السدود مما يسبب مشاكل بيئية وإيكولوجية. هناك تقنيات متنوعة لتقييم معايير جودة المياه في السدود وقياس العناصر الفيزيائية والكيميائية (درجة الحرارة، الرقم الهيدروجيني، الملوحة، التوصيلية، العكارة، المواد العالقة، الشفافية)، بالإضافة إلى العديد من مؤشرات الحمولة الملوثة. هدفت دراستنا إلى توضيح أهمية الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) في تقييم العكارة، المواد العالقة، والملوحة في سد تيلسدت. تسمح هذه التقنيات بمراقبة دقيقة، مما يضمن إدارة فعالة ومستدامة لموارد المياه. قمنا بتطوير ثلاثة نماذج انحدار لقياس العكارة، الملوحة، والمواد العالقة في بحيرة السد، مع معاملات تحديد عالية جدًا. بعد ذلك، استخدمنا هذه النماذج لإنتاج خرائط موضوعية زمنية ومكانية. كشفت الخرائط الموضوعية المنتجة عن التباين الزمني والمكاني للمعايير، مما يوفر نظرة شاملة على التوزيع المكاني والزمني لكل معيار عبر بحيرة السد بأكملها.

الكلمات المفتاحية: المعايير الفيزيائية والكيميائية، الاستشعار عن بعد، نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، سد تيلسدت

Liste des Tableaux

	Page
Chapitre I. Généralités sur la qualité des eaux	
Tableau I.1. Qualité de l'eau en fonction de la conductivité électrique	06
Tableau I.2. Qualité de l'eau en fonction de la valeur du TH	07
Tableau I.3. Normes et recommandations pour quelques paramètres de qualité de l'eau potable en Algérie	08
Chapitre III. Utilisation des SIG et de la télédétection dans l'évaluation de la qualité des eaux	
Tableau III.1. La correspondance des bandes spectrales de Sentinel 2 dans l'assemblage des bandes	28
Tableau III.2. Les données fondamentales des paramètres mesurés et leurs valeurs respectives pour chaque bande	31
Chapitre IV. Résultats et discussions	
Tableau IV.1. Résultats des paramètres calculés (Salinité, MES, Turbidité) pour les 28 points de mesure (18/03/2019)	34
Tableau IV.2. Comparaison entre la turbidité mesurée et la turbidité calculée à l'aide de la loi de régression	39
Tableau IV.3. Comparaison entre la salinité mesurée et la salinité calculée à l'aide de la loi de régression	43
Tableau IV.4. Comparaison entre les matières en suspension mesurées et les matières en suspension calculées à l'aide de la loi de régression	48
Tableau IV.5. La turbidité pour différentes périodes de mesure	50
Tableau IV.6. La salinité pour différentes périodes de mesure	52
Tableau IV.7. Les matières en suspension pour différentes périodes de mesure	54

Liste des figures

	Page
Chapitre I. Généralités sur la qualité des eaux	
Figure I.1. Cycle biogéochimique de l'eau	02
Figure II.1. Localisation du barrage de TILES DIT willaya de Bouira	11
Figure II.2. Carte de délimitation du lac du barrage de TILES DIT	12
Chapitre III. Utilisation des SIG et de la télédétection dans l'évaluation de la qualité des eaux	
Figure III.1. Les étapes de travail	17
Figure III.2. Télédétection par satellite : principes, techniques et applications	22
Figure III.3. Comprendre c'est quoi la résolution spatiale	24
Figure III.4. Résolution radiométrique	25
Figure III.5. Interactions avec l'atmosphère	27
Figure III.6. Interface de site de téléchargement des images satellitaires (sentinel 2)	29
Chapitre IV. Résultats et discussions	
Figure IV.1. Loi de régression linéaire entre la turbidité et les bandes (2.3.4.5.6 et 7)	36
Figure IV.2. Variation de la turbidité de l'eau dans le lac du barrage	38
Figure IV.3. La variation de turbidité dans les 28 points de mesure	38
Figure IV.4. Les valeurs de turbidité mesurées (18/03/2019) et calculées (16/03/2019)	40
Figure IV.5. Loi de régression linéaire entre la salinité et les bandes (2.3.4.5.6 et 7)	41
Figure IV.6. La variation de la salinité de l'eau dans le lac du barrage	42
Figure IV.7. La variation de la salinité dans les 28 points de mesure	43
Figure IV.8. Les valeurs de salinité mesurées le (18/03/2019) et calculées le (16/03/2019)	44
Figure IV.9. Loi de régression linéaire entre les matières en suspension et les bandes (2.3.4.5.6 et 7)	45
Figure IV.10. Variation des matières en suspension dans le lac du Barrage	47
Figure IV.11. La variation des matières en suspension dans les 28 points de mesure	47
Figure IV.12. Les valeurs des matières en suspension mesurées le (18/03/2019) et calculées le (16/03/2019)	49

Figure IV.13. La variation de la turbidité de l'eau du barrage pour les dates de 27/09/2019 et 20/11/2023	50
Figure IV.13. La variation spatio-temporelle de la turbidité dans le lac du barrage	51
Figure IV.14. La variation de la salinité de l'eau du barrage pour les dates 27/09/2019 et 20/11/2023	52
Figure IV.15. La variation spatio-temporelle de la salinité dans le lac du barrage	53
Figure IV.16. La variation des matières en suspension dans le lac du barrage pour les dates de 27/09/2019 et 20/11/2023	54
Figure IV.17 La variation spatio-temporelle des matières en suspension dans le lac du barrage	55

Introduction générale

Introduction générale

Les eaux en Algérie comprennent deux types principaux de ressources : les eaux superficielles et les eaux souterraines. Les eaux superficielles sont estimées à 11 milliards de mètres cubes, stockées dans les barrages, tandis que les eaux souterraines sont également exploitées mais sont moins abondantes [1].

La qualité de l'eau en Algérie est un sujet préoccupant. Les eaux superficielles et souterraines sont un peu polluées en raison des rejets de déchets urbains et industriels, et les barrages s'ensavent progressivement, ce qui pose des problèmes écologiques et environnementaux. De nombreuses techniques existent pour évaluer les paramètres de qualité de l'eau des barrages et quantifier les éléments physiques et chimiques (température, pH, salinité, conductivité, turbidité, matières en suspension), ainsi que plusieurs indicateurs de charge polluante.

Dans les études récentes, les techniques de télédétection ont été utilisées pour détecter les changements à la surface de la terre et pour calculer divers paramètres liés à la pollution marine et terrestre. Notre recherche sur le barrage de Telesdit se concentre sur la création d'une méthodologie appropriée pour établir et suivre les indices de qualité de l'eau de la surface du barrage en utilisant la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG). Les données des images satellitaires sont combinées avec des modèles empiriques pour estimer la turbidité, les matières en suspension et la concentration des sédiments dans la méthodologie proposée.

Notre étude vise à utiliser la télédétection et les SIG pour surveiller la variabilité spatio-temporelle de certains paramètres physico-chimiques des eaux du barrage de TELESBIT, situé dans la Wilaya de Bouira. Pour mener à bien cette étude, nous utiliserons la méthodologie suivante :

- Le premier chapitre présentera la qualité des eaux superficielles.
- Le deuxième chapitre décrira la zone d'étude.
- Le troisième chapitre abordera l'évaluation de la qualité des eaux superficielles à l'aide des SIG et de la télédétection.
- Dans le quatrième chapitre, nous présenterons et analyserons les résultats des calculs.
- Enfin, notre étude se terminera par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I. Généralités sur la qualité des eaux superficielles

Chapitre I. Généralités sur la qualité des eaux de surface

I.1. Définition de l'eau

L'eau, une substance chimique composée de molécules H_2O , est un excellent solvant liquide et est essentielle à la vie et à tous les organismes vivants connus.

L'eau peut être liquide, solide (glace) ou gazeuse (vapeur).

Les termes suivants sont liés à l'eau dans différentes situations :

Il s'agit d'un liquide incolore, inodore et sans saveur à l'état pur, composé d'un mélange d'hydrogène et d'oxygène.

I.2. L'importance de l'eau

L'eau est essentielle à la vie sur terre. Elle est essentielle à toute forme de vie et est le principal constituant des êtres vivants. Sans eau, aucun être vivant, qu'il soit végétal ou animal, ne peut survivre. En effet, la vie a commencé dans l'eau il y a environ 3 milliards d'années. L'eau est essentielle à de nombreuses fonctions biologiques, y compris le transport des nutriments, la régulation de la température corporelle, la lubrification des articulations et l'élimination des déchets métaboliques. De plus, de nombreuses activités quotidiennes, telles que la cuisine, l'hygiène personnelle et l'irrigation des cultures, nécessitent de l'eau. Pour résumer, l'eau est non seulement essentielle à la survie des organismes vivants, mais elle est également essentielle à la propreté, à la santé et au bien-être de l'humanité.

I.3. Cycle hydrologique

Le cycle hydrologique, également connu sous le nom de cycle de l'eau, décrit le processus naturel de circulation de l'eau sur Terre. Il s'agit d'un processus continu qui implique l'évaporation de l'eau à partir de la surface de la Terre, la formation de nuages, la précipitation, l'infiltration de l'eau dans le sol, le ruissellement de l'eau vers les rivières et les océans, et la recharge des nappes phréatiques. Le cycle hydrologique est alimenté par l'énergie solaire, qui fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau à partir de la surface de la Terre. Le cycle hydrologique est essentiel pour maintenir l'équilibre de l'eau sur Terre et pour soutenir la vie des êtres vivants. Il est également important pour l'agriculture, la production d'énergie hydroélectrique et d'autres activités humaines qui dépendent de l'eau [2].



Figure I.1. Cycle biogéochimique de l'eau

I.4. Les réservoirs d'eau

Les réservoirs d'eau existants sur terre comprennent principalement les suivants :

1.4.1 La biosphère

- a. Les océans et les mers (eau salée)
- b. Glaciers et calottes (eau douce solidifiée)

1.4.2 Les eaux continentales

- a. Les eaux superficielles telles que les lacs, les cours d'eau et les marais
- b. Les nappes d'eau souterraines sont des nappes d'eau douce liquide.

1.4.3 Atmosphère

La vapeur d'eau gazeuse

1.5 La répartition des sources d'eau sur Terre

Les océans et les mers représentent 97 % de l'eau.

Les glaciers et les nappes d'eau souterraine représentent 2 % de l'eau.

Les eaux douces de surface (lacs, cours d'eau, humidité du sol) représentent 0,1 % de l'eau [3].

Cependant, environ 0,7 % de l'eau douce est disponible et exploitable par les humains [4].

I.6. Utilisations et consommation de l'eau

De nombreuses activités utilisent l'eau, notamment dans le traitement, la fabrication et le lavage. La production primaire d'énergie et la production d'électricité nécessitent également beaucoup d'eau.

Les activités agricoles, l'irrigation, l'arrosage des animaux et l'utilisation domestique sont également des utilisations importantes de l'eau.

I.6.1 Utilisations domestiques

Selon le code de l'environnement, l'utilisation domestique de l'eau est la quantité d'eau destinée à la satisfaction des besoins des personnes à domicile. Elle est présente dans toutes les activités qui composent notre vie quotidienne. Toilette, différents lavages, déchets, à boire, à cuisiner et même à arroser les jardins de quelques Construire des bâtiments [5].

Aujourd'hui, 10 % de la consommation d'eau est utilisée dans les maisons. D'eau mondiale, avec des variations importantes selon le niveau et le mode de vie des pays. Selon les directives de l'OMS, la quantité disponible doit être suffisante. 1 à 20 L par personne et par jour) et fournis régulièrement.

I.6.2 Utilisations agricoles

Environ 70 % des ressources en eau douce disponibles sur Terre sont utilisées par l'agriculture, qui est le plus gros utilisateur d'eau au monde [6].

Historiquement, la croissance du secteur agricole et l'augmentation de sa productivité reposent sur un usage intensif de l'eau pour l'irrigation tout en respectant les équilibres naturels des écosystèmes [7].

I.6.3 Utilisations industriels

L'eau est utilisée dans le domaine industriel dans divers processus, y compris la production, les réactions chimiques, le refroidissement des appareils et la production de vapeur pour l'entraînement direct. Ainsi, presque toutes les chaînes de production et de transformation des produits que nous consommons contiennent de l'eau : (métaux, plastiques, produits pétroliers, produits alimentaires...). L'eau réellement consommée par l'industrie est de plus en plus recyclée et réutilisée, ce qui signifie qu'elle ne retourne pas au milieu naturel [8].

I.7. La pollution de l'eau

I.7.1. Définition de la pollution de l'eau

La pollution de l'eau est une dégradation physique, chimique, biologique ou bactériologique de ses qualités naturelles, provoquée par l'homme et ses activités. Elle perturbe les conditions de vie de la flore et de la faune aquatiques ; elle compromet les utilisations de l'eau et l'équilibre du milieu naturel.

I.7.2 Les type de pollution de l'eau

La pollution de l'eau peut prendre différentes formes, notamment :

a. Pollution chimique

Causée par des produits chimiques tels que les pesticides, les métaux lourds, les produits pharmaceutiques et les produits chimiques industriels.

b. Pollution organique

Causée par des matières organiques telles que les déchets humains et animaux, les engrais et les pesticides.

c. Pollution bactériologique

Causée par des bactéries et des virus provenant de déchets humains et animaux.

d. Pollution thermique

Causée par l'augmentation de la température de l'eau due aux rejets d'eau chaude provenant de centrales électriques et d'autres installations industrielles.

e. Pollution physique

Causée par des éléments minéraux en suspension tels que le sable, les limons et les argiles, entraînés par les pluies et les inondations.

I.7.3. Les sources de la pollution de l'eau

La pollution de l'eau peut venir de diverses sources, principalement liées aux activités humaines. Voici quelques exemples de ces sources :

a. Activités industrielles

Les rejets de produits chimiques, de métaux lourds et d'autres polluants issus des industries contribuent fort à la pollution de l'eau.

b. Agriculture

Les pesticides et les engrais utilisés dans l'agriculture peuvent entraîner une pollution chimique et nutritive de l'eau.

c. Domestique

Les eaux usées contenant des produits ménagers et des déchets domestiques peuvent contribuer à la pollution de l'eau

d. Urbanisation

Les rejets d'eau usée provenant des collecteurs d'égouts et des eaux pluviales contribuent à la pollution de l'eau

e. Transports maritimes

Les navires et les opérations portuaires peuvent entraîner des fuites d'huile et d'autres polluants dans les eaux marines

f. Naturelle

Certaines sources de pollution de l'eau peuvent être naturelles, comme les érosions des sols, les glissements de terrain et les écoulements de minerais

I.8. Paramètres de mesure de la qualité de l'eau

I.8.1. Paramètres physico-chimiques

a. Le potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH est une grandeur invariable. Un indice pour évaluer l'activité de l'ion hydrogène dans une solution. Même si la proportion est très faible, l'eau pure contient la même quantité d'ions hydronium H_3O^+ et d'hydroxyde HO^- . Elle demeure neutre. Parce que la concentration en ions hydronium détermine le pH d'un milieu donné. La relation suivante fournit cela : Le pH est égal à $-\log [H_3O^+]$. Ainsi, il y a plus d'ions hydroniums dans un milieu acide que dans l'eau pure. Cependant, il y a une plus grande quantité d'ions hydroxydes dans un milieu basique que dans l'eau pure [9].

b. La salinité

La salinité est une caractéristique de l'eau de mer qui est essentielle à l'étude de l'environnement marin [10].

Elle correspond à la quantité de sels présente dans un kilogramme d'eau. La conductivité d'une eau peut être déduite à l'aide de l'évaluation de la salinité, qui est exprimée en UPS : Unité Pratique de Salinité, qui équivaut environ à 1 mg/g de sel. L'eau de mer a une salinité moyenne de 35 UPS, soit 35 g/kg d'eau, l'eau saumâtre est de 5 à 18 UPS et l'eau douce est inférieure à 0,5 UPS [11].

c. La conductivité

La mesure de la conductivité électrique permet une évaluation rapide mais très précise de la minéralisation globale de l'eau [12].

La conductivité d'une eau naturelle est de 50-150 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La multiplication de la valeur de la conductivité par un facteur empirique dépendant de la nature des sels dissous et de la température de l'eau peut être utilisée pour estimer la quantité totale de matières dissoutes. La connaissance du contenu en sels dissous est cruciale car chaque organisme aquatique a ses propres besoins [13].

Du point de vue qualité de l'eau, on a le classement suivant :

Tableau I.1: Qualité de l'eau en fonction de la conductivité électrique [14]

Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Qualité de l'eau
50 à 400	excellente
400 à 750	bonne qualité
750 à 1500	médiocre mais eau utilisable
> à 1500	minéralisation excessive

d. La température

Est une grandeur physique qui a un impact sur la densité, la viscosité, la solubilité des gaz et des molécules, ainsi que sur la vitesse des réactions chimiques. La température peut varier considérablement en fonction des conditions locales, allant de quelques degrés sous zéro jusqu'à des centaines de degrés dans les conditions extrêmes. Un thermomètre ou un thermomètre d'eau peuvent être utilisés pour mesurer la température de l'eau.

e. La turbidité

La transparence de l'eau est liée à sa turbidité. Elle indique la quantité de matière en suspension. Les eaux troubles contiennent des substances finement divisées telles que les grains de silice, la matière organique et les limons. Pour avoir une bonne qualité de l'eau, il est nécessaire de maintenir une turbidité inférieure à 5 NTU [15].

f. La matière en suspension (MES)

Mesure des particules en suspension (minérales et organiques) dans les eaux usées [16].

g. L'oxygène dissous

Seuls les principaux facteurs de contrôle de la variation de l'OD, notamment l'influence de l'activité autotrophe et hétérotrophe en relation avec la productivité du milieu, ainsi que l'effet de la température sur les concentrations en oxygène, sont mentionnés dans l'eau sous forme dissoute [17].

Le nombre de milligrammes d'oxygène (O_2) par litre d'eau (mg/L) ou le pourcentage de saturation peuvent être utilisés pour déterminer la teneur en OD de l'eau. Sa valeur dépend de l'origine de l'eau [18].

h. La demande chimique en oxygène (DCO)

Mesure la quantité d'oxygène nécessaire pour décomposer complètement la matière organique (biodégradables ou non) dans l'eau (Pollution biodégradable et non). Dans les eaux usées domestiques, le rapport DCO/DBO \approx 2.5) [16].

i. Demande biochimique en oxygène (DBO5)

Mesure de la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes pour assurer l'oxydation des matières organiques biodégradables dans l'eau (Pollution biodégradable) [16].

j. La dureté

La somme des concentrations en Ca^{++} et Mg^{++} (dureté calcique et magnésienne) est appelée dureté totale d'une eau ou titre hydrotimétrique total (TH). La méthode xométrique complexe à l'EDTA est fréquemment utilisée. La dureté peut être représentée soit en ppm (ou mg/L) de CaCO_3 , soit en degré français (symbole °F). 1 degré français équivaut à 10^{-4} mol/l de calcaire m ou/et de magnésium. En [19].

Tableau I.2 Qualité de l'eau en fonction de la valeur du TH [20]

Eau	Eau douce	Eau calcaire	Eau dure
TH (°F)	0 à 15	15 à 25	Au-delà de 25

k. Eléments chimiques toxiques dangereux

Ils sont fréquemment recherchés dans les eaux des barrages et des forages et se composent d'une grande variété de substances telles que les pesticides, les métaux lourds (tels que le plomb, le cadmium, le chrome, le nickel, etc.), les hydrocarbures. En principe, il est interdit de rejeter tous ces produits, mais la mauvaise gestion ou le mauvais traitement de l'eau rejeté par les industries dans les réseaux d'eau superficielles [21].

I.8.2. Paramètres microbiologiques**a. Germes pathogènes**

Les eaux peuvent contenir des organismes (virus, bactéries, protozoaires, helminthes...) qui peuvent être pathogènes. Il est d'usage de se contenter de mesurer des «germes tests » qui comprennent les coliformes du genre *Escherichia coli* et les streptocoques fécaux dans l'eau.

La présence de germes spécifiques dans l'eau peut indiquer une contamination ou la possibilité de contamination par ces pathogènes [22].

b. Bactérie (*Escherichia coli*)

L'*Escherichia coli* existe indépendamment et est souvent confondu avec l'eau, mais il peut être un bon indicateur de contamination fécale d'origine causée par les eaux usées déversées dans les surfaces d'eau [23].

c. Virus

Les effluents urbains contiennent également une grande quantité de virus (tels que le poliovirus, l'adénovirus et l'hépatite A), mais ils sont rarement observés. Cependant, les examens de ses germes sont plus courants dans les eaux superficielles [24].

d. Parasites

Les parasites comme les formes enkystées des amibes et les œufs de ténia sont rarement recherchés. Car le travail sur du matériel biologique est extrêmement complexe et soumis aux variations inhérentes aux microorganismes, l'ensemble des analyses réalisées dans le cadre de la recherche d'une contamination bactériologique doit toujours être interprété avec précaution. La présence de ces organismes dans l'eau est plus souvent due à une dégradation de la qualité de la ressource en eau, à une mauvaise protection ou à un manque d'entretien des ouvrages de captage. Le paramètre d'évaluation de la qualité bactériologique de l'eau est plus crucial et doit être strictement respecté. Étant donné que la présence de ces germes dans l'eau indique la possibilité de présence de germes pathogènes [24].

I.9. Normes des paramètres physico-chimiques de l'eau potable

L'eau potable doit répondre à des normes physiques, chimiques et bactériologiques précises pour être certifiée sa qualité et destinée à la consommation humaine (tableau I.3).

Tableau I.3. Normes et recommandations pour quelques paramètres de qualité de l'eau potable en Algérie [25].

Paramètres	Unités	Valeurs limites
Température	°C	Inférieur à 25°C
Potentiel hydrique		Entre 6.5-8.5
L'oxygène dissous	mgO ₂ /L	5 mgO ₂ /L
Turbidité	NTU	Ne doit pas dépasser 5 NTU
Conductivité	µs/cm	En dessous de 2800 µs/cm
Sulfate	[mg]/l	Maximum admissible [500] mg/l
Phénols	mg/l	Entre 0.001-0.002
DBO ₅	mg/l	5
DCO	mg/l	20
Dureté (TH)	mg/l	en CaCO ₃ 500
<i>Escherichia Coli</i>	n/100ml	0
Chlorure	mg/l	Maximum admissible [200] mg/l
Bactéries sulfitoréductives	n/20ml	0

I.10. Conclusion

Ce chapitre met en évidence l'importance vitale de l'eau pour la survie de la vie sur terre, en détaillant son cycle, ses différents réservoirs et ses multiples usages. Il analyse également les dangers de pollution qui menacent ces précieuses ressources, tout en examinant les critères utilisés pour mesurer leur qualité. En conclusion, il insiste sur l'impératif d'une gestion éclairée de l'eau afin de protéger notre environnement et d'assurer la santé et le bien-être des communautés humaines.

Chapitre II. Présentation de la région d'étude

Chapitre II. Présentation de la région d'étude

Introduction

Le barrage de Tilesdit est un projet d'importance pour la wilaya de Bouira et les wilayas voisines. Il permet de répondre aux besoins en eau potable et industrielle, ainsi que d'irrigation, et contribue au développement économique et social de la région.

II.1. Présentation de la région d'étude

II.1.1. Présentation et localisation du barrage TILESDDIT

Préalable et indispensable à toute étude efficace, la connaissance du milieu naturel du bassin doit s'acquérir dans de multiples domaines (topographie, géologie, climatologie, hydrologie et la biogéographie, etc.). Pour ces raisons, un choix a été fait Le barrage de TILESDDIT a été choisi comme bassin d'application de notre travail pour la diversité des données qui y sont disponibles

Le barrage de **Tilesdit** ou les échantillons étudiés sont prélevés est situé dans la partie septentrionale centrale d'Algérie, à 18km à l'Est de la ville de Bouira. Le site du barrage est à 4km de la RN n°5 Alger – Constantine. A l'aval, à 7km du site, on signale la confluence de l'oued Eddous avec Zaiane avec la formation de l'oued Sahel.

C'est un barrage récent, mis en service à la fin de l'année de 2005. La retenue a une capacité totale maximale de 167 millions de m³. La retenue est destinée à la régulation de l'écoulement de oued Eddous pour l'alimentation en eau potable ainsi pour l'irrigation des terrains de cette dernière et même les wilayas qui l'entourent comme Bordj Bou Arreridj et M'sila [26].

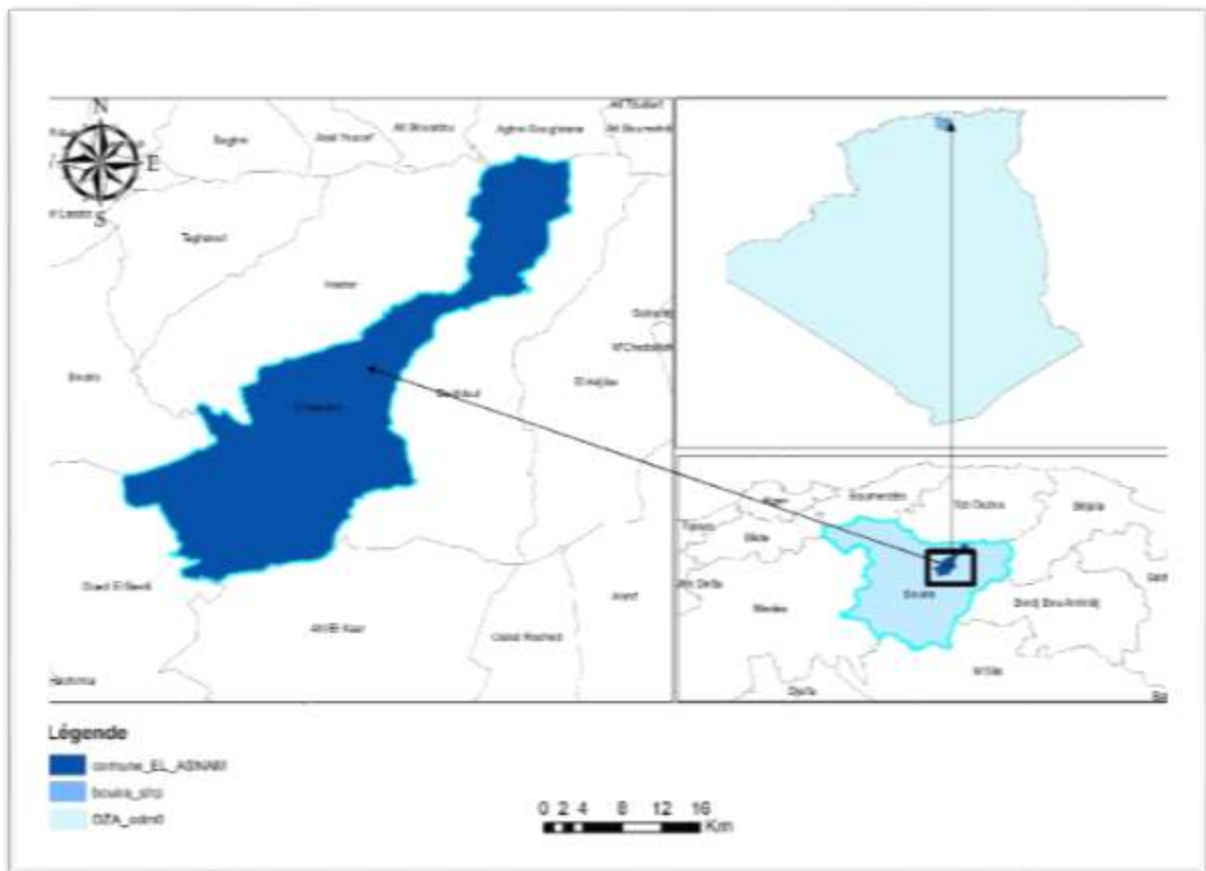


Figure II.1. Localisation du barrage Tilesdit wilaya de Bouira.

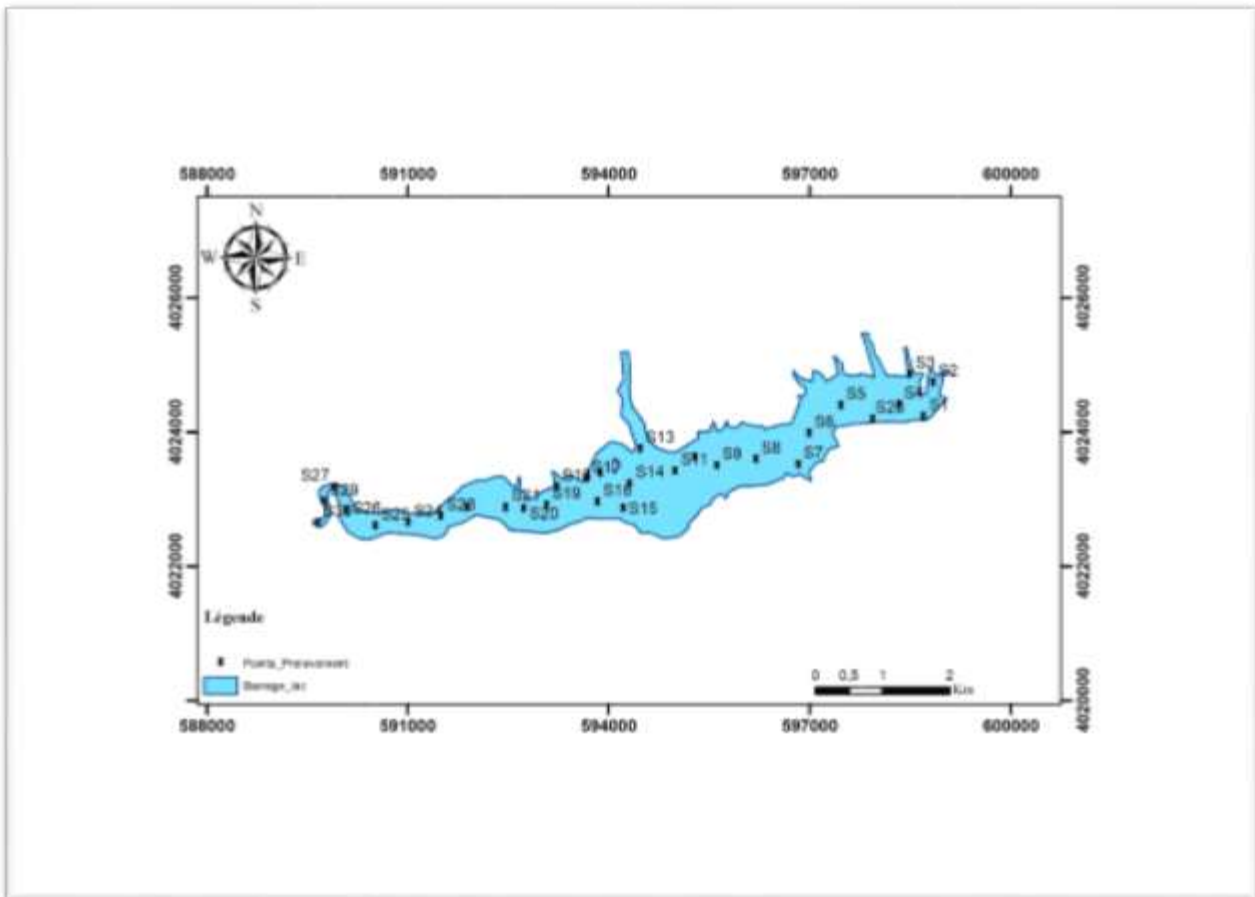


Figure II.2. Carte de délimitation du lac du barrage de Tilesdit.

II.1.2. Historique de réalisation du barrage

Le barrage de **Tilesdit** a été réalisé par l'avenant n°1 du marché n° 157/ANB/SM/93 relatif à la construction du barrage signé entre l'ANB et « SELKHOZPROMEXPORT » le 3 octobre 1993, le chantier a été transféré au mois de novembre 1993 à l'entreprise « ZARUBEZZHVOIDSTROY », Russie, sans changer l'ensemble des clauses contractuelles entre le Ministère des ressources en eau de la RADP et l'entreprise. Initialement, en septembre 1997, l'entreprise a entamé les travaux de construction et les finalisé en 2004.

D'après l'importance de ses ouvrages, de la hauteur de la digue, du milieu géologique de la fondation, de l'existence de beaucoup de localités, de routes à l'aval, l'ouvrage de TILES-DIT est classé de gros travaux [27].

II.1.3. Géologie, hydrogéologie et géomorphologie de la région

II.1.3.1. Structure géologique

Sur le plan géologique, la région étudiée se trouve dans la partie moyenne du domaine de plissement mésozoïque - cénozoïque qui renferme les chaînes montagneuses de la Grande Kabylie et de l'Atlas Tellien dans le trait distinctif est la présence des systèmes de nappes miocène chevauchées dans la direction sud. La composition lithologique des formations déluviales et proluviales est hétérogène, argiles et limons argileux avec l'inclusion des roches mères [28].

II.1.3.2. Hydrogéologie

D'après la nature d'alimentation, l'étendue et la décharge des eaux souterraines fait distinguer les nappes aquifères et les complexes. La couche aquifère est reliée hydrauliquement aux eaux souterraines des dépôts déluviaux – proluviaux et les roches-mères de l'aquitainien. [29].

Le niveau des nappes d'eau souterraine varie en fonction du régime hydrologique des cours d'eau à son tour, dépend des précipitations atmosphériques et conditionné par la structure géologique, la composition et la nature de la roche mère. Alors que l'amplitude des variations du niveau de la nappe souterraine du bassin de barrage TILES-DIT est de 1,5 à 2,5m, le coefficient d'infiltration des terrains sous-sol varie de 3 à 60 m/jour.

Les eaux infiltrées sont généralement douces, peu minéralisées, chlorurées, sodiques et magnésiennes sodiques. [30].

II.1.3.3. Géomorphologie et topographie du bassin

Dans la zone du barrage, la vallée de l'oued Eddous qui porte le nom de Sahel à la direction sub latitudinale fait partie du plateau limité par la chaîne montagneuse du Djurdjura et la crête de Biban au sud est le seul territoire favorable sur l'oued Eddous permettant la formation d'une retenue avec un volume utile de 60 millions m³.

La morphologie de la vallée dans cette zone est conditionnée par les affluents des rives gauche et droite, son bassin caractérise par la rive gauche affouillée, avec les pentes raides et la rive droite douce avec le lit majeur et la première terrasse pratiquement aplanis. Dans le site du barrage la largeur de la vallée de l'oued est de 80m, en aval, dans le secteur de confluence avec l'oued Barbar, la vallée s'élargit jusqu'à 3-4Km [31].

II.1.4. Climatologie de site du barrage

Les conditions climatiques de la région envisagée s'expliquent par sa situation géographique, caractère de circulation atmosphérique, l'effet thermique de la mer et le relief environnant.

Les facteurs climatiques principaux sont caractérisés d'après les données des observations réalisées par les stations météo de la région [32].

II.14.1. Température de l'air

La région du barrage de TILES DIT se caractérise par un été chaud et sec et un hiver relativement doux. La température annuelle moyenne est de 15,1°C à 18,8°C. Le mois de Janvier est le plus froid (7,5° – 11,0°). Les baisses maximales observées de la température sont de -1.1°C.

Le mois d'Aout est le plus chaud (24,1° – 29,2°). Les températures estivales maximales peuvent dépasser 46° [32].

II.1.4.2. Les précipitations

Dans le bassin de l'oued Eddous les précipitations ont une répartition irrégulière. On observe un net zonage vertical dans la distribution des précipitations atmosphériques avec une augmentation à la hauteur. Le taux annuel de pluviométrie dans le bassin est de 655mm.

Les taux maximaux journaliers de précipitation étant un facteur majeur de la formation des crues catastrophiques sur les versants de petites dimensions tombent pendant la période des cyclones méditerranéens. La répartition annuelle de précipitation est caractérisée par l'existence de deux périodes ; la période humide (novembre – avril) avec 80% de pluviométrie annuelle et la période sèche (mai – octobre) [32].

II.1.4.3. Régime des vents

Les vents d'orientation occidentale et orientale prédominent dans la région. Les caractéristiques du régime des vents sont présentées à la base des résultats d'observation météorologique de M'Chedallah disposant des informations les plus complètes. Les vitesses moyennes maximales du vent feront 28 m/s, mais elle peut atteindre 42 m/s en été. [30]

II.1.5. Caractéristique hydro chimique d'eau

L'étude de la composition chimique et physique de l'eau de l'oued Eddous dans le site de l'ouvrage hydraulique a été effectuée pendant une période suffisamment longue, de 1976 à 1985,

270 échantillons ont été prélevés pour cette étude avec le changement des débits de 0.01 à 176 m³/s. La systématisation et l'analyse des résultats des observations ont montré une augmentation de l'hydraulicité accompagnée de la baisse de minéralisation d'eau [33].

Conclusion

Le barrage de Tilesdit représente un projet d'une grande importance pour la wilaya de Bouira et les régions environnantes. Il joue un rôle crucial dans la satisfaction des besoins en eau potable, industrielle et pour l'irrigation, tout en contribuant au développement économique et social de la zone. D'une capacité de 150 millions de mètres cubes, ce barrage est spécifiquement conçu pour approvisionner en eau potable la ville de Bouira, les municipalités voisines, ainsi que la zone industrielle de Sidi Khaled, tout en assurant l'irrigation des terrains du Plateau d'El Asnam et de la vallée du Sahel. Situé sur l'Oued Eddous, il a été mis en service en 2009. Le barrage de Tilesdit illustre parfaitement l'importance des infrastructures hydrauliques dans le processus de développement économique et social d'une région.

Chapitre III. Utilisation de SIG et de la télédétection dans l'évaluation de la qualité des eaux

Chapitre III. Utilisation des SIG et de la télédétection dans l'évaluation de la qualité des eaux

III.1. Introduction

La qualité de l'eau des rivières servant notamment à alimenter la Guyane en eau potable est difficile à mesurer en raison de l'importance du réseau hydrographique et des difficultés d'accès au territoire. L'objectif de ce chapitre est de pouvoir suivre cette qualité et les pressions exercées sur les eaux de surface, à travers le coefficient de turbidité, de salinité et de matières en suspension, par télédétection et Système d'Information Géographique, et ainsi réduire les mouvements sur le terrain.

III.2. Matériel et Protocol

L'étude et l'évaluation de la qualité de l'eau à l'aide des SIG et des images satellitaires, l'objet du présent travail, a été envisagée afin de doter un système de surveillance spatiotemporelle. Des outils de base pouvant contribuer à une gestion durable du patrimoine en question, en apportant des éléments de réponse aux questions que l'on se pose et qui constituent la problématique de l'étude.

Pour étudier la problématique posée on a divisé le travail sous deux (02) ateliers de pratique :

1. Cartographie des paramètres physico-chimiques
2. Acquisition et traitement des données satellitaires

Les étapes de travail sont résumées et schématisées dans la Figure III.1 :

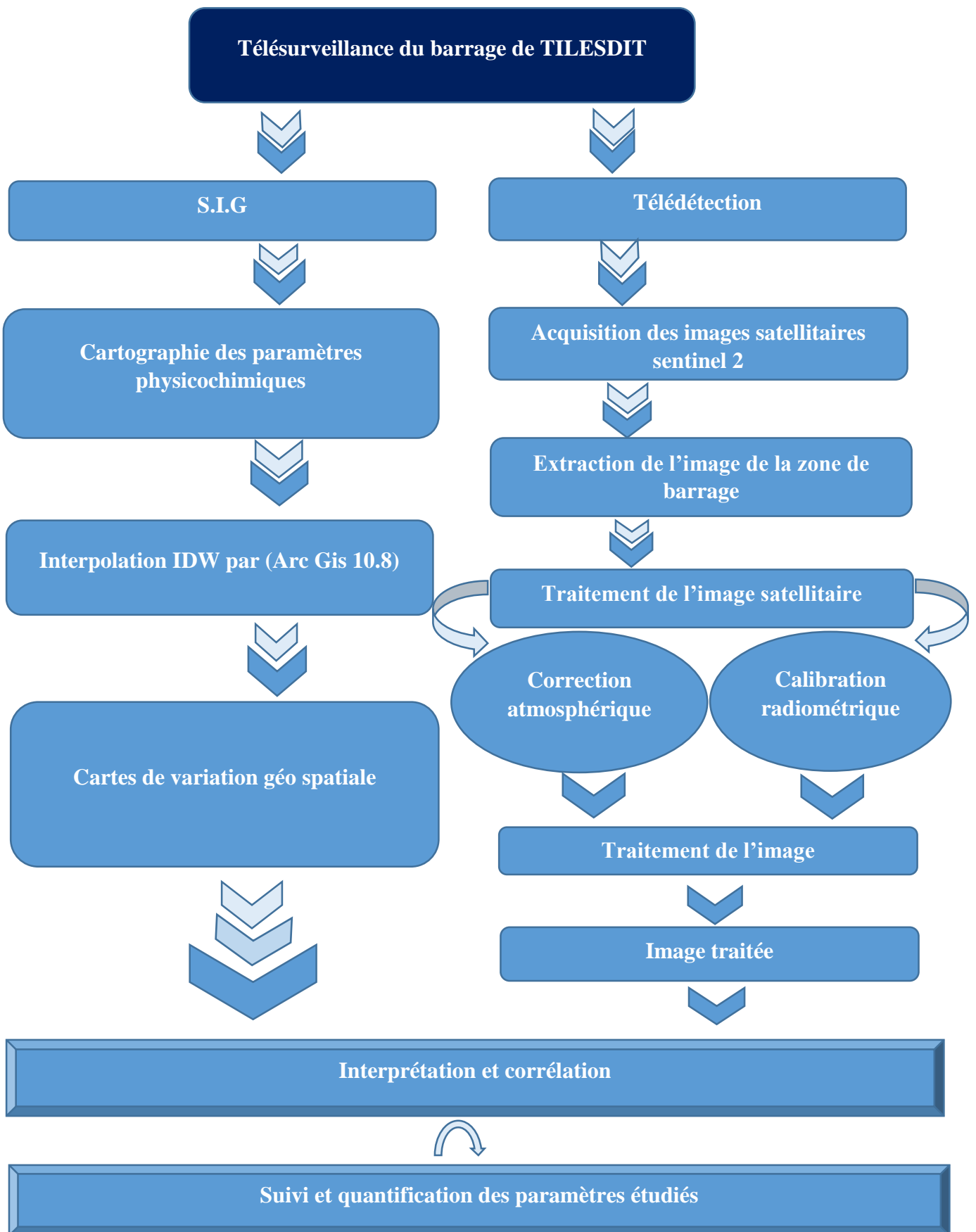


Figure III.1. Les étapes de travail

III.3. Système d'Information Géographique

La nécessité de mettre en place des instruments de surveillance et de gestion de notre territoire et milieu géographique paraît chaque jour comme une tâche incontournable. Comme le souligne **Caloz** (1997) gérer c'est prévoir, et prévoir l'évolution d'un phénomène suppose que l'on connaisse sa dynamique, donc les paramètres qui le déterminent et leurs rôles respectifs. Cette gestion nécessite des opérations qui représentent un volume de données sur le territoire considérable et des capacités de traitement de même ordre. C'est ce qui a donné naissance aux SIG (Systèmes d'information géographique) [34].

III.3.1. Historique

Les premiers SIG opérationnels sont apparus dans les années 1960 au Canada et aux Etats Unis. Le pionnier est indiscutablement le Canadian Geographic Information System (1964) qui rassemble des informations relatives à l'usage du sol, et des données concernant l'environnement, sur une grande partie du territoire canadien. Deux autres réalisations avantgardistes méritent d'être mentionnées : le New York Land Use Information System (1967) et le Minnesota Information System (1969). Depuis cette époque, les coûts et les difficultés techniques ont considérablement diminué [34].

III.3.2. Définitions et concepts associés

Un système d'information géographique ou SIG (en anglais, géographique information system ou GIS) est un système d'information conçu pour recueillir, stocker, traiter, analyser, gérer et présenter tous les types de données spatiales et géographiques. L'acronyme SIG est parfois utilisé pour définir les « sciences de l'information géographique » ou « études sur l'information géospatiale ». Cela se réfère aux carrières ou aux métiers qui impliquent l'usage de systèmes d'information géographique et, dans une plus large mesure, qui concernent les disciplines de la géo-informatique (ou géomatique). Ce que l'on peut observer au-delà du simple concept de SIG a trait aux données de l'infrastructure spatiale. Dans un sens plus général, le terme de SIG décrit un système d'information qui intègre, stocke, analyse et affiche l'information géographique. Les applications liées aux SIG sont des outils qui permettent aux utilisateurs de créer des requêtes interactives, d'analyser l'information spatiale, de modifier et d'éditer des données par l'entremise de cartes et d'y répondre cartographiquement. La science de l'information géographique est la science qui sous-tend les applications, les concepts et les systèmes géographiques. Le SIG est un terme général qui se réfère à un certain nombre de technologies,

de processus et de méthodes. Celles-ci sont étroitement liées à l'aménagement du territoire, la gestion des infrastructures et réseaux, le transport et la logistique, l'assurance, les télécommunications, l'ingénierie, la planification, l'éducation et la recherche, etc. C'est pour cette raison que les SIG sont à l'origine de nombreux services de géolocalisation basés sur l'analyse des données et leur visualisation. Les SIG permettent également une mise en relation de données qui peuvent, sur le papier, sembler très éloignées. Quelle que soit la façon d'identifier et de représenter les objets et événements qui illustrent notre environnement (coordonnées, latitude & longitude, adresse, altitude, temps, médias sociaux, etc.), les SIG permettent de réunir toutes ces dimensions autour d'un même référentiel, véritable colonne vertébrale du système d'information. Cette caractéristique clé du SIG permet d'imaginer de nouvelles applications et de nouveaux débouchés en matière de recherche scientifique [35].

III.3.3. Objectifs des SIG

- Définir les bases de la référence spatiale.
- Développer et utiliser des outils pour localiser les différents éléments du territoire, existants ou à mettre en place.
- Intégrer ou rendre intégrables les données obtenues en fonction des systèmes de référence choisis.
- Offrir des données et informations de qualité.
- Améliorer leurs traitement, stockage et diffusion grâce à l'informatique.
- Analyser différents scénarios décisionnels à partir des informations obtenues [34].

III.4. SIG et gestion intégrée de la qualité de l'eau (GIRE)

III.4.1. Définition de La Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE)

Plusieurs définitions ont été données à la GIRE. Pour le Partenariat Mondial de l'Eau (2000), la GIRE est un processus qui encourage la mise en valeur et la gestion coordonnée de l'eau, des terres et des ressources associées en vue de maximiser de manière équitable le bien-être économique et social qui en résulte d'une manière équitable, sans compromettre la durabilité des écosystèmes vitaux (GWP).

Selon Hofwegen et Jaspers (1999), il s'agit d'un processus consistant à attribuer des fonctions à des systèmes d'eau, à établir des normes, à les mettre en œuvre (surveiller) et à les gérer. Cette approche implique la collecte de données, l'étude de processus physiques et socioéconomiques,

la prise en compte des divers intérêts et la prise de décisions concernant la disponibilité, l'exploitation et l'utilisation des ressources inondables.

Selon Calder (1999), la GIRE implique également une planification et une gestion coordonnées des terres, de l'eau et d'autres ressources naturelles afin de garantir une utilisation équitable, efficace et durable.

Enfin, la GIRE, selon le RIOB (atelier de mars 2000) serait « un outil visant à utiliser durablement l'eau pour répondre aux différents besoins, en permettant à la fois :

- De lutter contre les catastrophes naturelles et les risques d'érosion, d'inondation ou de sécheresse, en prenant en compte gestion de l'eau et de l'espace.
- De satisfaire de façon fiable les besoins des populations urbaines et rurales en eau potable de qualité, afin d'améliorer l'hygiène et la santé, et de prévenir les grandes épidémies.
- D'assurer la suffisance agroalimentaire par l'assainissement des terres agricoles et l'irrigation appropriée.
- De développer de manière harmonieuse l'industrie, la production énergétique, la pratique des loisirs et les transports par voie d'eau.
- De prévenir et de combattre les pollutions de toutes origines et de toutes natures, afin de préserver les écosystèmes aquatiques, notamment en vue de protéger la faune et d'optimiser la production piscicole pour l'alimentation, de satisfaire les besoins des différents usages et de façon plus générale préserver la biodiversité des milieux aquatiques. » (Concept GIRE, cours 2007[36]).

III.5. Relation entre la GIRE et les SIG

III.5.1. SIG, un outil d'aide à la décision

L'élaboration d'une politique de gestion des ressources naturelles, les mesures à prendre pour la prévention de catastrophes ou pour l'atténuation de leurs effets ou même pour assurer une eau de qualité et en quantité à la population, suppose que l'on dispose de toutes les informations nécessaires à la prise de décision. Les décideurs ont besoin, quelque soit leur niveau de compétence d'un outil pouvant les aider dans leur prise de décision. Dans cette partie de notre étude, nous allons proposer et analyser des cas d'étude qui mettent en évidence le caractère outil d'aide à la décision des Système d'Information Géographique.

III.6. Télédétection

III.6.1. Généralités et définitions

La télédétection est la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour observer, interpréter et gérer l'espace géographique à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes.

La télédétection permet de saisir, de reconnaître, de classer et d'évaluer des objets, des régions ou des phénomènes.

La télédétection produit des données numériques sous forme d'images.

III.6.2. Bref historique

L'histoire de la télédétection reflète l'évolution des techniques photographiques et radiométriques et parallèlement le développement de l'aviation et des véhicules spatiaux.

- La photographie aérienne conventionnelle noir et blanc :
- La photographie couleur
- la photographie proche infra-rouge se développe essentiellement autour d'applications militaires.
- L'image numérique

III.6.3. Applications de la télédétection

- les applications relatives à la géosphère
- les applications relatives à l'atmosphère et l'hydrosphère terrestre
- les applications relatives à la biosphère terrestre
- Les applications relatives au milieu marin et au littoral
- Les applications relatives à l'œkoumène (espace occupé et organisé par l'être humain).
- Utilité de la télédétection qui permet une mise à jour régulière qui n'est pas disponible avec les moyens de cartographie ou de suivi (terrain) classiques.

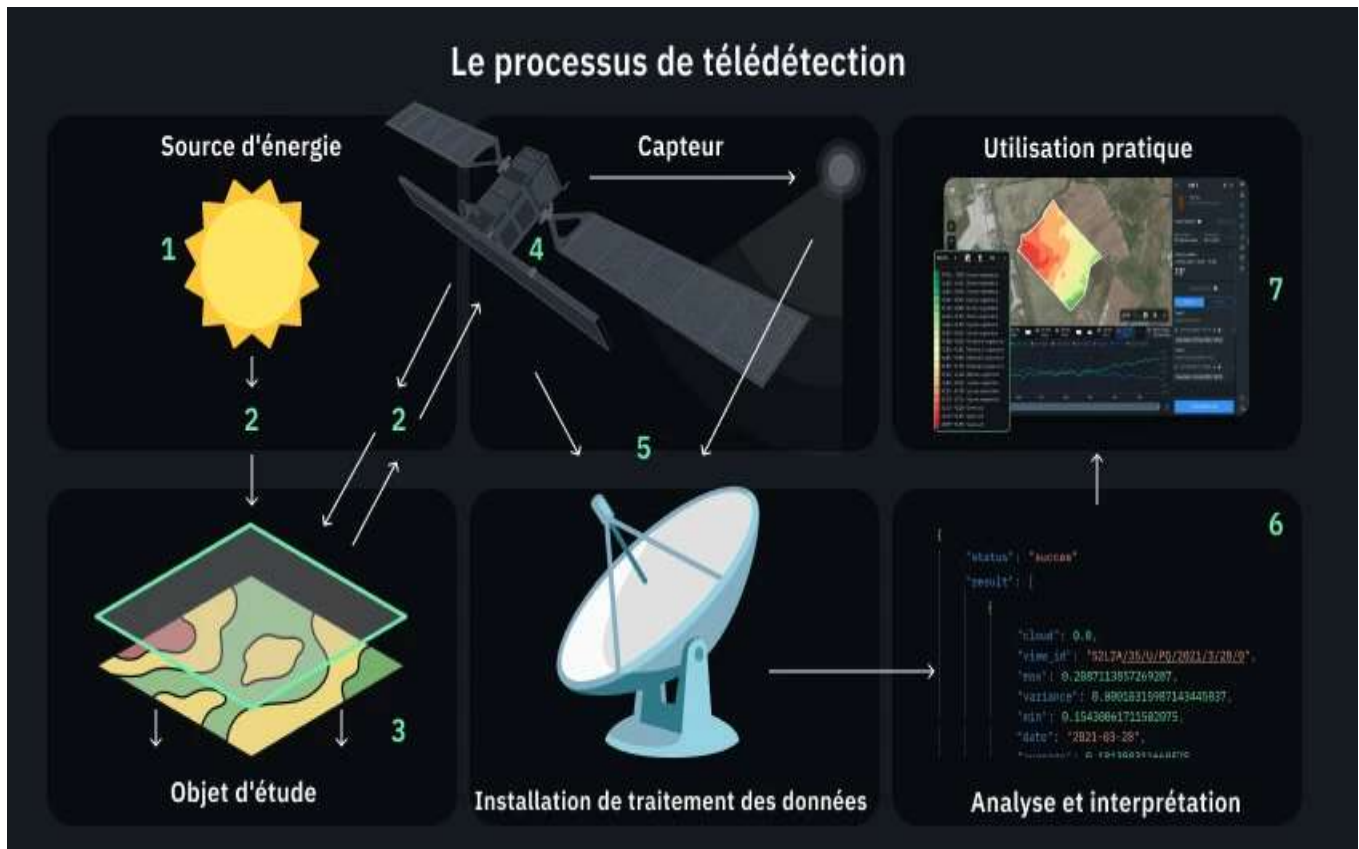


Figure III.2. Télédétection par satellite : principes, techniques et applications [37]

III.6.4. Principes de la télédétection

La reconnaissance et la distinction des objets et des surfaces se basent sur l'émission ou la réflexion d'énergie qu'ils produisent. Le principe de la télédétection, une méthode qui détecte et enregistre cette énergie rayonnante en vue d'une analyse ultérieure.

Divers objets et surfaces, tels que l'eau, le sol ou les végétaux, renvoient des niveaux variables d'énergie dans différentes plages du spectre électromagnétique. Plusieurs facteurs influent sur ce phénomène, dont les principaux sont les suivants :

Les caractéristiques de l'objet : composition chimique et physique, nature du matériau et texture de la surface.

Les caractéristiques du rayonnement : son intensité, l'angle sous lequel il frappe et la longueur d'onde correspondante [37].

III.6.5. Objectif de la télédétection

L'objectif fondamental de la télédétection est d'élargir la connaissance de notre environnement et faciliter l'interprétation des multiples processus qui affectent la planète [38].

III.7. Caractéristiques des images

Dans la mesure des données de télédétection où il existe différents types d'images (Landsat, ortho-photographie), obtenues depuis des plateformes aéroportées ou satellitaires, sont le plus souvent des images numériques structurées sous forme de matrices spatialisées, il convient de s'attacher à comprendre les spécificités de chacun d'eux. Afin de savoir ce que chaque type peut apporter et de choisir entre les différentes combinaisons vecteur / capteur, il faut notamment prendre en compte trois caractéristiques : la résolution spectrale, la résolution spatiale et la résolution temporelle [39].

III.8. Les type de Résolutions

III.8.1. La résolution spatiale

La résolution spatiale correspond à la taille du plus petit objet perceptible dans une image. Il s'agit du pixel, qui est la plus petite surface homogène constitutive d'une image numérique. Généralement la résolution spatiale est exprimée en mètre [40].



Figure III.3. Comprendre c'est quoi la résolution spatiale [41]

III.8.2. Résolution radiométrique

La Résolution radiométrique décrit la capacité de reconnaître de petites différences dans l'énergie électromagnétique et distinguer deux quantités d'énergie voisines, Par une plage dynamique : gamme de longueurs d'onde à l'intérieur de laquelle un capteur est sensible [42].

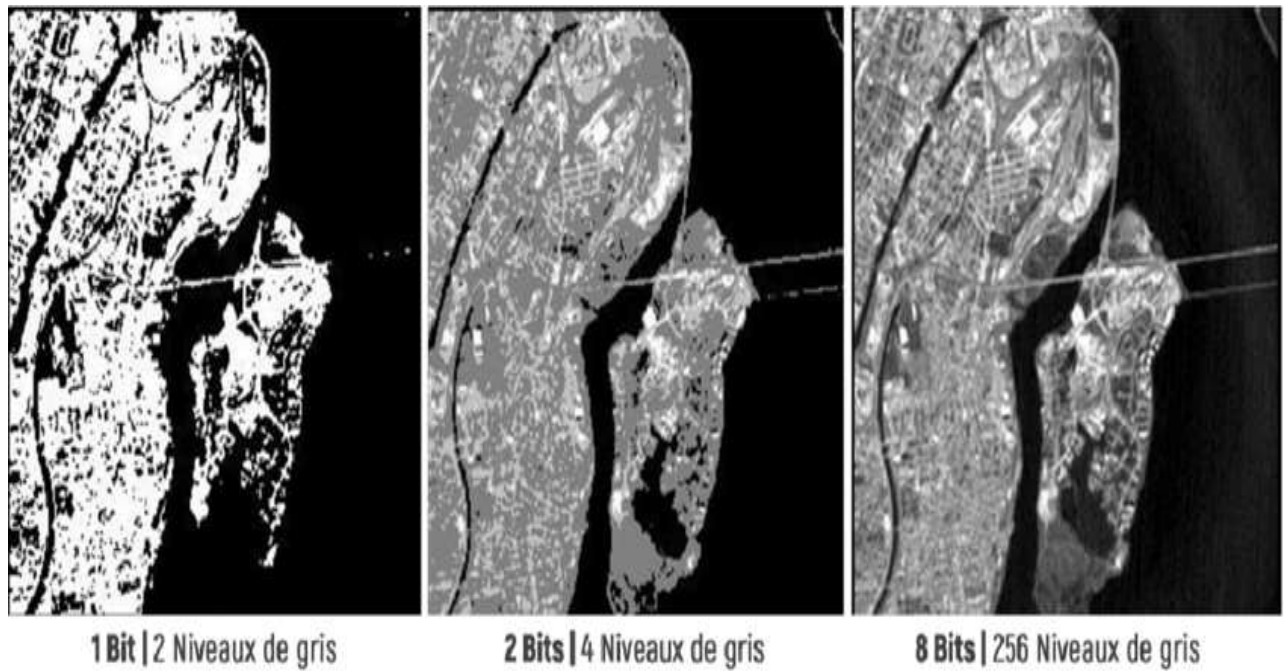


Figure III.4. Résolution radiométrique [43].

III.8.3. Résolution spectrale

La résolution spectrale correspond à l'aptitude du capteur à distinguer des rayonnements électromagnétiques de fréquences différentes. Etant donné que les objets n'absorbent pas tous la même partie du rayonnement solaire, le spectre du rayonnement réfléchi sera différent en fonction de chaque objet [42].

La spectrale est définie par le nombre de bandes ; la largeur des bandes du capteur et le pas d'échantillonnage spectral de l'instrument [40], On qualifie un capteur de haute résolution spectrale lorsque la largeur des bandes est étroite et de résolution hyper spectrale lorsque les bandes sont à la fois étroites. Une amélioration de la résolution spectrale se traduit souvent par une meilleure appréciation de la signature spectrale de la surface considérée [44].

III.8.4. Résolution temporelle ou répétitivité

Correspond à la période entre deux acquisitions de la même scène. Cette résolution ne dépend pas du capteur mais de l'orbite et du mode de manœuvre du satellite. Notons que le satellite SPOT offre la possibilité de viser un site sur commande permettant ainsi d'assurer une excellente résolution temporelle. Sans manœuvre, la résolution temporelle de SPOT est de 26 jours, 16 jours pour LANDSAT TM et 14.5 jours pour NOAA-AVHRR. C'est le cycle de

passage du satellite : dépend de la zone de chevauchement entre les fauchées adjacentes, de la capacité du satellite et de ses capteurs et de latitude [45.46.47].

III.9. Télésurveillance de la qualité de l'eau

III.9.1. Bases de la télédétection de la qualité de l'eau

La recherche soutenue par le projet EU BON a démontré que la télédétection par satellite (TDS) serait l'une des approches les plus rentables pour l'identification de la qualité de l'eau superficielle et la prévision des changements relatifs à la composition physico chimique. Il est difficile d'évaluer avec la surveillance traditionnelle la qualité de l'eau dans de courtes périodes, ce qui est essentiel pour la planification, l'évaluation et la gestion sanitaire des plans d'eau [48].

Les techniques de télédétection sont utilisées pour mesurer et effectuer le suivi à distance, pour fournir des évaluations de la distribution, de la quantité et de la qualité de l'eau de surface [49].

L'incorporation des données de télédétection dans un SIG permet le calcul et l'évaluation rapides des niveaux d'eau, des dommages et des régions en danger d'inondation et d'établir un processus de surveillance spatiotemporel. [50].

III.9.2. Interférences atmosphériques

Avant que le rayonnement électromagnétique utilisé pour la télédétection n'atteigne la surface de la Terre, celui-ci doit traverser une certaine épaisseur d'atmosphère. Les particules et les gaz dans l'atmosphère peuvent dévier ou bloquer le rayonnement incident. Ces effets sont causés par les mécanismes de diffusion et d'absorption. La diffusion se produit lors de l'interaction entre le rayonnement incident et les particules ou les grosses molécules de gaz présentes dans l'atmosphère.

Les particules dévient le rayonnement de sa trajectoire initiale. Le niveau de diffusion dépend de plusieurs facteurs comme la longueur d'onde, la densité de particules et de molécules, et l'épaisseur de l'atmosphère que le rayonnement doit franchir [51].

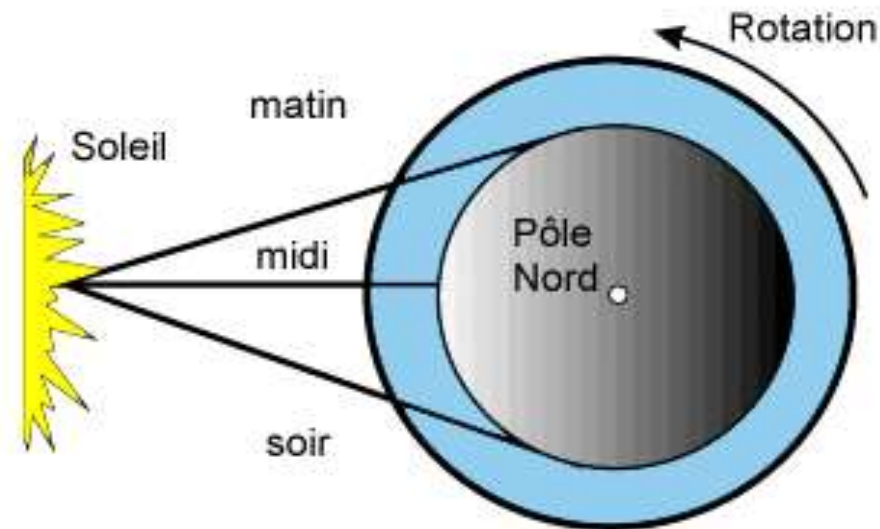


Figure III.5. Interactions avec l'atmosphère [52]

III.10. Acquisition et traitement des données satellitaires

III.10.1. La série de satellites Sentinel 2

III.10.1.a. Présentation

La mission Sentinel-2 est une mission européenne d'imagerie multispectrale à large fauchée, haute résolution, composée d'une constellation de deux satellites identiques, Sentinel-2A et Sentinel-2B, lancés respectivement en 2015 et 2017 [53].

III.10.1.b. Les caractéristiques de capture de Sentinel-2

- Mission d'imagerie multispectrale haute résolution avec 13 bandes spectrales dans le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge à ondes courtes .
- Couverture systématique mondiale des surfaces terrestres de 56° S à 84° N, des eaux côtières et de toute la mer Méditerranée .
- Revisite tous les 10 jours sous les mêmes angles de vue, avec une superposition de fauchée et des observations multiples dans certaines régions tous les 10 jours, mais avec des angles de vue différents
- Résolution spatiale de 10 m, 20 m et 60 m avec une largeur de fauchée de 290 km .
- Politique de données gratuite et ouverte pour les utilisateurs [54].

Tableau III.1. La correspondance des bandes spectrales de Sentinel 2 [55].

Satellites	Sentinelle-2 A Sentinelle-2 B		Lancé en juin 2015 Lancé en mars 2017	
Instrument de détection	Instrument multispectral (MSI)			
Largeur d'andain	290 km			
Résolution Temporelle	5 jours (à l'équateur)			
Résolution spectrale et spatiale	groupe	Longueur D'onde centrale (nm)	Région	Résolution spatiale (m)
	1	443	Aérosol côtier	60
	2	490	Bleu	10
	3	560	Vert	10
	4	665	Rouge	10
	5	705	Bordure rouge de végétation (VRE)	20
	6	740	Bordure rouge de la végétation	20
	7	783	Bordure rouge de la végétation	20
	8	842	Proche infrarouge (NIR)	10
	8a	865	NIR étroit	20
	9	940	Vapeur d'eau	60
	10	1375	Cirrus infrarouge à ondes courtes (SWIR)	60
	11	1610	SWIR	20
	12	2190	SWIR	20

III.10.a.c. Les étapes d'acquisition des images Sentinel

Plusieurs portails de téléchargement existent comme exemple :

<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>

Cette interface permet de naviguer sur une carte du monde a fin de trouver sa zone d'étude. Elle peut ensuite être définie soit en dessinant un polygone (cercle ou rectangle) sur la carte, soit en indiquant les coordonnées de la région d'intérêt. Lorsque le téléchargement terminé on obtient une image satellite sous forme tif avec un nom et chaque lettre et chiffre a une signification caractérise l'image télécharger.

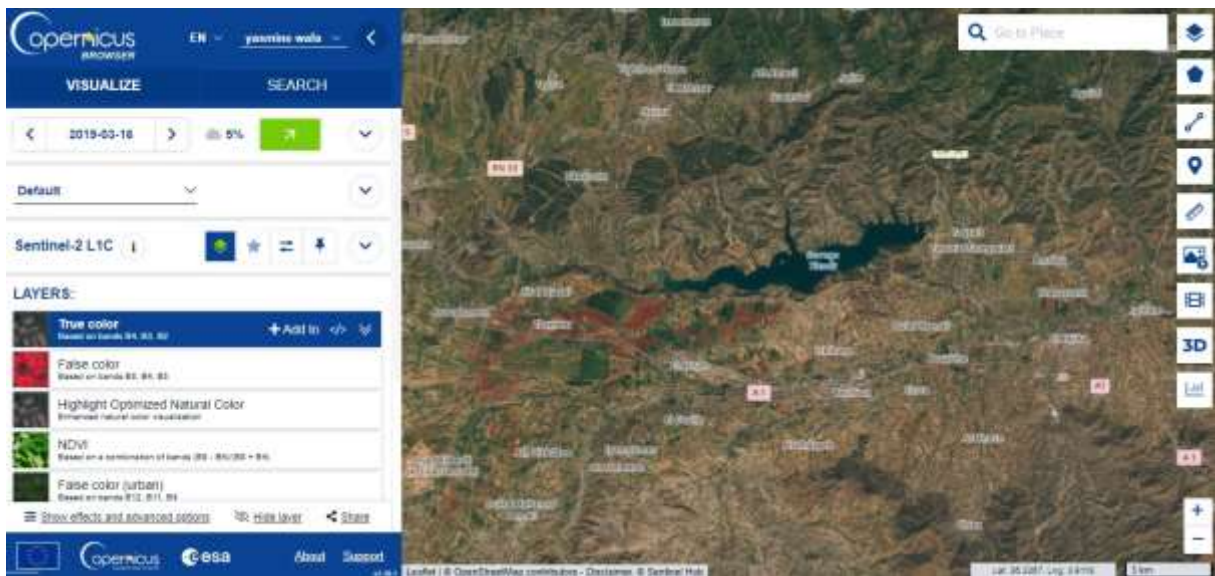
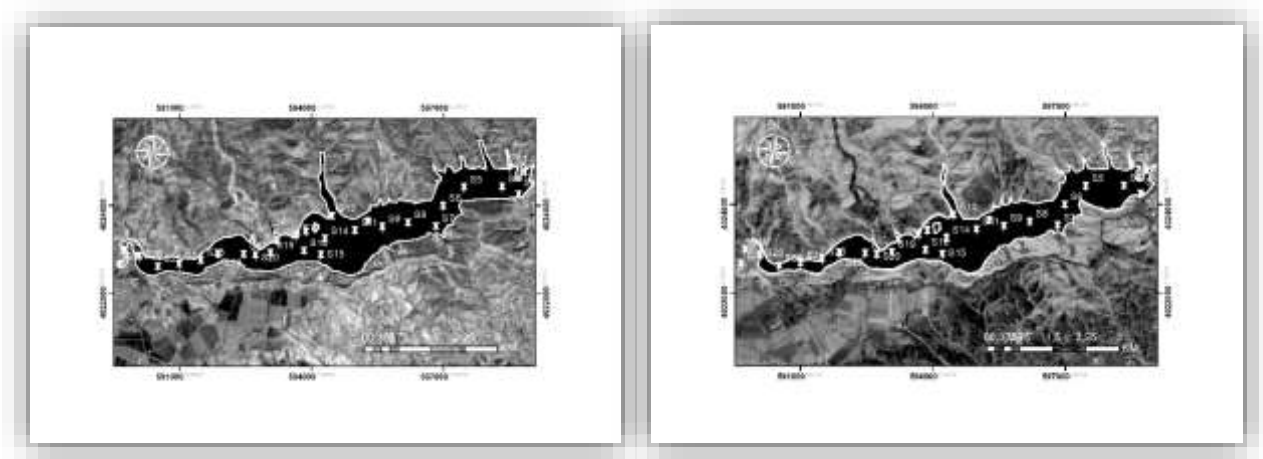


Figure III.6. Interface de site de téléchargement des images satellitaires (Sentinel 2)

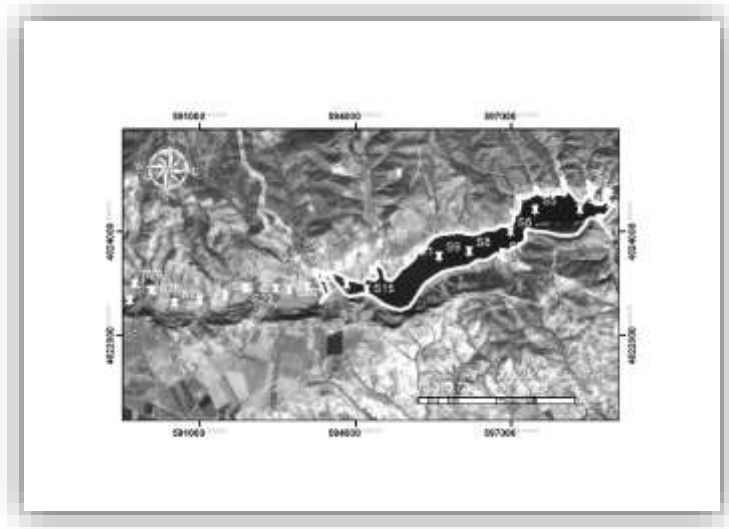


Carte bande 04

16_03_2019

Carte bande 04

27_09_2019



Carte bande 04

20_11_2023

Après le téléchargement des images satellites Sentinel-2 pour les trois dates : le 16/03/2019, le 27/09/2019 et le 20/11/2023, nous avons entamé la recherche d'une relation linéaire entre les valeurs mesurées et les valeurs correspondantes pour chaque bande de chaque paramètre de qualité, notamment la turbidité, les matières en suspension et la salinité.

Tableau III.2. Les données fondamentales des paramètres mesurés et leurs valeurs respectives pour chaque bande.

Points de mesures	X_m	Y_m	Salinité	MES	Turbidité	Bande02	Bande03	Bande04	Bande05	Bande06	Bande07
S1	598703.857	4024217.77	0.32	0.233	1.95	104	184	46	1	1	31
S2	598846.146	4024724.18	0.37	1.567	1.725	84	151	20	1	1	1
S3	598497.512	4024845.57	0.33	1.4	1.9	98	164	18	16	1	23
S4	598333.043	4024394.39	0.32	1.133	1.3	81	121	3	1	1	1
S5	597467.243	4024383.51	0.32	1.567	1.45	95	181	35	16	1	1
S6	596993.656	4023964.38	0.32	1.633	1.65	76	146	17	1	1	1
S7	596611.852	4043408.35	0.32	0.967	1.975	107	197	32	11	1	1
S8	596199.293	4023577.23	0.32	1.967	1.65	92	138	20	8	1	1
S9	595616.083	4023486.46	0.32	1.933	1.95	91	158	19	1	1	1
S10	595284.462	4023611.5	0.32	1.367	2.1	86	144	10	1	1	1
S11	594992.362	4023406.39	0.32	2.6	1.925	102	154	24	9	1	1
S12	593875.391	4023377.58	0.32	1.433	1.9	97	171	18	12	1	1
S13	594470.103	4023732.39	0.32	2.033	1.75	103	164	27	27	1	2
S14	594312.408	4023214.81	0.32	1.667	1.2	89	137	19	1	1	1
S15	594215.884	4022847.66	0.32	1.967	2.575	122	188	41	15	1	2
S16	593834.32	4022943.37	0.32	2.133	2.05	85	154	28	6	1	1
S17	593668.113	4023292.14	0.32	1.967	1.775	99	180	57	42	17	40
S18	593224.33	4023167.54	0.31	1.8	2	91	157	29	3	1	1
S19	593071.111	4022894.1	0.31	2.233	1.25	85	138	10	1	1	1
S20	592732.431	4022841.65	0.31	1.8	2.45	91	147	14	1	1	1
S21	592463.823	4022866.52	0.31	1.8	2.1	100	168	24	5	1	1

S22	591888.579	4022863.74	0.31	2.633	2.65	90	148	20	1	1	1
S23	591494.2	4022730.88	0.31	1.433	2.35	117	179	24	9	1	1
S24	591002.485	4022635.85	0.33	2.3	2.9	104	204	22	5	1	0
S25	590517.488	4022584.18	0.35	2.5	3.125	167	298	58	20	1	1
S26	590085.059	4022828.18	0.38	3.867	3.25	214	432	115	48	1	1
S27	589748.138	4022951.16	0.56	11.433	12.275	424	735	517	390	118	140
S28	589652.674	4022636.21	0.58	10.4	9.05	428	702	515	426	114	65

Conclusion

Dans cette section, nous avons détaillé le processus complet d'évaluation et de suivi de la qualité des eaux de surface en mettant en œuvre une approche intégrée combinant la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG). Nous avons souligné l'importance de cette méthode dans la surveillance continue de la qualité des eaux, permettant une analyse exhaustive des données spatiales et temporelles. En intégrant les données recueillies par les satellites et les outils de cartographie géospatiale, cette approche offre une vision globale et précise de l'état des eaux de surface.

Chapitre IV. Résultats et discussions

Chapitre IV. Résultats et discussions

Introduction

Dans ce chapitre, nous avons examiné la relation entre les mesures effectuées sur le terrain et les réflectances des bandes issues des images satellites. Notre objectif était de trouver des liens entre les paramètres de qualité de l'eau tels que la turbidité, la salinité et les matières en suspension, et les réflectances. Nous avons ensuite utilisé ces relations pour prédire les paramètres de qualité de l'eau et générer des cartes objectives illustrant leur variation dans l'espace et dans le temps. Cela a été rendu possible grâce à l'utilisation de la télédétection et des systèmes d'information géographique.

IV .1. Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau du barrage

Nous avons exploité les données des caractéristiques physico-chimiques recueillies par Zidane Massinissa dans le cadre de la préparation de sa mémoire de Master intitulée "Apport de la télédétection et des SIG pour le suivi de la qualité physico-chimique des eaux du barrage de Telesdit dans la wilaya de Bouira en l'année 2019". Les résultats des paramètres mesurés sur le terrain et en laboratoire sont synthétisés dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1. Résultats des paramètres calculés (Salinité, MES, Turbidité,) pour les 28 points de mesure (18/03/2019) [56].

Paramètres	Latitude	Longitude	Turbidité	Salinité	MES
	(X)	(Y)	(NTU)	(g/kg.eau)	(mg/L)
Points de mesure					
S1	59,870	4,02421777	2,3394	0,3323	2,1623
S2	59,885	4,02472418	1,8818	0,3193	1,6813
S3	59,850	4,02484557	1,8466	0,3183	1,6443
S4	59,833	4,02439439	1,5826	0,3108	1,3668
S5	59,747	4,02438351	2,1458	0,3268	1,9588
S6	59,699	4,02396438	1,829	0,3178	1,6258
S7	59,661	4,04340835	2,093	0,3253	1,9033

S8	59,620	4,02357723	1,8818	0,3193	1,6813
S9	59,562	4,02348646	1,8642	0,3188	1,6628
S10	59,528	4,0236115	1,7058	0,3143	1,4963
S11	59,499	4,02340639	1,9522	0,3213	1,7553
S12	59,388	4,02337758	1,8466	0,3183	1,6443
S13	59,447	4,02373239	2,005	0,3228	1,8108
S14	59,431	4,02321481	1,8642	0,3188	1,6628
S15	59,422	4,02284766	2,2514	0,3298	2,0698
S16	59,383	4,02294337	2,0226	0,3233	1,8293
S17	59,367	4,02329214	2,533	0,3378	2,3658
S18	59,322	4,02316754	2,0402	0,3238	1,8478
S19	59,307	4,0228941	1,7058	0,3143	1,4963
S20	59,273	4,02284165	1,7762	0,3163	1,5703
S21	59,246	4,02286652	1,9522	0,3213	1,7553
S22	59,189	4,02286374	1,8818	0,3193	1,6813
S23	59,149	4,02273088	1,9522	0,3213	1,7553
S24	59,100	4,02263585	1,917	0,3203	1,7183
S25	59,052	4,02258418	2,5506	0,3383	2,3843
S26	59,009	4,02282818	3,5538	0,3668	3,4388
S27	58,975	4,02295116	10,629	0,5678	10,8758
S28	58,965	4,02263621	10,5938	0,5668	10,8388
		Maximum	10.629	0.5668	10.8758
		Minimum	1,7058	0,3108	1,3668
		Moyenne	6.1674	0.4388	6.1213

IV.2. Recherche de loi de corrélation

IV.2.1. La turbidité

Nous avons tenté de calibrer le signal enregistré par les 6 bandes de résolution de 20 m de l'image Sentinel-2A acquise le 18 mars 2019, en utilisant les données de mesure sur le terrain effectuées par Zidane Massinissa lors de la campagne du 18 mars 2019 (référencées dans le Tableau IV.1).

La figure IV.1 montre la régression linéaire entre la turbidité mesurée et les réflectance des bandes 2, 3, 4, 5, 6 et 7.

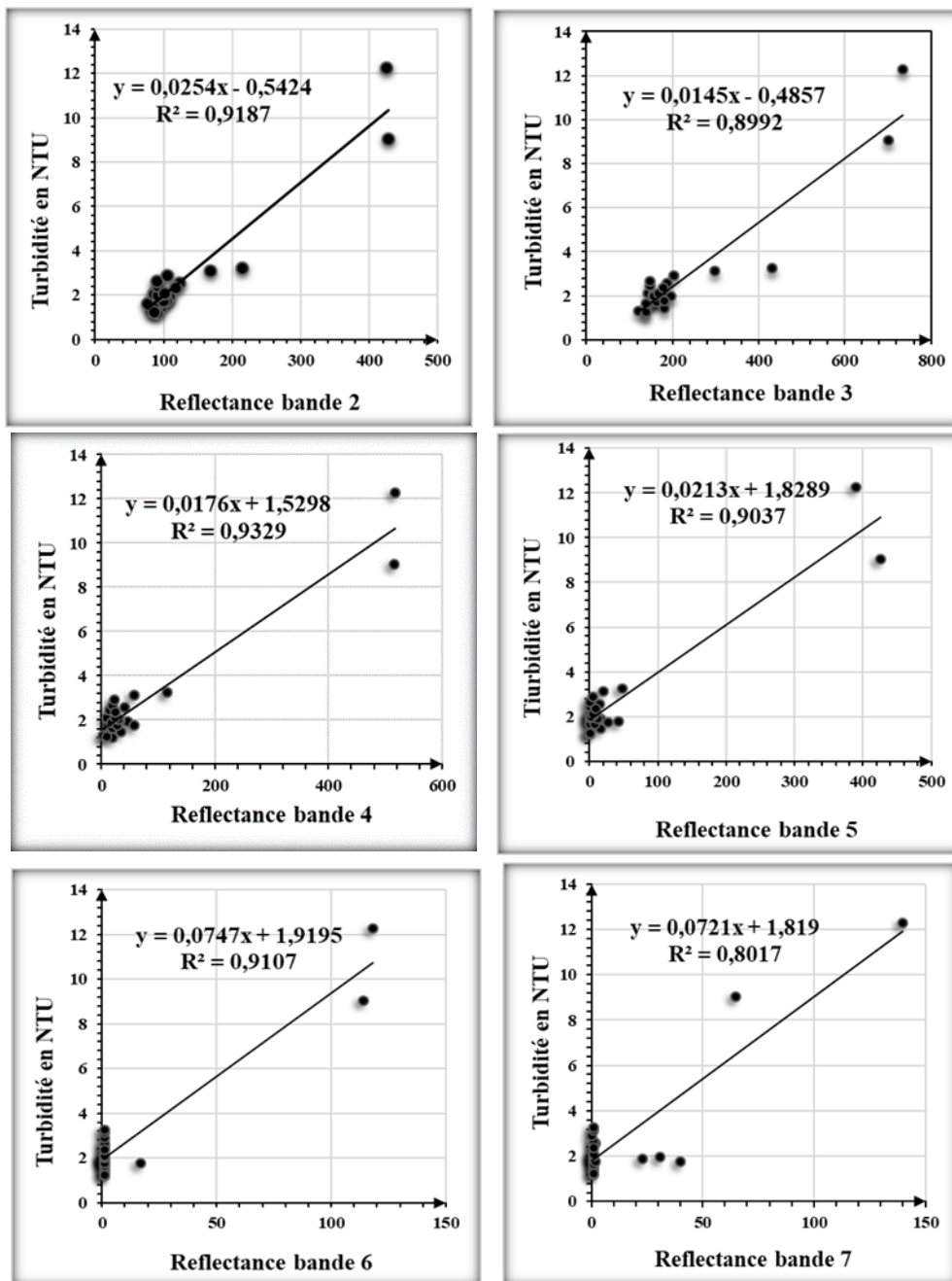


Figure IV .1. Loi de régression linéaire entre la turbidité et les bandes (2.3.4.5.6 et 7)

Pour la bande 2 : cette bande correspond aux longueurs d'onde dans le bleu. Les résultats sont les suivants : **Turbidité NTU = 0.0254* Réflectance B2 - 0.5424** avec un coefficient de détermination **R²=0.92**

Pour la bande 3 : cette bande correspond aux longueurs d'onde dans le vert. Les résultats sont les suivants : **Turbidité_{NTU} = 0.0145* Réflectance_{B3} - 0.4857** avec un coefficient de détermination **R²=0.899**

Pour la bande 4 : cette bande correspond aux longueurs d'onde dans le rouge. Les résultats sont les suivants : **Turbidité_{NTU} = 0.0176* Réflectance_{B4} + 1.5298** avec un coefficient de détermination **R²=0.93**

Pour la bande 5: cette bande correspond aux longueurs d'onde dans la bordure rouge de végétation. Les résultats sont les suivants : **Turbidité_{NTU} = 0.0213* Réflectance_{B5} + 1.8298** avec un coefficient de détermination **R²=0.90**

Pour la bande 6: cette bande correspond aux longueurs d'onde dans la bordure rouge de végétation. Les résultats sont les suivants : **Turbidité_{NTU} = 0.0747* Réflectance_{B6} + 1.9195** avec un coefficient de détermination **R²=0.91**

Pour la bande 7 : cette bande correspond aux longueurs d'onde dans la bordure rouge de végétation. Les résultats sont les suivants : **Turbidité_{NTU} = 0.0721* Réflectance_{B7} + 1.819** avec un coefficient de détermination **R²=0.80**

Il apparait que la bande 4 de Sentinel 2A semble la mieux corrélée aux mesure de la turbidité effectué le 16 mars 2019.

A titre de démonstration, si l'on applique la loi de la bande 4 à l'image Sentinel, on obtient le résultat de la figure IV.2.

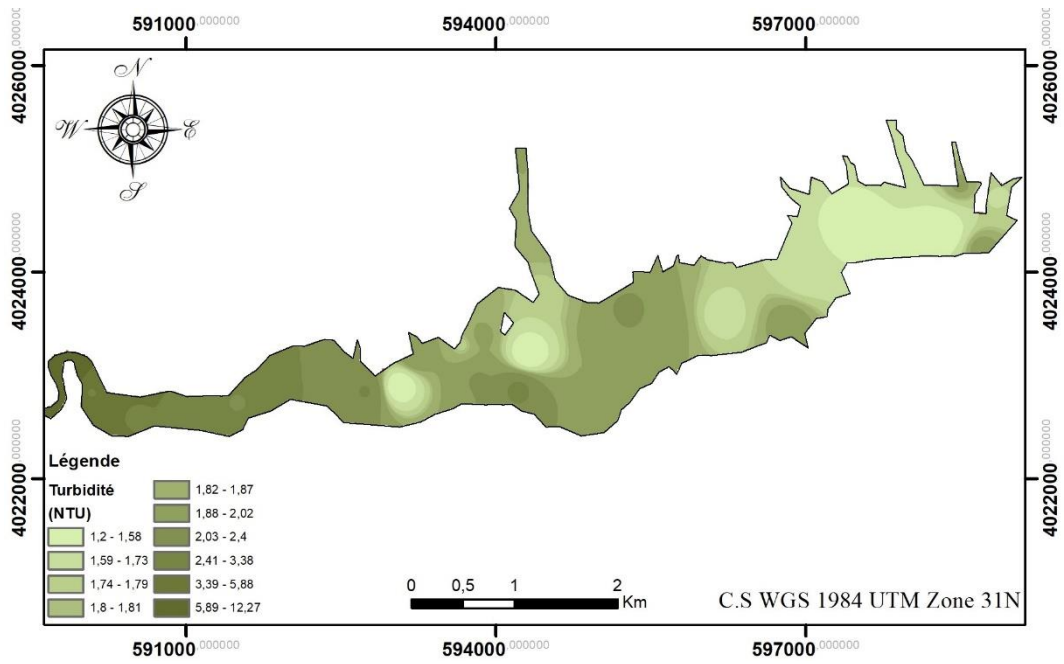


Figure IV.02. Variation de la turbidité de l'eau dans le lac du barrage

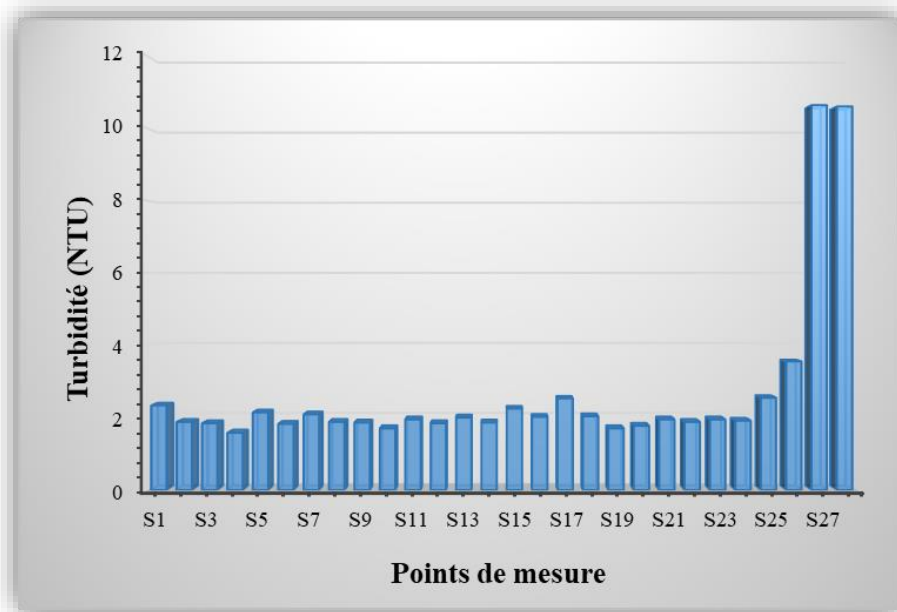


Figure IV.3. La variation de turbidité dans les 28 points de mesures.

Tableau IV.2. Comparaison entre la turbidité mesurée et la turbidité calculée à l'aide de la loi de régression.

Points de mesure	Turbidité (mesurée)	Turbidité (calculée)
S1	1,95	2,33
S2	1,72	1,88
S3	1,90	1,84
S4	1,30	1,58
S5	1,45	2,14
S6	1,65	1,83
S7	1,97	2,09
S8	1,65	1,88
S9	1,95	1,86
S10	2,10	1,70
S11	1,92	1,95
S12	1,90	1,85
S13	1,75	2,00
S14	1,20	1,86
S15	2,57	2,25
S16	2,05	2,02
S17	1,77	2,53
S18	2,00	2,04
S19	1,25	1,70
S20	2,45	1,78
S21	2,10	1,95
S22	2,65	1,88
S23	2,35	1,95
S24	2,90	1,92
S25	3,12	2,55
S26	3,25	3,55
S27	12,27	10,63
S28	9,05	10,59

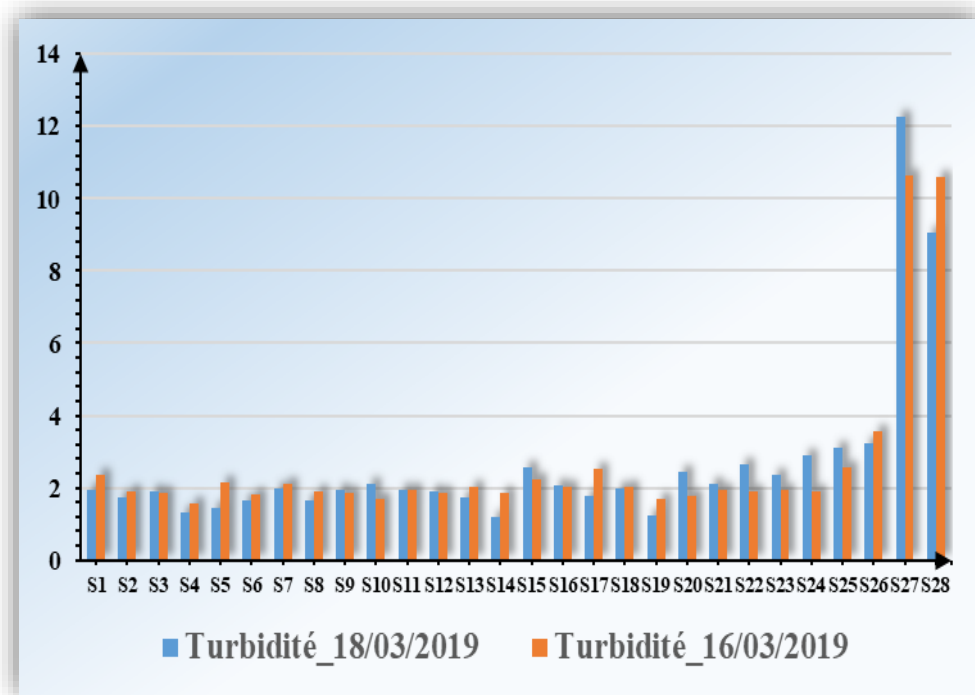


Figure IV.4. Les valeurs de turbidité mesurées (18/03/2019) et calculées (16/03/2019)

D'après les données présentées dans le tableau IV.2 et la figure IV.4, nous observons une similitude remarquable entre la turbidité mesurée et celle calculée à partir de la loi de régression. Cela témoigne de l'efficacité de l'approche utilisant la télédétection pour anticiper et surveiller la turbidité dans le lac du barrage de Telesdit, à Bouira.

IV.2.2. La salinité

Nous avons tenté de calibrer le signal enregistré par les 6 bandes de résolution de 20 m de l'image Sentinel-2A acquise le 18 mars 2019, en utilisant les données de mesure sur le terrain effectuées par Zidane Massinissa lors de la campagne du 16 mars 2019 (référéncées dans le Tableau IV.1).

La figure IV.1 montre la régression linéaire entre la salinité mesurée et les réflectance des bandes 2, 3, 4, 5, 6 et 7.

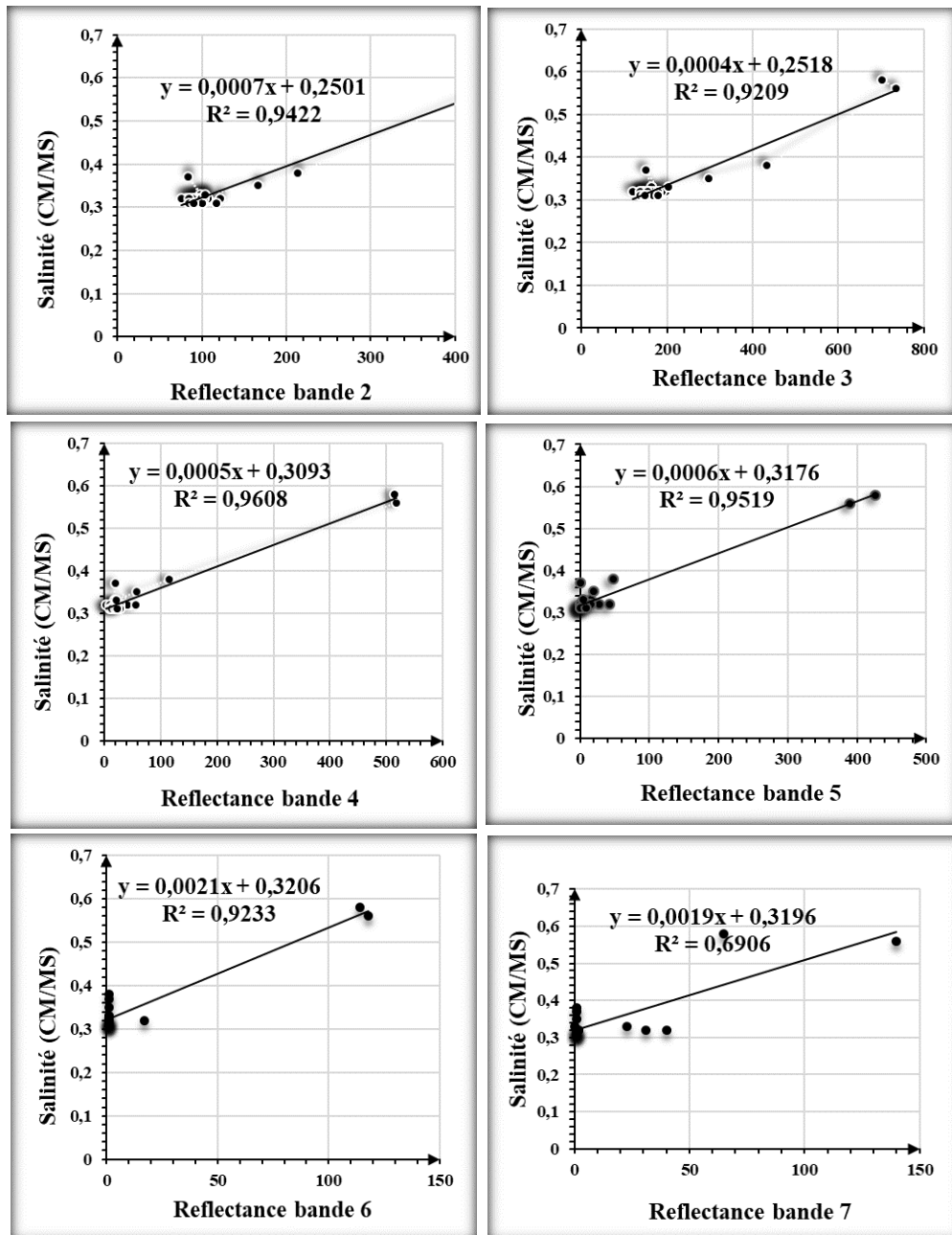


Figure IV.5. Loi de régression linéaire entre la salinité et les bandes (2.3.4.5.6 et 7)

Pour la bande 2 : cette bande correspond aux longueurs d'onde dans le bleu. Les résultats sont les suivants : **Salinité = 0.0007* Réflectance B₂ + 0.2501** avec un coefficient de détermination **R²=0.94**

Pour la bande 3 : cette bande correspond aux longueurs d'onde dans le vert. Les résultats sont les suivants : **Salinité = 0.004* Réflectance B₃ + 0.2518** avec un coefficient de détermination **R²=0.92**

Pour la bande 4 : cette bande correspond aux longueurs d'onde dans le rouge. Les résultats sont les suivants : **Salinité = 0.0005* Réflectance B4 + 0.3093** avec un coefficient de détermination **R²=0.96**

Pour la bande 5: cette bande correspond aux longueurs d'onde dans la bordure rouge de végétation. Les résultats sont les suivants : **Salinité = 0.0006* Réflectance B5 + 0.3176** avec un coefficient de détermination **R²=0.95**

Pour la bande 6: cette bande correspond aux longueurs d'onde dans la bordure rouge de végétation. Les résultats sont les suivants : **Salinité = 0.0021* Réflectance B6 + 0.3206** avec un coefficient de détermination **R²=0.92**

Pour la bande 7 : cette bande correspond aux longueurs d'onde dans la bordure rouge de végétation. Les résultats sont les suivants : **Salinité = 0.0019* Réflectance B7 + 0.3196** avec un coefficient de détermination **R²=0.69**

Il apparait que la bande 4 de Sentinel 2A semble la mieux corrélée aux mesure de la salinité effectué le 18 mars 2019.

A titre de démonstration, si l'on applique la loi de la bande 4 à l'image Sentinel, on obtient le résultat de la figure IV.2.

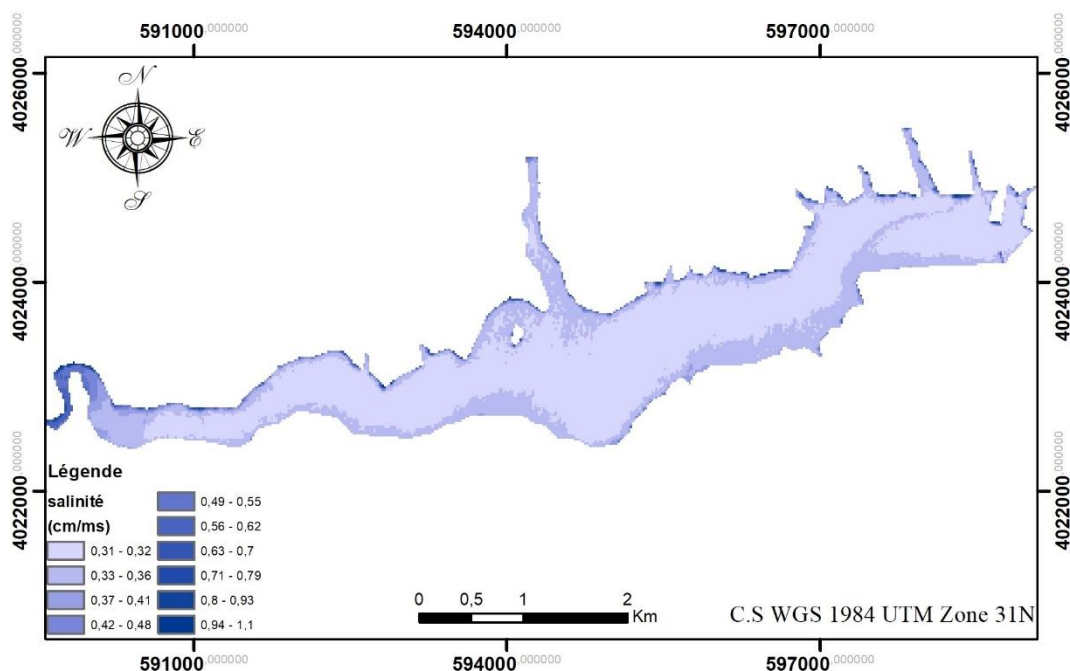


Figure IV.06. Variation de la salinité de l'eau dans le lac du barrage

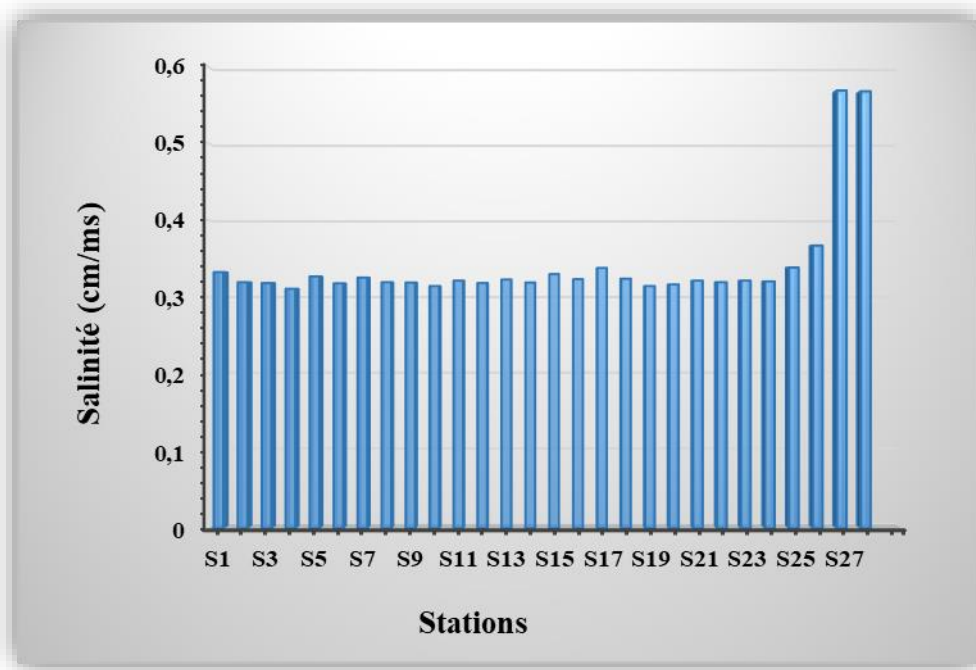


Figure IV.7. La variation de la salinité dans les 28 points de mesure.

Tableau IV.3. Comparaison entre la turbidité mesurée et la turbidité calculée à l'aide de la loi de régression.

Points de mesure	Salinité (mesurée)	Salinité (calculée)
S1	0,32	0,33
S2	0,37	0,32
S3	0,33	0,32
S4	0,32	0,31
S5	0,32	0,33
S6	0,32	0,32
S7	0,32	0,32
S8	0,32	0,32
S9	0,32	0,32
S10	0,32	0,31
S11	0,32	0,32
S12	0,32	0,32
S13	0,32	0,32
S14	0,32	0,32
S15	0,32	0,33
S16	0,32	0,32
S17	0,32	0,34
S18	0,31	0,32
S19	0,31	0,31
S20	0,31	0,32
S21	0,31	0,32

S22	0,31	0,32
S23	0,31	0,32
S24	0,33	0,32
S25	0,35	0,34
S26	0,38	0,37
S27	0,56	0,57
S28	0,58	0,57

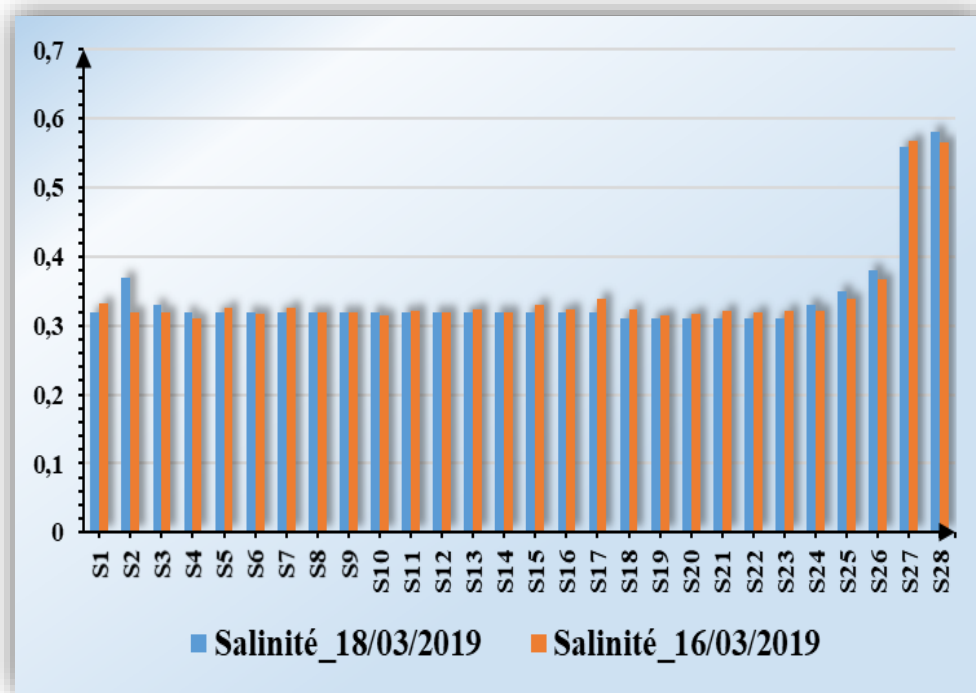


Figure.IV.8. Les valeurs de salinités mesurées (18/03/2019) et calculées (16/03/2019)

En se référant aux données fournies dans le tableau IV.3 et la figure IV.8, nous remarquons une concordance significative entre la salinité mesurée et celle estimée à partir de la loi de régression. Cela confirme l'efficacité de l'approche utilisant la télédétection pour anticiper et surveiller la salinité dans le lac du barrage de Telesdit, à Bouira.

IV.2.3. Les matières en suspension

Nous avons tenté de calibrer le signal enregistré par les 6 bandes de résolution de 20 m de l'image Sentinel-2A acquise le 18 mars 2019, en utilisant les données de mesure sur le terrain des matières en suspension effectuées par Zidane Massinissa lors de la campagne du 16 mars 2019 (référéncées dans le Tableau IV.1).

La figure IV.1 montre la régression linéaire entre la salinité mesurée et les réflectance des bandes 2, 3, 4, 5, 6 et 7. Nous avons essayé de calibrer le signal enregistré par les quatre bandes à 20 m de résolution de l'image SENTINEL 2A obtenu le 16/03/2019

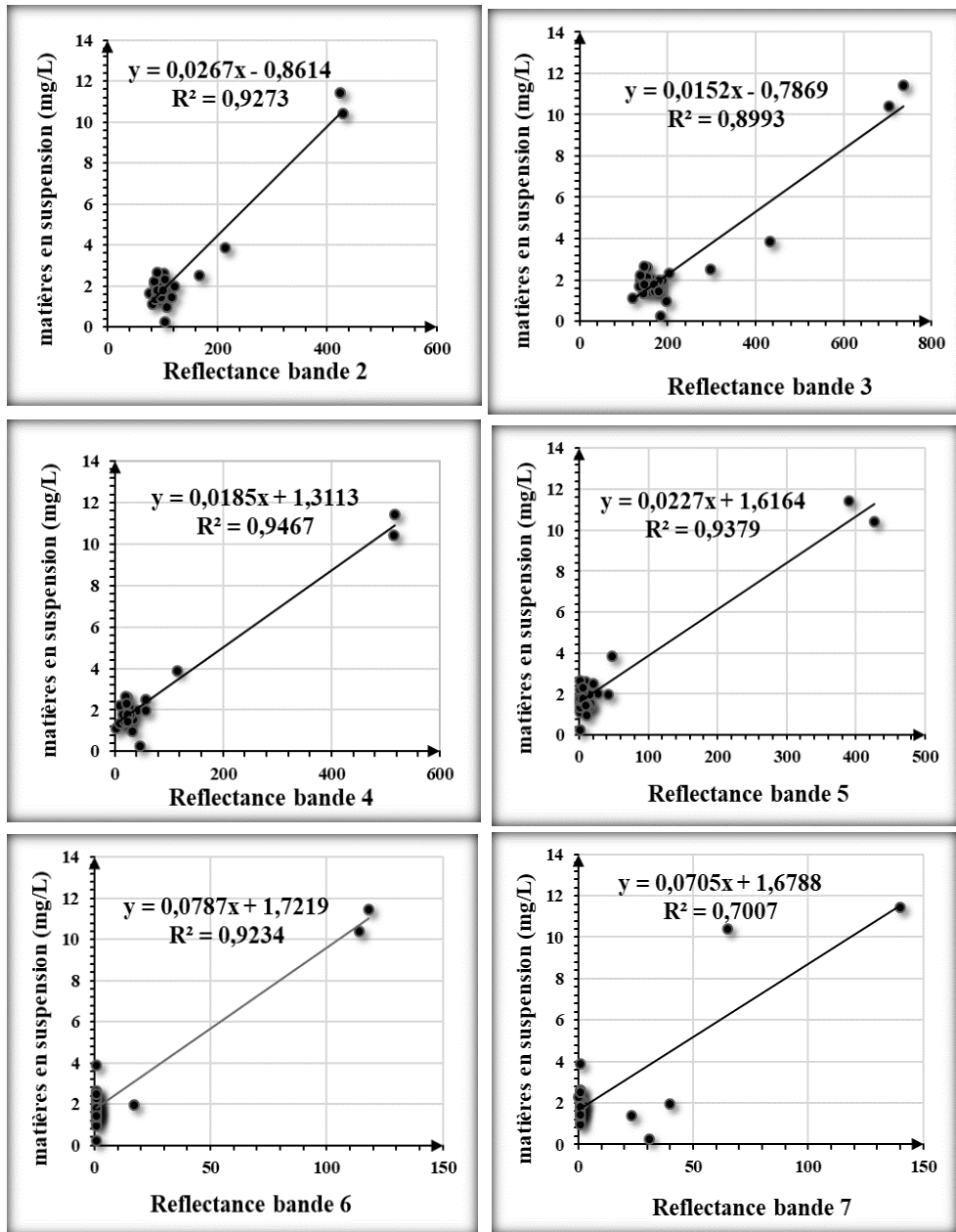


Figure IV.9. Loi de régression linéaire entre les matières en suspension et les bandes (2.3.4.5.6 et 7)

Pour la bande 2 : cette bande correspond aux longueurs d'onde dans le bleu. Les résultats sont les suivants : $MES = 0.0152 * \text{Réflectance}_{B2} - 0.8614$ avec un coefficient de détermination $R^2=0.92$

Pour la bande 3 : cette bande correspond aux longueurs d'onde dans le vert. Les résultats sont les suivants : $MES = 0.004 * \text{Réflectance}_{B3} - 0.7869$ avec un coefficient de détermination $R^2=0.90$

Pour la bande 4 : cette bande correspond aux longueurs d'onde dans le rouge. Les résultats sont les suivants : $MES = 0.0185 * \text{Réflectance}_{B4} + 1.3113$ avec un coefficient de détermination $R^2=0.95$

Pour la bande 5: cette bande correspond aux longueurs d'onde dans la bordure rouge de végétation. Les résultats sont les suivants : $MES = 0.0006 * \text{Réflectance}_{B5} + 0.3176$ avec un coefficient de détermination $R^2=0.95$

Pour la bande 6: cette bande correspond aux longueurs d'onde dans la bordure rouge de végétation. Les résultats sont les suivants : $MES = 0.0787 * \text{Réflectance}_{B6} + 1.7219$ avec un coefficient de détermination $R^2=0.92$

Pour la bande 7 : cette bande correspond aux longueurs d'onde dans la bordure rouge de végétation. Les résultats sont les suivants : $MES = 0.0705 * \text{Réflectance}_{B7} + 1.678$ avec un coefficient de détermination $R^2=0.70$

Il apparait que la bande 4 de Sentinel 2A semble la mieux corrélée aux mesure des matières en suspension effectué le 18 mars 2019.

A titre de démonstration, si l'on applique la loi de la bande 4 à l'image Sentinel, on obtient le résultat de la figure IV.10.

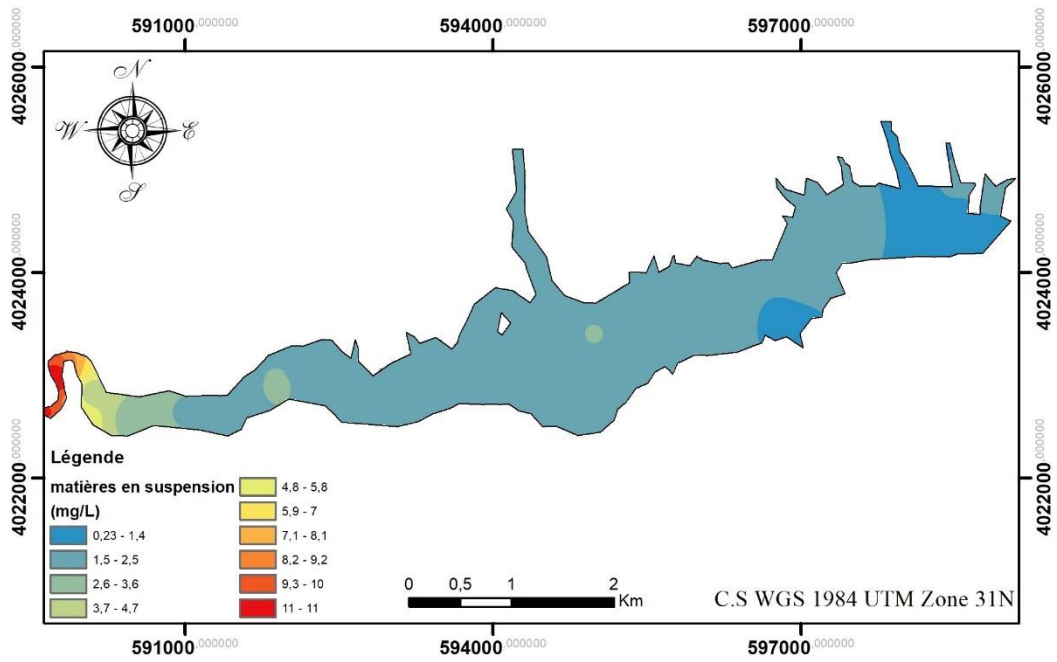


Figure IV .10. Variation des matières en suspension dans le lac du Barrage

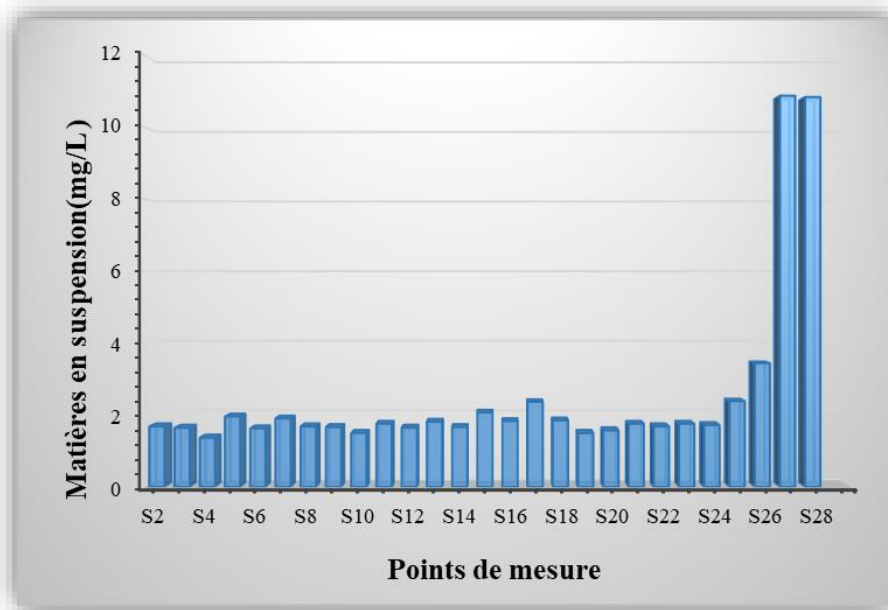


Figure.IV.11. La variation des matières en suspension dans les 28 points de mesure.

Tableau IV.4. Comparaison entre les matières en suspension mesurées et les matières en suspension calculées à l'aide de la loi de régression.

Points de mesure	matières en suspension (Mesurées)	matières en suspension (Calculées)
S1	0,233	2,16
S2	1,567	1,68
S3	1,4	1,64
S4	1,133	1,37
S5	1,567	1,96
S6	1,633	1,62
S7	0,967	1,90
S8	1,967	1,68
S9	1,933	1,66
S10	1,367	1,49
S11	2,6	1,75
S12	1,433	1,64
S13	2,033	1,81
S14	1,667	1,66
S15	1,967	2,06
S16	2,133	1,83
S17	1,967	2,36
S18	1,8	1,85
S19	2,233	1,50
S20	1,8	1,57
S21	1,8	1,75
S22	2,633	1,68
S23	1,433	1,75
S24	2,3	1,72
S25	2,5	2,38
S26	3,867	3,44
S27	11,433	10,87
S28	10,4	10,84

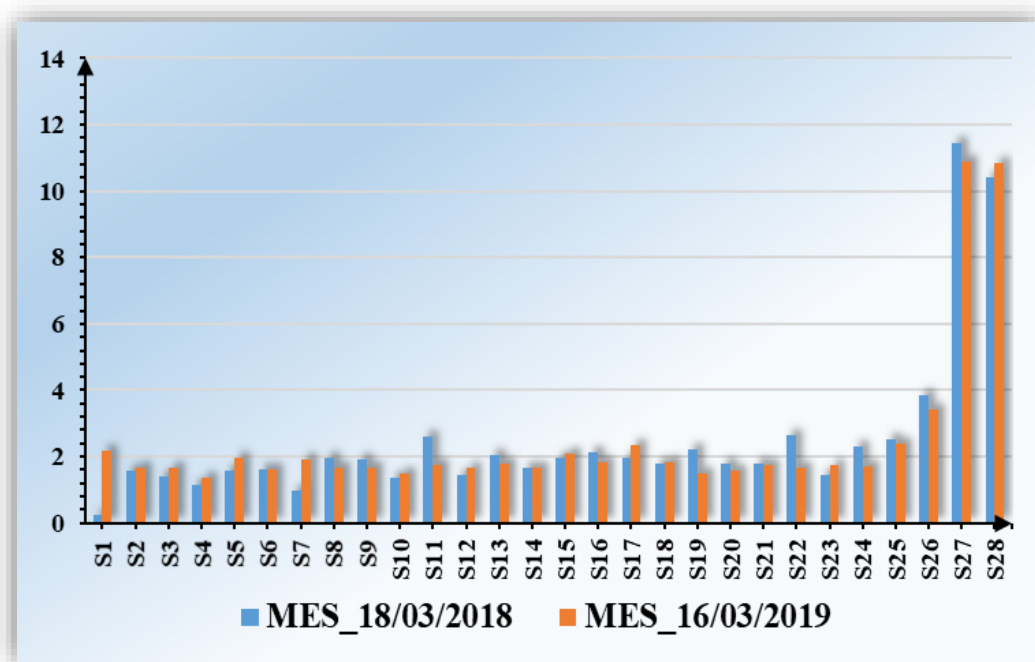


Figure IV.12. Les valeurs des matières en suspension mesurées (18/03/2019) et calculées (16/03/2019)

En se basant sur les données répertoriées dans le tableau IV.4 et illustrées dans la figure IV.12, il est clair qu'il existe une corrélation significative entre les mesures des matières en suspension et celles obtenues à partir de la loi de régression. Cette constatation confirme l'efficacité de l'approche utilisant la télédétection pour évaluer et surveiller les matières en suspension dans le lac du barrage de Telesdit, à Bouira.

IV.3. La variation spatio-temporelle des paramètres de qualité des eaux du barrage

Après avoir confirmé les lois de corrélation entre la turbidité, la salinité et les matières en suspension avec la réflectance de la bande 4 de l'image Sentinel 2A, nous avons utilisé ces lois de régression pour étudier la variation spatio-temporelle de la turbidité, de la salinité et des matières en suspension aux dates suivantes : le 27 septembre 2019 et le 20 novembre 2023.

IV.3.1. La turbidité

Après avoir téléchargé et traité les images Sentinel 2A des dates du 27 septembre 2019 et du 20 novembre 2023, nous avons extrait la bande 4. Cette bande a été utilisée dans l'équation de la turbidité : **Turbidité (NTU) = 0.0176 * Réflectance B4 + 1.5298**. En utilisant le logiciel Arc GIS, nous avons produit les cartes de turbidité pour ces deux dates, comme présente la figure IV.13.

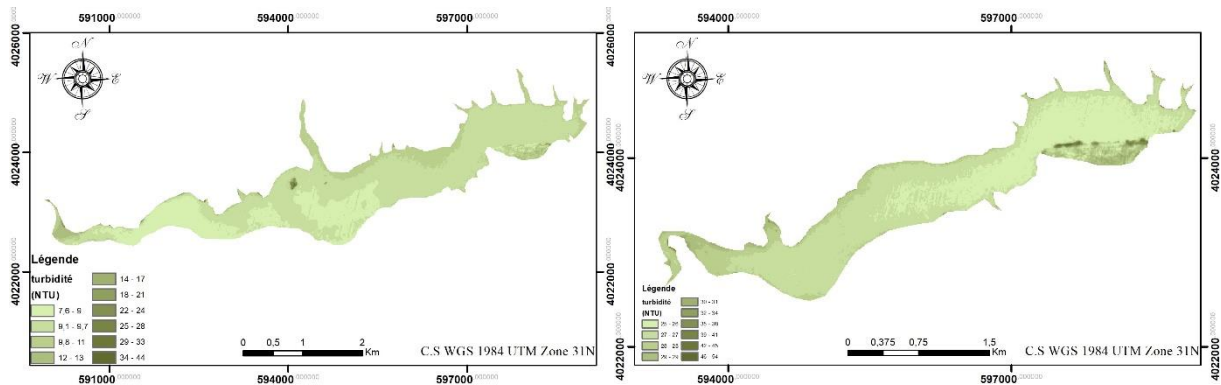


Figure. IV.13. La variation de la turbidité de l'eau du barrage pour les dates de 27/09/2019 et 20/11/2023.

Tableau. IV.5. La turbidité pour différentes périodes de mesure.

Points de mesure	Turbidité 18/03/2019	Turbidité 16/03/2019	Turbidité 27/09/2019	Turbidité 20/11/2023
S2	1,72	1,88	9,80	29,34
S4	1,30	1,58	9,22	25,64
S5	1,45	2,14	9,29	25,50
S6	1,65	1,83	9,50	25,48
S8	1,65	1,88	9,29	25,75
S9	1,95	1,86	9,11	25,90
S10	2,10	1,70	9,40	27,58
S15	2,57	2,25	9,18	26,31
S16	2,05	2,02	8,96	26,73

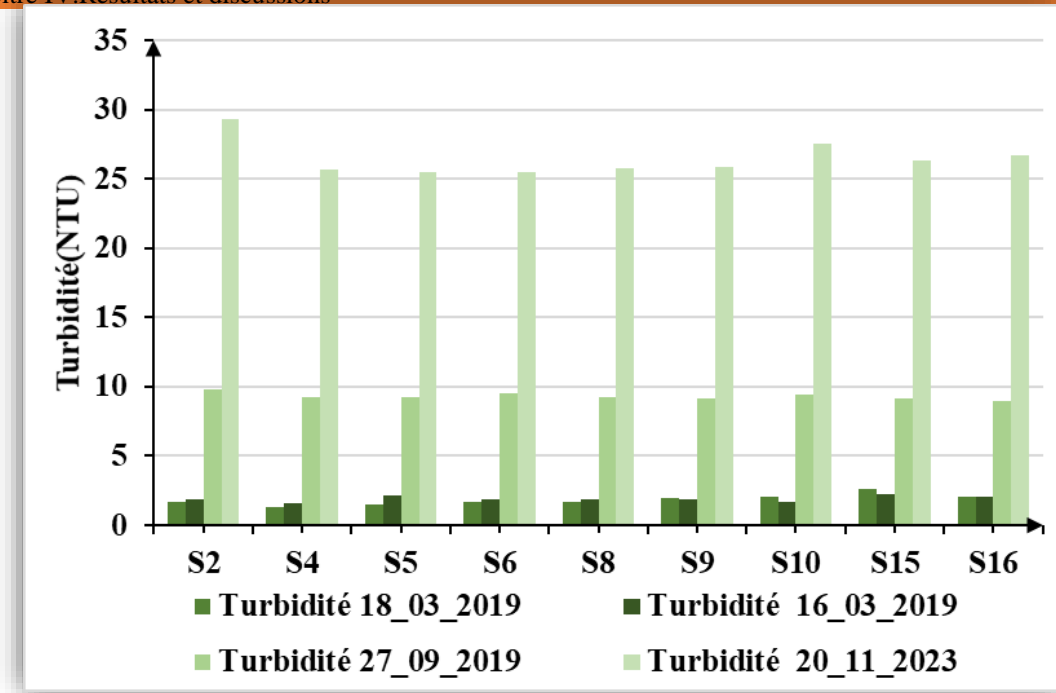


Figure. IV.13. La variation spatio-temporelle de la turbidité dans le lac du barrage

Les figures IV.13 et IV.14 ainsi que le tableau IV.5 illustrent la variation spatio-temporelle de la turbidité de l'eau dans le lac du barrage aux dates du 27 septembre 2019 et du 20 novembre 2023. Nous observons une augmentation de la turbidité au cours de ces deux périodes, attribuable aux conditions météorologiques, notamment les pluies orageuses fréquentes en septembre 2019 et en novembre 2023. Cette augmentation de la turbidité peut également être liée à certaines activités humaines, telles que la construction, qui entraîne des niveaux élevés de sédimentation dans l'eau pendant les tempêtes, rendant ainsi l'eau plus trouble. En outre, une diminution significative de la superficie du lac a été constatée, particulièrement en novembre 2023, en raison du manque de précipitations au cours des dernières années.

IV.3.2. La salinité

Nous avons déterminé la salinité pour les deux périodes en utilisant l'équation de régression linéaire : $\text{Salinité} = 0.0005 * \text{Réflectance B4} + 0.3093$. Grâce au logiciel Arc Map, nous avons généré les cartes de salinité pour ces deux dates, comme le montre la figure IV.14.

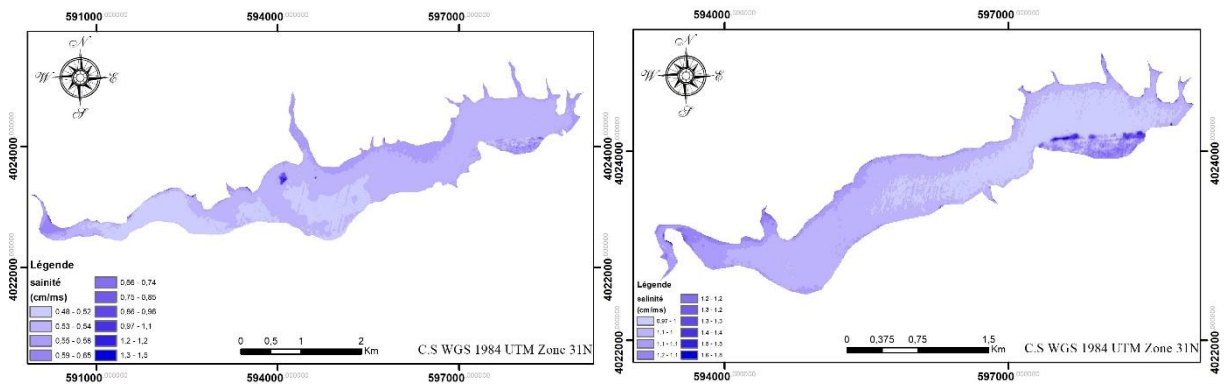


Figure. IV.15. La variation de la salinité de l'eau du barrage pour les dates de 27/09/2019 et 20/11/2023.

Tableau. IV.6. La salinité pour différentes périodes de mesure.

Points de mesure	Salinité 18/03/2019	Salinité 16/03/2019	Salinité 27/09/2019	Salinité 20/11/2023
S2	0,37	0,32	0,54	1,10
S4	0,32	0,31	0,53	0,99
S5	0,32	0,33	0,53	0,99
S6	0,32	0,32	0,53	0,99
S8	0,32	0,32	0,53	0,99
S9	0,32	0,32	0,52	1,00
S10	0,32	0,31	0,53	1,05
S15	0,32	0,33	0,53	1,01
S16	0,32	0,32	0,52	1,02

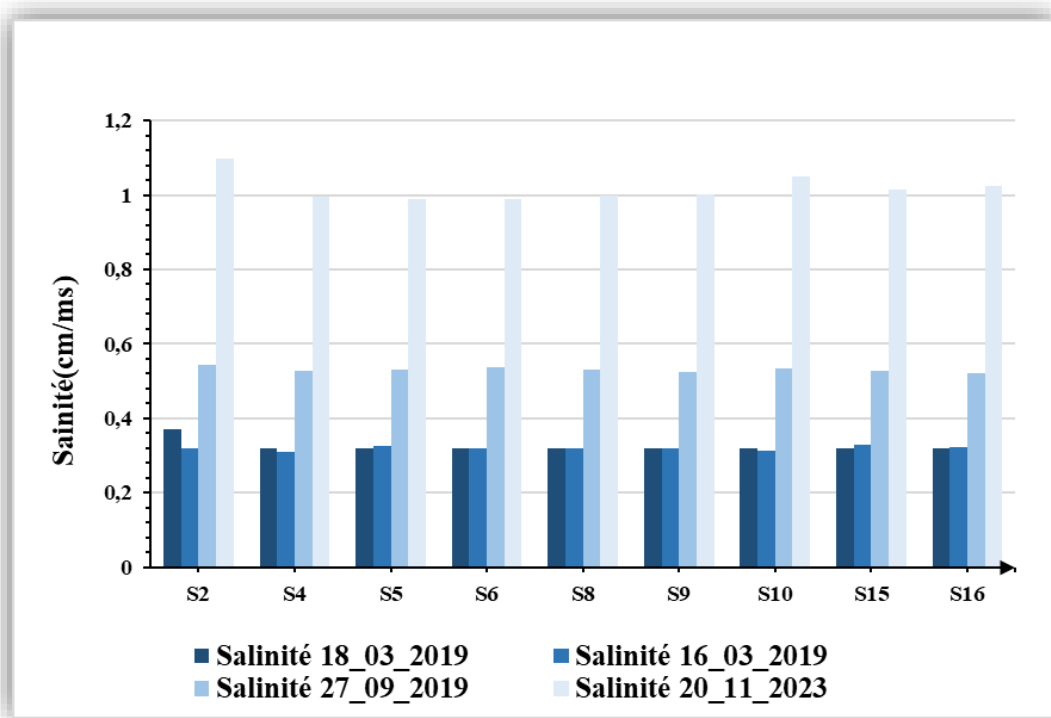


Figure IV.16. La variation spatio-temporelle de la salinité dans le lac du barrage

Les figures IV.15 et IV.16, ainsi que le tableau IV.6, mettent en évidence la variation spatio-temporelle de la salinité dans le lac du barrage. Nous observons une augmentation de la salinité aux dates du 27 septembre 2019 et du 20 novembre 2023, ce qui peut être le résultat de divers facteurs tels que l'évaporation accrue due aux températures élevées ou l'influence des précipitations réduites sur le régime hydrologique du lac. Par exemple, des pluies moins abondantes peuvent entraîner une concentration accrue de sels dans le lac. Cette augmentation de la salinité peut avoir des implications écologiques et environnementales, notamment sur la vie aquatique et la qualité de l'eau.

Par ailleurs, en parallèle de cette augmentation de la salinité, nous observons également une diminution de la surface du lac du barrage. Cette diminution peut être due à une combinaison de facteurs tels que l'évaporation accrue, la diminution des apports d'eau provenant des précipitations et éventuellement une utilisation accrue de l'eau pour des besoins humains ou agricoles. Ces changements dans la surface du lac peuvent avoir des répercussions sur l'écologie du lac, l'accès à l'eau pour les populations locales et les activités économiques qui dépendent de la disponibilité de l'eau.

IV.3.3. La matière en suspension

Nous avons utilisé l'équation de régression linéaire pour les matières en suspension : $MES = 0.0185 * \text{Réflectance B4} + 1.3113$, afin de calculer les matières en suspension pour les deux périodes du 27 septembre 2019 et du 20 novembre 2023. Ensuite, à l'aide du logiciel ArcMap, nous avons généré les cartes des matières en suspension pour le lac du barrage, comme illustré dans la figure IV.17.

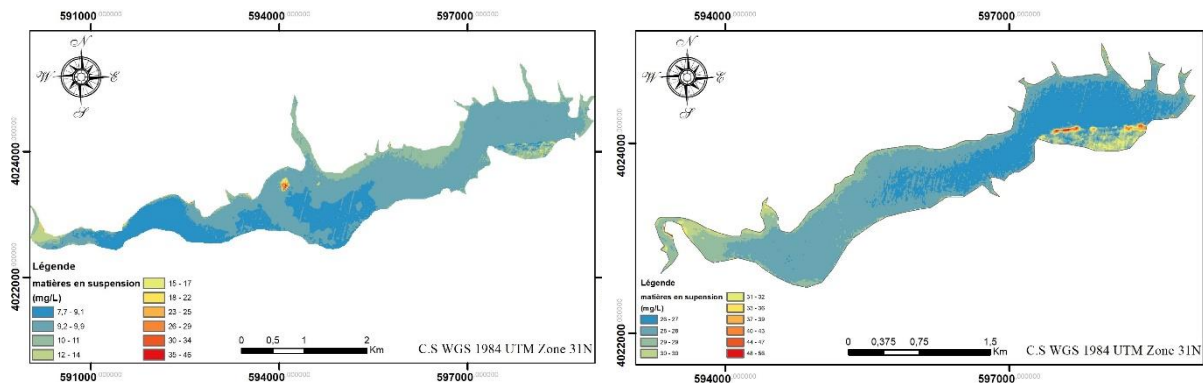


Figure. IV.17. La variation des matières en suspension dans le lac du barrage pour les dates de 27/09/2019 et 20/11/2023

Tableau. IV.7. Les matières en suspension pour différentes périodes de mesure.

Points de mesure	MES 18/03/2019	MES 16/03/2019	MES 27/09/2019	MES 20/11/2023
S2	1,56	1,68	10,01	30,54
S4	1,13	1,36	9,39	26,66
S5	1,56	1,96	9,47	26,51
S6	1,63	1,62	9,69	26,49
S8	1,96	1,68	9,47	26,77
S9	1,93	1,66	9,28	26,93
S10	1,37	1,50	9,58	28,69
S15	1,97	2,07	9,36	27,36
S16	2,13	1,83	9,12	27,80

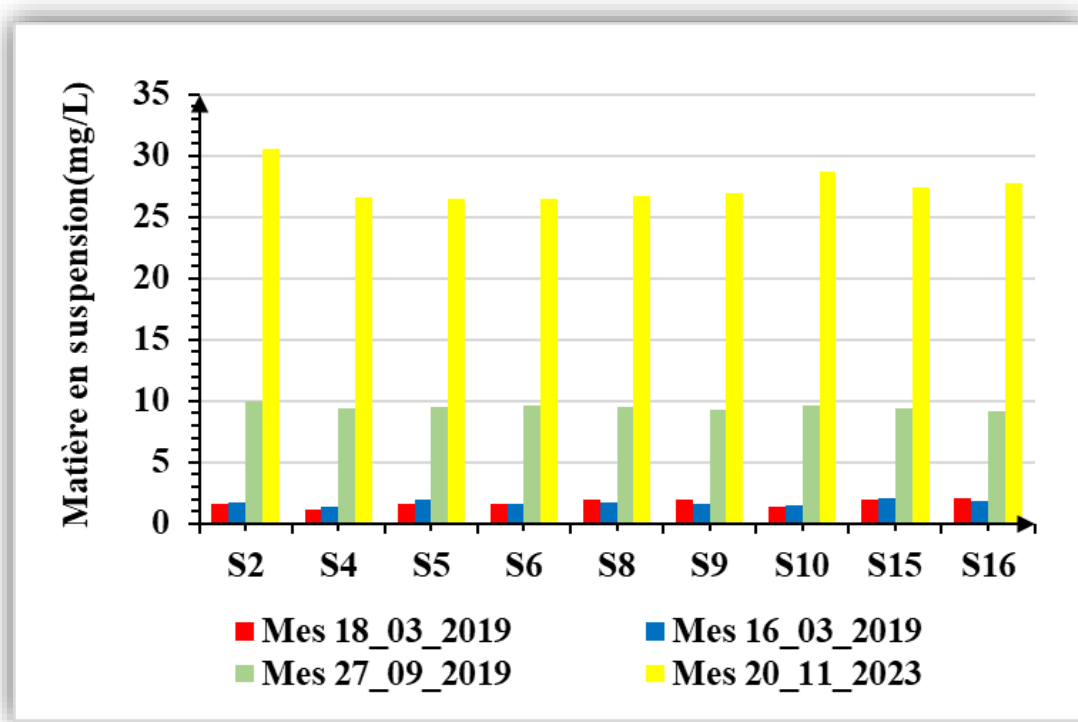


Figure. IV.17. La variation spatio-temporelle des matières en suspension dans le lac du barrage

Les figures IV.16, IV.17, ainsi que le tableau IV.7, présentent la variation spatio-temporelle des matières en suspension dans le lac du barrage. Nous observons une augmentation significative des matières en suspension aux dates du 27 septembre 2019 et du 20 novembre 2023. Cette augmentation peut être influencée par plusieurs facteurs, tels que les précipitations abondantes, les activités humaines telles que la construction ou l'agriculture, ou encore le ruissellement des sols érodés.

En parallèle de cette augmentation des matières en suspension, nous constatons une diminution de la surface du lac du barrage. Cette diminution peut être attribuée à une combinaison de facteurs, notamment l'évaporation accrue due à des températures élevées, une réduction des apports d'eau provenant des précipitations et éventuellement une utilisation accrue de l'eau pour des besoins humains ou agricoles.

Ces variations dans les matières en suspension et la surface du lac peuvent avoir des répercussions importantes sur l'écosystème aquatique du lac, ainsi que sur les communautés humaines qui dépendent de ses ressources. Il est crucial de comprendre ces changements afin

de mettre en place des mesures de gestion appropriées pour la conservation et la durabilité de cet environnement lacustre.

Conclusion

L'analyse de la variation spatio-temporelle de la turbidité, de la salinité et des matières en suspension dans le lac du barrage met en lumière plusieurs tendances significatives. Les données recueillies et traitées à partir des images Sentinel 2A, combinées à l'utilisation de techniques de régression linéaire et de cartographie géospatiale, ont permis de mieux comprendre les changements environnementaux dans ce milieu aquatique.

Les résultats ont montré une augmentation de la turbidité, de la salinité et des matières en suspension lors des périodes étudiées, en particulier les 27 septembre 2019 et 20 novembre 2023. Ces augmentations peuvent être attribuées à divers facteurs, tels que les conditions météorologiques, les activités humaines et les changements dans le régime hydrologique du lac. De plus, la diminution concomitante de la surface du lac suggère une pression supplémentaire sur les ressources en eau, avec des implications potentielles sur la biodiversité et la disponibilité des ressources pour les populations locales.

Ces résultats soulignent l'importance de surveiller régulièrement la qualité de l'eau et les changements environnementaux dans les écosystèmes lacustres, afin de mieux informer la gestion et la conservation de ces précieux habitats. Des mesures de protection et de restauration peuvent être nécessaires pour atténuer les effets néfastes des pressions anthropiques et des variations climatiques sur la santé et la durabilité du lac du barrage, garantissant ainsi sa pérennité pour les générations futures.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de ce travail, dont l'objectif est de démontrer le potentiel et l'utilité de la télédétection et des SIG dans la quantification et le suivi de trois paramètres relatifs à la qualité des eaux du barrage de Telesdit dans la wilaya de Bouira, nous avons pu montrer l'efficacité de ces techniques pour une surveillance précise et continue. Une surveillance régulière du barrage de Telesdit est indispensable, car la qualité physico-chimique de cette eau est une responsabilité cruciale pour les habitants et les industries locales. Notre étude visait à illustrer l'importance de la télédétection et des SIG pour évaluer la turbidité, les matières en suspension et la salinité dans le barrage de Telesdit. Ces technologies permettent une surveillance rigoureuse, assurant ainsi une gestion efficace et durable des ressources en eau.

Nous avons obtenu trois modèles de régression pour quantifier la turbidité, la salinité et les matières en suspension dans le lac du barrage, avec des coefficients de détermination très élevés. Par la suite, nous avons utilisé ces modèles pour produire des cartes thématiques à l'échelle spatio-temporelle. Les modèles sont les suivants :

- Pour la turbidité : $\text{Turbidité NTU} = 0.0176 * \text{Réflectance B4} + 1.5298$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.93$
- Pour la salinité : $\text{Salinité} = 0.0005 * \text{Réflectance B4} + 0.3093$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.96$
- Pour les matières en suspension : $\text{MES} = 0.0185 * \text{Réflectance B4} + 1.3113$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.95$

Ces modèles fournissent une base solide pour estimer ces paramètres à partir des données de réflectance, ce qui est crucial pour une surveillance efficace de la qualité de l'eau dans le barrage.

Les cartes thématiques produites ont révélé la variation spatio-temporelle des paramètres, nous permettons ainsi d'obtenir une vue d'ensemble de la distribution spatiale et temporelle de chaque paramètre sur l'ensemble du barrage.

Nous avons observé une augmentation relative de la valeur de chaque paramètre au cours de la période étudiée :

- ✓ La turbidité a varié de 1,58 NTU à 29,34 NTU entre le 16/03/2019 et le 20/11/2023.
- ✓ La salinité a varié de 0,31 cm/ms à 1,10 cm/ms entre le 16/03/2019 et le 20/11/2023.
- ✓ Les matières en suspension ont varié de 1,36 mg/L à 30,54 mg/L entre le 16/03/2019 et le 20/11/2023.

L'augmentation de la turbidité, des matières en suspension et de la salinité dans l'eau des barrages peut être due à une combinaison de facteurs humains et naturels, qui peuvent être aggravés par des pratiques non durables ou des événements météorologiques extrêmes.

La télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) sont des outils essentiels pour gérer et analyser les données géospatiales, permettant avant tout d'économiser du temps, des efforts et de l'argent. Pour renforcer notre objectif à long terme, il est crucial de combiner de manière continue l'analyse des données satellitaires de télédétection avec les mesures in situ. Il est nécessaire d'identifier le plus grand nombre des facteurs impliqués dans la quantification des paramètres physico-chimiques de l'eau et d'appliquer cette approche géomatique afin d'élaborer des prévisions fiables et précises, ainsi que d'évaluer leur impact sur la qualité de l'eau des barrages.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] :Hydrologic cycle. The water cycle describes how water is exchanged (cycled) through Earth's land, ocean, and atmosphere. Earth Science, Meteorology, Geography, Physical Geography, Geology. <https://education.nationalgeographic.org/resource/hydrologic-cycle/>
- [2] : Water science school .The Water Cycle and climate change. <https://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclefrenchhi.html>
- [3]: Les réservoirs d'eau sur Terre Cycle 3 et 5e Une séquence du projet L'océan, ma planète... et moi ! . https://fondation-lamap.org/sites/default/files/sequence_pdf/les-reservoirs-d-eau-sur-terre.pdf
- [4] : L'eau : faits et statistiques - Enjeux et solutions à la crise. <https://www.cieau.com/connaitre-leau/les-ressources-en-france-et-dans-le-monde/ou-en-sont-les-ressources-en-eau-dans-le-monde/>
- [5] : ARTICLE R.214-5. (2007). Code de l'environnement, Sous-section 1 : Champ d'application. Version en vigueur.
- [6] : JEROME, D. (2004). Series on Water and Ethics: Essay 1, United Nations educational, ISBN: 92-9220-016-X.
- [7] : MULLER, P. (2000). La politique agricole française : l'État et les organisations professionnelles. Journal Économie rurale, vol. 255-256, p. 33-39.
- [8] : BENOUDIZ, S. (2012). L'eau, source de valeur dans votre industrie. Edition / revue : ONDEO Industrial Solutions, vol. 1, p.4.
- [9] : <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-ph-222/>
- [10] : AMINOT, A., & CHAUSSEPIED, M. (1983). Manuel des analyses chimiques en milieu marin CNEXO. Brest, p. 395.
- [11] : CHAUVALLIER. H. (2007). L'eau un enjeu pour demain, p. 26.
- [12] : RODIER J., 1984 : L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires et eaux de mer, 7^{ème} édition, Dulod, Paris
- [13] : VILLERS J., 2005 : Qualité physicochimique et chimique des eaux de surface, Edition Squilbin M., Yourassowsky C, Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement ;
- [14] : BERRYMAN D., 1990 : Sélection de nouveaux indicateurs de la qualité des cours d'eau du Québec, Ministère de l'environnement du Québec, Direction de la qualité des cours , rapport : QE-90-05, EN900140 QE/67/1 ;
- [15] : LOUP J., 1974 : Les eaux terrestres, Edition Masson et Cie, Paris ;
- [16] : MERZOUK B. Chapitre I. paramètres de pollution des eaux usées et normes de rejet (Chapitre de cours de la matière traitement et épuration des eaux).
- [17] : VALERIE, V., LEGARE, S., PAINCHAUD, J., & VINCENT, W. (2005). Dynamique Et Modélisation De L'oxygène Dissous En Rivière. Édifice Marie-Guyart, 2005, vol. 7.
- [18] : HUBICHE, JL. (2012). L'eau support de vie : L'oxygène de l'eau. Revue / journal : La dynamique de la vie, pp. 6.
- [19] : Squilbin Marianne, Yourassowsky Catherine 2005. Qualité physico-chimique et Chimique des eaux de surface. 16p.
- [20] : ADE. Algérien Des Eaux (2005), Maintien de la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution et lutte contre les pollutions accidentelles, formation contenue en entreprise, les cahiers techniques du stage T2, Algérien Des Eaux, Centre de formation aux Métiers de l'eau de Tizi-Ouzou, Algérie.
- [21] : SBARGOUD, A. (2009). Diagnostic environnemental de la gare routière (Pollution atmosphérique par TSP et métaux lourds). Mémoire : Ingénieur d'état en Ecologie et Environnement.

- [22] : LANDREAU, A., & SAUTER, M. (1983). Eléments de microbiologie des eaux : Service Géologique National. Institut Pasteur : Lyon, 1983, ISBN : 83 SGN 386 EAU.
- [23] : PARUCH, A., & MAEHLUM, T. (2012). Specific features of Escherichia coli that distinguish it from coliform and thermotolerant coliform bacteria and define it as the most accurate indicator of faecal. Ecological indicators, vol. 23, p. 140-142.
- [24] : MASSCHELEIN, WJ. (1992). Unit processes in drinking water treatment (Environmental Science & Pollution). Taylor & Francis, vol. 13. ISBN: 9780824786786.
- [25] : MREE. (2018). Ministère des ressources en eau et de l'environnement, monographie. Réf.
- [26] : ZARUBEZZHVODSTROY. (2004). Monographie MRE. Administration du barrage, 10.08.2004.p. 71.
- [27] : AGENCE NATIONALE DES BARRAGES. (1993). Kouba Alger, Algérie.
- [28] : SOKRATOV, GI. (1972). Géologie structurale et zonation géologique. M., « Nedra ».
- [29] : RPRGGTPEBT. (1998). (Forages S-1001, S-1002). Barrage de Telesdit. Algérie.
- [30] : GROMOV, V., & GASPIROVITCH. (1999). Rapport de prospections géologiques et géotechniques. Algérie, (N° D18-GRP 230) : p. 43.
- [31] : UKRGUIPROVODKHOZ. (1988). ANNEXE I Rapport hydrologique KIEV : Institut d'Etat de Projets et de Recherches Scientifiques, 1988, p. 91.
- [32] : SET HANDASSA. (2004). Fiche technique, Bureau d'étude : direction des études techniques. Agence Nationale des barrages et transferts. p. 2.
- [33] : NORMES ET REGLES DE CONSTRUCTION. (1986). Assises des ouvrages hydrotechniques. SNiP 2.02.02-85.
- [34] : H. Chakroun, Département GC, ENIT Cours SIG-Téledétection, 2ème GC 2013-2014
- [35] : http://fr.wikipedia.org/wiki/syst%C3%A8me_d'information_g%C3%A9ographique
- [36] : MONPROJET :http://documentation.2ie-edu.org/doc_num
- [37] : <https://eos.com/fr/blog/teledetection/>
- [38] : ZIDANE Massinissa.2019. Apport de la télédétection et des SIG pour le suivi de la qualité physico-chimique des eaux du Barrage de Tiledit dans la wilaya de Bouira mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de master Filière : Ecologie et Environnement Spécialité : Biodiversité et Environnement
- [39] : SERVADIO, Z. (2013). Apports de l'imagerie à haute résolution spectrale et spatiale dans les bilans de volume et bilans radiatifs au Piton de La Fournaise. Sciences de la Terre. Université de la Réunion. Français, ID. NNT 2011 LARE 002
- [40] : CLARK, R. (2004). Spectroscopy of rocks and minerals, and principals of spectroscopy. Infrared Spectroscopy in Geochemistry Exploration. London, Ontario: Mineralogical Association of Canada. Ed. Centre National pour l'Exploitation des Océans, Brest, France, pp. 395
- [41] : <https://etggroupe.wordpress.com/2018/09/28/comprendre-ce-quest-la-resolution-spatiale/>
- [42] : WIEDERKEHR, E., DUFOUR, S., & PIÉGAY, H. (2008). Apport des techniques d'imagerie pour la caractérisation physique des corridors fluviaux : Synthèse des connaissances et extraction d'indicateurs, p. 50/337p hal-00828825.
- [43] : https://www.researchgate.net/figure/Resolution-radiometrique_fig7_343761906
- [44] : ROBIN, A. (1999). Utilisation d'image spot en sédimentologie littorale : Traitement et étalonnage sur le terrain (spectroradiométrie et sédimentologie). L'exemple de la baie d'Authie. Lill
- [45] : SOUDANI, K. (2005). Bulletin de l'information géographique appliquée aux activités de recherche-développement, Cours Télédétection ECO II (Version 1.2). Université Paris Sud, Bâtiment 362.
- [46] : SUMAN, S., MATTHEW, R.N., GEORGE, P., PETROPOULOS., PRASHANT, K., SRIVASTAVA, J.P., MCCALMONT., FUZZO, D.S, LAMINE, S & CARLSON, T.N. (2018).

- Modelling Key Parameters Characterising Land Surface in 1D Space using the SimSphere SVAT model: Findings from use at European Ecosystems. In: Manika Gupta, Prashant K. Srivastava, George Tsakiris, Nevil Quinn (eds). *Agricultural Water Management: Theory, Abstratction and Practices*. ISBN 978 0128123621. Academic Press. 1st edition. 416p.
- [47] : DENG, K.KH.A., LAMINE, S., PAVLIDES, A. GEORGE, P., PETROPOULOS., BAO, Y. PRASHANT, K., SRIVASTAVA., & GUAN, Y. (2019B). Large Scale Operational Soil Moisture Mapping from Passive MW Radiometry: SMOS product evaluation in Europe & USA. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation - Elsevier*, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.015>
- [48] : DENG, K.KH.A., LAMINE, S., PAVLIDES, A., GEORGE, P., PETROPOULOS., PRASHANT, K., SRIVASTAVA., BAO, Y., HRISTOPOULOS, D., & ANAGNOSTOPOULOS, V. (2019A). Operational Soil Moisture from ASCAT in Support of Water Resources Management. *MDPI. Remote Sensing*, vol. 11(5), p. 579: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/5/579>
- [49] : WANG, X. (2001). Application of remote sensing techniques in monitoring and the water quality of Taihu Lake. *Contam. Toxicol*, vol. 67, p. 863 – 870, DOI: 10.1007/s00128-001-0202-z.
- [50] : SHEN, L., & CHANGCHUN, L. (2010). Water Body Extraction from Landsat ETM+ Imagery Using Adaboost Algorithm. In *Proceedings of 18th International Conference on Geoinformatics*, Beijing, China, p. 1- 4.
- [51] : HELLWEGER, F., SCHLOSSERAC, P., LALLAC, U., WEISSEL, JK. (2004). Use of satellite imagery for water quality studies in New York Harbor. *Estuary Coast. Shelf Sci*, vol. 61, p. 437–448.
- [52] : CENTRE CANADIEN DE TELEDETECTION. (2008). Département de la Résolution spectrale,
- [53] : <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission>
- [54] : <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission>