

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE SAAD DAHLAB – BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département des Sciences de l'Eau et Environnement



MEMOIRE DE MASTER

Filière : Hydraulique

Spécialité : Ressources Hydrauliques

Apport de la télédétection à l'analyse spatio-temporelle des précipitations et des plans d'eau : cas du bassin hydrographique Côtier Algérois 02A

Présenté par :

LALLOUTI Farida

Devant le jury composé de :

Mme. TAIBI Sabrina	MCA	USD Blida 1	Présidente
M. GUENDOZ Abdelhamid	Pr	USD Blida 1	Examineur
M. BOUACH Ahcene	MCA	USD Blida 1	Promoteur

Juin 2025

Dédicaces

À ma mère bien-aimée

À mon cher père

À mes chers frères et sœurs

À toutes les personnes que j'ai aimées et que j'ai oublié de mentionner par accident.

À tous mes professeurs qui ont éclairé mon chemin durant mes années scolaires.

À tous ceux qui ont contribué, directement ou indirectement, à cette réalisation.

A tous ceux qui luttent pour une Algérie meilleure.

Lallouti farida

REMERCIEMENTS

Toutes les louanges et tous les remerciements à Dieu Tout-Puissant, qui m'a donné la force, la patience et la détermination pour atteindre ce stade de réalisation. Je le remercie pour chaque instant où il m'a inspiré à faire ce qui est juste et m'a facilité le chemin du succès. Lui seul est capable de rendre difficile ce qui est facile s'Il le veut, et de rendre facile ce qui est difficile s'Il le veut. Louange à Dieu en premier et en dernier lieu, extérieurement et intérieurement, pour sa grâce, sa générosité et son succès.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance à mon directeur de thèse, Bouach Ahcène, pour les précieux conseils, les commentaires constructifs et le soutien continu qu'il m'a apporté pendant la préparation de cette thèse. Son souci d'atteindre une qualité scientifique et son suivi méticuleux ont eu un grand impact sur l'achèvement de ce travail.

Je remercie également Mme TAIBI Sabrina présidente du jury, ainsi que M. GUNDOUZ examinateur, pour avoir accepté de faire partie du jury et pour leur présence lors de cette soutenance

Je voudrais également remercier tous les professeurs du Département des Sciences de l'Eau et de l'Environnement de l'Université Saad Dahleb, Blida 1, pour leurs grands efforts pour nous guider et enrichir nos connaissances tout au long de nos années d'études.

Je ne dois pas oublier de remercier le personnel administratif du Département des sciences de l'eau et de l'environnement et du faculté de technologie de cette université pour avoir fourni les conditions appropriées à la recherche et à la réussite académique.

ملخص

أجريت دراسة متعمقة لتقييم الجوانب المكانية والزمانية للبيانات الهيدرولوجية لمستجمعات المياه الساحلية الجزائرية، مع التركيز على الحوض 2أ. في هذه الدراسة، قمنا باستخدام منهجية الاستشعار عن بُعد لتحليل مساحة المياه السطحية وأنظمة هطول الأمطار. اعتمدنا على بيانات الأقمار الصناعية Sentinel 2 لحساب مساحات المياه السطحية باستخدام مؤشر الفرق المعياري للمياه (NDWI)، وهو أداة فعالة لتمييز المسطحات المائية عن غيرها. بالنسبة لهطول الأمطار، تم استخدام قاعدة بيانات CHIRPS العالمية (Climate Hazards Ensemble for Hydrological Data with Station Data)، مما يوفر معلومات دقيقة ومتسقة مؤقتاً حول توزيع هطول الأمطار على نطاق واسع. هدفت الدراسة إلى تتبع التغيرات الموسمية وبين السنوية في الموارد المائية، وبالتالي تحسين فهم الديناميكيات الهيدرولوجية في المنطقة.

الكلمات المفتاحية: التحليل الزمني المكاني؛ الاستشعار عن بُعد؛ مؤشر الفرق المعياري للمياه (NDWI)؛ قاعدة بيانات CHIRPS

Abstract

An in depth study was conducted to evaluate the spatial and temporal aspects of hydrological data of Algerian coastal watersheds, focusing on Basin 2A. In this study, we used remote sensing methodology to analyze surface water area and rainfall regimes. We used Sentinel 2 satellite data to calculate surface water areas using the Normalized Difference Water Index (NDWI), an effective tool for distinguishing water bodies from other features. For rainfall, the global CHIRPS (Climate Hazards Ensemble for Hydrological Data with Station Data) database was used, providing accurate and temporally consistent information on the distribution of rainfall over a wide area. The study aimed to track seasonal and inter annual variations in water resources, thus improving the understanding of hydrological dynamics in the region.

Keywords : Spatio temporal analysis ; Remote sensing ; Normalized Difference Water Index (NDWI) ; CHIRPS database

Résumé

Une étude approfondie a été menée pour évaluer les aspects spatiaux et temporels des données hydrologiques du bassin hydrographique côtier algérois 02A. Dans cette étude, nous avons utilisé la méthodologie de télédétection pour analyser la superficie des eaux de surface et les régimes pluviométriques. Nous avons utilisé les données du satellite Sentinel 2 pour calculer les superficies des eaux de surface à l'aide de l'indice de différence normalisée des eaux (NDWI), un outil efficace pour distinguer les masses d'eau des autres. Pour les précipitations, la base de données mondiale CHIRPS (Climate Hazards Ensemble for Hydrological Data with Station Data) a été utilisée, fournissant des informations précises et temporellement cohérentes sur la répartition des précipitations sur une large zone. L'étude visait à suivre les variations saisonnières et interannuelles des ressources en eau, améliorant ainsi la compréhension de la dynamique hydrologique de la région.

Mots clés : Analyse spatio temporelle ; Télédétection ; Indice de différence normalisée des eaux (NDWI) ; Base de données CHIRPS

Table des matières

Table des matières	
LISTE DES TABLEAUX	8
LISTE DES FIGURES	9
LISTE DES NOTATIONS	11
INTRODUCTION GÉNÉRALE	13
1. Données hydrologiques : mesures, modélisation et télédétection	16
1.1. Mesures in situ.....	16
1.1.1. Précipitations	16
1.1.2. L'évapotranspiration.....	17
1.1.3. La température.....	18
1.1.4. Le ruissellement.....	19
1.2. Modélisation hydrologique.....	21
1.2.2. Classification des modèles	21
1.2.3. Modèles hydrologiques GR.....	22
1.3. Télédétection pour l'acquisition des données hydrologiques.....	24
1.3.1. Principes de base	24
1.3.2. Variables hydrologiques mesurées par télédétection.....	25
1.3.3. Technologies et capteurs de télédétection	26
1.3.4. Traitement des données	26
1.3.5. Avantages et limites	27
1.3.6. Exemples d'applications.....	27
.2 Méthodes de télédétection pour la surveillance.....	30
.2.1 Historique de la télédétection	31
.2.2 Les premiers débuts de la technologie de télédétection en hydrologie	32
.2.3 Rayonnement électromagnétique	34
2.3.1. Définition du rayonnement électromagnétique utilisé en télédétection	34
.2.3.2 Les type De Rayonnement Électromagnétique	34
2.3.3. Utilisation du rayonnement électromagnétique en télédétection pour surveiller les données hydrologiques	37
.2.4 Système D'observation	38
.2.4.1 Les capteurs	38
2.5. Définition du système de surveillance et de détection à distance.....	40
2.6. Définition du vecteur.....	41
2.6.1. Type de vecteur	41
.2.7 La Résolution	41

2.7.1.	Résolution spatiale.....	42
2.7.2.	Résolution temporelle.....	42
2.7.3.	Résolution radiométrique	43
.2.7.4	La Résolution spectrale	43
.2.8	Le processus de la télédétection	43
.2.8.1	Les étapes du processus de télédétection.....	43
.2.9	Utilisation de La Télédétection en Hydrologie.....	50
.2.9.1	Les précipitations.....	50
.2.9.2	Les Eaux de Surface	50
.2.9.3	Humidité du sol:	51
.2.9.4	Qualité De L'eau	51
.2.9.5	L'évaporation:	52
.3	Présentation du bassin hydrographique Côtier Algérois 02A	55
.3.1	Le Bassin Versant Côtier Algérois 02	55
.3.2	Côtier Algérois Ouest 02A	56
3.3.	Caractéristiques hydrologiques et morphologiques du Côtier Algérois 02A	57
3.3.1.	Forme des sous-bassins	57
3.3.2.	Relief et altitude	58
3.3.3.	Réseau hydrographique	60
3.4.	Caractéristiques climatiques du bassin côtier algérien (02A).....	61
3.4.1.	Températures	62
3.4.2.	Pluie.....	62
3.4.3.	Humidité relative:.....	62
3.4.4.	Évaporation et évapotranspiration:.....	62
3.4.5.	Vents:.....	63
3.4.6.	Changement climatique moderne:.....	63
3.5.	Caractéristiques géologiques, lithologiques et pédologiques	63
3.5.1.	Géologie	63
3.5.2.	Lithologie	63
3.5.3.	Pédologie	64
3.6.	Découpage hydrologique du Côtier Algérois Ouest (02A)	64
3.6.1.	Sous bassin versant de Oued Mazfran.....	65
3.6.2.	Sous bassin versant de Oued El Harrach	66
3.6.3.	Sous- Bassin versant de côtes occidentales :	67
3.6.4.	Petits bassins versants côtiers	67
3.7.	Ressources en eau de l'Algérois 02A	68

3.7.1.	Ressource souterraine potentielle	68
3.7.2.	Ressource superficielle	69
4.	Analyse spatiotemporelle des données hydrologiques du Côtier Algérois 02A.....	76
4.1.	Satellite de surveillance de l'eau de surface	76
4.1.1.	Méthode utilisée pour calculer l'eau de surface (indice NDWI)	77
4.2.	Outil utilisé pour la quantification des précipitations.....	77
4.3.	Résultats et analyse des eaux de surface	78
4.3.1.	Analyse spatiale des eaux de surface.....	78
4.3.2.	Analyse temporelle des eaux de surface.....	79
4.4.	Résultat et analyse des précipitations	87
4.4.1.	Analyse spatiale des précipitations.....	87
4.4.2.	Analyse temporelle des précipitations	88
4.5.	Étude de la corrélation précipitations–eaux de surface	90
	Conclusion générale	95
	Références Bibliographiques.....	98
	Annexe	103

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Caractéristiques de forme du bassin 02A.	56
Tableau 3.2 : Indices de pentes des sous-bassins.	57
Tableau 3.3 : Altitudes des sous-bassins.	58
Tableau 3.4 : Hydrographie des sous bassins.	59
Tableau 3.5 : Différents caractéristiques des sous bassins.	66
Tableau 3.6 : Unités aquifère de l'Algérois 02A.	67
Tableau 3.7 : Apport en eau superficielle de l'Algérois 02A.	68
Tableau 4.1 : Statistiques saisonnières des eaux de surface.	80
Tableau 4.2 : Paramètres statistiques interannuels des eaux de surface.	81

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Instruments de mesure des précipitations.	17
Figure 1.2 : Instruments de mesure d'évapotranspiration.	18
La Figure 1.3 : instruments de mesure de température.	19
Figure 1.4 : Instruments de mesure de débit.	20
Figure 1.5 : Principe de télédétection.	24
Figure 1.6 : Principes de base de la télédétection.	25
Figure 2.1 : Nadar premier photographe..	31
Figure 2.2 : Première image satellitaire de la terre.	32
Figure 2.3 : TIROS, le premier satellite météorologique en orbite en 1960.	33
Figure 2.4 : Télédétection.	34
Figure 2.5 : Spectre électromagnétique.	35
Figure 2.6 : Onde Lumineuse.	37
Figure 2.7 : Différents capteurs de détection.	39
Figure 2.8 : Capteur passifs.	39
Figure 2.8 : Capteur actifs.	40
Figure 2.10 : Résolution Spatiale.	42
Figure 2.11 : Résolution temporelle.	42
Figure 2.12 : Résolution radiométrique.	43
Figure 2.13 : Les processeurs de télédétection.	44
Figure 2.14 : Traitement des données.	47
Figure 3.1 : Bassins hydrographiques en Algérie.	56
Figure 3.2 : Situation géographique du Côtier Algérois Ouest 02A.	57
Figure 3.3 : Pluies moyennes annuelles.	62
Figure 3.4 : Carte d'érosion du sol du bassin Algérois 02A.	64
Figure 3.5 ; Découpage hydrologique du Côtier Algérois 02A.	65
Figure 3.6 : Oued Mzafran.	66
Figure 3.7 : Sous bassin versant de l'Oued El Harrach.	67
Figure 3.8 : Ressources en eaux souterraines de l'Algérois 02A.	69
Figure 3.9 : Barrage de Kramis.	70
Figure 3.10 : Barrage de Ked Eddir.	71
Figure 3.11 : Barrage De Boukardane	71
Figure 3.12 : Barrage de Boroumi.	72
Figure 3.13 : Barrage de Douéra.	73
Figure 3.14 : Barrage du Hamiz.	73
Figure 3.15 : Barrage du Keddara.	74
Figure 4.1 : Carte des eaux des eaux en 2024.	74
Figure 4.2 : Évolution mensuelle des eaux de surface dans le bassin Côtier Algérois 02A (2018–2024).	79
Figure 4.3 : Évolution mensuelle des eaux de surface en 2018 dans le bassin Côtier Algérois 02A.	80

Figure 4.3 : Courbe moyenne mensuelle des eaux de surface (2018–2024).	80
Figure 4.4 : Tendance saisonnière des eaux de surface dans le bassin Côtier Algérois 02A.	82
Figure 4.5 : Évolution interannuelle des eaux de surface dans le bassin Côtier Algérois 02A.	83
Figure 4.6 : Evolution mensuelle des eaux de surface du barrage de Kramis (2019).	84
Figure 4.7 : Image satellitaire de la réserve du barrage de Kramis.	84
Figure 4.8 : Evolution mensuelle des eaux de surface du barrage de KefEddir (2019).	85
Figure 4.11 : Image satellitaire de la réserve du barrage de Keddara (2018).	86
Figure 4.11 : carte de répartition des précipitations annuelles 2018.	87
Figure 4.12 : carte de répartition des précipitations annuelles 2024.	88
Figure 4.13 : précipitations mensuelles du côtier Algérois 02A.	88
Figure 4.14 : Evolution des précipitations mensuelle.	89
Figure 4.15 : Evolution des précipitations annuelles.	89
Figure 4.16 : Evolution temporelle des précipitations et des eaux de surface (Lag 0).	90
Figure 4.16 : Evolution temporelle des précipitations et des eaux de surface (Lag 1).	91
Figure 4.16 : Evolution temporelle des précipitations et des eaux de surface (Lag 2).	91
Figure 4.16 : Evolution temporelle des précipitations et des eaux de surface (Lag 3).	92
Figure 4.16 : Evolution temporelle des précipitations et des eaux de surface (Lag 4).	92

LISTE DES NOTATIONS

$H(t)$: hauteur d'eau à l'instant t (limnigramme), exprimée en cm

$Q(t)$: débit d'eau à l'instant t (hydrogramme), exprimé en m^3/s

NDWI (Normalized Difference Water Index) : indice de différence normalisée des eaux, calculé par

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) : indice de différence normalisée de la végétation, calculé par

CHIRPS : Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data – base de données de précipitations à haute résolution spatiale et temporelle

GPM (Global Precipitation Measurement) : mission satellite de la NASA dédiée à la mesure globale des précipitations

SMAP (Soil Moisture Active Passive) : mission satellite de la NASA dédiée à la mesure de l'humidité du sol par micro-ondes

SAR (Synthetic Aperture Radar) : radar à synthèse d'ouverture, technique d'imagerie active fonctionnant quelles que soient les conditions météorologiques

TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) : mission satellite conjointe de la NASA et de la JAXA consacrée à la mesure des précipitations tropicales

GLDAS NOAH 2.1 : Global Land Data Assimilation System – modèle hydrologique NOAH version 2.1 pour l'assimilation des données terrestres

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) : véhicule aérien sans pilote, utilisé pour la collecte de données de surface

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) : capteur optique à résolution modérée embarqué sur les satellites Terra et Aqua

AMSRE (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS) : radiomètre micro-ondes à balayage avancé pour le programme Earth Observing System (lorsqu'il apparaît dans l'étude)

INTROUDUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les ressources en eau constituent aujourd'hui un élément clé du développement durable, notamment face aux défis croissants liés au changement climatique et aux rapides évolutions démographiques. Dans ce contexte, les études hydrologiques sont essentielles pour comprendre la dynamique des systèmes hydrologiques et leur répartition spatiale et temporelle. Les modèles hydrologiques modernes reposent principalement sur la disponibilité de données précises et en temps réel, notamment les mesures des précipitations, les niveaux d'eau de surface et l'humidité du sol, qui constituent les principales données d'entrée pour les processus de simulation et de prévision.

Cependant, la réalité pratique présente des défis importants en matière de collecte de données hydrologiques, en particulier dans les régions reculées et en développement. De nombreux bassins fluviaux souffrent d'une grave pénurie de stations de surveillance terrestres, soit en raison des coûts élevés de leur mise en place et de leur maintenance, soit de la difficulté d'accès à des zones géographiques spécifiques. De plus, les données disponibles souffrent souvent de problèmes méthodologiques liés à leur précision et à leur exhaustivité temporelle, ce qui limite l'efficacité des modèles hydrologiques et affaiblit leur capacité à soutenir la prise de décision.

Face à ces défis, les techniques de télédétection se sont imposées comme une solution pratique et prometteuse pour combler le manque de données traditionnelles. Les satellites tels que Sentinel-2 du programme européen Copernicus offrent un potentiel considérable pour la surveillance des masses d'eau grâce à l'application d'indices spectraux spécialisés tels que l'indice normalisé de l'eau (NDWI). Les bases de données mondiales telles que CHIRPS fournissent également des données pluviométriques complètes à haute résolution spatiale et temporelle.

Cette étude vise à évaluer le potentiel de l'intégration de ces sources de données modernes pour améliorer la surveillance hydrologique, en se concentrant sur le bassin hydrographique Côtier Algérois 02A comme application modèle. La méthodologie repose sur le traitement de séries temporelles d'images Sentinel-2 pour calculer l'NDWI, en parallèle avec l'utilisation des données pluviométriques CHIRPS. Les résultats sont validés par comparaison avec les mesures terrestres disponibles en des points sélectionnés.

Cette étude revêt une importance pratique majeure dans le contexte des défis actuels liés à l'eau, notamment au vu de la pression croissante sur les ressources en eau et de l'aggravation des problèmes de rareté des données dans de nombreuses régions. Ses résultats devraient contribuer à améliorer la précision des modèles hydrologiques dans les zones pauvres en données, ouvrant

Introduction Générale

ainsi de nouvelles perspectives pour une compréhension plus complète des cycles et des écoulements de l'eau dans différents environnements. Ces études devraient également contribuer au développement de systèmes de surveillance des ressources en eau plus efficaces, s'appuyant sur des technologies innovantes qui suivent le rythme des avancées technologiques modernes, améliorant les capacités de surveillance en temps réel et réduisant les lacunes en matière d'information. De plus, l'étude apportera un soutien pratique à la prise de décision dans le domaine de la gestion intégrée des ressources en eau, en fournissant aux dirigeants du secteur des outils d'analyse précis pour formuler des politiques éclairées répondant aux défis actuels et futurs. Enfin, cette recherche ouvrira la voie à de nouvelles études avancées dans le domaine de l'utilisation des techniques de télédétection pour obtenir et interpréter des données hydrologiques, associées à des résultats réalistes de haute précision. Cette étude représente une étape concrète vers une vision plus durable de la gestion des ressources en eau face au changement climatique et à la pression humaine croissante, en mettant l'accent sur l'utilisation des technologies modernes pour combler les lacunes en matière de connaissances et de données dans le domaine de l'hydrologie.

Le chapitre un cherche à explorer les méthodes de base de collecte de données hydrologiques, qui sont classées en trois catégories principales et interdépendantes. Il y a d'abord la mesure sur le terrain. Deuxièmement, la modélisation hydrologique. Enfin, il y a la télédétection, qui s'appuie sur des satellites ou des drones pour collecter régulièrement des données complètes.

Le chapitre deux traite du concept de technologie de télédétection et de son importance cruciale dans le domaine de l'hydrologie, car cette technologie est utilisée pour collecter et analyser des données relatives à l'eau avec une grande précision et une grande efficacité.

Le chapitre trois traite le bassin hydrographique Côtier Algérois 02A, située au nord de l'Algérie, qui est considérée comme un point focal hydrologique, social et économique.

Dans le chapitre 4, nous nous plongeons dans le monde de la technologie de télédétection et dans la manière dont elle peut être utilisée pour analyser les données hydrologiques, nous permettant d'explorer les phénomènes hydrologiques avec une précision et sur de vastes échelles.

Chapitre 1

1. Données hydrologiques : mesures, modélisation et télédétection

Introduction

L'hydrologie des bassins versants repose sur l'analyse rigoureuse de données quantitatives et qualitatives, indispensables à la compréhension du cycle de l'eau et à l'évaluation des ressources hydriques. Ces données proviennent de différentes approches : mesures in situ, détection à distance et modélisation. Ce chapitre présente les principales méthodes utilisées pour l'acquisition et la génération des données hydrologiques, en insistant sur leurs principes, leurs avantages et leurs limites.

1.1. Mesures in situ

1.1.1. Précipitations

Toute l'eau qui tombe sur la Terre à partir de l'atmosphère est appelée précipitation. Cette eau peut se présenter sous diverses formes : liquide (pluie), solide (grêle, neige), ou encore sous forme de condensation comme la rosée ou le givre. Les précipitations résultent de changements de température ou de pression atmosphérique. Elles représentent la principale porte d'entrée de l'eau dans les systèmes hydrologiques continentaux, notamment les bassins versants (**Koussa, 2021**).

Mesurer la hauteur des chutes d'eau est une tâche complexe, en raison des variations causées par plusieurs facteurs tels que les perturbations du mouvement, la topographie, la localisation des précipitations et autres. Quel que soit le type de précipitation, qu'elle soit liquide ou solide, on mesure la quantité d'eau qui tombe par la hauteur des précipitations, qui s'exprime en millimètres (mm) par unité de surface horizontale (**Koussa, 2021**).

L'Intensité des précipitations est mesurée en millimètres par heure, ce qui reflète la quantité d'eau tombant sur une période donnée.

Les équivalences sont les suivantes :

- 1 mm = 1 décimètre cube par mètre carré = 1 litre par mètre carré = 10 mètres cubes par hectare.

1.1.1.1.Appareils de mesure des précipitations

- **Pluviomètre :**

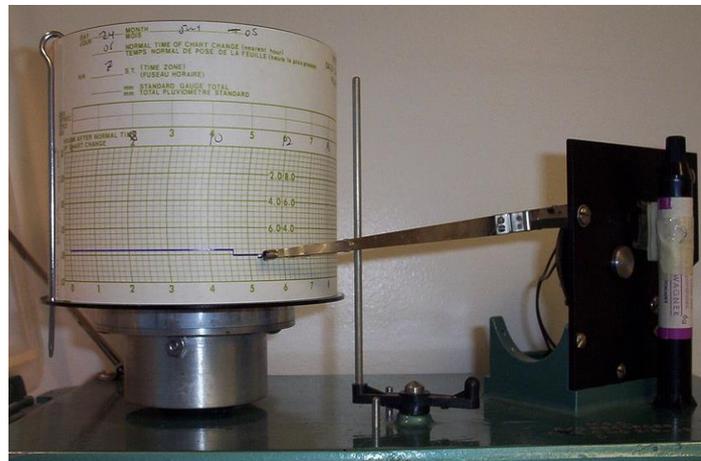
C'est un instrument utilisé pour estimer la précipitation (**figure 1.1a**), qu'elle soit liquide ou solide. Il permet de connaître la quantité d'eau qui a été déposée et collectée sur une surface donnée durant la période de temps entre deux relevés (**Koussa, 2021**).

- **Pluviographes :**

C'est un outil de surveillance des précipitations qui fonctionne de la même manière que la mesure de la pluie (**figure 1.1b**), mais est équipé d'un appareil qui permet de connaître la distribution de l'eau dans le temps, en plus de mesurer sa hauteur totale (**Koussa, 2021**).



-a-



-b-

Figure 1.1 : instruments de mesure des précipitations (**Techno-science, 2025**).

1.1.2. L'évapotranspiration

L'évapotranspiration c'est le processus par lequel l'eau passe de son état liquide à l'état de vapeur, et c'est un type d'évaporation physique. Les plans d'eau et les plantes sont les principales sources de vapeur d'eau. On peut également parler de sublimation, où l'eau passe de son état solide (glace) directement à l'état de vapeur. Le rayonnement solaire est le principal facteur affectant le processus d'évaporation (**Koussa, 2021**).

1.1.2.1. Appareils de mesure d'évapotranspiration :

Différents appareils ont été développés pour mesurer l'évapotranspiration à partir d'une surface ouverte, mais chacun présente ses propres avantages et inconvénients. Le plus courant d'entre eux est :

- Evaporomètre –atmomètre- (**figure 1.2a**).
- Bac classe A -du Weather Bureau, U.S.A- (**figure 1.2b**).

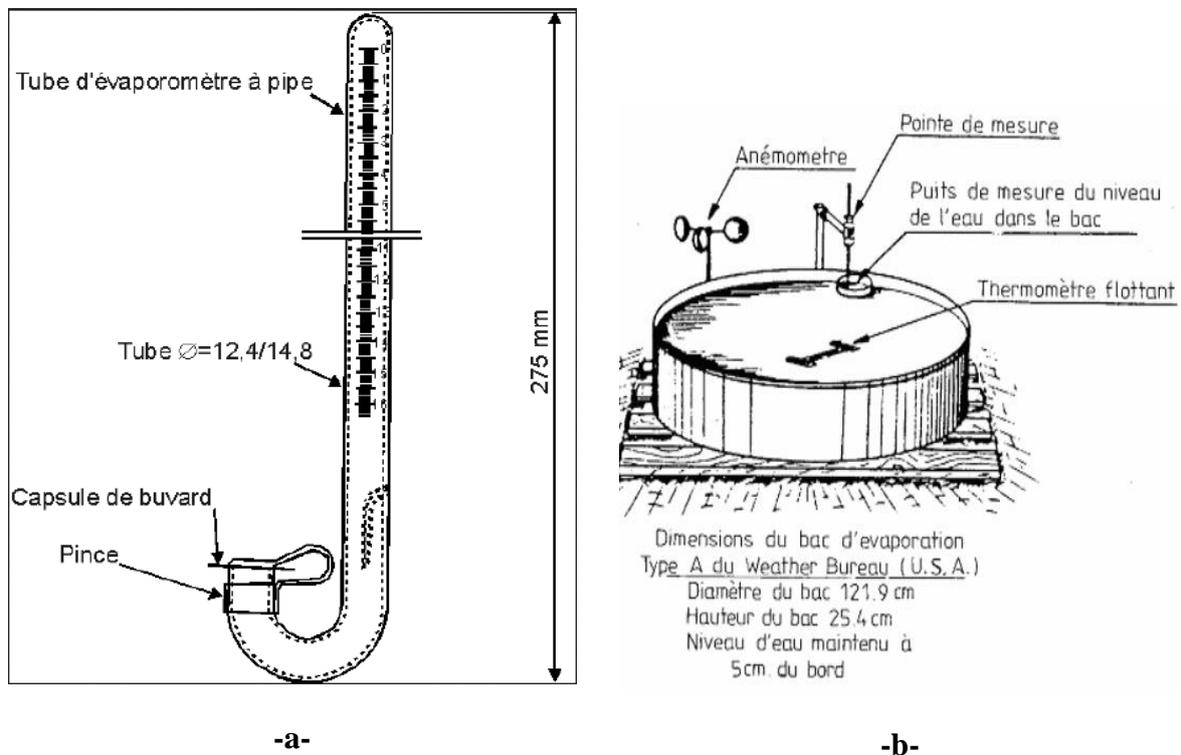


Figure 1.2 : instruments de mesure d'évapotranspiration (Paré, 2006).

1.1.3. La température

La température est une grandeur physique qui exprime l'état thermique d'un milieu et reflète l'énergie cinétique moyenne des molécules. En hydrologie, elle joue un rôle central en influençant les processus tels que l'évaporation, l'évapotranspiration, la fonte de la neige, la viscosité de l'eau, et la solubilité des gaz comme l'oxygène dissous. Elle varie dans le temps (cycles journaliers et saisonniers) et dans l'espace (avec l'altitude, la couverture du sol, ou la proximité de masses d'eau). Mesurée en degrés Celsius (°C). La température est ainsi un paramètre fondamental dans les bilans hydriques et énergétiques, les modèles de prévision climatique, et l'analyse de la qualité des eaux de surface.

1.1.3.1. Appareils de mesure de la température

Le thermomètre mesure uniquement la température, quelle que soit sa valeur. Il est donc très important de veiller à ce qu'il soit en équilibre thermique avec l'environnement dont on souhaite mesurer la température. Qu'il s'agisse de mesurer la température de l'air ou de l'eau, la précision exige cette balance (Koussa, 2021).

Il existe plusieurs types de thermomètre (Chetoui, 2020) :

- À gaz ;
- Liquide (alcool ou mercure)
- Electronique
- Magnétique



Thermometers



Thermograph

Figure 1.3 : instruments de mesure de température (Wellington, 2011).

1.1.4. Le ruissellement

Le ruissellement est l'écoulement de l'eau à la surface du sol qui se produit lorsque les précipitations dépassent la capacité d'infiltration du sol ou lorsque ce dernier est saturé. Il constitue une composante majeure du cycle hydrologique et représente la fraction des précipitations qui atteint les exutoires (cours d'eau, rivières) soit de manière immédiate (écoulement direct), soit après un certain délai (écoulement différé). Le ruissellement est influencé par plusieurs facteurs, notamment l'intensité et la durée des pluies, la pente du terrain, la nature et la perméabilité du sol, l'occupation du sol (végétation, imperméabilisation), ainsi que l'état hydrique initial du bassin versant. Le débit de ruissellement est généralement exprimé en mètres cubes par seconde (m^3/s).

Le ruissellement joue un rôle crucial dans l'alimentation des cours d'eau, le transport des sédiments et des polluants, ainsi que dans les phénomènes d'érosion et d'inondation.

1.1.4.1. Mesure du débit

Le débit des cours d'eau varie au cours du temps. Certaines études requièrent des mesures instantanées effectuées à des moments précis, tandis que dans la majorité des cas, l'intérêt porte sur l'évolution temporelle du débit. Pour cela, des stations hydrométriques (ou stations de jaugeage) sont installées afin d'enregistrer la hauteur d'eau (H) en fonction du temps. Cette hauteur, notée $H(t)$, constitue ce que l'on appelle un limnigramme. Parallèlement, des mesures ponctuelles de débit sont réalisées, correspondant à des hauteurs d'eau enregistrées simultanément. En croisant ces données (courbe de tarage), on peut reconstituer l'évolution du débit au cours du temps $Q(t)$, connue sous le nom d'hydrogramme (Koussa, 2021).

Parmi les principales méthodes de mesure du débit, on distingue :

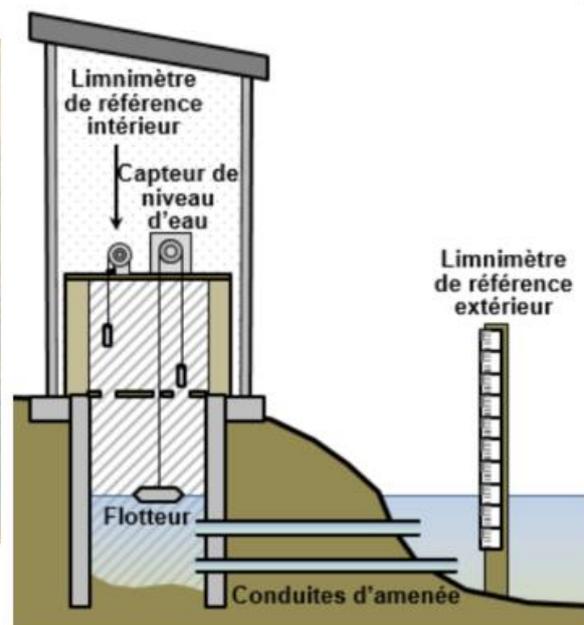
- La méthode de jaugeage classique (par sections transversales)
- La méthode de jaugeage au flotteur

Quant aux instruments utilisés, on peut citer :

- Le moulinet hydrométrique (figure 1.4a)
- Le limnimètre -capteur de niveau- (figure 1.4b)



-a-



-b-

Figure 1.4 : instruments de mesure de débit (WikHydro, 2024)

1.2. Modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique constitue un outil fondamental pour comprendre la dynamique des bassins versants et contribuer à une gestion durable des ressources en eau. Les premiers modèles hydrologiques modernes, simulant l'écoulement des précipitations, ont émergé dans les années 1960. Selon Zeghdoudi et Boudjehm (2018), la modélisation hydrologique correspond à une représentation partielle ou complète du cycle de l'eau.

1.2.2. Classification des modèles

De nombreuses classifications des modèles hydrologiques existent, reflétant la diversité des approches et des méthodes utilisées. Cette diversité rend difficile l'établissement d'une classification unifiée. Bien que ce travail ne vise pas à développer un modèle hydrologique traditionnel, il s'appuie sur les classifications disponibles dans la littérature pour présenter la démarche adoptée (**Zeghdoudi & Boudjehm, 2018**).

1.2.2.1. Modèle global ou distribué

Un modèle est dit global lorsqu'il considère le bassin versant comme une entité unique, sans distinction spatiale détaillée. À l'inverse, un modèle distribué divise le bassin en sous-unités (par exemple, mailles ou éléments discrets) pour prendre en compte la variabilité spatiale des paramètres et des processus. Les modèles quasi-distribués, bien que parfois mal définis, combinent des aspects des deux approches en découpant le bassin en sous-bassins, sur lesquels une méthode globale est appliquée, souvent avec des paramètres variables spatialement (**Zeghdoudi & Boudjehm, 2018**).

1.2.2.2. Modèle conceptuel ou physique

Les modèles physiques décrivent les mécanismes internes du système hydrologique en résolvant des équations différentielles issues de la mécanique des fluides, telles que les équations de Saint-Venant, la loi de Darcy, l'équation de Richards ou les lois de conservation. En revanche, les modèles conceptuels analysent le comportement du bassin de manière simplifiée, en représentant les processus hydrologiques sous forme de sous-processus globaux (**Zeghdoudi & Boudjehm, 2018**).

1.2.2.3. Modèle événementiel ou continu

Un modèle événementiel simule le flux généré par un seul événement pluvieux, tandis qu'un modèle continu reproduit la variation du débit sur une période prolongée (par exemple, une

saison ou une année), en intégrant l'ensemble des processus hydrologiques (**Zeghdoudi & Boudjehm, 2018**).

1.2.3. Modèles hydrologiques GR

Depuis plus de trente ans, l'équipe d'hydrologie de l'IRSTEA (anciennement CEMAGREF, aujourd'hui intégré à INRAE) développe les modèles GR, abréviation de « Génie Rural ». Ces modèles visent à améliorer la précision des prévisions de débit dans divers bassins versants. Parmi les plus connus figurent GR4H, GR4J, GR5J, GR6J, GR2M et GR1A (**Madani & Mahtout, 2020**).

1.2.3.1. Caractéristiques de ces modèles

Les modèles GR se distinguent par leur efficacité et leur fiabilité, grâce à des structures simples qui ne requièrent pas de grandes quantités de données. Ils utilisent des informations facilement accessibles, telles que les précipitations, les températures et les débits. Ces modèles opèrent sur différentes échelles temporelles (horaire, journalière, mensuelle ou annuelle) et trouvent des applications dans la prévision des crues, l'évaluation des ressources en eau et les projections hydrologiques futures (**Madani & Mahtout, 2020**).

1.2.3.2. Nature des modèles

Les modèles GR sont à la fois conceptuels et globaux. Ils sont conceptuels car ils représentent de manière simplifiée le comportement hydrologique des bassins versants en s'appuyant sur leurs propriétés physiques. Ils sont globaux car ils traitent le bassin comme une entité unique, intégrant les processus hydrologiques spatiaux pour estimer le débit à la sortie. Connus également sous le nom de modèles de réservoir, ils représentent le bassin comme un ensemble de réservoirs interconnectés, décrits par des équations d'équilibre et des lois de décharge (**Madani & Mahtout, 2020**).

1.2.3.3. Composants du modèle

- Unité de production : Gère l'équilibre hydrique à travers le stockage, l'évaporation et le ruissellement.
- Unité de transport : Contrôle la répartition temporelle des flux au sein du bassin.

1.2.3.4. Principales caractéristiques des modèles GR

Les modèles GR adoptent une triple globalisation (processus, espace, temps) du système bassin versant (**Madani & Mahtout, 2020**) :

- **Processus**

Les modèles GR reposent sur des relations comportementales simples, établies à partir d'expériences à l'échelle du bassin versant. Ces relations reflètent une moyenne des processus hydrologiques, sans lien direct avec la physique détaillée des phénomènes locaux (**Madani & Mahtout, 2020**).

- **Espace**

Les modèles GR globaux considèrent le bassin versant dans son ensemble, malgré ses caractéristiques variables. Les tentatives de développer des modèles plus détaillés spatialement n'ont pas encore produit de résultats pleinement satisfaisants, maintenant l'accent sur une approche globale (**Madani & Mahtout, 2020**).

- **Temps**

Les modèles GR fonctionnent à des pas de temps définis : annuel (GR1A), mensuel (GR2M), quotidien (GR4J), avec des versions horaires comme GR4H en développement. Chaque modèle traite des moyennes temporelles adaptées à son échelle. Le modèle journalier peut également être utilisé pour analyser des données horaires (**Madani & Mahtout, 2020**).

1.2.3.5. Exemples de modèles GR

- **Modèle GR1A**

Le modèle GR1A (« Génie Rural à 1 paramètre Annuel ») est un outil simple qui convertit les précipitations annuelles en ruissellement à l'aide d'un unique paramètre ajusté chaque année. Développé à la fin des années 1990 par le CEMAGREF, il facilite l'estimation des débits annuels pour la gestion durable des ressources en eau, notamment en zones rurales (**Medane, Kheira**).

- **Modèle GR2M**

Le modèle GR2M, modèle mensuel à deux paramètres, simule le débit en fonction des précipitations mensuelles. Développé à la fin des années 1980 par le CEMAGREF et amélioré jusqu'en 2006, il repose sur une structure conceptuelle comprenant un réservoir de production (stockage d'humidité dans le sol) et un réservoir de routage (mouvement de l'eau). Il intègre un suivi de l'état d'humidité du bassin pour refléter l'influence des conditions antérieures sur le débit (**Medane, Kheira**).

- **Modèle GR4J**

Le modèle GR4J (« Génie Rural à 4 paramètres Journaliers ») est un modèle quotidien avancé pour simuler les précipitations et le ruissellement. Développé au début des années 1990 par le CEMAGREF, il est largement utilisé dans la gestion des ressources en eau pour sa robustesse et sa fiabilité (Medane, Kheira).

1.3. Télédétection pour l'acquisition des données hydrologiques

La télédétection (remote sensing) est une méthode d'acquisition de données qui permet de mesurer des variables hydrologiques à distance (figure 1.5), sans intervention physique sur le terrain. Elle utilise des capteurs embarqués sur des plateformes comme des satellites, des avions ou des drones, qui captent le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par la surface terrestre. Cette technique est essentielle pour surveiller des zones étendues ou difficilement accessibles, offrant une couverture spatiale et temporelle que les mesures traditionnelles ne peuvent égaler. En hydrologie, la télédétection est utilisée pour estimer des paramètres tels que les précipitations, l'humidité du sol, la couverture neigeuse ou les niveaux d'eau. Cette section détaille les principes, les variables mesurées et les technologies associées à la télédétection hydrologique (Lillesand et al ; 2015).

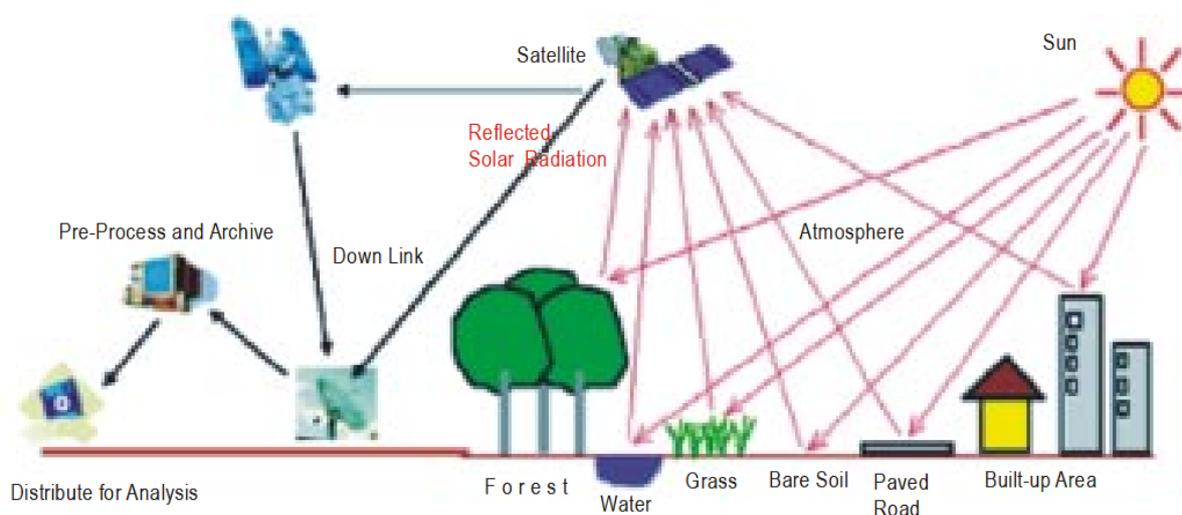


Figure 1.5 : Principe de télédétection (Sivakumar, 2003).

1.3.1. Principes de base

La télédétection repose sur l'analyse du spectre électromagnétique (visible, infrarouge, micro-ondes) pour obtenir des informations sur les processus hydrologiques. Les capteurs peuvent être passifs -captant le rayonnement naturel-ou actifs -émettant un signal et mesurant son retour- (figure 1.6). Les données brutes sont ensuite traitées pour fournir des estimations quantitatives des variables hydrologiques (Sivakumar, 2003).

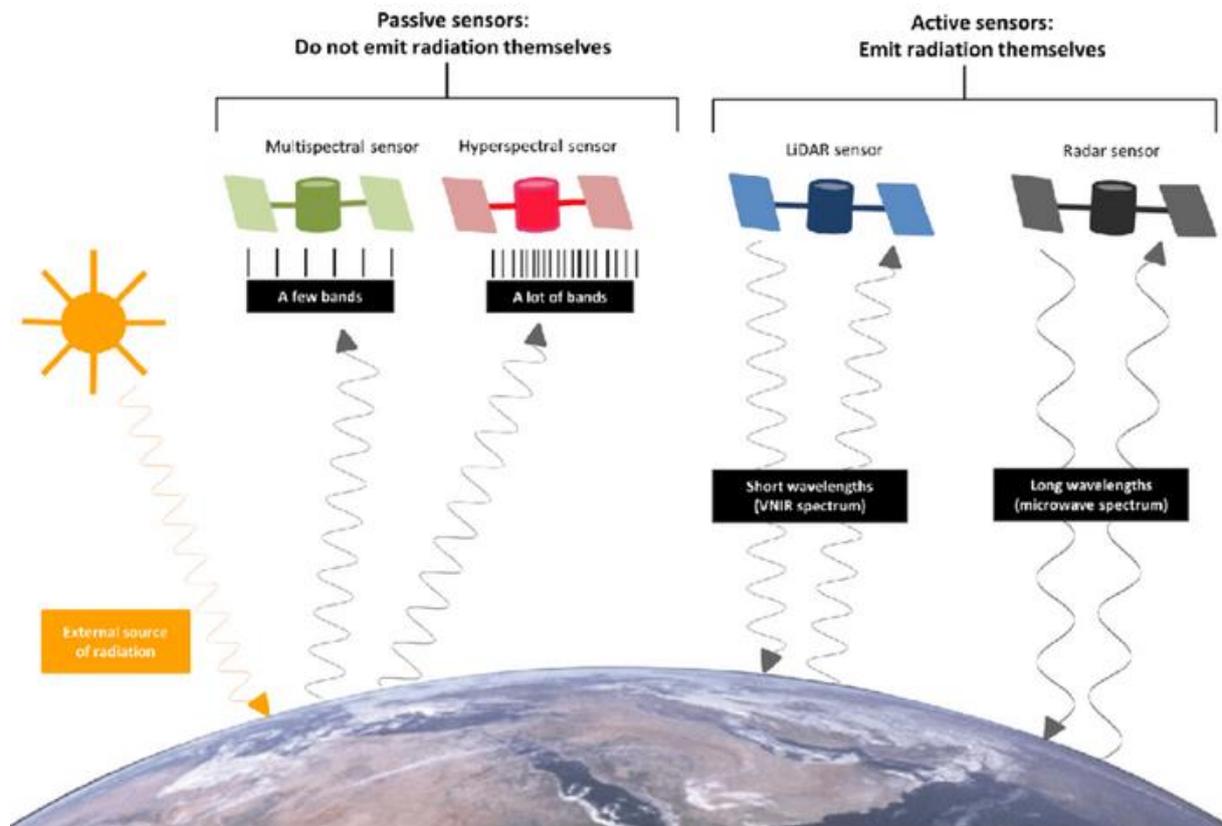


Figure 1.6 : principes de base de la télédétection (Pettorelli et al., 2018).

1.3.2. Variables hydrologiques mesurées par télédétection

La télédétection permet de mesurer plusieurs paramètres clés en hydrologie :

- **Précipitations**

Les satellites équipés de capteurs micro-ondes passifs ou de radars actifs, tels que la mission GPM (Global Precipitation Measurement), estiment l'intensité et la distribution spatiale des précipitations à l'échelle globale. Ces données, disponibles à des résolutions de 0,1° à 0,5°, sont essentielles pour la modélisation hydrologique et la prévision des crues (NASA, 2024).

- **Humidité du sol**

Les capteurs micro-ondes, comme ceux de la mission SMAP (Soil Moisture Active Passive), mesurent la teneur en eau des couches superficielles du sol (0-5 cm). Les radars actifs (ex. Sentinel-1) et les radiomètres passifs offrent une résolution spatiale variant de 1 à 40 km, adaptée à la gestion agricole et à l'évaluation des sécheresses (NASA, 2025).

- **Température de surface**

Les capteurs infrarouges thermiques, embarqués sur des satellites comme MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) ou Landsat, cartographient la température de surface des sols et des plans d'eau. Ces données, avec une résolution spatiale de 30 m à 1 km, permettent d'estimer l'évapotranspiration et les bilans énergétiques (**de Souza et al. 2023**).

- **Étendue des surfaces en eau et niveaux d'eau**

Les radars à synthèse d'ouverture « Synthetic Aperture Radar » (SAR), comme ceux de Sentinel-1, détectent les zones inondées et cartographient les surfaces en eau, tandis que les altimètres satellitaires (ex. Jason-3, Sentinel-6) mesurent les hauteurs des lacs et rivières avec une précision centimétrique (**Choi et al., 2024 ; Nilsson & Nielsen, 2024**).

1.3.3. Technologies et capteurs de télédétection

Les technologies utilisées en télédétection hydrologique incluent (**Tian et al. 2023**) :

- **Capteurs optiques** : Ils opèrent dans les domaines visible et infrarouge (ex. Landsat, MODIS). Sensibles aux nuages, ils sont idéaux pour la végétation, la neige et la température de surface.
- **Capteurs micro-ondes** : Les radiomètres passifs (ex. SMAP, AMSR-E) et les radars actifs (ex. Sentinel-1, GPM) pénètrent les nuages et mesurent les précipitations, l'humidité du sol et les surfaces en eau.
- **Altimètres satellitaires** : Ils utilisent des impulsions radar ou laser pour mesurer les hauteurs de surface (ex. Sentinel-6).

1.3.4. Traitement des données

Les données brutes issues de la télédétection nécessitent un traitement complexe, incluant (**Billen & Cornélis, 2000**) :

- **Correction géométrique et radiométrique** : pour aligner les images et ajuster les variations de capteurs.
- **Modèles d'inversion** : pour convertir les signaux électromagnétiques en variables hydrologiques (ex. humidité du sol à partir de la rétrodiffusion radar).
- **Validation** : en comparant les données satellitaires avec des mesures in situ pour garantir leur précision.

1.3.5. Avantages et limites

- **Avantages :** Couverture spatiale étendue, accès à des zones reculées, fréquence des observations (quotidienne à hebdomadaire), et intégration dans les modèles hydrologiques.
- **Limites :** Résolution spatiale parfois insuffisante pour les petits bassins, sensibilité des capteurs optiques aux nuages, et nécessité de validation avec des données in situ.

1.3.6. Exemples d'applications

La télédétection est largement utilisée pour :

- **Prévision des crues :** Les données de précipitations (GPM) et d'inondations (Sentinel-1) permettent une surveillance en temps réel.
- **Gestion des ressources en eau :** Les cartes d'humidité du sol (SMAP) et de température (MODIS) optimisent l'irrigation.
- **Suivi des sécheresses :** Les indices dérivés de la télédétection (ex. NDVI, indice de végétation) évaluent l'impact des déficits hydriques.

La télédétection est un outil incontournable pour l'acquisition de données hydrologiques, offrant une vision globale et continue des processus du cycle de l'eau. Malgré ses limites, elle complète efficacement les mesures in situ et la modélisation, renforçant la capacité à gérer durablement les ressources en eau et à anticiper les risques hydrologiques.

Conclusion

Ce chapitre a examiné les principales méthodes d'acquisition des données hydrologiques dans les bassins versants, essentielles pour comprendre les dynamiques hydriques et soutenir une gestion durable des ressources en eau. Les mesures in situ, telles que les pluviomètres et les stations manométriques, offrent des données précises à l'échelle locale, mais leur couverture spatiale et temporelle reste limitée. La modélisation hydrologique, illustrée par les modèles GR (GR1A, GR2M, GR4J), permet de simuler les processus du cycle de l'eau et de pallier l'absence de données observées, bien que sa fiabilité dépende d'une calibration rigoureuse et d'une gestion des incertitudes. Enfin, la télédétection, grâce à des technologies comme les capteurs optiques (MODIS, Landsat), micro-ondes (SMAP, GPM) et altimètres (Sentinel-6), fournit une couverture spatiale et temporelle étendue, permettant de mesurer des variables clés comme les précipitations, l'humidité du sol et les niveaux d'eau. Malgré des limites, telles qu'une résolution parfois insuffisante pour les petits bassins, la télédétection se distingue par sa capacité à surveiller des zones vastes ou reculées, ce qui en fait une méthode pivot pour les

analyses hydrologiques futures. Ces trois approches, complémentaires, répondent à des besoins variés en termes d'échelle et de précision. En particulier, la télédétection, par son potentiel à générer des données globales et fréquentes, jouera un rôle central dans les investigations ultérieures de ce travail, notamment pour l'étude des dynamiques hydrologiques et la gestion des ressources en eau.

Chapitre 2

2. Méthodes de télédétection pour la surveillance

Introduction:

Ce chapitre explore le concept de télédétection et souligne son importance cruciale en hydrologie, car il s'agit d'un outil scientifique et technique avancé qui contribue de manière significative à la compréhension et à la gestion des ressources en eau. La technologie de télédétection a connu un développement remarquable depuis ses débuts au XIXe siècle, lorsque les photographies aériennes étaient utilisées à des fins militaires et topographiques. Elle est ensuite passée à une étape plus précise avec l'introduction des satellites dans les années 1970, notamment grâce au programme américain Landsat, qui a fourni des images et des données complètes et périodiques sur la surface de la Terre.

La télédétection est basée sur la capture et l'analyse du rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par des objets à la surface de la Terre. Ces phénomènes physiques sont utilisés pour détecter les propriétés de la terre, des plantes, de l'eau et d'autres éléments. Parmi ces types de rayonnement, le rayonnement magnétique joue un rôle essentiel dans la compréhension de la composition géologique du sol et des couches souterraines, ce qui est particulièrement important dans la recherche liée à l'eau. Ce processus est intégré à des systèmes de surveillance avancés qui incluent des satellites, des avions et des radars, permettant une surveillance continue et précise des changements environnementaux.

Dans le domaine de l'hydrologie, la télédétection a prouvé son efficacité en tant qu'outil clé pour la surveillance des précipitations, du ruissellement de surface, des précipitations et d'autres propriétés physiques, ainsi que pour la détection des emplacements des eaux souterraines. Elle est également utilisée pour analyser la couverture végétale, qui affecte directement le cycle de l'eau, et est considérée comme une méthode peu coûteuse par rapport aux mesures traditionnelles sur le terrain, en particulier dans les zones accidentées ou éloignées.

En conséquence, ce chapitre cherche à fournir un aperçu complet du concept scientifique de la télédétection, de son développement historique et de son mécanisme de fonctionnement, en mettant l'accent sur ses applications les plus importantes dans l'étude des phénomènes hydrologiques et le rôle qu'elle joue dans le soutien à la prise de décision dans la gestion des ressources en eau.

2.1. Historique de la télédétection

Le voyage de la photographie aérienne comme moyen d'observation et de documentation a commencé au milieu du XIXe siècle. 1858 est considérée comme le véritable point de départ de ce domaine, lorsque Gaspard-Félix Tournachon, dit « Nadar » (**figure 2.1**), prit la première photographie aérienne depuis un ballon au-dessus des environs de Paris. Bien que cette image soit relativement floue en raison des technologies disponibles à l'époque, elle a jeté les bases d'une future révolution dans les méthodes de collecte de données du ciel (**Lillesand & Chipman ,2008**).



Figure 2.1 : Nadar premier photographe.

Au fil du temps, cette technologie a connu un développement important à la fin du XIXe et au début du XXe siècle, lorsque des ballons et des cerfs-volants ont été utilisés pour transporter des caméras et capturer des images de la Terre vues d'en haut (**figure 2.2**). Pendant la Première Guerre mondiale, la photographie aérienne est devenue un outil essentiel dans les opérations de reconnaissance militaire, accélérant considérablement le développement des équipements et des technologies liés à ce domaine (**Lillesand & Chipman, 2008**).



Figure 2.2: Première image satellitaire de la terre (Kennedy, ni).

Ces développements ont ouvert la voie à la télédétection, qui s'appuie sur l'analyse d'images aériennes et spatiales pour comprendre les caractéristiques de la surface de la Terre et les phénomènes naturels. (Lillesand & Chipman, 2008).

2.2. Les premiers débuts de la technologie de télédétection en hydrologie

L'utilisation de la télédétection en hydrologie a commencé dans les années 1950 et 1960 avec le développement des techniques de photographie aérienne. Les photographies aériennes ont été utilisées pour la cartographie, l'analyse des bassins fluviaux et la détermination de l'utilisation des terres (figure 2.3). Cela a contribué à une évaluation préliminaire des ressources en eau, avant que les satellites n'entrent en scène (Lillesand et al, 2015).

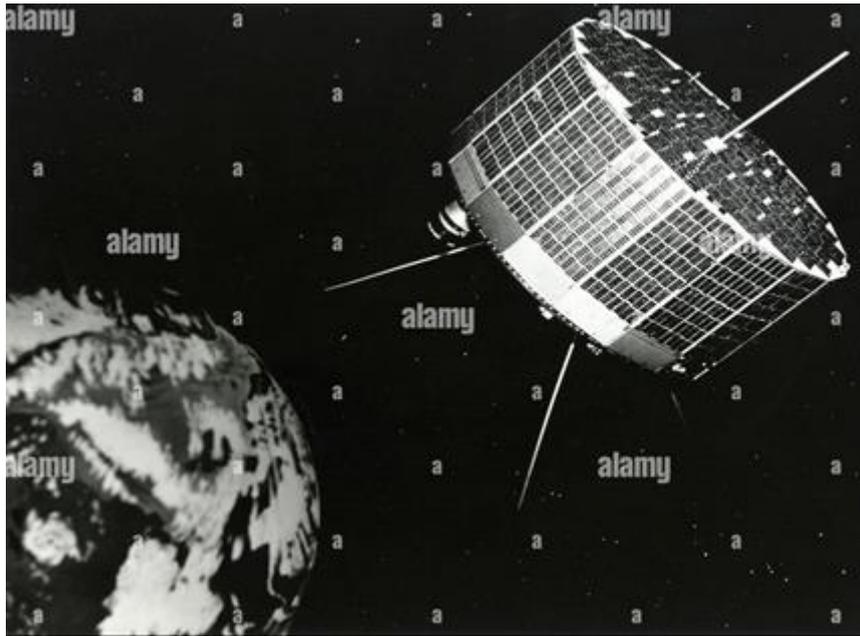


Figure 2.3 : TIROS, le premier satellite météorologique en orbite en 1960.

L'utilisation des applications hydrologiques a évolué dans les années 1980 et 1990, une période qui a vu des avancées significatives dans les technologies de télédétection. Ces technologies sont désormais capables d'analyser le ruissellement de surface, l'humidité du sol, la neige et la glace, en utilisant des méthodes telles que la thermographie infrarouge et la technologie des micro-ondes passives (**Jensen, 2007**).

Depuis 2000, des satellites équipés de technologies radar et micro-ondes, tels que Sentinel-1, SMAP et GRACE, sont utilisés pour surveiller les changements dans les eaux souterraines, l'humidité du sol et les niveaux des eaux de surface. Ces innovations permettent la collecte de données même dans les conditions météorologiques les plus difficiles et au milieu d'une épaisse couverture nuageuse. (**Schmagge et al , 2002**).

Développements récents et intégration avec les systèmes d'information géographique:

Récemment, les données de télédétection ont été intégrées aux SIG et à de multiples modèles, permettant une meilleure analyse spatiale et temporelle des processus hydrologiques tels que les inondations, la gestion des bassins versants et le changement climatique. (**Gomez et al ,2016**).

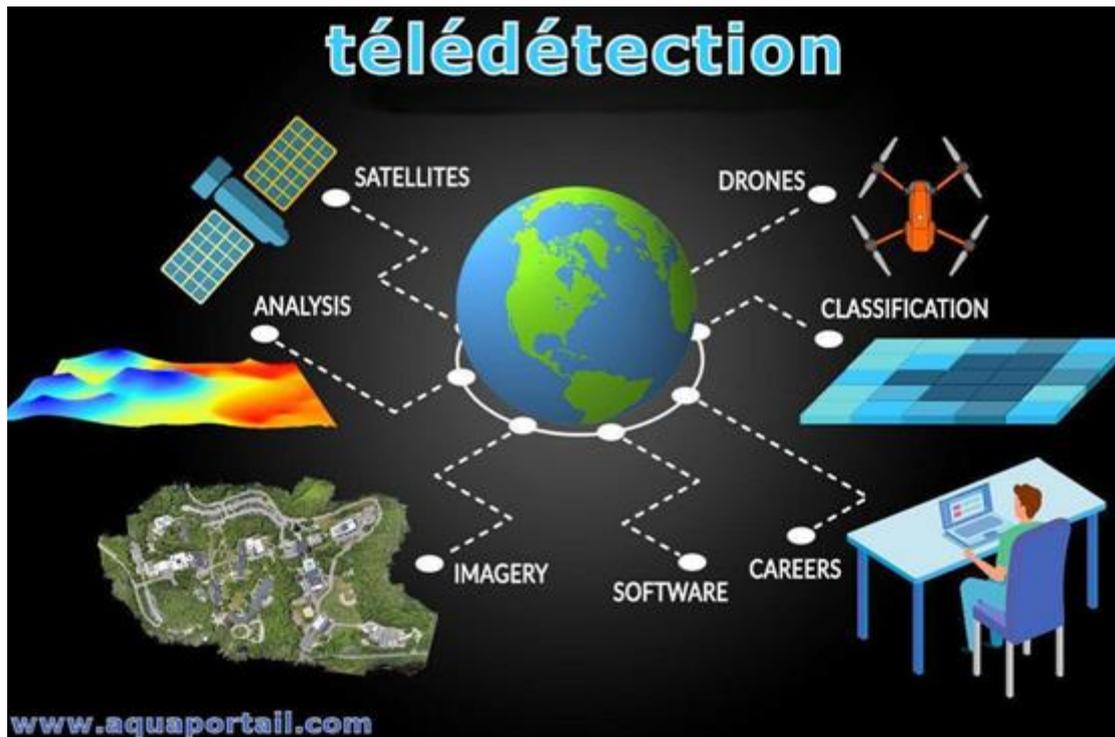


Figure 2.4 : Télédétection.

2.3. Rayonnement électromagnétique

2.3.1. Définition du rayonnement électromagnétique utilisé en télédétection

Le rayonnement électromagnétique est un type d'énergie qui se propage sous forme d'ondes électromagnétiques, constituées de champs électriques et magnétiques oscillants perpendiculaires entre eux et à la direction de propagation. En télédétection, ce rayonnement est utilisé pour détecter, enregistrer et analyser des informations sur des objets ou des surfaces à distance, sans avoir besoin de contact direct. Les capteurs sur les satellites ou les avions capturent l'énergie électromagnétique émise, réfléchi ou transmise par les objets à la surface de la Terre (Lillesand, et al, 2015).

Les techniques de télédétection s'appuient principalement sur les parties visibles, infrarouges et micro-ondes du spectre électromagnétique pour obtenir des informations précises basées sur la réponse spectrale des surfaces surveillées. (Lillesand, et al, 2015).

2.3.2. Les type De Rayonnement Électromagnétique

2.3.2.1. L'infrarouges

La gamme infrarouge est relativement large, s'étendant jusqu'à inclure des longueurs d'onde allant de 0,7 micromètre à 100 micromètres.

a. L'Infrarouge moyen

L'Infrarouge moyen, allant de 1,6 à 4 micromètres, est un outil puissant pour étudier la teneur en eau sur les surfaces. Ces rayons sont largement utilisés en foresterie et en agriculture, notamment pour cartographier les plantes qui se nourrissent des eaux souterraines. Cependant, l'atmosphère absorbe la plupart de ces rayons, ce qui la rend largement opaque en raison de la présence de vapeur d'eau. Il n'existe que quelques fenêtres atmosphériques qui laissent passer le rayonnement, qui se concentrent sur des longueurs d'onde spécifiques de 2,5, 3,5 et 5 micromètres.

b. Proche infrarouge

Le rayonnement proche infrarouge, allant de 0,7 micromètre à 1,6 micromètre, est la partie du spectre électromagnétique qui suit directement le rouge dans le spectre visible.

Lorsqu'un radiomètre détecte des niveaux proches de l'infrarouge, il mesure la luminosité résultant du rayonnement solaire réfléchi par la surface de la Terre.

Cette gamme du spectre électromagnétique est largement utilisée dans les techniques de télédétection, car elle permet de distinguer les surfaces naturelles qui présentent des différences significatives de réflectance à ces longueurs d'onde.

Ce domaine permet également d'étudier les surfaces continentales, notamment de distinguer les zones végétales et minérales. Les zones couvertes de plantes ont une réflectivité élevée dans les longueurs d'onde proches du rayonnement infrarouge, tout en réfléchissant moins le rayonnement visible.

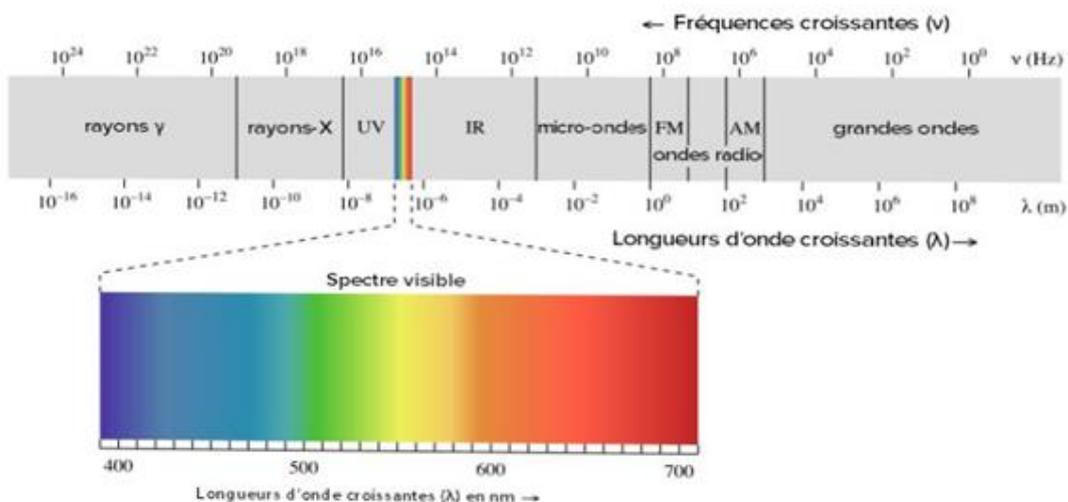


Figure 2.5: le spectre électromagnétique.

2.3.2.2. Ondes radio

Les ondes radio sont un type de rayonnement électromagnétique qui possède de grandes longueurs d'onde, allant de quelques millimètres à plusieurs kilomètres, et de basses fréquences, allant de quelques kilohertz à plusieurs gigahertz. Dans le domaine de la télédétection, ces ondes sont principalement utilisées dans les systèmes radar actifs, notamment dans la technologie radar à synthèse d'ouverture (SAR), qui se distingue par sa capacité à capturer des images de la surface de la Terre quelles que soient les conditions météorologiques ou les niveaux d'éclairage (Lillesand et al, 2015).

Avantages des ondes radio dans le domaine de la télédétection :

- **Absence de fluctuations météorologiques :**

Contrairement à la lumière visible ou au rayonnement infrarouge, les ondes radio ont la capacité de pénétrer les nuages, la pluie et le brouillard, permettant ainsi la collecte de données dans toutes les conditions météorologiques (Jensen, 2007).

- **Surveillance 24h/24 et 7j/7 :**

Les capteurs radar actifs, qui fonctionnent grâce aux ondes radio, génèrent leur propre énergie, ce qui les rend indépendants de la lumière du soleil. Ainsi, il peut prendre des photos en continu, que ce soit la nuit ou le jour.(Jensen,2007).

- **Révéler les détails de surface et la texture :**

Les ondes radio ont une grande sensibilité à la rugosité de la surface, à l'humidité du sol et à la diversité de la végétation, ce qui en fait un outil précieux dans des domaines tels que la surveillance agricole, la cartographie forestière et les études des ressources en eau (Jensen,2007).

- **Capacité à pénétrer partiellement les plantes ou le sol sec :**

Certaines bandes radio, comme les bandes L ou P, peuvent pénétrer une végétation dense ou même une couche arable sèche, révélant des structures cachées telles que des racines ou des caractéristiques géologiques (Jensen, 2007).

2.3.2.3. Micro-ondes

Les micro-ondes sont une forme de rayonnement électromagnétique dont les longueurs d'onde varient de 1 millimètre (mm) à 1 mètre (m), correspondant à des fréquences comprises entre 300 MHz et 300 GHz. Dans le domaine de la télédétection, les micro-ondes apparaissent comme

un outil puissant, car elles ont la capacité de pénétrer les nuages, la pluie et même certains types de plantes et de sols, permettant la collecte de données quelles que soient les conditions météorologiques ou le rayonnement solaire (Lillesand et al, 2015).

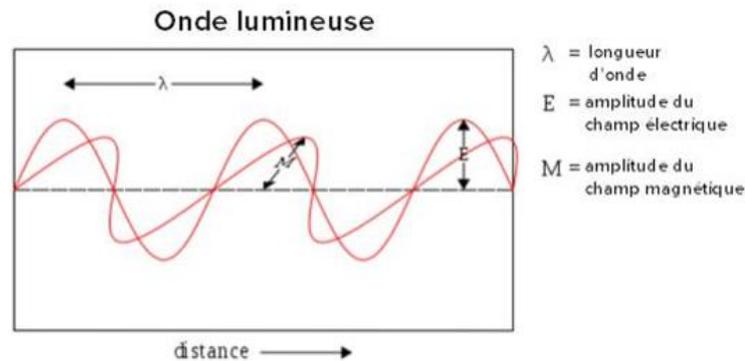


Figure 2.6 : onde Lumineuse.

Les utilisations des micro-ondes en télédétection se divisent en deux types principaux :

- Télédétection passive : Lorsque le rayonnement naturel émis par des objets est mesuré par des appareils de mesure du rayonnement (Lillesand et al, 2015).
- Télédétection active : où des signaux micro-ondes sont envoyés et les signaux réfléchis sont mesurés, comme le radar, en particulier le radar à synthèse d'ouverture (SAR).(Lillesand et al,2015).

2.3.3. Utilisation du rayonnement électromagnétique en télédétection pour surveiller les données hydrologiques

La télédétection est un outil essentiel dans les études hydrologiques, utilisé pour recueillir des informations sur les ressources terrestres et hydriques sans contact direct. En analysant le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par les surfaces naturelles, des indicateurs précis des conditions de l'eau, de l'humidité du sol, des inondations, de la présence de glace, de la présence de polluants, etc. peuvent être obtenus. L'objectif principal de l'utilisation de ce rayonnement en télédétection est de surveiller et d'analyser les caractéristiques hydrologiques et environnementales des masses d'eau et du sol de manière indirecte et efficace, couvrant de vastes zones et à une fréquence temporelle appropriée, soutenant ainsi la prise de décision en matière de gestion des ressources en eau.

Les sous-objectifs de l'utilisation du rayonnement électromagnétique dans ce contexte comprennent :

Chapitre 2 : Méthodes de télédétection pour la surveillance

- La surveillance des eaux de surface telles que les rivières, les lacs et les réservoirs, où le spectre électromagnétique visible et infrarouge est utilisé pour distinguer l'eau de la terre et suivre les changements dans l'étendue de l'eau (**Jensen, 2007**).
- L'estimation de l'humidité du sol à l'aide de longueurs d'onde micro-ondes telles que la bande L et la bande C pour surveiller la teneur en humidité est essentielle pour la modélisation du ruissellement et de la sécheresse (**Jackson et Schmugge, 1989**).
- Détection et suivi des inondations à l'aide de radars pénétrant les nuages et de technologies d'imagerie nocturne, permettant une surveillance précise des inondations même dans des conditions météorologiques difficiles (**Schumann & Bates, 2018**).
- Surveillance de la glace et de la neige à l'aide de spectres infrarouges et visibles pour suivre la fonte des neiges et estimer le stockage de l'eau dans les régions froides (**Dozier, 1989**).
- Analyse de la qualité de l'eau par spectroscopie qui permet de détecter la turbidité, la chlorophylle et les polluants grâce aux changements de la réflectance spectrale de l'eau (**Dekker & Peters, 1993**).

Ainsi, le rayonnement électromagnétique constitue un fondement essentiel des techniques de télédétection, permettant une surveillance précise et périodique des systèmes hydrologiques sans nécessiter de mesures continues sur le terrain, améliorant ainsi l'efficacité de la gestion des ressources en eau, l'alerte précoce et la planification environnementale durable.

2.4. Système D'observation

2.4.1. Les capteurs

Les capteurs sont des instruments sophistiqués capables de capter le rayonnement émis par la Terre et de le convertir en signaux qui stockent des informations. Ces appareils varient en fonction du type d'acquisition (passive ou active) et des méthodes de mesure utilisées.

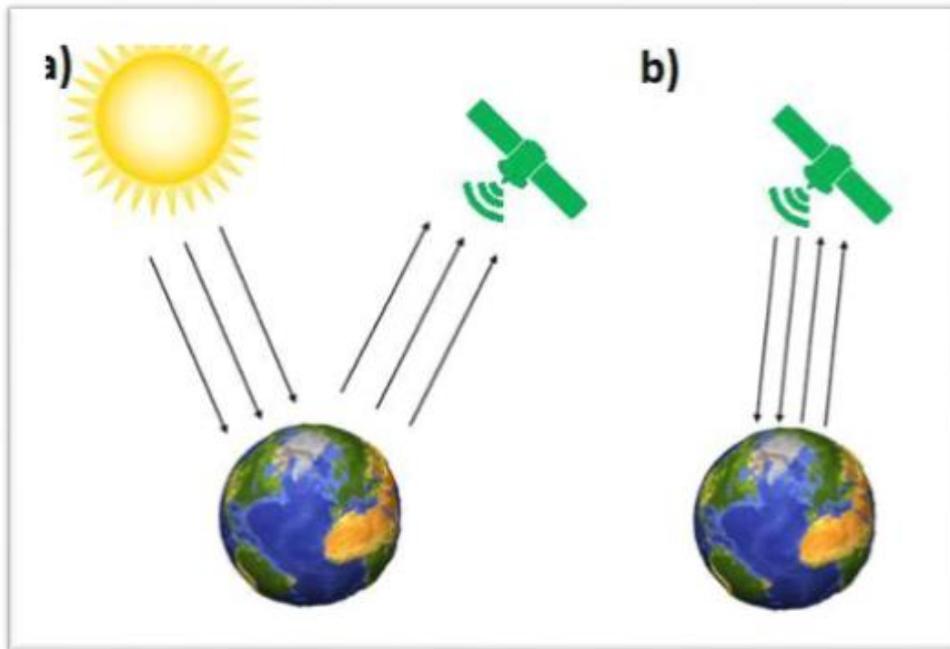


Figure 2.7 : différents capteurs de détection.

2.4.1.1. *Capteurs passifs*

Ils s'appuient sur le soleil comme source d'énergie ou de rayonnement utilisée dans les opérations de télédétection. Cette énergie est soit réfléchi (dans le spectre visible) soit absorbée et transmise par des phénomènes tels que la fluorescence et le rayonnement infrarouge thermique par la cible. Ces appareils sont des instruments de télédétection qui mesurent l'énergie naturellement disponible.

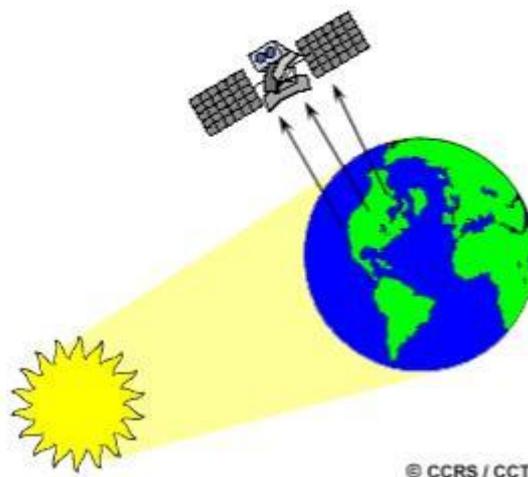


Figure 2.8 : Capteur passifs.

2.4.1.2. *Capteurs actifs*

Ils produisent leur propre énergie pour la cible, puis mesurent les signaux diffusés dans leur direction. Ces appareils fonctionnent dans la gamme des micro-ondes et sont capables de prendre des mesures à tout moment de la journée ou à n'importe quelle saison de l'année.

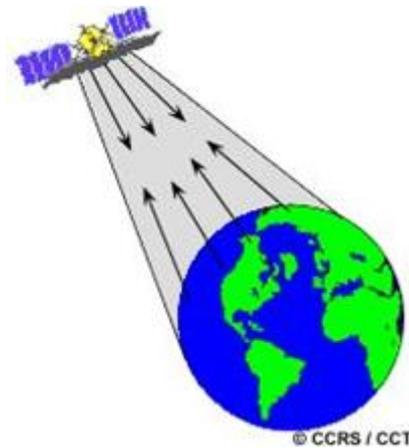


Figure 2.8 : capteur actifs.

2.5. Définition du système de surveillance et de détection à distance

La télédétection fait référence à un ensemble d'outils et de techniques utilisés pour collecter des informations sur la surface et l'atmosphère de la Terre à de longues distances. Ce système comprend principalement des capteurs, actifs et passifs, ainsi que des moyens de transport tels que des satellites, des avions et des drones, ainsi que des systèmes de traitement et d'analyse de données (Lillesand et al, 2015).

Les véhicules de télédétection sont des plateformes mobiles qui transportent des capteurs. Il existe plusieurs types de ces méthodes:

- Satellites orbitaux : utilisés pour l'observation à grande échelle, et tournent sur des orbites polaires ou géostationnaires (Lillesand et al 2015).
- Avion : Permet de surveiller des zones à moyenne altitude, offrant une résolution spatiale plus élevée.
- Véhicules aériens sans pilote (UAV) : ils sont idéaux pour les études locales, car ils se caractérisent par leur grande précision, leur flexibilité et leur faible coût (Lillesand et al 2015).

Chacune de ces méthodes présente ses avantages et ses inconvénients, en fonction des objectifs de l'étude et des exigences de résolution spatiale, temporelle et spectrales (Lillesand et al, 2015).

2.6. Définition du vecteur

Dans le monde de l'eau, un vecteur de données est un ensemble ordonné de valeurs numériques qui reflètent les mesures d'une variable hydrologique particulière, telle que le débit d'eau, les précipitations ou les niveaux d'eau, enregistrées à des moments ou à des endroits spécifiques. Chaque élément de ce vecteur représente une observation obtenue à un moment ou à un endroit particulier, nous permettant d'étudier et d'analyser les variations temporelles ou spatiales du phénomène que nous étudions (**Maidment, 1993**).

2.6.1. Type de vecteur

Dans le monde de l'eau, les vecteurs de données sont des objets géométriques utilisés pour représenter des propriétés spatiales. Ces vecteurs jouent un rôle essentiel dans les systèmes d'information géographique (SIG) pour modéliser les éléments du cycle hydrologique.

Il existe trois principaux types de vecteurs utilisés dans les données hydrologiques :

2.6.1.1. Points (point)

Représente des emplacements précis sans dimensions spatiales étendues (**Boroet al, 1998**).

Exemples : Stations de mesure, puits et pluviomètres.

2.6.1.2. Lignes (lignes ou polygones)

Représente des entités linéaires continues (**Chang, 2016**).

Exemples : Rivières, canaux et voies navigables.

2.6.1.3. Polygones

Représente des surfaces fermées avec une dimension spatiale (**Clark, 2011**).

Exemples : Bassins versants, lacs et zones inondables.

2.7. La Résolution

Dans le monde de la télédétection, les concepts de résolution spatiale, temporelle et radiométrique sont des outils fondamentaux utilisés pour évaluer la qualité des images et des données capturées. Ces éléments jouent un rôle essentiel dans la compréhension et l'analyse des phénomènes hydrologiques tels que la distribution de l'eau, les inondations, les sécheresses et les changements dans la couverture terrestre. Passons en revue chacun de ces types de précision en nous référant à des références académiques fiables :

2.7.1. Résolution spatiale

Il représente la plus petite zone distinguable dans une image satellite et est liée à la taille des pixels ; Plus la taille des pixels est petite, plus la résolution spatiale est élevée, ce qui nous permet de détecter des détails plus fins dans les caractéristiques terrestres telles que les petites rivières ou les voies navigables (Jensen, 2007).

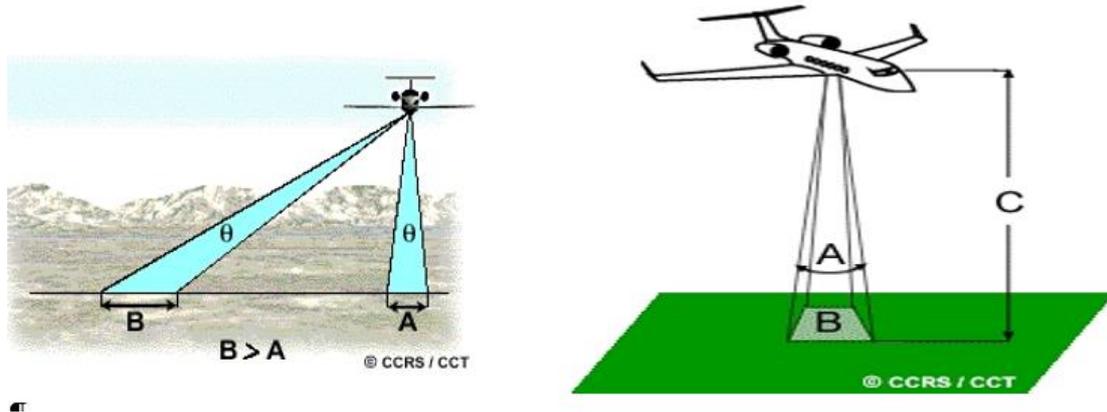


Figure 2.10 : résolution Spatiale.

Exemple : Une image avec une résolution de 10 mètres signifie que chaque pixel représente une zone de 10 x 10 mètres sur la surface de la Terre (Jensen, 2007).

2.7.2. Résolution temporelle

Il fait référence à la fréquence à laquelle le même endroit sur la surface de la Terre est photographié et est essentiel pour suivre les changements dynamiques tels que le débit des rivières, l'évaporation ou les changements de niveau d'eau (Lillesand et al,2015).

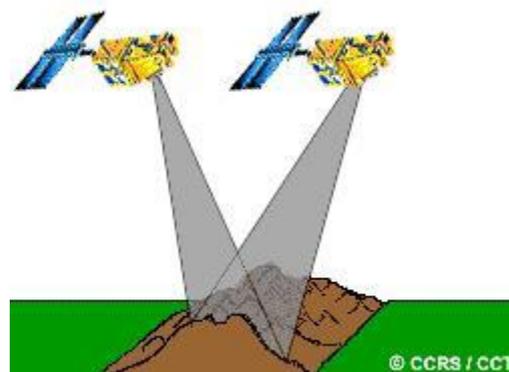


Figure 2.11 : résolution temporelle.

Chapitre 2 : Méthodes de télédétection pour la surveillance

Exemple : Le satellite MODIS a une résolution temporelle quotidienne, ce qui en fait un outil efficace pour surveiller des phénomènes quotidiens tels que la pluie ou la sécheresse (**Lillesand et al, 2015**).

2.7.3. Résolution radiométrique

Il s'agit de la capacité du capteur à distinguer les différences subtiles d'énergie réfléchie ou émise par la surface de la Terre, et se mesure en bits : une image 8 bits peut distinguer 256 degrés radiants, tandis qu'une image 12 bits peut distinguer 4096 degrés (**Campbell & Wynne, 2011**).

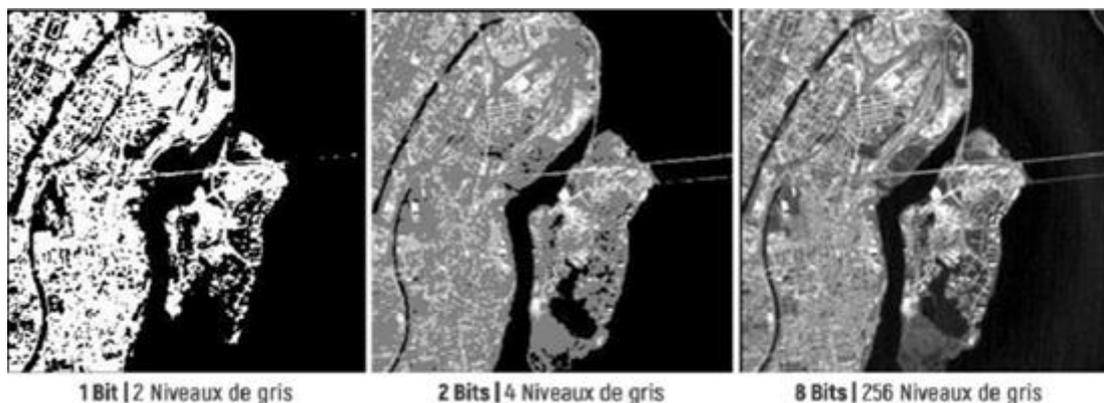


Figure 2.12 : résolution radiométrique.

Exemple : dans les applications hydrologiques, une résolution radiométrique élevée permet de distinguer les niveaux d'humidité du sol ou de salinité de l'eau (**Campbell & Wynne, 2011**).

2.7.4. La Résolution spectrale

La résolution spectrale reflète le nombre de bandes de longueurs d'onde diverses présentes dans le spectre électromagnétique (**Francidco et al, 2013**).

2.8. Le processus de la télédétection

La télédétection en hydrologie est l'utilisation de techniques telles que les satellites, les drones et les radars pour collecter des informations sur les ressources en eau, qu'elles soient superficielles ou souterraines, sans avoir besoin de communication directe avec eux. Cette méthode vise à étudier la répartition de ces ressources, leurs quantités, leurs changements et leur mouvement (**Qara, 2021**).

2.8.1. Les étapes du processus de télédétection

2.8.1.1. Mode d'acquisition

a. Définition générale :

Le mode d'acquisition est la méthode par laquelle les données sont collectées à la surface de la Terre à l'aide de capteurs spatiaux. Ce mode comprend les angles d'observation, les modèles de balayage et la fréquence de passage, ainsi que le type de capteur utilisé dans le processus (**Ben Nasser,2018**).

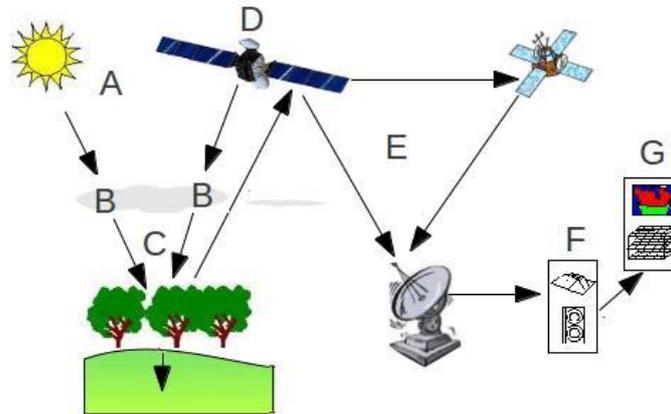


Figure 2. 13 : les processeurs de télédétection.

b. Types de mode d'acquisition en télédétection

• Mode d'acquisition du nadir :

Les images sont capturées sous un angle perpendiculaire directement vers la surface de la Terre, permettant une analyse précise des changements topographiques et hydrologiques sans aucune distorsion angulaire (**Ben Nasser, 2018**).

• Mode oblique :

Les photos sont prises sous un angle oblique, ce qui permet de capturer les montagnes et les hauts plateaux et d'éviter les ombres ou les obstacles. Ce mode est particulièrement utile dans les zones au terrain complexe (**Laribi, 2020**).

• Mode balai-poussoir :

sur la capture linéaire de l'image, ce qui améliore la résolution de l'image et réduit les distorsions.(**Tayyibi, 2019**).

• .Mode balai à fouet

Il utilise un scanner oscillant pour collecter des données en effectuant des balayages répétés dans le sens horizontal. Il est souvent utilisé sur des satellites plus anciens tels que Landsat 5 et 7 (**Continrnt, 2021**).

Chapitre 2 : Méthodes de télédétection pour la surveillance

c. Modes d'acquisition radar (par exemple IW, EW, SM dans Sentinel-1)

- IW (Interferometric Wide Swath) : couvre de larges zones avec une précision moyenne.
- EW (Extra Wide Swath) : Pour couvrir de grandes surfaces avec moins de précision.
- SM (Stripmap Mode) : offre une haute résolution mais dans une bande étroite (Sabti,2017).

2.8.1.2. Définir l'objectif de l'acquisition :

Le processus d'acquisition commence par la définition de l'objectif scientifique ou pratique de la collecte de données (Qara,2021).

a. Choisissez le type de satellite et de capteur :

Le satellite approprié est sélectionné en fonction de :

- Sa précision spatiale et temporelle
- Son type de données (visuel, radar)
- Sa compatibilité avec la nature de la zone étudiée (Ben Nassrr,2018).

b. Déterminer l'angle d'acquisition :

L'angle est choisi en fonction de :

- Nature du terrain (haut, plat)
- La nécessité d'éviter les ombres du terrain ou les nuages
- Type de phénomène ciblé (Laribi,2020).

c. Déterminer le moment de l'acquisition :

Le timing est déterminé en fonction de :

- Période orbitale du satellite
- La lune passe à plusieurs reprises au-dessus de la même zone.
- Moment du phénomène à surveiller (Tayybi,2019).

d. Vérifier la qualité des données obtenues :

Le mode sélectionné est vérifié pour fournir des données de résolution appropriée pour l'analyse en comparant les données avec les résultats de terrain ou les images précédentes (Mazari,2021).

2.8.1.3. L'importance du mode d'acquisition des données hydrologiques

a. Rôle principal :

Chapitre 2 : Méthodes de télédétection pour la surveillance

Le mode d'acquisition détermine la manière dont les images satellites des phénomènes hydrologiques tels que les rivières, les lacs, l'humidité du sol, les inondations et la neige sont collectées, en termes d'angle, de résolution et de couverture temporelle, affectant directement l'efficacité et la précision de l'analyse (**Youssef,2010**).

Le choix du mode d'acquisition contribue à une meilleure surveillance de la dynamique hydrologique au fil du temps, comme la fonte des neiges, les crues ou les variations du niveau des eaux. (**Youssef, 2010**).

b. Comment utiliser les modes d'acquisition dans les études hydrologiques:

Mode vertical (Nadir) : Il est utilisé pour la surveillance précise des surfaces d'eau et de leurs changements temporels avec une résolution spatiale élevée.

Mode oblique : utilisé dans les zones montagneuses pour éviter les ombres causées par le terrain.

Modes radar (tels que IW et EW dans Sentinel-1) : Utilisés pour détecter les inondations même dans des conditions météorologiques défavorables ou dans l'obscurité (**ESA,2016**).

Des modes d'acquisition soigneusement étudiés constituent la base d'applications hydrologiques fiables, en particulier dans des conditions météorologiques difficiles ou sur des terrains accidentés.

2.8.1.4. L'importance de la situation d'acquisition

La fréquence de collecte des données détermine la résolution temporelle et donc la capacité à surveiller en continu les changements dans l'eau. (**Saada,2002**).

Il permet de contrôler la précision spatiale, ce qui contribue à la prédiction des risques (**Saadz, 2002**).

Le choix du mode approprié améliore la fiabilité des résultats, en particulier dans les zones au terrain complexe (**Saada, 2002**).

L'importance du choix du mode d'acquisition approprié réside dans sa compatibilité avec la nature de l'environnement hydrologique observé, qu'il s'agisse d'eau de surface, de glace ou de zones submergées (**Saada, 2002**).

2.8.1.5. Traitement des données

a. Définition du traitement des données hydrologiques en télédétection :

Chapitre 2 : Méthodes de télédétection pour la surveillance

Le traitement des données hydrologiques en télédétection est un ensemble de procédures techniques appliquées aux images satellites ou aux données radar, dans le but d'améliorer leur qualité et de les convertir en informations analysables. Ces informations sont utilisées dans l'étude des ressources en eau telles que les rivières, les inondations, l'humidité et les changements dans les masses d'eau (Continent, 2021).

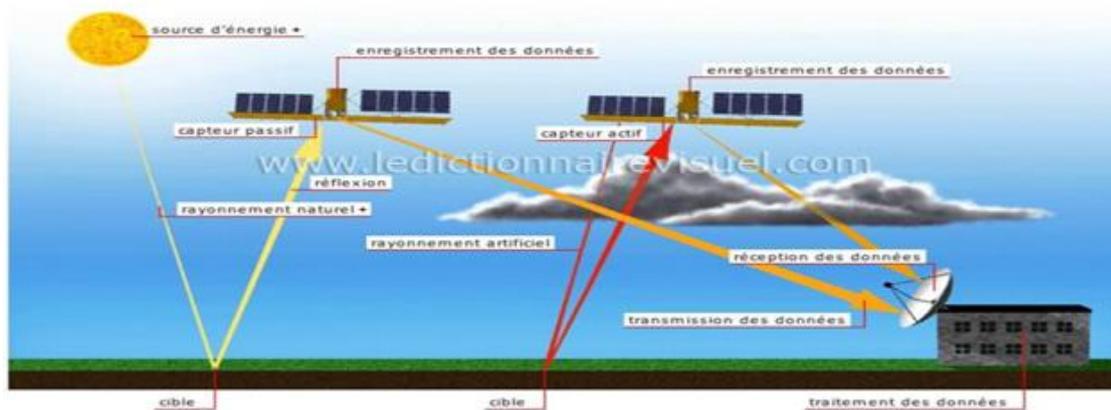


Figure 2.14 : Traitement des données.

b. Types de traitement :

Radiothérapie : vise à corriger les variations de luminosité et d'éclairement.(Ben Nasser,2018).

Traitement géométrique : Il s'agit de corriger les distorsions résultant de l'angle de capture ou du mouvement du satellite (Ben Nasder ,2018).

c. Classification :

Permet d'identifier le type de couverture, qu'elle soit à eau ou sèche (Ben Nasser,2018).

d. Analyse temporelle :

Permet de suivre l'évolution des ressources en eau au fil du temps (Ben Nasser ,2018).

e. L'importance du traitement :

Il contribue à extraire des informations précises sur la largeur des voies navigables et permet la connexion entre les images satellites et les modèles numériques d'eau.(Tayyibi,2019).

f. Logiciels utilisés :

Des logiciels tels que ENVI, ERDAS Imagine et QGIS sont utilisés pour traiter et analyser les données satellitaires dans un contexte hydrologique (Sabti, 2017).

g. Relation avec les systèmes d'information géographique (SIG) :

Les données de télédétection traitées sont utilisées dans les systèmes SIG pour effectuer des analyses spatiales précises des eaux de surface et souterraines.(Mazari,2021).

2.8.1.6. Méthodes de traitement des données dans le domaine de la télédétection :

a. Correction radiométrique :

Ce processus implique l'ajustement des différences d'intensité de rayonnement causées par des facteurs tels que l'atmosphère ou l'angle du soleil. Ce traitement est essentiel pour obtenir des images comparables de manière fiable (Ben Nasser,2018).

b. Correction géométrique :

Cette méthode est utilisée pour corriger les distorsions qui peuvent résulter du mouvement du satellite, du terrain terrestre ou de l'inclinaison du capteur. Son objectif est de faire correspondre l'image aux coordonnées réelles du sol (Sabti,3017).

c. Classification des images :

Cette technique est utilisée pour identifier les types de couverture terrestre ou aquatique dans une image, soit par classification supervisée, soit par classification non supervisée (Continent,3021).

d. Extraction d'indices spectraux

Tout comme le NDWI (Natural Water Index) ou le NDVI (Natural Vegetation Index), ces indices permettent de déterminer avec précision la présence d'eau ou de végétation.(Laribi,2020).

2.8.1.7. L'enregistrement

a. Définition de l'enregistrement en télédétection:

L'enregistrement est le processus consistant à combiner deux ou plusieurs images de télédétection, prises à des moments différents ou à l'aide de capteurs différents, de sorte qu'elles se chevauchent précisément au même endroit géographique (Ben Nasser, 2018).

b. Objectif de l'enregistrement :

L'objectif de l'enregistrement est de permettre aux chercheurs de comparer des images ou d'analyser avec précision les changements temporels, comme le suivi des changements dans les cours d'eau ou les plans d'eau au fil du temps (Qara,2021).

c. Comment effectuer l'enregistrement:

L'enregistrement s'effectue en identifiant des points de référence communs entre les images, puis en appliquant des transformations mathématiques (telles que des transformations linéaires ou polynomiales) pour aligner les images ensemble (Tayyibi,2019).

d. L'importance de l'enregistrement dans l'analyse hydrologique :

L'enregistrement permet d'étudier les changements saisonniers ou annuels du débit d'eau et de surveiller l'expansion ou la contraction des lacs et des rivières avec une résolution temporelle et spatiale élevée.(Laribi,2020).

e. Logiciels utilisés :

L'enregistrement est effectué à l'aide de logiciels tels que ENVI, ERDAS Imagine, QGIS et ArcGIS, qui fournissent des outils permettant de définir des points de référence et d'appliquer des transformations géométriques.(Mazari,2021).

f. Types d'enregistrement en télédétection :

• **Enregistrement géométrique :**

Ce type est utilisé pour aligner des images sur un système de coordonnées géographiques tel que UTM ou WGS84. Permet de convertir l'image de ses coordonnées à son emplacement réel sur la surface de la Terre (Ben Nasser,2018).

• **Enregistrement temporaire :**

Elle est utilisée lors de la comparaison d'images de dates différentes pour surveiller les changements d'eau, tels que les inondations ou les changements de niveau des lacs. Il s'appuie sur la mise en correspondance d'images situées au même endroit avec une grande précision temporelle (Qara,2021).

• **Enregistrement multicateur:**

Il est utilisé pour combiner des images provenant de différents capteurs, comme la combinaison d'images optiques Sentinel-2 avec des images radar Sentinel-1, pour obtenir des informations plus complètes. Aide à améliorer l'analyse du sol, de l'humidité ou du débit d'eau (Laribi,2020).

• **Enregistrement spectral :**

Chapitre 2 : Méthodes de télédétection pour la surveillance

Il est appliqué à différents canaux spectraux au sein de la même image pour assurer un chevauchement parfait entre eux, et est utilisé pour extraire des indices tels que NDWI (Tayyibi,2019).

g. Le rôle de l'enregistrement dans la collecte de données hydrologiques:

- **Assurer une superposition d'images précise et améliorer l'analyse temporelle:**

L'enregistrement permet de comparer plusieurs images à différentes périodes afin de surveiller les changements dans les cours d'eau, la couverture végétale ou la sécheresse (Sabti,2017).

- **Améliorer la précision des modèles hydrologiques :**

Un enregistrement précis est essentiel pour saisir des données correctes dans les modèles de prévision du ruissellement ou des inondations.(Mazari,2021).

2.9. Utilisation de La Télédétection en Hydrologie

La télédétection est une innovation moderne qui a révolutionné l'étude des ressources en eau, permettant d'obtenir des données temporelles et spatiales précises couvrant de vastes zones difficiles d'accès avec les méthodes traditionnelles (Saadi,2015)

2.9.1. Les précipitations

Tirant parti des données satellitaires mondiales telles que TRMM et GPM, ces satellites fournissent des informations précises sur les précipitations en temps réel, avec un niveau acceptable de précision en place et dans le temps, en particulier dans les zones dépourvues de stations de mesure des terres (Tawhariya,2019).

2.9.2. Les Eaux de Surface

Des images satellites telles que Landsat et Sentinel-2 sont utilisées pour examiner les propriétés du sol, la végétation et les pentes, facteurs qui jouent un rôle essentiel dans la détermination de la quantité de ruissellement. (Abdellawi,2020).

L'un des indicateurs les plus importants utilisés dans ce domaine est le NDWI (Normalized Difference Water Width Index), qui est basé sur la mesure de l'absorption du rayonnement dans les gammes verte et proche infrarouge, ce qui aide à identifier avec précision les emplacements d'accumulation d'eau (Tawahariya,2018).

a. La distinction entre l'eau et la terre par des images satellites:

Chapitre 2 : Méthodes de télédétection pour la surveillance

Telles que Landsat et Sentinel-2, est utilisée pour déterminer les limites des plans d'eau, en particulier pendant les saisons, ce qui contribue à la mesure des espaces d'eau avec une grande précision. (Zaxawi, 2016.).

b. Surveillance des fluctuations du niveau d'eau au fil du temps :

Les techniques de télédétection permettent de suivre les variations du niveau d'eau, qu'il s'agisse d'une augmentation ou d'une diminution, en raison de changements climatiques ou d'activités humaines. Cela se fait en analysant les images satellites prises à différents moments (Lazhar,2020).

2.9.3. Humidité du sol:

L'humidité du sol fait référence à la quantité d'eau retenue dans les pores du sol et constitue un élément essentiel de l'équilibre du système hydrologique, jouant un rôle central dans la croissance des plantes, l'écoulement des eaux de surface et la recharge des eaux souterraines.(Boudaoud,2015).

a. Utilisation des données radar:

La technologie radar à synthèse d'ouverture (SAR), comme celle des satellites Sentinel-1, permet de mesurer l'humidité de surface du sol jusqu'à 5 cm avec une grande précision, même par temps nuageux (Kabash,2021).

b. Utilisation des indices spectraux des images multispectrales:

Tels que le NDMI (Normalized Difference Moisture Index) et le LSWI, extraits d'images Landsat ou MODIS, qui permettent d'estimer la teneur en humidité grâce au contraste spectral entre le rayonnement proche infrarouge et le rayonnement à courte longueur d'onde (Abdellaoui,2020).

c. Suivi de l'évolution temporelle de l'humidité du sol:

Les techniques de télédétection permettent d'obtenir des enregistrements temporels continus qui peuvent être utilisés pour analyser l'évolution de la sécheresse ou de l'augmentation de l'humidité, en particulier dans les zones agricoles ou celles souffrant de fragilité environnementale.(Laour,2018).

2.9.4. Qualité De L'eau

La qualité de l'eau reflète les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de l'eau et détermine son aptitude à diverses utilisations telles que la consommation, l'agriculture et

Chapitre 2 : Méthodes de télédétection pour la surveillance

l'industrie. Leur surveillance est une pierre angulaire de la gestion durable de l'eau **(Boudaoud,2015)**.

La qualité de l'eau est un enjeu vital dans la science de l'eau, car elle est étroitement liée à la santé humaine et à ses utilisations quotidiennes telles que la cuisine, l'hygiène et le lavage. Ainsi, le besoin de techniques efficaces pour surveiller cette qualité devient urgent. La télédétection est l'un des outils modernes les plus importants utilisés pour surveiller la qualité de l'eau depuis l'espace. Grâce à des images satellites telles que Sentinel-2 et Landsat-8, nous pouvons suivre les changements dans la couleur de l'eau, la turbidité et la croissance des algues, qui sont tous des indicateurs de la qualité de l'eau. Par exemple, si la turbidité augmente, cela peut indiquer la présence de solides ou de contamination, ce qui rend l'eau inutilisable **(Draghi,2020)**.

L'une des méthodes courantes d'analyse de la qualité de l'eau à l'aide de la télédétection est l'utilisation d'indicateurs spectraux, tels que l'indice de chlorophylle pour détecter les algues et l'indicateur de turbidité pour surveiller la clarté de l'eau. Ces méthodes aident les autorités à suivre les barrages et les rivières qui sont utilisés comme sources d'eau potable.**(Abdellaoui,2021)**.

En outre, ces données sont intégrées au SIG pour identifier les zones où la qualité de l'eau se détériore rapidement, permettant des décisions rapides telles que le traitement ou l'avertissement d'utilisation.**(Khalifi,2020)**.

2.9.5. L'évaporation:

L'évaporation est le processus par lequel l'eau passe de son état liquide à son état gazeux. On le trouve à la surface des mers, des océans, des rivières et du sol. Cette transformation est la principale source de vapeur d'eau dans l'atmosphère **(Boudaoud,2015)**.

L'évaporation est un processus vital dans le cycle de l'eau, où l'eau passe de son état liquide à l'état de vapeur et s'élève dans le ciel. Ce phénomène affecte directement la quantité d'eau disponible dans les rivières, les barrages et les plans d'eau, ce qui rend sa mesure cruciale pour la gestion des ressources en eau, en particulier dans les régions arides comme l'Algérie **(Boudaoud,2015)**.

La recherche moderne s'appuie sur l'imagerie satellite telle que MODIS et Landsat, qui fournit des données thermiques et temporelles précises contribuant à estimer les taux d'évaporation des surfaces du sol et des plans d'eau. Le modèle SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for

Chapitre 2 : Méthodes de télédétection pour la surveillance

Land) est également utilisé pour calculer l'évaporation avec une grande précision à l'aide de données satellites (**Bouhouti,2020**).

Conclusion :

A la fin de ce chapitre, il ressort clairement de la présentation que la télédétection est un outil scientifique et technique indispensable dans l'étude des phénomènes naturels, notamment dans le domaine de l'hydrologie. Nous fournissons une définition complète du concept de télédétection, en passant en revue son développement historique et ses principes physiques, qui reposent principalement sur le rayonnement électromagnétique, y compris le rayonnement magnétique, ainsi que sur les systèmes de surveillance les plus importants qui permettent une collecte de données précise et durable sur la surface de la Terre.

Le rôle vital de la télédétection dans l'étude du cycle hydrologique a également été souligné, depuis la surveillance des précipitations jusqu'à l'évaluation des ressources en eaux de surface et souterraines, en soulignant les caractéristiques qui font de cet outil une grande valeur scientifique, notamment dans la surveillance du changement climatique et de son impact sur les ressources en eau. Cette approche a permis de confirmer l'importance de la télédétection comme outil d'aide à la planification et à la prise de décision dans la gestion de l'eau.

S'appuyant sur les fondements théoriques abordés dans ce chapitre, le chapitre suivant passera à une étude plus appliquée, en présentant les bassins versants de la région côtière de l'Algérie, considérée comme l'une des régions hydrologiques les plus importantes du pays, compte tenu des pressions urbaines et climatiques auxquelles elle est confrontée. Le chapitre suivant se concentrera sur les caractéristiques géographiques, climatiques et hydrologiques de ces bassins versants, en vue de l'utilisation de techniques de télédétection pour analyser et évaluer leur état hydrique.

Chapitre 3

3. Présentation du bassin hydrographique Côtier Algérois 02A

Introduction

Ce chapitre met en lumière l'aspect pratique de l'étude en analysant la réalité hydrographique du littoral algérien, classé deuxième plus grand bassin hydrographique du pays et revêtant une importance stratégique en raison de sa situation géographique et de la richesse de ses ressources en eau.

Ce bassin représente une zone vitale englobant la capitale, Alger, et les principaux centres urbains côtiers, avec une forte concentration de population et une activité économique intense. Ces facteurs contribuent à accroître la pression sur les ressources en eaux de surface et souterraines, nécessitant une étude approfondie pour identifier les défis et proposer des solutions durables..

Ce chapitre se concentre sur l'exploration des sous-bassins 02A du bassin côtier algérien, qui compte parmi les unités hydrologiques les plus importantes de la région côtière nord du pays.

Ce chapitre vise à éclairer les caractéristiques naturelles et hydrologiques bassins 02A, en analysant leur situation géographique, les principales vallées qui le traversent, ainsi que les barrages construits en leur sein et leur rôle vital dans la régulation des ressources en eau et la lutte contre le changement climatique.

Le sous-bassin 2A couvre les régions occidentales de la capitale, Alger, et s'étend vers la wilaya de Mostaganem. Il se caractérise par la présence de vallées importantes telles que la vallée de Mezfran. Alors que le sous-bassin 2B couvre les régions orientales de la capitale et atteint les frontières de la province de Boumerdes, et contient des vallées importantes telles que l'oued El Harrach, l'oued Isser, l'oued Sebaou, et d'autres.

L'étude comprend également une analyse de l'état des barrages construits dans le bassin 02A, de leur contribution à la satisfaction des besoins en eau de la population et des défis environnementaux et urbains qui affectent la gestion de ces ressources.

Cette étude vise à fournir une vision globale et intégrée de la réalité hydrologique, afin de soutenir les efforts de planification et de gestion durables des ressources en eau aux niveaux local et national.

3.1. Le Bassin Versant Côtier Algérois 02

Le bassin hydrographique n°02 du littoral algérois s'étend sur une vaste superficie de 8 471 kilomètres carrés. Géographiquement, elle est divisée en deux zones d'eau distinctes, identifiées

Chapitre 3 : Présentation du bassin hydrographique Côtier Algérois 02A

par les codes (02A) et (02B), selon les classifications établies par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (Maaliou et al ,2024).

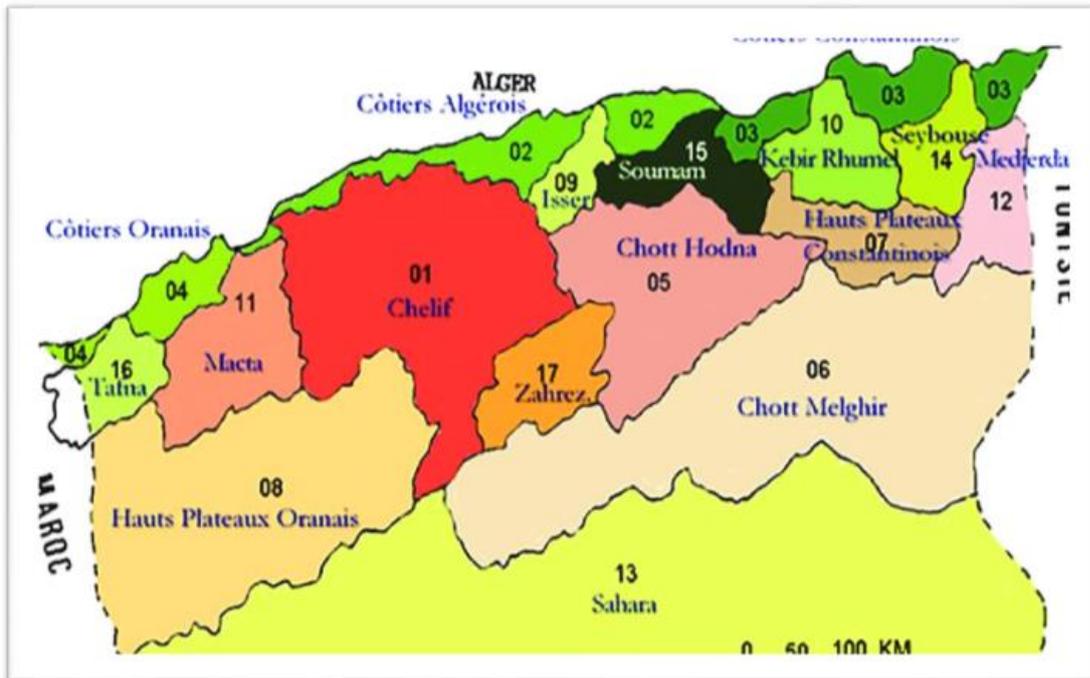


Figure 3.1 : Bassins hydrographiques en Algérie.

3.2. Côtier Algérois Ouest 02A

Le bassin 02A couvre administrativement l'ensemble des wilayas d'Alger et de Blida, tandis qu'il s'étend partiellement pour inclure les wilayas de Tipaza, Boumerdes, Médéa et Aïn Defla, et contient 125 communes. (Benmihoub & Akli,2014).

La situation géographique du bassin côtier algérien (02A) est caractérisée par sa superficie de 4 585 kilomètres carrés. Ce bassin s'étend entre le bassin du Dahar à l'ouest et l'embouchure de la rivière Iser à l'est. Tandis qu'elle est bordée au sud par les rivières Chlef et Isère, et au nord elle surplombe la mer Méditerranée (Ben Bouchrit, 2012).

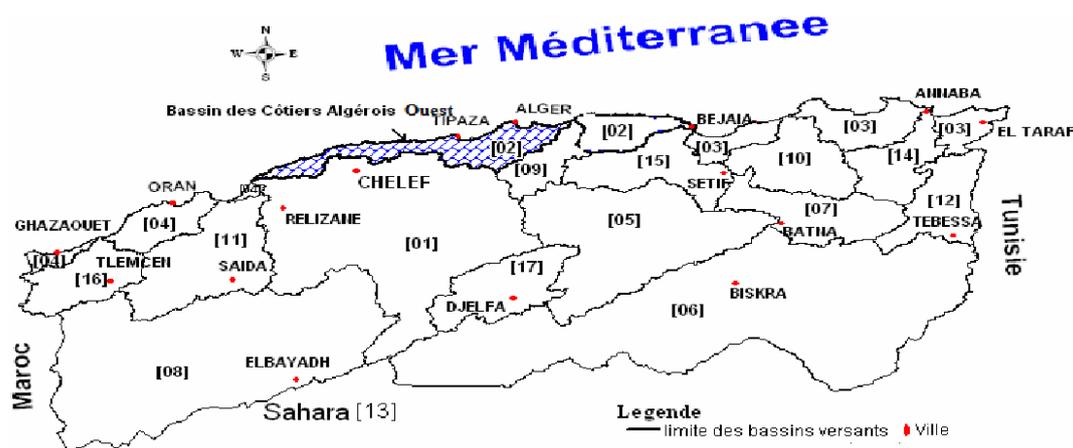


Figure 3.2 : Situation géographique du Côtier Algérois Ouest 02A (Hebal, 2013).

3.3. Caractéristiques hydrologiques et morphologiques du Côtier Algérois 02A

3.3.1. Forme des sous-bassins

L'analyse de l'indice de compacité montre que la plupart des sous-bassins du Côtier Algérois Ouest ont une configuration allongée (Hebal, 2013).

Tableau 3.1 : Caractéristiques de forme du bassin 02A (Hebal, 2013).

Sous-bassin	Station	Code	S (km ²)	Pb (km)	Kc	Rectangle équivalent Lr (km)	l (km)
Côtier Ténès	Sidi Akacha	20207	295	78	1.27	28.7	10.28
Côtiers Cherchell	Borj Ghobrini	20301	215	65	1.24	21.5	10
Côtiers Cherchell	Pont RN11	20323	55	18	0.68	10.39	5.29
Côtier Cap Matifou	Ouled Ali	20627	37	24	1.1	7	5.29
Oued Bouroumi	Djer-Tarzoute	21002	215	60	1.15	18.2	11.81
Oued Bouroumi	Djer-Boumedfaa	21006	336	76	1.16	24	14
Oued Bouroumi	Djer-El Affroun	21007	395	90	1.27	33	11.97
Oued Bouroumi	Djer-Attatba	21011	680	125	1.35	48.5	14.02

Oued Chiffa	Amont des Gorges	21126	316	73	1.15	23.6	13.39
Oued Mazafran	Fer à Cheval	21201	1900	185	1.19	61.7	30.89
Oued El Harrach	Amont Rocher des Pigeons	21301	387	75	1.06	19.7	19.64
Oued El Harrach Maritime	Gorges de Larbaa	21402	130	47	1.15	14.6	2.05
Oued El Harrach Maritime	Baraki	21418	970	143	1.28	53.3	18.2

3.3.2. Relief et altitude

Les sous-bassins présentent un relief généralement marqué : selon l'indice « Ig », les pentes varient de fortes à très fortes, tandis que l'indice « Ds » indique des pentes allant de modérées à assez fortes. Bien que les cours d'eau prennent leur source à des altitudes élevées, ils descendent rapidement vers de vastes plaines, comme celle de la Mitidja, avant de se jeter dans la mer (Hebal, 2013).

Tableau 3.2 : indices de pentes des sous-bassin (Hebal, 2013).

Sous-bassin	Station	Code	Ip	Ig (%)	Relief selon Ig	Ds	Relief selon Ds
Côtier Ténès	Sidi Akacha	20207	0.16	3.19	Assez fort	94	Modéré
Côtiers Cherchell	Borj Ghobrini	20301	0.22	6.65	Fort	73	Modéré
Côtiers Cherchell	Pont RN11	20323	0.22	6.84	Fort	148	Assez fort
Côtier Cap Matifou	Ouled Ali	20627	0.29	10.92	Assez fort	116	Assez fort
Oued Djer-Bouroumi	Tarzoute	21002	0.21	6.96	Fort	101	Assez fort
Oued Djer-Bouroumi	Boumedfaa	21006	0.19	5.54	Assez fort	80	Modéré
Oued Djer-Bouroumi	El Affroun	21007	0.18	4.33	Assez fort	86	Modéré

Oued Djer-Bouroumi	Attatba	21011	0.14	3.07	Fort	102	Assez fort
Oued Chiffa	Amont des Gorges	21126	0.2	5.67	Fort	102	Assez fort
Oued Mazafran	Fer à Cheval	21201	0.26	2.65	Fort	66	Modéré
Oued Harrach El	Amont Rocher des Pigeons	21301	0.24	7.53	Fort	51	Modéré
Oued Harrach Maritime El	Gorges de Larbaa	21402	0.24	6.42	Fort	98	Modéré
Oued Harrach Maritime El	Baraki	21418	0.15	3.02	Assez fort	55	Modéré

Tableau 3.3 : altitudes des sous-bassins (Hebal, 2013).

Sous-bassin	Station	Code	Hmax (m)	Hmin (m)	Hmoy (m)
Côtier Ténès	Sidi Akacha	20207	996	80	317
Côtiers Cherchell	Borj Ghobrini	20301	1417	14	387
Côtiers Cherchell	Pont RN11	20323	736	25	254
Côtier Cap Matifou	Ouled Ali	20627	832	67	323
Oued Djer-Bouroumi	Tarzoute	21002	1386	120	508
Oued Djer-Bouroumi	Boumedfaa	21006	1530	200	543
Oued Djer-Bouroumi	El Affroun	21007	1530	100	513
Oued Djer-Bouroumi	Attatba	21011	1530	40	469
Oued Chiffa	Amont des Gorges	21126	1629	290	833

Oued Mazafran	Fer à Cheval	21201	1629	10	446
Oued El Harrach	Amont Rocher des Pigeons	21301	1629	146	830
Oued El Harrach Maritime	Gorges de Larbaa	21402	1288	350	701
Oued El Harrach Maritime	Baraki	21418	1629	20	525

3.3.3. Réseau hydrographique

Le bassin hydrographique du Côtier Algérois 02A est densément maillé (**Hebal, 2013**).

- À l'est, l'Oued Boudouaou constitue le principal cours d'eau.
- En se dirigeant vers l'ouest, on rencontre l'Oued Djemaa, né sur les hauteurs de Larbaa à Tablat ; il est rattaché à l'Oued El Harrach, dont la source se situe à plus de 1 200 m sur le Rocher des Pigeons.

Dans la plaine de la Mitidja, l'Oued Mazafran naît près d'Attatba, à la confluence de l'Oued Djer et de l'Oued Bouroumi. Plus à l'ouest, il reçoit les eaux de l'Oued Chiffa, après Koléa, avant de se jeter en mer à Douaouda.

- L'Oued Djer prend naissance vers 1 500 m d'altitude sur le Djebel Ganntas.
- L'Oued Bouroumi naît à environ 1 400 m sur les monts de l'Atlas tellien, au sud du Djebel Mozaia.
- L'Oued Chiffa apparaît au nord d'Ouzera, également autour de 1 500 m.

Plus à l'ouest encore, plusieurs oueds secondaires parcourent la région :

- Nador, Bourkika et El Hachem (aux pieds du Djebel Bou Maad),
- Damous (au Djebel Sidi Bernous),
- et enfin l'Oued Allalah, qui termine son cours dans la mer à Ténés.

Tableau3.4 : hydrographie des sous bassins (**Hebal, 2013**).

Sous-bassin	Station	Code	Dd (km/km ²)	Ct	Lt (km)	tc (h)
-------------	---------	------	--------------------------	----	---------	--------

Côtier Ténès	Sidi Akacha	20207	4.7	44.9	35	9.84
Côtiers Cherchell	Borj Ghobrini	20301	3.1	27.3	34	7
Côtiers Cherchell	Pont RN11	20323	3.6	32.76	16	4.68
Côtier Cap Matifou	Ouled Ali	20627	2.8	15.4	14	3.54
Oued Djer-Bouroumi	Tarzoute	21002	3.4	22.8	42	8
Oued Djer-Bouroumi	Boumedfaa	21006	2.5	16.5	30	8
Oued Djer-Bouroumi	El Affroun	21007	2.5	16	50	9.5
Oued Djer-Bouroumi	Attatba	21011	2.6	15.6	65	13
Oued Chiffa	Amont des Gorges	21126	3.3	17.1	37	7
Oued Mazafran	Fer à Cheval	21201	2.8	21	96	19
Oued El Harrach	Amont Rocher des Pigeons	21301	5.2	69.2	35	6
Oued El Harrach Maritime	Gorges de Larbaa	21402	5	73	15	4.54
Oued El Harrach Maritime	Baraki	21418	3	21.96	59	12

3.4. Caractéristiques climatiques du bassin côtier algérien (02A)

Le bassin du Sahel (02A) est situé au nord de l'Algérie, le long des côtes couvertes par les eaux de la mer Méditerranée. Le climat y est méditerranéen, allant de humide à semi-aride selon l'emplacement exact. (Bin Khaled et al., 2020)

3.4.1. Températures

Les températures moyennes annuelles varient entre 17°C et 20°C.

Les étés sont chauds et secs (25°C – 35°C), tandis que les hivers restent doux (8°C – 15°C).

Les températures les plus élevées sont enregistrées en juillet et août (**Madi et al., 2016**).

3.4.2. Pluie

Les précipitations sont irrégulières, avec de grandes variations annuelles (300-800 mm/an). Les plus grandes quantités sont enregistrées en hiver et au printemps (de novembre à avril). La région souffre de sécheresses fréquentes, surtout en été. (**Boussivian et al., 2021**).

Les précipitations moyennes, illustrées sur la figure 3.3, sont présentées selon un gradient ouest-est le long du Côtier algérois 02A.

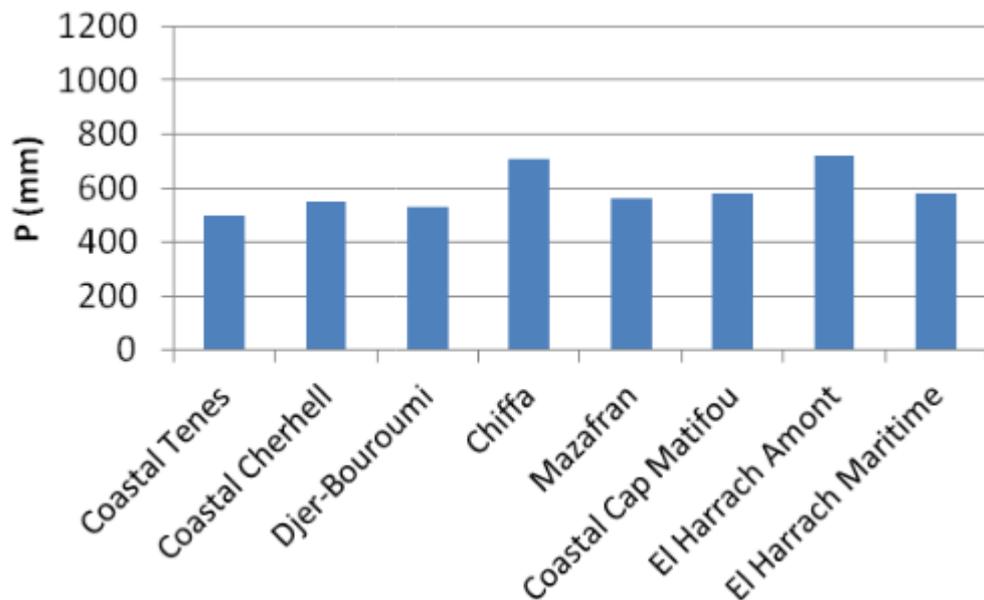


Figure 3.3 : Pluies moyennes annuelles (**Ammari & Remini, 2019**).

3.4.3. Humidité relative:

L'humidité est relativement élevée en raison de sa proximité avec la mer (70% - 85% en hiver, 50% - 65% en été) (**Saeedi et al., 2018**).

3.4.4. Évaporation et évapotranspiration:

Le taux d'évaporation annuel est élevé (1200-1500 mm/an) en raison de la chaleur et de l'abondance du soleil.

En été, l'évaporation dépasse les précipitations, ce qui augmente la pression de l'eau. (**Tawbia et al., 2017**)

3.4.5. Vents:

En hiver, des vents humides soufflent du nord-ouest. En été, les vents chauds et secs (sirocco) dominant, contribuant à la sécheresse. (**Khalfani et al., 2019**)

3.4.6. Changement climatique moderne:

Une diminution des précipitations et une augmentation des températures ont été observées au cours des dernières décennies.

La fréquence des événements climatiques extrêmes (inondations, sécheresses) augmente (**ANE, 2022**)

3.5. Caractéristiques géologiques, lithologiques et pédologiques

3.5.1. Géologie

Dans la partie orientale du Côtier Algérois Ouest, notamment la Mitidja, la sédimentation active issue des reliefs de l'Atlas blidéen a conduit, à la fin du Pliocène et durant le Quaternaire, à la formation de deux réservoirs aquifères distincts : l'Astien, composé de calcaires et de grès, et les alluvions quaternaires de galets et graviers. Vers l'ouest, en bordure de Nador, l'affaissement synclinal du bassin au Miocène s'est accompagné d'émissions volcaniques périphériques, particulièrement sur la bordure sud, tandis que le plissement naissant de l'anticlinal du Sahel, amorcé au Pliocène, isole désormais la Mitidja (**Hebal, 2013**).

3.5.2. Lithologie

Le sous-bassin de Ténès est majoritairement érodé : 73 % de la surface est couverte par des argiles helvétiques, des marnes caténiennes et des marnes schisteuses crétacées, alors que seules 17 % sont occupées par des formations résistantes (figure 3.4). Dans les hauteurs de l'Oued Bouroumi à Tarzoute, les marnes et argiles du Miocène supérieur et du Crétacé supérieur représentent environ 71 % de la formation, les grès et poudingues miocènes ne couvrant que 10 %. À l'amont de l'Oued El Harrach, près de Hammam Melouane, les grès et poudingues du Miocène, les calcaires marneux du Crétacé moyen et les schistes du Crétacé inférieur forment 54 % du bassin, tandis que les marnes schistoïdes et argiles noires du Miocène et du Crétacé supérieur constituent 18 % (**Hebal, 2013**).

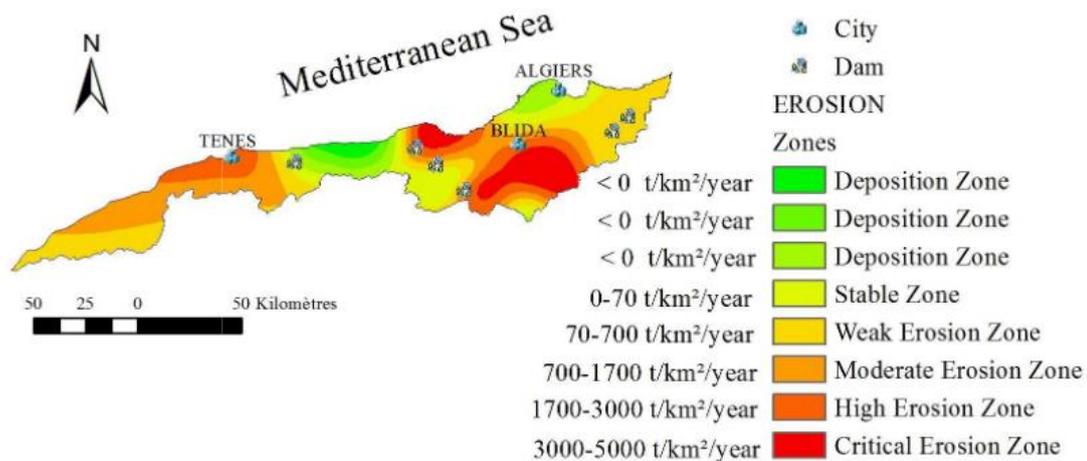


Figure 3.4 : carte d'érosion du sol du bassin Algérois 02A (Ammari & Remini, 2019).

3.5.3. Pédologie

Le littoral présente des lithosols perchés sur calcaires et grès calcaires durs, notamment entre Tipaza et Bouharoune, ainsi que des lithosols associés à des gneiss autour de Sidi Fredj. Entre Douaouda et Aïn Benian, des sols dunaires, d'origine éolienne, tapissent la côte. À proximité des cours d'eau—Mazafran, Nador, etc.—se développent fréquemment des sols peu évolués d'apport alluvial. Dans l'ensemble de la région, les sols rouges méditerranéens, les sols bruns calcaires et les sols bruns méditerranéens dominent le paysage pédologique (Hebal, 2013).

3.6. Découpage hydrologique du Côtier Algérois Ouest (02A)

Hydrologiquement, le bassin est constitué de cinq sous-bassins : Mazafran, El Harrach, Côte Ouest, Centrale et Orientale, et s'étend sur une superficie de 4 570 kilomètres carrés, dont 70 % sont concentrés dans les bassins versants de Mazafran et El Harrach. Le bassin contient également un réservoir principal d'eau souterraine au niveau de Maitika (Benmihoub & Akli, 2014).

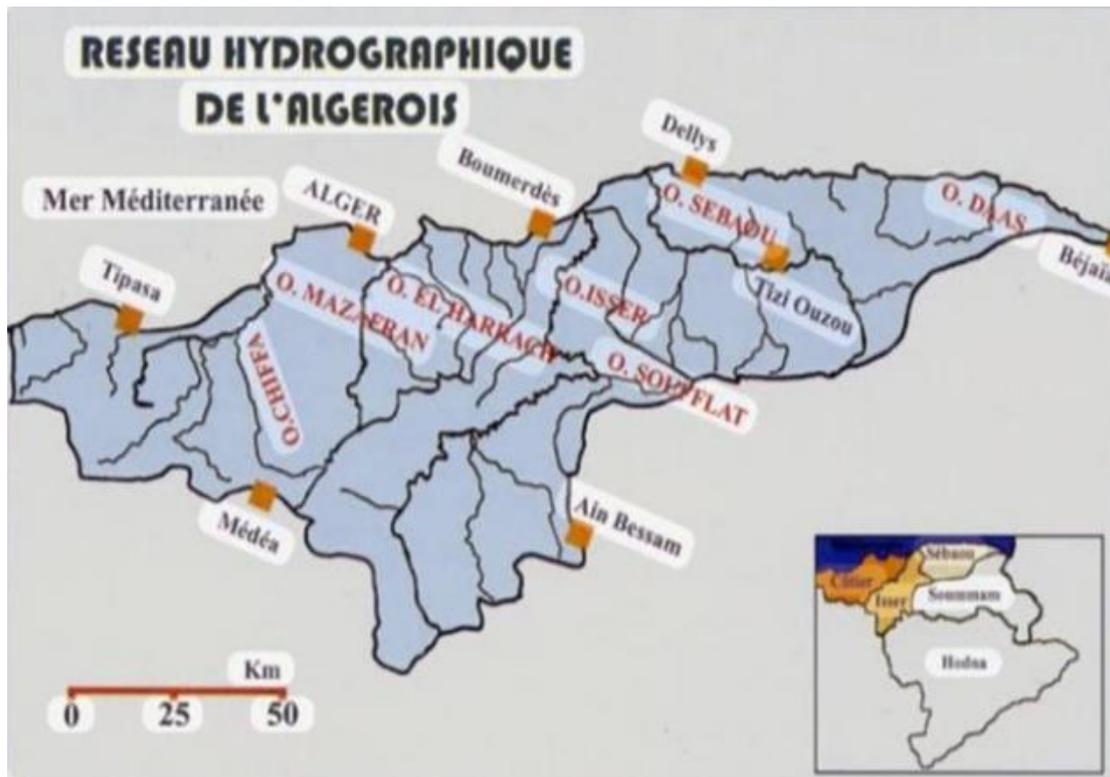


Figure 3.5 ; Découpage hydrologique du Côtier Algérois 02A.

3.6.1. Sous bassin versant de Oued Mazfran

Cette vallée est considérée comme la plus grande de la région, s'étendant sur une vaste superficie de 1 900 km² et se caractérise par son débit élevé. Elle reçoit ses eaux de plusieurs affluents provenant des montagnes de l'Atlas de Blida, tels que la vallée de Chlef, la vallée de Bouroumi et la vallée d'Affroun. **(Ben Bouchrit, 2012)**.

Le bassin de Mazafran est situé sur les rives de la mer Méditerranée en Algérie, dans la province de Tipaza. Son climat est méditerranéen, caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers pluvieux. La gestion des ressources en eau dans cette région est essentielle pour soutenir l'agriculture et assurer la disponibilité de l'eau potable **(Ould El Hadj, 2015)**.



Figure 3.6 : Oued Mzafran.

3.6.2. Sous bassin versant de Oued El Harrach

Bien que son bassin soit de plus petite taille (1207 km²), il revêt une importance particulière en raison de son passage à travers des zones à forte densité de population, ce qui affecte négativement la qualité de ses eaux.

Le bassin d'Ouled El Harrach est situé au cœur d'Alger et est considéré comme l'un des bassins vitaux de la capitale. Ce bassin joue un rôle essentiel dans la gestion des eaux pluviales et la protection de la zone contre les risques d'inondation. Les activités urbaines affectent également de manière significative les caractéristiques de l'eau de cette zone (*Toumi, 2018*).



(A) Oued El Harrach

(B) Délimitation de l'Oued El Harrach

Figure 3.7 : Sous bassin versant de l'Oued El Harrach.

3.6.3. Sous- Bassin versant de côtes occidentales :

Le bassin côtier occidental s'étend le long des rives de la mer Méditerranée, de Tipaza à Ténès, et contient un certain nombre d'affluents qui alimentent les niveaux d'eau de la région. Ce bassin est un élément essentiel de la gestion des eaux de surface et souterraines de cette zone (**Khelifi, 2016**).

3.6.4. Petits bassins versants côtiers

Il existe une dizaine de petits bassins versants sur la côte, dont les plus importants sont (**Benmihoub & Akli .2014**). :

- Oued Hashem : à l'est de Cherchell.
- Oued Nador : près de Tipaza.
- Oued Hamiz : qui contient un barrage et une zone résidentielle.
- Oued Réghaia : qui alimente le lac Réghaia, considéré comme l'une des zones humides les plus importantes de la région.

Le tableau 3.5 résume les caractéristiques des principaux sous bassin du Côtier Algérois 02A.

Tableau 3.5 : différents caractéristiques des sous bassins (**Benbouchrit, 2012**).

Sous-bassin	Oueds du SBV	Code ABH	Superficie totale (km ²)	Part du 02A (%)

Côtier Cherchell	Oued Hachem	203	317	6,91
	Oued Nador			
Côtier Sahel	Nombreux petits oueds	204	112	2,44
Oued Mazafran	Oueds Mazafran	212	427	9,31
	Oued Chiffa	211	585	12,76
	Côtier Djer Bouroumi	210	900	19,63
Côtier Bouzareah	Nombreux petits oueds	205	208	4,54
Oued El Harrach	Harrach amont / maritime	0213/14	1207	26,33
Côtier Cap Matifou	Oued Hamiz	206	829	18,08
	Oued Réghaia,			
	Oued Boudouaou			
	Oued Corso			

3.7. Ressources en eau de l'Algérois 02A

3.7.1. Ressource souterraine potentielle

D'après les informations fournies dans le Plan National de l'Eau (mars 2010), les unités aquifères identifiées dans le sous-bassin 02A sont résumées dans le tableau 3.6 et illustrées à la figure 3.8.

Ces ressources correspondent à une capacité de production annuelle estimée à environ 214,9 millions de m³, dont près de 80 % sont concentrés dans la plaine de la Mitidja (**Benbouchrit, 2012**).

Tableau 3.6 : unités aquifère de l'Algérois 02A (**Benbouchrit, 2012**).

N°	Nom d'Unité aquifère	Ressource potentielle (Hm ³ /an)	Part de la production totale (%)
1	Nappe de la Mitidja	107	79,1
2	Dune du Sahel 1	14,6	6,8
3	Dune du Sahel 2	3,9	1,8

4	Conglomérat miocènes de Médea	7,6	3,5
5	Schistes de l'Atlas blidéen	7	3,3
6	Autres petits aquifères	11,8	5,5

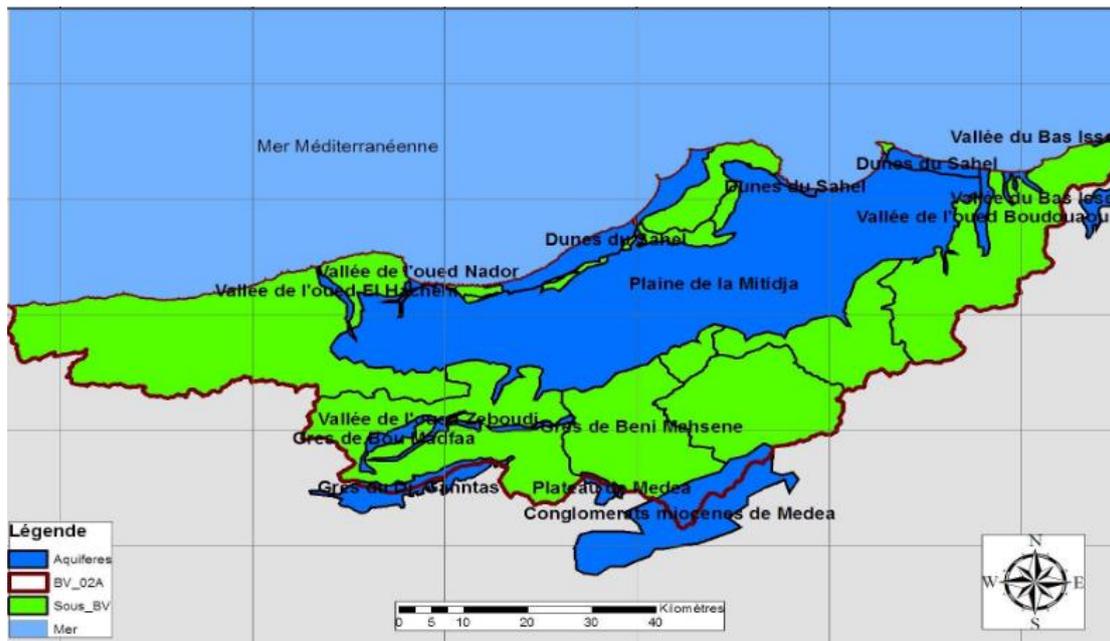


Figure 3.8: Ressources en eaux souterraines de l'Algérois 02A (Benbouchrit, 2012).

3.7.2. Ressource superficielle

3.7.2.1. Ressource superficielle potentielle

Les ressources superficielles potentielles, déterminées à partir des apports moyens annuels, s'élèvent à environ 848 Hm³. Les débits spécifiques y sont relativement stables, se situant entre 4 et 5 l/s/km² (Benbouchrit, 2012).

Sur l'ensemble de ces apports, environ 63,32 % sont régulés et maîtrisés grâce aux ouvrages hydrauliques installés dans la zone étudiée (voir tableau 3.7).

Tableau 3.7 : apport en eau superficielle de l'Algérois 02A (Benbouchrit, 2012).

BV (km ²)	Pluie moyenne annuelle (mm)	Lame d'eau ruisselée (mm)	Apports moyens annuels (Hm ³)	BV contrôlé (km ²)	Apport moyen annuel contrôlé (Hm ³)	Part contrôlée de BV (%)	Apports contrôlés (%)
4 585	735	185	848	3 461	537	75,48	63,32

3.7.2.2. Barrages du Côtier Algérois 02A

Le bassin de l'Algérois 02A compte sept barrages principaux, dont la majorité est implantée dans sa partie orientale. Voici une présentation détaillée de chacun ::

i. Barrage de Kramis

Implanté sur l'Oued Kramis, à environ 80 km du chef-lieu de la wilaya de Mostaganem, le barrage de Kramis a été achevé en 2001 puis mis en eau en 2005. Réalisé en terre zonée avec un noyau d'étanchéité argileux, il mesure 61,5 m de hauteur pour 630 m de longueur de crête. Sa retenue bénéficie d'une capacité de stockage de 45,38 hm³. Cet ouvrage alimente en eau potable les communes de Achaâcha, Nekmaria, Ouled Boughalem, Khadra et Sidi Lakhder, ainsi que les extensions touristiques de Dahra, et sert à l'irrigation des plaines de cette même région (ANBT, 2024).



Figure 3.9 : Barrage de Kramis (ANBT, 2024).

ii. Barrage de Kef Eddir

Situé à 8 km au sud-ouest de Damous, le barrage de Kef Eddir répond aux besoins en eau potable de huit agglomérations et renforce l'irrigation du périmètre du Moyen Chélif, ainsi que l'alimentation du secteur touristique. Cet ouvrage en terre zonée, doté d'un noyau argileux protégé par des filtres et matériaux de transition, présente une hauteur maximale de 95 m (cote de crête : 121,00 m) pour une longueur de 478 m et une largeur de 10 m. Le niveau normal d'exploitation est fixé à la cote 111,25 m NGI, et le niveau d'alerte extrême à 116 m (ANBT, 2024).



Figure 3.10: Barrage de Ked Eddir (ANBT, 2024)

iii. Le barrage de Boukardane

est situé dans la province de Tipaza sur les rives de la vallée de Boukardane, et est considéré comme un affluent vital de la vallée de Mazafran. Ce barrage a une capacité de stockage d'environ 45 millions de mètres cubes et joue un rôle essentiel dans l'approvisionnement en eau potable des habitants de Tipaza, en plus de soutenir l'irrigation agricole dans la région (**Djebbar , 2016**).



Figure 3.11 : Barrage De Boukardane

iv. Barrage de Boroumi

Ce barrage est situé dans l'état de Médéa sur la vallée de Boroumi, qui est l'un des affluents de la vallée de Mazafran. Sa capacité de stockage est d'environ 125 millions de mètres cubes et contribue à l'approvisionnement en eau potable de la plaine de la Mitidja, en plus de soutenir l'irrigation agricole et les usages industriels (**Khellaf, 2017**).



Figure 3.12: Barrage de Boroumi

v. Barrage de Douéra

Le barrage-réservoir de Douéra, construit sur l'Oued Ben-Amar à 2 km au sud-ouest de Douéra et 27 km au sud-ouest d'Alger, stocke 87 hm³ : 39 hm³ provenant de l'Oued Mazafran et 71 hm³ de l'Oued El Harrach. Destiné principalement à l'irrigation de 17 200 ha dans la Mitidja centrale et à la recharge artificielle de la nappe, il prend la forme d'une digue à noyau argileux, revêtue de matériaux gréseux. L'ouvrage culmine à la cote 142,00 m pour une longueur de crête de 820 m et une hauteur de 77 m. La galerie de dérivation provisoire, longue de 435 m (Ø 3,5 m), est dimensionnée pour 14 m³/s et sert successivement au contournement du chantier, au vidage de fond et à l'irrigation via une conduite DN 1600 mm.



Figure 3.13 : Barrage de Douéra (ANBT, 2024).

vi. Barrage du Hamiz

Situé dans la commune de Larbâtache (Boumerdès), à 6 km de Khemis-el-Khechna et 35 km d'Alger, le barrage du Hamiz régularise les crues de l'Oued Lekhal (bassin de 139 km²) et irrigue la Mitidja orientale. Cet ouvrage poids béton/maçonnerie à contreforts, rehaussé, culmine à 53 m de hauteur sur fondations et s'étend sur 161,70 m de longueur de crête pour 6,65 m de largeur. La cote de retenue normale est à 174,10 m, et le PHE à 175,00 m.



Figure 3.14 : Barrage du Hamiz (ANBT, 2024).

vii. Barrage de Keddara

Membre de l'aménagement Isser-Keddara, le barrage de Keddara se trouve à 8 km au sud de Boudouaou, à 35 km à l'est d'Alger. Il alimente l'agglomération algéroise en eau potable grâce aux apports des oueds Keddara et El Haad, ainsi que par une galerie de transfert depuis le Hamiz. La digue en enrochement, avec noyau central argileux, atteint 106 m de hauteur au-dessus du lit d'oued et 468 m de longueur de crête (largeur : 12–20 m). La retenue normale est

Chapitre 3 : Présentation du bassin hydrographique Côtier Algérois 02A

à 145 m NGA, et la cote des plus hautes eaux à 147,32 m NGA (crue cinq-millénaire : $Q_{\text{pointe}} = 735 \text{ m}^3/\text{s}$) (ANBT, 2024).



Figure 3.15 : Barrage du Keddara (ANBT, 2024).

Conclusion

Ce chapitre mis en évidence le bassin hydrographique Côtier Algérois 02A, en passant en revue ses caractéristiques naturelles et géographiques, ainsi que ses composantes hydrologiques de base. Nous avons également souligné l'importance des sous-bassins versants, qui jouent un rôle essentiel dans le maintien de l'équilibre écologique et la gestion des ressources en eau au niveau national. Cette définition constitue une base cognitive essentielle pour comprendre le contexte hydrologique et régional de la zone que nous étudions.

Chapitre 4

4. Analyse spatiotemporelle des données hydrologiques du Côtier Algérois 02A

Introduction

Dans ce chapitre, nous analysons les données hydrologiques du bassin côtier Algérois 02A, en nous concentrant particulièrement sur les eaux de surface et les précipitations. Les eaux de surface sont évaluées à partir des images du satellite Sentinel-2, reconnu pour sa capacité à cartographier les plans d'eau avec une haute résolution spatiale. Grâce à ses images multispectrales, il est possible de suivre la dynamique spatiale et temporelle des plans d'eau. Pour cela, nous utilisons l'indice de différence normalisée d'eau (NDWI).

Concernant les précipitations, nous avons recours à la base de données CHIRPS, qui fournit des estimations spatio-temporelles fiables à haute résolution. Cette base combine des observations infrarouges issues de satellites géostationnaires avec des mesures pluviométriques au sol, offrant ainsi une estimation précise des précipitations sur des pas de temps de cinq jours.

Enfin, nous étudions la relation entre les deux variables — eaux de surface et précipitations — en analysant leur corrélation à différents délais temporels (lags), dans le but de mieux comprendre la réponse hydrologique du bassin aux événements pluviométriques.

4.1. Satellite de surveillance de l'eau de surface

Le satellite Sentinel-2, issu du programme Copernicus de l'Agence spatiale européenne, constitue la référence actuelle pour la cartographie de l'eau de surface à haute résolution. Sentinel-2 se compose de deux plateformes (Sentinel-2A et Sentinel-2B) équipées chacune d'un imageur multispectral (MSI) délivrant des images optiques dans treize bandes spectrales, réparties dans le domaine du visible (bandes 2, 3 et 4 à 10 m), du proche infrarouge (bande 8 à 10 m, bande 8A à 20 m) et du moyen infrarouge (bandes 11 et 12 à 20 m). Grâce à cette imagerie, il est possible de retracer, avec une précision métrique (10 à 20 m), la distribution spatiale et l'évolution temporelle des plans d'eau, des rivières et des zones humides.

Chaque tuile Sentinel-2 est acquise tous les cinq jours (avec les deux satellites), ce qui permet un suivi quasi continu des variations saisonnières et hydrologiques. Les bandes spectrales à haute résolution (10 m et 20 m) sont particulièrement adaptées à la détection des surfaces aquatiques, même de petite taille (mares, cours d'eau étroits), contrastant avec les capteurs de résolution plus grossière (par exemple MODIS à 500 m), qui lissent ou occultent les détails fins.

4.1.1. Méthode utilisée pour calculer l'eau de surface (indice NDWI)

Afin de porter à l'échelle spatiale la présence de l'eau, on applique l'Indice Normalisé de Différence Eau (NDWI – Normalized Difference Water Index), qui s'exprime classiquement comme suit :

$$NDWI = \frac{\text{Bande}_{\text{Green}} - \text{Bande}_{\text{Swir}}}{\text{Bande}_{\text{Green}} + \text{Bande}_{\text{Swir}}}$$

Dans le contexte de Sentinel-2, la bande « Green » correspond à la bande 3 (approximativement 560 nm à 10 m), tandis que la bande « SWIR » (shortwave infrared) correspond généralement à la bande 11 (environ 1610 nm à 20 m).

L'indice NDWI valorise les pixels où la composante verte est élevée simultanément à l'absorption dans le moyen infrarouge, caractéristique des surfaces d'eau libre.

Cette approche permet d'extraire, mois après mois, la surface d'eau libre au sein du bassin d'étude, ainsi que de générer une carte de fréquence d'inondation (moyenne des masques binaires sur l'année), illustrant la répartition spatiale des zones inondables permanentes et éphémères.

4.2. Outil utilisé pour la quantification des précipitations

Pour la surveillance des précipitations, nous avons utilisé la base CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), un produit combiné qui intègre :

- Les observations infrarouges des satellites géostationnaires, permettant d'estimer la couverture nuageuse froide associée aux averses ;
- Les mesures pluviométriques issues d'un vaste réseau de stations au sol, afin de corriger et calibrer les estimations satellitaires ;
- Les données climatologiques historiques pour combler les lacunes d'information localisées.

CHIRPS fournit une grille quasi-quotidienne (résolution : cinq jours) d'estimations de précipitation à une résolution spatiale d'environ 0,05° (~ 5 km). La méthodologie se décompose ainsi :

- Acquisition des données satellites infrarouges : les capteurs géostationnaires mesurent la température de sommet nuageux, corrélée à l'intensité des précipitations.
- Interpolation par krigeage : les valeurs centrées sur les stations sont intégrées via un schéma de krigeage spatial qui ajuste finement la carte de précipitations.

- Production d'une série temporelle unifiée : CHIRPS génère des images cumulées toutes les cinq jours (« pentads »), couvrant la période 1981–présent, avec une cohérence spatiale et temporelle adaptée aux études hydrologiques régionales.

Ainsi, l'utilisation de CHIRPS permet d'obtenir une estimation spatialisée et temporelle des précipitations, indispensable pour comprendre la dynamique hydrologique du bassin, étudier la relation entre pluviométrie et surfaces inondées, et valider ou alimenter des modèles hydrologiques de bassin versant.

4.3. Résultats et analyse des eaux de surface

4.3.1. Analyse spatiale des eaux de surface

Une analyse spatiale de la superficie des eaux de surface dans les bassins versants côtiers algériens (2A) pour la période 2018-2024, à l'aide d'images satellite Sentinel-2, a révélé de nettes variations dans les changements annuels. En 2018-2020, la baisse des précipitations a entraîné une diminution du ruissellement de surface et l'assèchement partiel de certains oueds, tandis que 2021-2022 a connu une nette amélioration grâce à une légère augmentation des précipitations (voir annexe A), ce qui a amélioré la recharge des eaux souterraines et augmenté les débits. Cependant, la sécheresse est revenue fortement en 2023-2024 (figure 4.1), impactant négativement les aquifères et les zones humides. Les influences humaines ont également joué un rôle important, car l'urbanisation près d'Alger a contribué à la surexploitation des ressources en eau à des fins agricoles et potable a entraîné une baisse des débits en aval.



Figure 4.1 : carte des eaux de surface en 2024

4.3.2. Analyse temporelle des eaux de surface

4.3.2.1. Analyse mensuelle

L'analyse mensuelle des eaux de surface dans le bassin Côtier Algérois 02A, sur la période 2018–2024, met en évidence d'importantes fluctuations (**Figure 4.2**). Le minimum mensuel a été enregistré en juillet 2018, tandis que le maximum a été atteint en janvier 2019.

L'analyse statistique révèle une moyenne mensuelle d'environ 119 km² et un écart-type de 19 km², soit un coefficient de variation de 16 %, ce qui traduit une variabilité mensuelle notable autour de la moyenne.

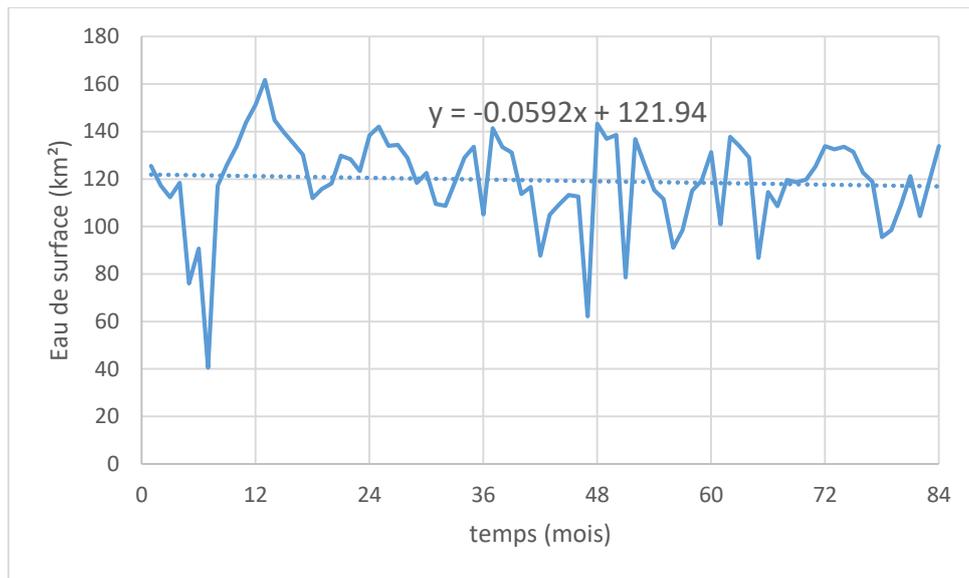


Figure 4.2 : Évolution mensuelle des eaux de surface dans le bassin Côtier Algérois 02A (2018–2024).

La tendance linéaire montre une diminution moyenne de 0,06 km²/mois, traduisant une réduction progressive des réserves de surface.

Pour l'année 2018, l'évolution mensuelle peut être décrite comme suit (**Figure 4.3**) :

- **Janvier à avril** : la superficie passe de 150 km² à 130 km², indiquant une baisse continue des réserves.
- **Avril à juin** : chute significative à 95 km², probablement liée à l'évaporation accrue ou à un déficit de recharge.
- **Juin à août** : diminution jusqu'à 45 km² en juillet, témoignant d'un déficit pluviométrique marqué et d'une forte demande en eau.

- **Août à décembre** : reprise nette des surfaces en eau (de 125 à 150 km²), liée aux premières précipitations automnales.

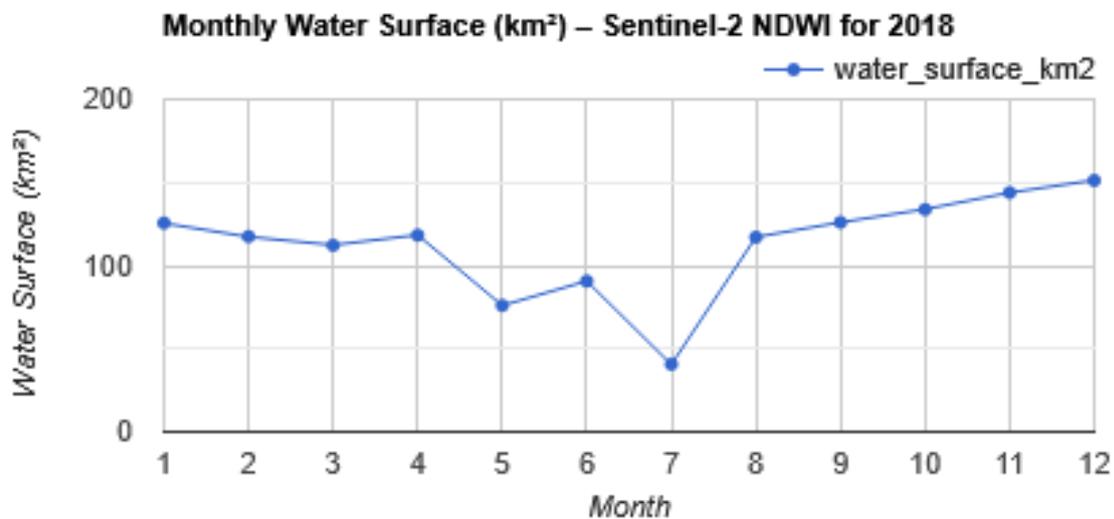


Figure 4.3 : Évolution mensuelle des eaux de surface en 2018 dans le bassin Côtier Algérois 02A.

Les autres années (2019 à 2024, voir **annexe B**) présentent une tendance similaire, avec un maximum en hiver et un minimum en été. Cette dynamique saisonnière est confirmée par la courbe moyenne mensuelle.

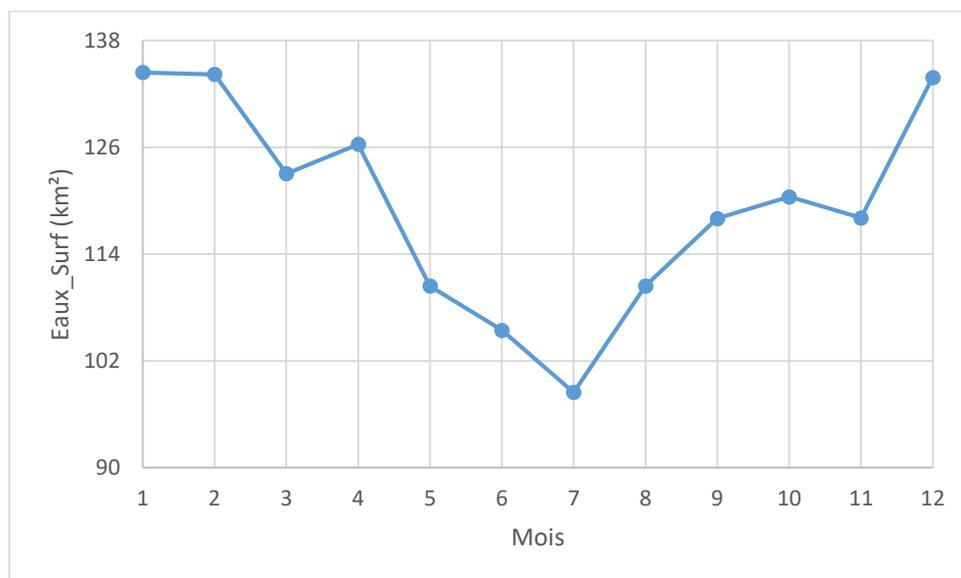


Figure 4.3 : Courbe moyenne mensuelle des eaux de surface (2018–2024).

4.3.2.2. Analyse saisonnière

La variation saisonnière des eaux de surface dans le bassin Côtier Algérois 02A révèle une forte dépendance aux conditions climatiques. Les réserves augmentent en hiver et au printemps, et

diminuent en été et en automne. Ce comportement s'explique principalement par les précipitations saisonnières, mais aussi par d'autres facteurs comme la température, l'évapotranspiration et l'occupation des sols.

Les données mensuelles ont été regroupées par saisons pour mieux comprendre cette dynamique (**Figure 4.4**). L'analyse statistique (Tableau 4.1) montre :

- Un maximum en hiver (moyenne : 402 km², maximum : 444 km²)
- Une moyenne élevée également au printemps (360 km²)
- Des valeurs proches au printemps et à l'automne (environ 356 km²)
- Un minimum en été (314 km²)

.Tableau 4.1 : Statistiques saisonnières des eaux de surface dans le bassin Côtier Algérois 02A.

Saison	Moy (km ²)	Min (km ²)	Max (km ²)	σ (km ²)
Automne	356.52	288.14	403.78	38.52
Hiver	402.46	372.48	444.83	24.11
Printemps	359.81	306.78	404.71	31.44
Eté	314.36	248.35	345.92	34.49

Les tendances linéaires (**Figure 4.4**) révèlent une baisse saisonnière :

- Automne : -9,3 km²/saison
- Hiver : -3,6 km²/saison

Cela est préoccupant, car ces saisons représentent les périodes de recharge. En revanche, le printemps (+1,7 km²/saison) et l'été (+4,8 km²/saison) montrent une légère tendance à la hausse, bien que l'été reste la saison la plus déficitaire.

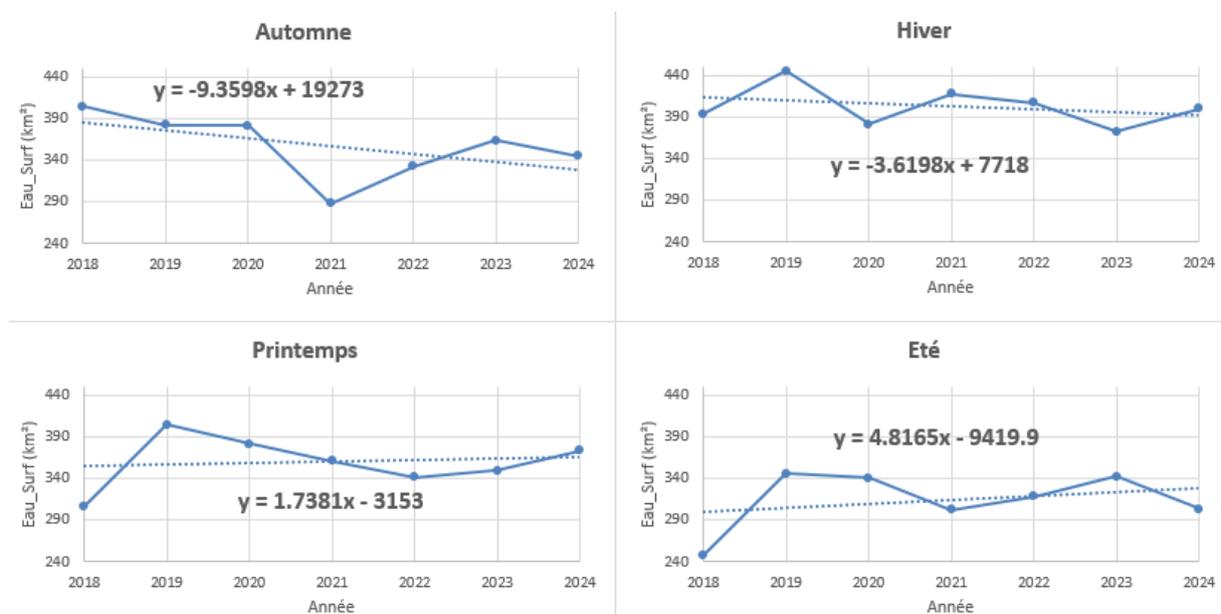


Figure 4.4 : Tendence saisonnière des eaux de surface dans le bassin Côtier Algérois 02A.

4.3.2.3. Analyse interannuelle

L'analyse interannuelle des eaux de surface dans le bassin Côtier Algérois 02A sur la période 2018–2024 montre une moyenne annuelle de 1 433 km², avec un minimum en 2018 (1 352 km²) et un maximum en 2019 (1 577 km²). Le coefficient de variation interannuelle est de 5,3 %, indiquant une variabilité modérée.

Tableau 4.2 : Paramètres statistiques interannuels des eaux de surface.

Année	Eau surface
2018	1 352.99
2019	1 577.08
2020	1 484.52
2021	1 369.57
2022	1 398.75
2023	1 428.35
2024	1 420.77
Moy (km²)	1 433.15
σ (km²)	76.58
Min (km²)	1 352.99
Max (km²)	1 577.08

La **Figure 4.5** illustre cette dynamique : après un point bas en 2018, les réserves ont augmenté en 2019, puis ont décliné progressivement jusqu'en 2021. Une légère amélioration a été observée en 2022 et 2023, avant une nouvelle baisse en 2024.

La tendance linéaire annuelle est de $-6,42 \text{ km}^2/\text{an}$, confirmant une réduction lente mais constante des réserves d’eaux de surface à l’échelle interannuelle dans le bassin Côtier Algérois 02A.

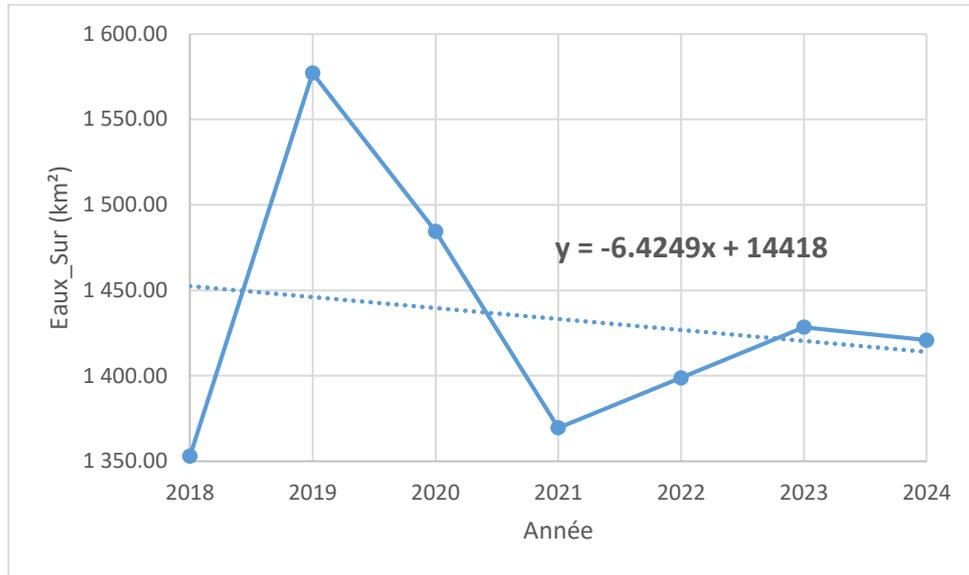


Figure 4.5 : Évolution interannuelle des eaux de surface dans le bassin Côtier Algérois 02A.

4.3.2.4. Analyse d’évolution du remplissage des barrages

Pour approfondir la compréhension des dynamiques hydriques au sein du bassin Côtier Algérois 02A, trois barrages représentatifs ont été sélectionnés : Kramis (ouest), Kef Eddir (centre) et Keddara (est). Chacun fait l’objet d’une évaluation saisonnière et interannuelle sur la période 2018–2024,

a. Barrage de Kramis

Au barrage de Kramis, les superficies maximales sont atteintes en hiver et en automne, lorsque les précipitations et le ruissellement sont à leur apogée. Au contraire, le printemps et l’été se caractérisent par un retrait prononcé des zones en eau, conséquence d’une évaporation estivale intense, de prélèvements pour l’irrigation et de pluies limitées (**Figure 4.6**). Entre 2018 et 2020, on observe une diminution progressive du remplissage, avec des minima relevés en juillet 2018 puis juillet 2020. Les années 2021 et 2022 marquent toutefois une légère reprise (surface en eau +5 à 10 %). Enfin, 2023 et 2024 (**Figure 4.7**) enregistrent une nouvelle décrue, accentuée par des températures élevées et un déficit de précipitations, confirmant la vulnérabilité du réservoir face aux sécheresses méditerranéennes, à l’évapotranspiration et aux usages agricoles (**Annexe –C**).

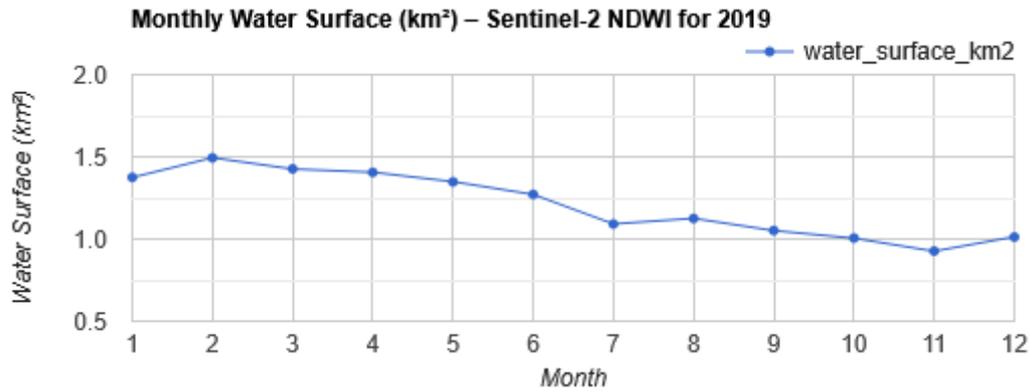


Figure 4.6 : Evolution mensuelle des eaux de surface du barrage de Kramis (2019).

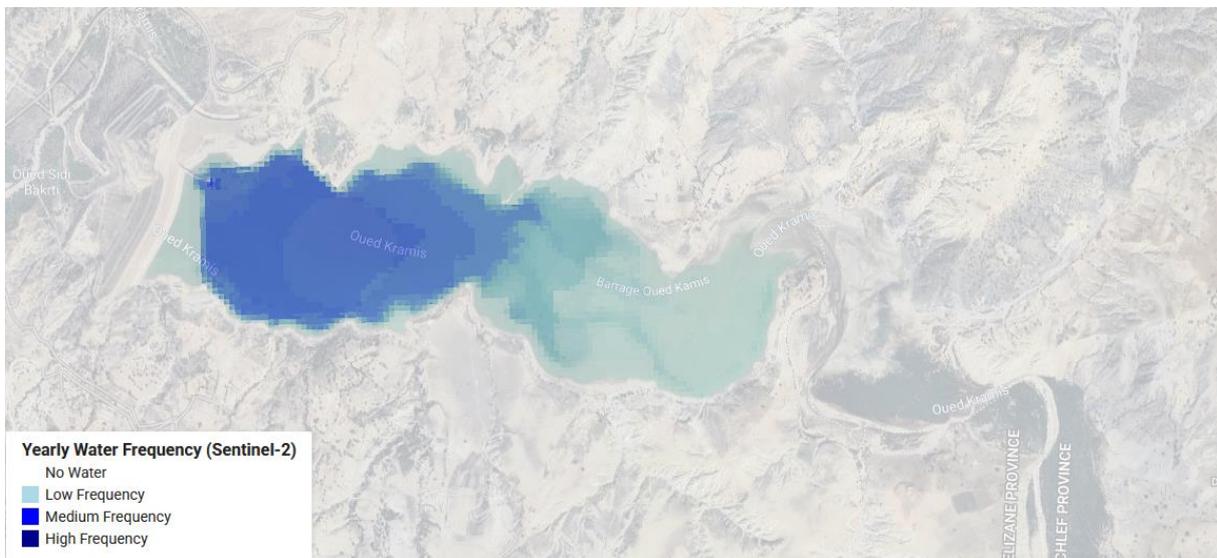


Figure 4.7 : Image satellitaire de la réserve du barrage de Kramis.

b. Barrage de Kef Eddir

La variabilité du remplissage au barrage de Kef Eddir est plus accentuée, en raison d'un bassin d'alimentation moindre et de modes de gestion spécifiques. Les surfaces en eau culminent en hiver et en automne, notamment en 2021, 2023 et 2024, lors d'épisodes pluvieux importants ou suite à des lâchers optimisés (**Figure 4.8**). En revanche, le printemps et l'été 2018–2020 témoignent d'une forte contraction, parfois jusqu'à –30 % par rapport aux maxima annuels, liée à la sécheresse et à l'évaporation (**Figure 4.9**). Ces creux sont ensuite partiellement compensés les années plus humides. Cette alternance met en lumière l'impact du changement climatique, de la pression agricole, de la couverture végétale réduite (favorisant l'évaporation) et des stratégies opérationnelles sur la dynamique hydrique de ce barrage (voir **Annexe –D -**).

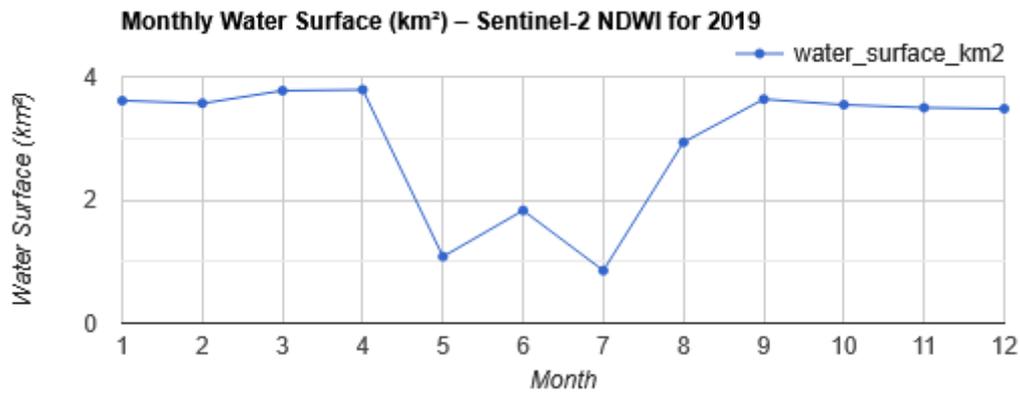


Figure 4.8 : Evolution mensuelle des eaux de surface du barrage de Kef Eddir (2019).

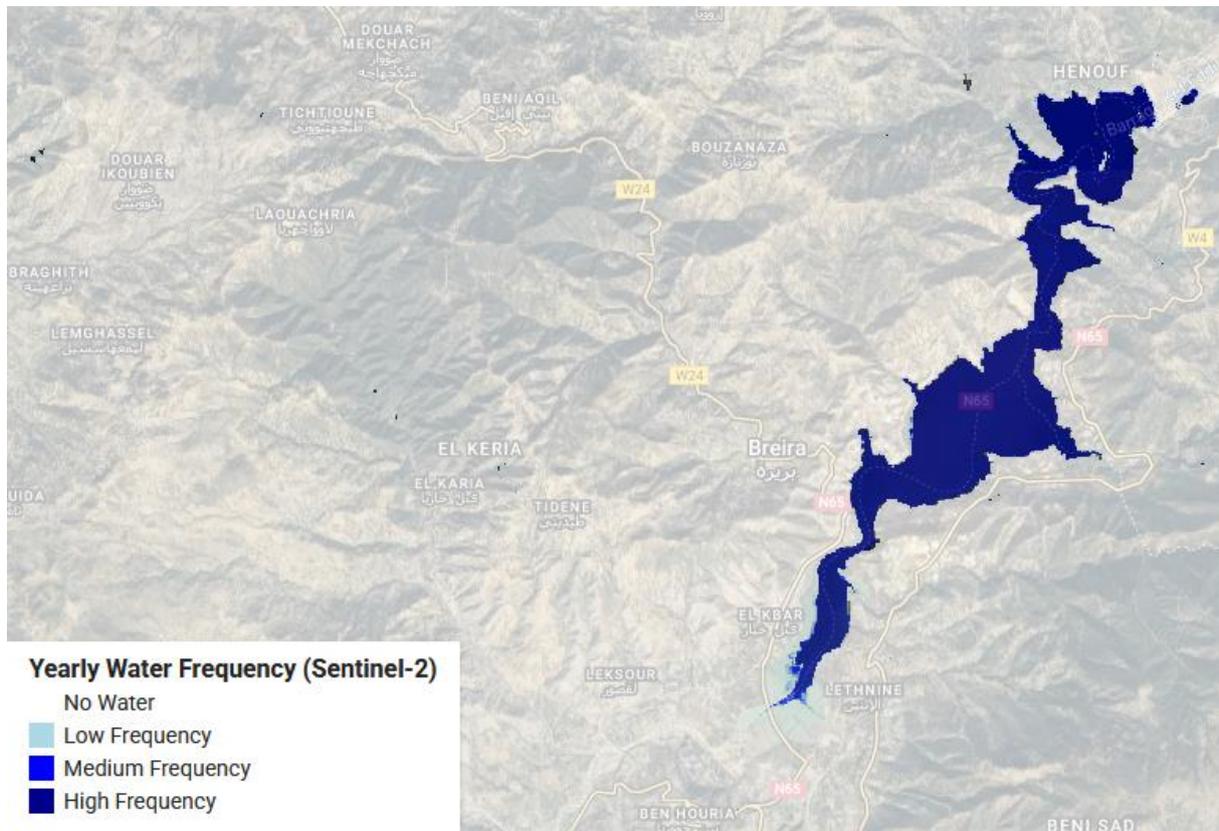


Figure 4.9 : Image satellitaire de la réserve du barrage de Kef Eddir (2018).

c. Barrage de Keddara

À Keddara, l'année 2018 se distingue par un remplissage quasi maximal (Figure 4.11), la quasi-totalité de la surface étant saturée. En 2019 et 2020, un reflux progressif est constaté, sans épuisement complet du réservoir. Entre 2021 et 2023, une phase de sécheresse prononcée réduit fortement les zones en eau, traduite par des surfaces peu profondes et des lits asséchés. Un bref rebond apparaît en 2022, résultat de quelques pluies intenses, avant que le niveau ne retombe

en 2024 à environ 85 % du pic de 2018, en raison d'un déficit pluviométrique et d'une évaporation toujours élevée (Annexe –E-).

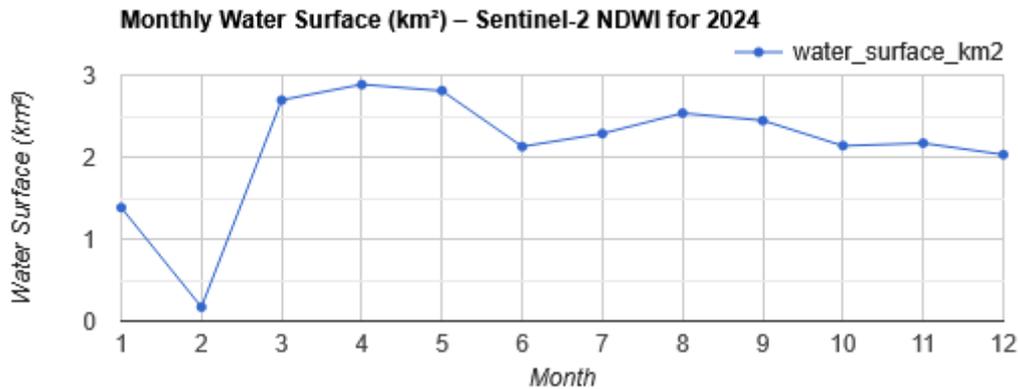


Figure 4.10 : Evolution mensuelle des eaux de surface du barrage de Keddara (2024).

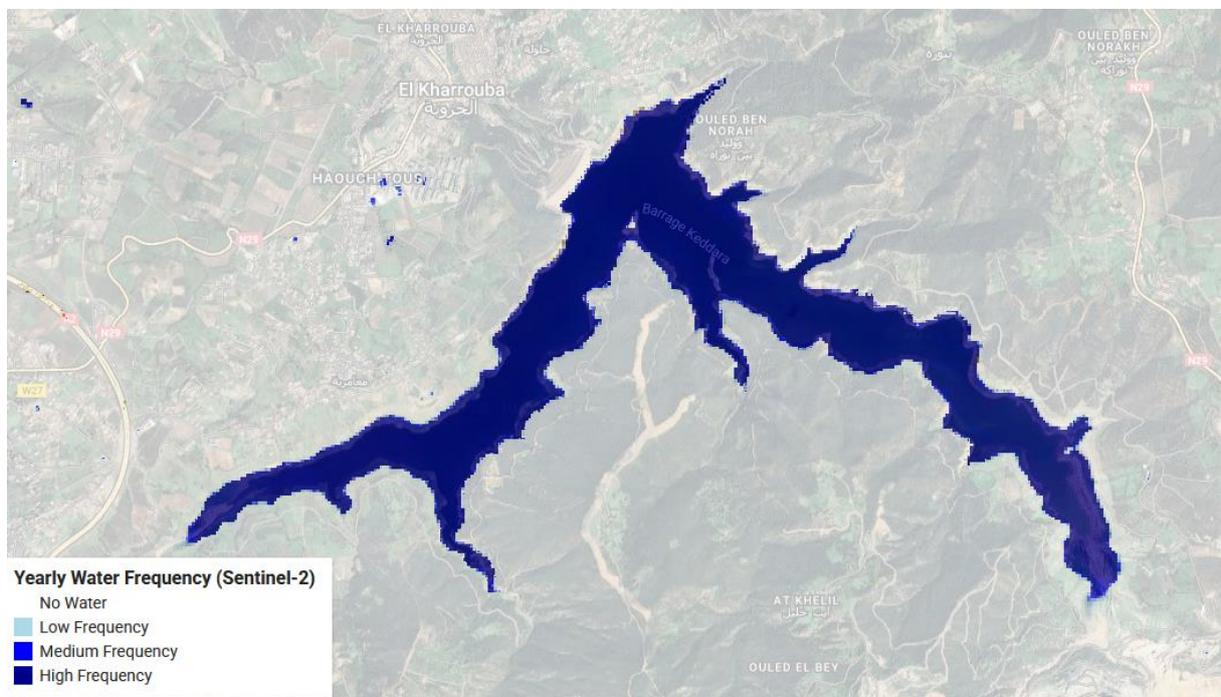


Figure 4.11 : Image satellitaire de la réserve du barrage de Keddara (2018).

L'étude conjointe de ces trois barrages révèle leur forte sensibilité aux régimes pluviométriques méditerranéens et aux pratiques de gestion. Si les années humides permettent toujours une recharge partielle, les sécheresses entraînent des régressions souvent supérieures à la moitié de la surface initiale. Ces constats soulignent l'urgence de renforcer les politiques de conservation de l'eau face aux pressions climatiques et anthropiques croissantes.

4.4. Résultat et analyse des précipitations

4.4.1. Analyse spatiale des précipitations

L'analyse spatiale des précipitations dans le bassin du Côtier Algérois 02A met en évidence une distribution hétérogène des apports pluviométriques, comme illustré en annexe (**Annexe – F**). En 2018, la partie occidentale du bassin est caractérisée par une pluviométrie relativement faible, inférieure à 300 mm par an, tandis que la partie orientale bénéficie de précipitations plus abondantes, atteignant localement jusqu'à 900 mm par an. Cette répartition contraste fortement selon la topographie et les influences climatiques régionales. En particulier, les zones montagneuses d'Oued Djer et d'Aïn Romana présentent les niveaux les plus élevés de précipitations, traduisant l'effet orographique sur les masses d'air humides (**Figure 4.11**).

Toutefois, une évolution notable a été observée au cours des dernières années. En 2023 et 2024, la zone à faible précipitation, historiquement confinée à l'ouest, s'est étendue progressivement vers l'est du bassin. Parallèlement, la sécheresse s'est intensifiée dans la région occidentale : les précipitations, qui oscillaient auparavant entre 300 et 600 mm par an, sont désormais passées sous la barre des 300 mm dans plusieurs zones (**Figure 4.12**). Cette extension de l'aridité géographique confirme une dégradation progressive du régime pluviométrique du bassin, liée très probablement aux effets du changement climatique régional.

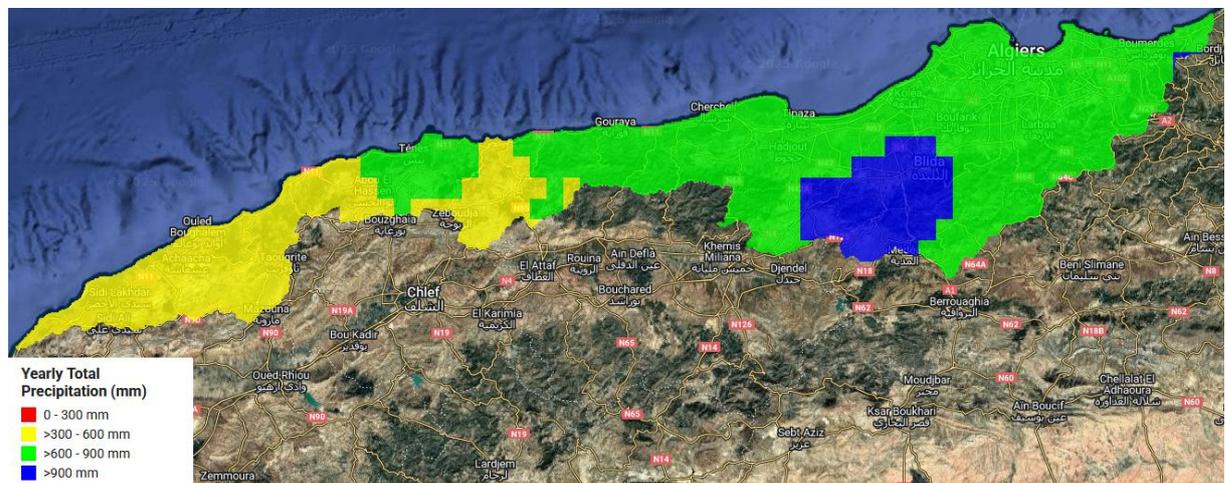


Figure 4.11 : carte de répartition des précipitations annuelles 2018

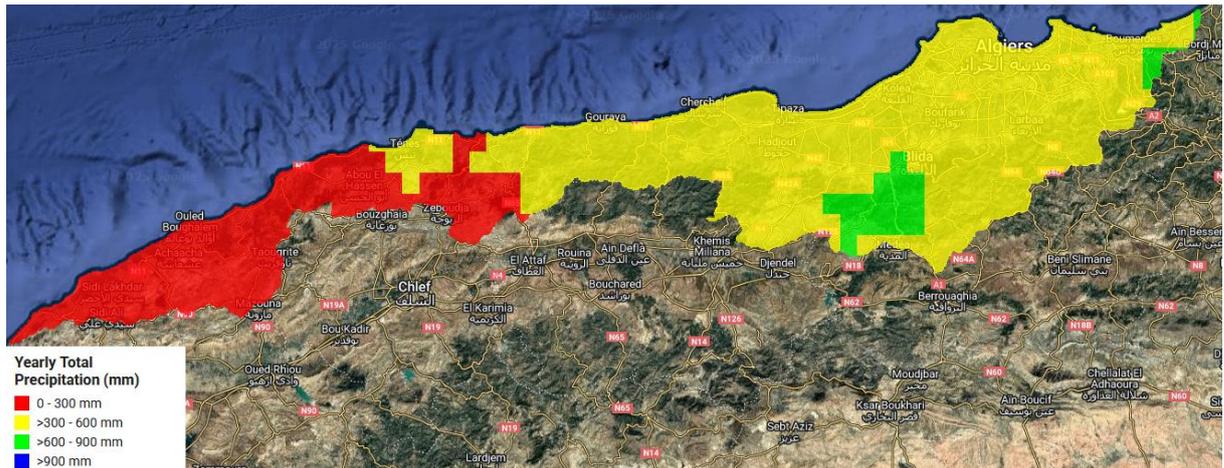


Figure 4.12 : carte de répartition des précipitations annuelles 2024.

4.4.2. Analyse temporelle des précipitations

Sur le plan temporel, l’analyse des précipitations mensuelles du bassin Côtier Algérois 02A (**Annexe –G–**) révèle une forte variabilité saisonnière. La période hivernale (de décembre à février) concentre l’essentiel des apports, avec des cumuls pouvant atteindre jusqu’à 90 mm par mois. À l’opposé, l’été, notamment les mois de juillet et août, est marqué par une quasi-absence de précipitations, caractérisant un régime méditerranéen classique dominé par la sécheresse estivale (Figure 4.13).

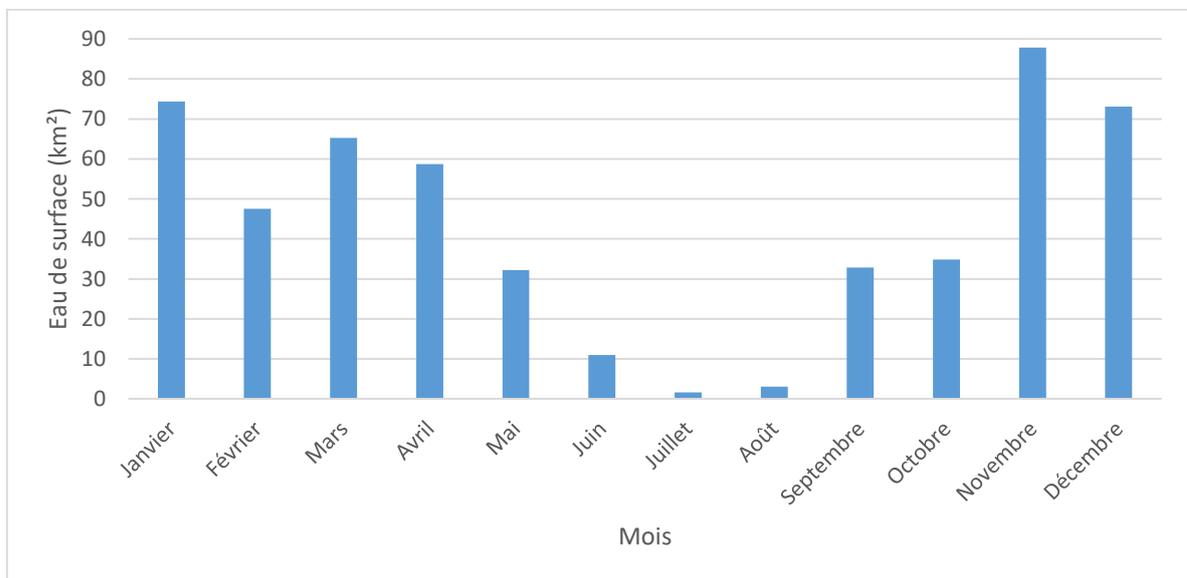


Figure 4.13 : précipitations mensuelles du côtier Algérois 02A.

L’étude des tendances linéaires met en évidence une baisse significative des précipitations au cours de la période analysée. La tendance mensuelle affiche un recul moyen d’environ $-0,3$ mm par mois (**Figure 4.14**), tandis que la tendance annuelle révèle une diminution beaucoup plus marquée de $-40,1$ mm par an (**Figure 4.15**). Ce déclin progressif des apports annuels entre 2018

et 2024 suggère une tendance à la sécheresse chronique dans la région, susceptible d'impacter durablement les ressources en eau de surface et les capacités de stockage des barrages.

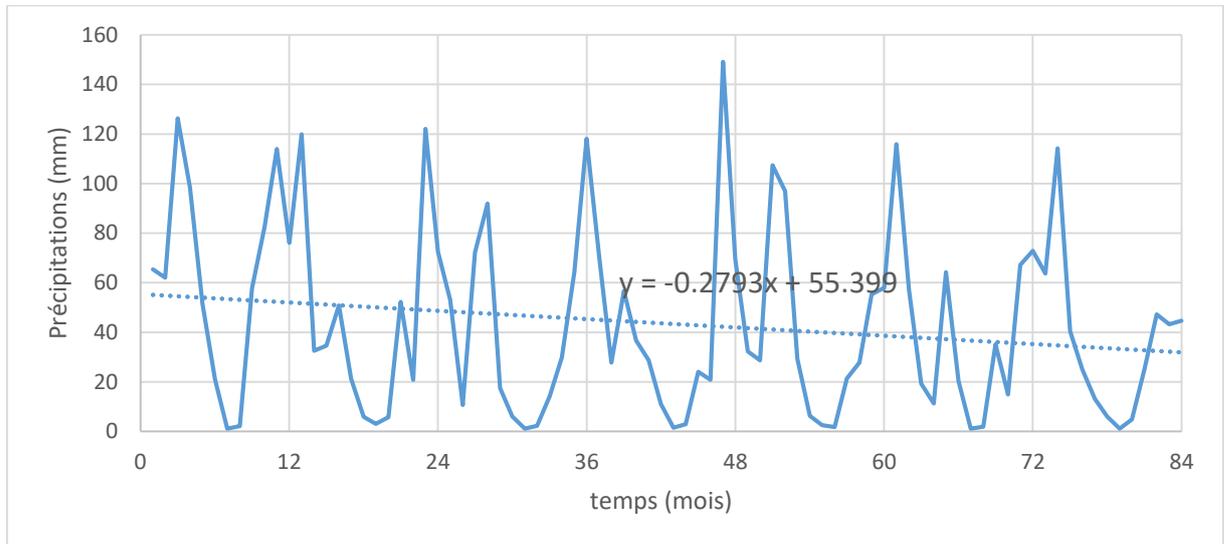


Figure 4.14 : évolution des précipitations mensuelle.

En somme, l'évolution des précipitations au sein du bassin Côtier Algérois 02A se traduit à la fois par une régression géographique des zones arrosées et par une décroissance temporelle marquée des volumes annuels, ce qui souligne l'urgence d'adapter la gestion de l'eau face à un contexte climatique de plus en plus contraignant.

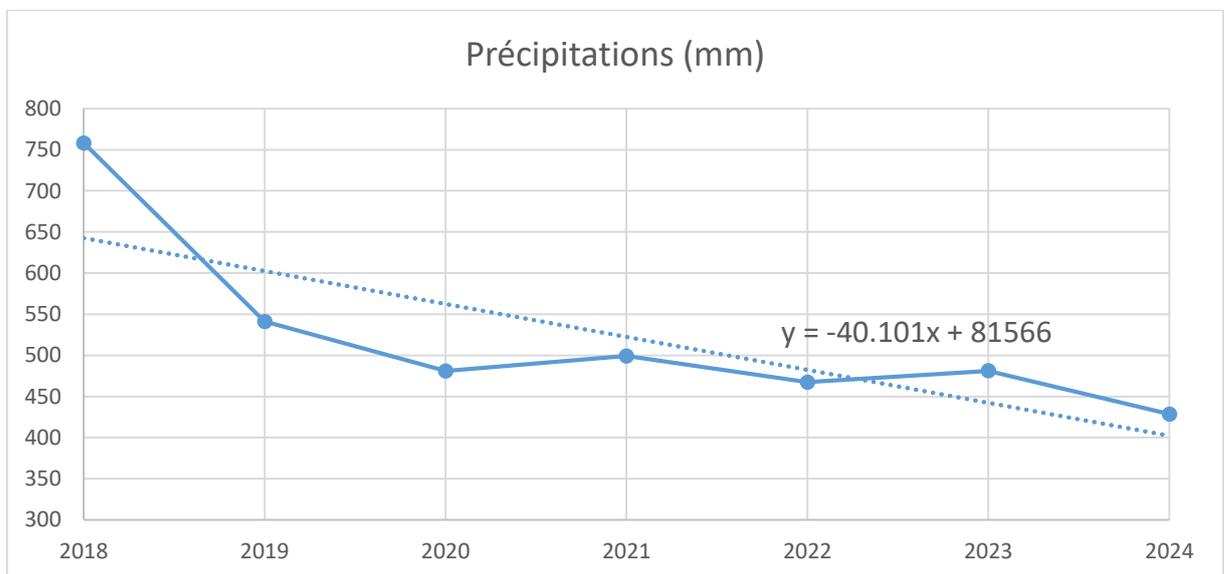


Figure 4.15 : évolution des précipitations annuelles.

4.5. Étude de la corrélation précipitations–eaux de surface

Pour quantifier la réponse du bassin Côtier Algérois 02A aux pluies, nous avons calculé le coefficient de corrélation de Pearson entre les séries mensuelles de précipitations et de surfaces en eau, en considérant des décalages (lags) de 0 à 4 mois.

Lag 0 (aucun décalage) – $r = 0,18$

La corrélation directe est très faible, ce qui reflète le temps nécessaire aux processus hydrologiques (infiltration, ruissellement, stockage dans les réservoirs) et l'action simultanée de l'évaporation et des prélèvements humains. La courbe des eaux de surface est moins volatile que celle des pluies, marquant l'effet tampon des barrages et des nappes.

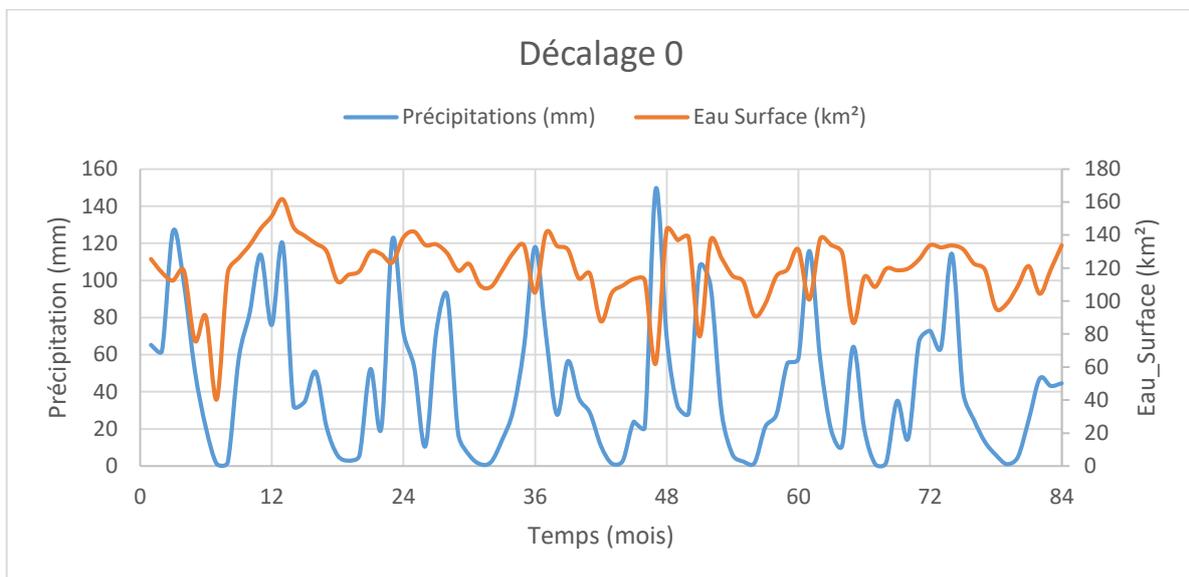


Figure 4.16 : Evolution temporelle des précipitations et des eaux de surface (Lag_0).

Lag 1 (décalage d'un mois) – $r = 0,25$

La corrélation s'améliore légèrement, ce qui suggère que la réponse maximale du bassin survient environ quatre à six semaines après un épisode pluvieux. Ce décalage correspond au temps de transit de l'eau de ruissellement jusqu'aux réservoirs.

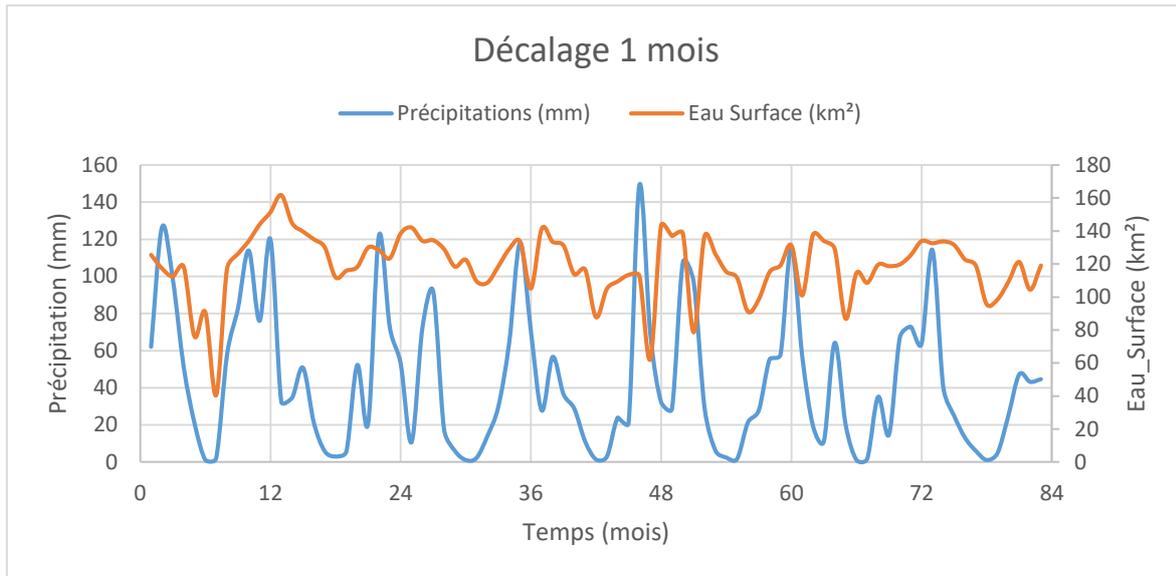


Figure 4.16 : Evolution temporelle des précipitations et des eaux de surface (Lag_1).

Lag 2 (décalage de deux mois) – $r = 0,22$

La relation reste modérée, indiquant que l’essentiel de l’influence des pluies est déjà exprimé après un mois et qu’au-delà, d’autres facteurs (gestion des lâchers, évaporation prolongée) prennent le relais.

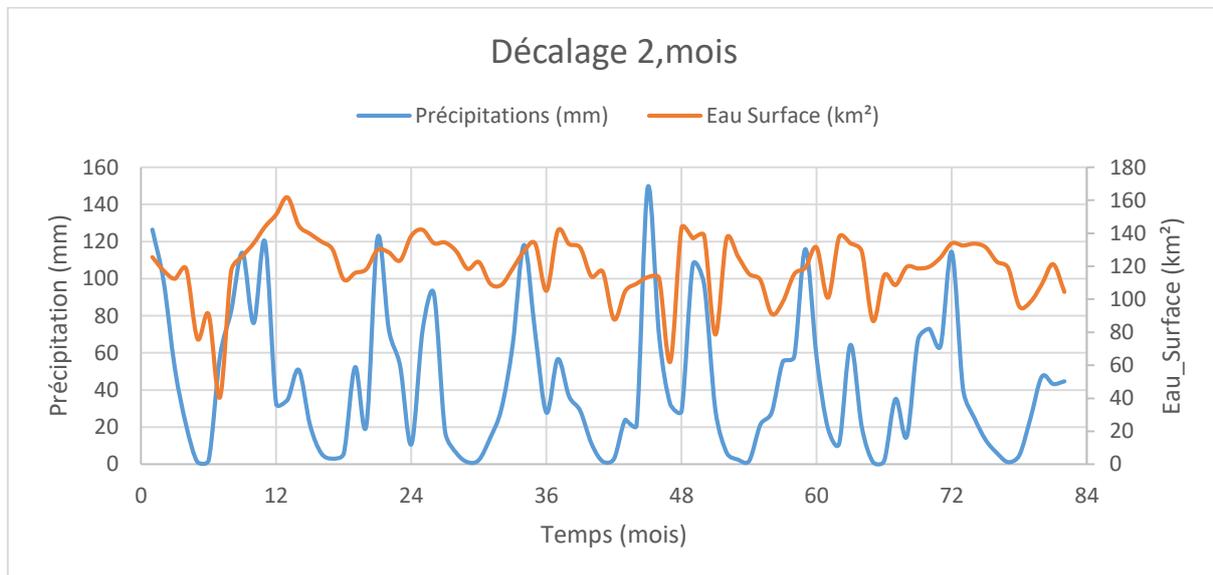


Figure 4.16 : Evolution temporelle des précipitations et des eaux de surface (Lag_2).

Lag 3 (décalage de trois mois) – $r = 0,02$

La corrélation tombe à quasi zéro, signe que les précipitations d’il y a trois mois n’expliquent pratiquement plus la variation des surfaces en eau. À ce stade, les prélèvements estivaux, l’évaporation et la percolation vers les nappes dominant.

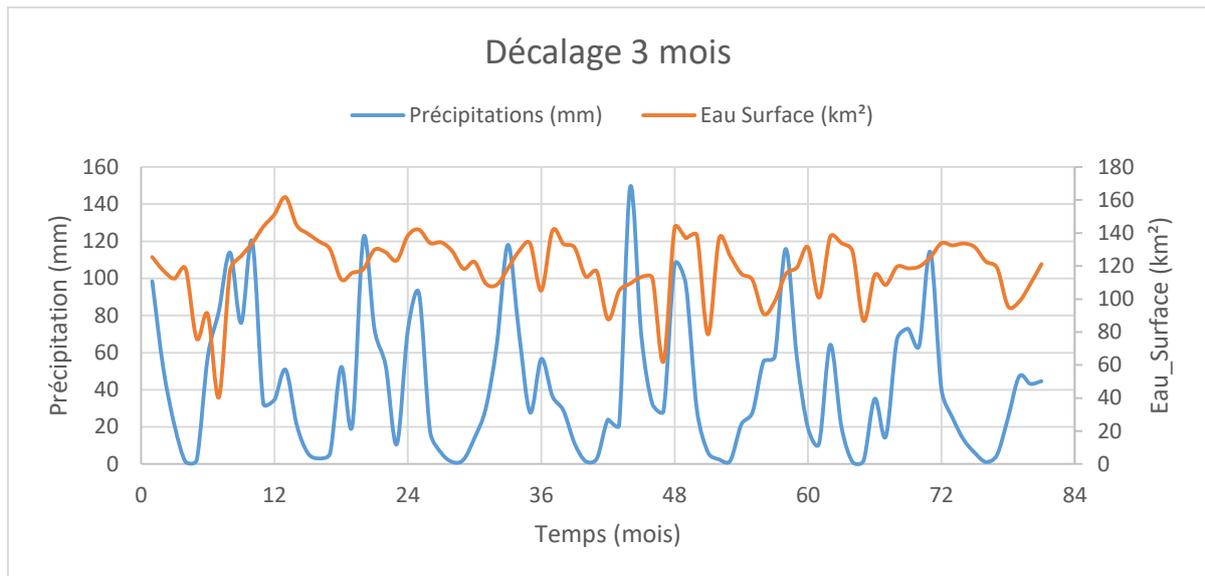


Figure 4.16 : Evolution temporelle des précipitations et des eaux de surface (Lag_3).

Lag 4 (décalage de quatre mois) – $r = -0,40$

La corrélation devient négative : un excès de pluies quatre mois plus tôt est suivi d’une diminution des surfaces en eau, probablement sous l’effet d’une consommation agricole et domestique accrue durant la période chaude, d’une évaporation élevée et d’une infiltration soutenue vers les nappes phréatiques.

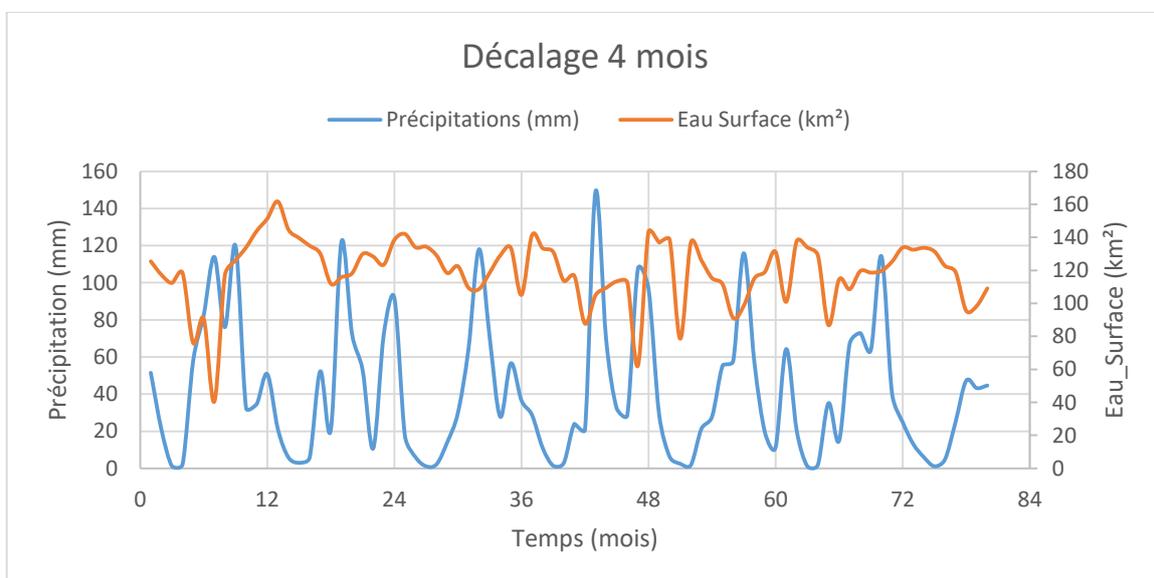


Figure 4.16 : Evolution temporelle des précipitations et des eaux de surface (Lag_4).

Interprétation générale

La réponse hydrologique du bassin est donc maximale au bout d’un mois, puis s’estompe puis s’inverse : d’abord amortie par les réservoirs, puis concurrencée par l’évaporation et les usages,

pour aboutir à un effet négatif après quatre mois. Ces résultats soulignent l'importance de modéliser conjointement délais d'infiltration, gestion des lâchers, prélèvements et évaporation afin d'optimiser la prévision et la gestion des ressources de surface dans un contexte de changement climatique et de pression anthropique.

Conclusion :

En définitive, l'étude spatiotemporelle du bassin Côtier Algérois 02A révèle une forte variabilité géographique et saisonnière : les zones occidentales s'assèchent progressivement sous l'effet d'un recul pluviométrique, tandis que les surfaces en eau déclinent de façon chronique, avec des pics en hiver et des creux marqués en été. Les barrages de Kramis, KefEddir et Keddara, bien que soumis aux mêmes influences climatiques, présentent des réponses différenciées selon leur bassin d'alimentation et leurs modalités de gestion, et restent tous vulnérables aux sécheresses méditerranéennes et à l'évaporation estivale. Par ailleurs, l'analyse croisée met en lumière un délai hydrologique optimal d'environ un mois entre pluies et variation de surface d'eau, au-delà duquel l'effet des précipitations s'estompe puis s'inverse, soulignant le rôle déterminant des processus d'infiltration, de stockage et des prélèvements humains. Ces enseignements insistent sur la nécessité d'intégrer dans les futurs modèles de gestion des scénarios climatiques extrêmes, les bilans thermiques et d'évaporation, ainsi que des stratégies de lâchers et de prélèvements raisonnées, afin d'optimiser la résilience et la durabilité des ressources en eau face au changement climatique et à la pression anthropique.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'étude intégrée des données hydrologiques à travers trois méthodologies principales – mesures de terrain, modélisation mathématique et télédétection – représente une approche globale pour comprendre la dynamique des ressources en eau dans les bassins hydrologiques. Ces méthodologies se complètent. Alors que les mesures de terrain (telles que les données de précipitations et d'évaporation) offrent une grande précision à l'échelle locale, la télédétection (telles que les données satellitaires GPM et SMAP) compense la couverture spatiale et temporelle limitée des mesures de terrain en fournissant des données complètes et périodiques, en particulier dans les zones reculées ou étendues. La modélisation hydrologique (telle que les modèles GR) relie ces deux méthodologies en transformant les données en prévisions quantitatives qui soutiennent la gestion des inondations et la planification de l'eau.

Dans ce contexte, ces méthodologies intégrées ont été appliquées au bassin côtier algérien 02A (8 471 km²), qui comprend deux zones principales : la côte occidentale s'étendant de Tipaza à Ténès, et la plaine fertile de la Mitidja. Les résultats de l'étude (2018-2024), qui s'appuyait sur le NDWI pour détecter les masses d'eau, ont montré une nette variation des ressources de surface, notamment autour de la vallée de Righaya et des barrages de Kaddara, Kermis et Kaf Ed-Deir, où une baisse significative a été enregistrée en période de sécheresse. Une analyse de corrélation temporelle a également révélé un décalage de 2 à 3 mois dans la réponse des ressources de surface aux précipitations, reflétant la complexité des processus hydrologiques du bassin. Ces résultats confirment la grande sensibilité du système du bassin 02A au changement climatique et soulignent l'importance d'intégrer les méthodologies de recherche.

- 1) Les mesures de terrain corrigent les biais des données des capteurs.
- 2) Les modèles mathématiques étendent la résolution temporelle et spatiale.
- 3) La télédétection permet une surveillance continue et complète. Cette intégration méthodologique est un outil essentiel pour relever les défis du changement climatique et de la pénurie d'eau, en particulier dans les bassins d'importance stratégique tels que le bassin 02A, qui abrite 80 % de ses ressources en eaux souterraines (214,9 millions de m³/an) dans la plaine de la Mitidja et comprend un vaste réseau de barrages qui régule 63,32 % de ses ressources en eaux de surface (848 millions de m³/an). Cela en fait un système écologique et économique vital qui nécessite le renforcement des systèmes de surveillance spatiale pour soutenir la prise de décision durable en matière de gestion des ressources en eau.

Sur la base de ce que nous avons atteint en raison des facteurs naturels et climatiques observés ces dernières années, l'augmentation des températures et le manque de précipitations année après année, le taux d'évaporation augmente d'abord en raison de l'augmentation des températures et du manque de précipitations, deuxièmement l'abondance des usines, ce qui augmente les températures même en hiver, similaire à la pollution de l'environnement dans les vallées et les vallées et autres, cette étude nous ouvre la voie pour l'approfondir et étendre l'étude au reste des bassins d'Algérie pour prendre une décision sur les ressources en eau, et le citron est un sujet proposé pour les diplômés de master et de doctorat.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

Abdellaoui, F. (2020). Utilisation de Sentinel-2 pour surveiller la qualité des eaux de surface dans la vallée du M'Zab (Mémoire de Master). Université de Tébessa.

Abdellaoui, F. (2020). Analyse des changements d'humidité dans les régions semi-arides à l'aide de la télédétection (Mémoire de Master). Université de Tébessa.

Abdellawi, F. (2020). Les propriétés hydrologiques du sol et son impact sur l'alimentation des eaux souterraines (Mémoire de Master). Université de Tébessa.

Agence Nationale de l'Eau (ANE). (2022). Rapport sur les impacts du changement climatique sur les bassins côtiers algériens. Alger, Algérie.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Évapotranspiration des cultures – Document FAO sur l'irrigation et le drainage n° 56. FAO.

Ammari, A., & Remini, B. (2019, novembre). What about the erosion in the coastal Algiers watershed (Algeria)? In Proceedings of the Arabian Journal of Geosciences (pp. 433–437). Springer.

ANBT. (2024). Agence Nationale des Barrages et Transferts. Techno-Science. <https://www.anbt.dz/>

Atto, F. A. Z. (2014). Étude hydrologique du bassin du Chiffa (Projet de fin d'études). Département d'Hydraulique, Université de Blida 1.

Belhadj, A. (2017). Gestion durable des bassins versants côtiers (Mémoire de Magistère). Université de Tlemcen.

Ben Hamza, K. (2015). Gestion des ressources hydriques dans la Mitidja Ouest (Mémoire de Master). Université de Blida 1.

Ben Ismail, F. (2014). Contribution à l'étude hydrologique du barrage de Qadara (Mémoire de Maîtrise). Université de Boumerdès.

Ben Nasser, N. (2018). La télédétection et ses applications géographiques (Mémoire de Master). Université Constantine 2 – Faculté des Sciences de la Terre et de Géographie.

Benzineb, M. (2021). [Titre à préciser] (Mémoire de Magister). Université ...

Billen, R., & Cornélis, B. (2000). Géométrie de la spatiocarte : correction et validation. Bulletin de la Société Géographique de Liège, 38(1), 25–42.

Bouanani, A. (2004). Hydrologie et transport des solides dans les régions semi-arides : une étude de cas sur les bassins algériens (Thèse de Doctorat). Université de Tizi Ouzou. <http://dl.ummo.dz/>

Boudaoud, A. (2015). Hydrologie appliquée. Dar El Gharb.

Bouhafs, A. (2012). Le rôle hydrologique de la vallée de Chlef dans l'écosystème de l'Atlas de Blida (Mémoire de Master). Université de Blida 1.

Bouhouti, A. (2020). Estimation de l'évaporation réelle à l'aide de techniques de télédétection et du système SEBAL dans le bassin de l'Oued Jedi (Mémoire de Master). Université de Ouargla.

Boussivian, M., et al. (2021). Variabilité pluviométrique et sécheresses dans le bassin 02A. *Journal of Arid Environments*, 34(2), 112–125.

Bouskin, F. A. Z. (2017). Analyse hydrologique de la vallée du Boudaou et évaluation des risques d'inondation (Mémoire de Master). Université de Blida 1.

Burn, B. H., & Hag Elnur, M. A. (2002). Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of Hydrology*, 255(1–4), 107–122.

Campbell, J. S., & Norman, J. M. (1998). Introduction à la biophysique environnementale.

Chetoui, H. (2020). Conception d'une mini-station météorologique automatique : comparaison avec les données d'une station synoptique (Mémoire de Master). Université d'Ouargla.

Choi, I. H., Lee, E. R., & Jung, H. S. (2024). Performance comparison of water body detection from Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 optical imagery using Attention U-Net model. *Korean Journal of Remote Sensing*, 40(5), 507–523.

Continent, F. A. Z. (2021). Le rôle de la télédétection dans l'analyse des variations spatiales des cours d'eau – Wadi Al Ramal (Mémoire de Master). Université de Batna 1.

Dagmon, N. E. (2010). Étude des dépôts de limons dans le barrage de Hamiz (Mémoire de Master). Université de Boumerdès.

de Souza, F. B., Laipelt, L., de Andrade, B. C., de Arruda Souza, V., Roberti, D. R., & Ruhoff, A. (2023). A MODIS–Landsat cloud-based spatiotemporal downscaling algorithm to estimate land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 44(15), 4775–4795.

Djebbar, F. (2016). Suivi de la qualité des eaux du barrage de Boukerdane (Mémoire de Master). Université de Blida 1.

ESA. (2016). Sentinel-1 Technical Guide.

Ghalmi, L. (2019). Contrôle des risques d'inondation à Wadi Khraisiya (Mémoire de Master). Université d'Alger 1.

Hebal, A. (2013). Analyse hydrologique de quelques bassins versants du nœud algérien : eaux superficielles, crues et aménagement (Thèse de Doctorat). Université de Blida.

Jami, M. (2016). Étude de la qualité des eaux de surface dans le bassin de Wadi El Harrach (Mémoire de Master). Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene.

Jensen, J. R. (2015). *Remote Sensing of the Environment : An Earth Resource Perspective*. Pearson.

Kabash, M. (2021). Utilisation de données Sentinel-1 dans l'étude de l'humidité du sol en Algérie (Mémoire de Master). Université de Laghouat.

Khalifa, A. Q. (2018). Modélisation hydrologique du bassin de Budao (Mémoire de Master). Université M'Hamed Bouguerra, Boumerdès.

Khalifi, H. (2016). Ressources en eau et irrigation sur le littoral algérien (Mémoire de Magistère). Université d'Oran.

Khalifi, M. (2020). Télédétection et systèmes d'information géographique au service du développement durable. Dar Al-Ma'rifa.

Khelifi, R. (2017). Évaluation de l'envasement du barrage de Bouroumi (Mémoire de Master). Université de Blida 1.

Kououssa, M. (2021). Cours Hydrologie 1 (Notes de cours). Université Abdelhafid Boussouf de Mila.

Laour, S. (2018). Utilisation de l'imagerie satellitaire pour surveiller les changements environnementaux (Mémoire de Master). Université de Batna.

Laribi, S. (2020). Utilisation d'images satellites pour analyser les inondations saisonnières dans la vallée du M'Zab (Mémoire de Master). Université de Ghardaïa.

Leghyd (Maaliou, A., et al.). (2014). Évaluation et cartographie de l'indice d'érosivité de pluie "R" de grands bassins versants en Algérie côtière algéroise et Isser. Laboratoire d'Environnement Géotechnique et Hydraulique (LEGHYD), USTHB.

Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons.

Maazouzi, I. (2011). Gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin de l'Isser (Mémoire de Master). Université de Boumerdès.

Madi, N., et al. (2016). Températures et régimes thermiques du littoral nord-algérien. Climatologie, 8(1), 30–45.

Madani, M., & Mahtout, M. (2020). Évaluation des techniques de correction du biais des précipitations sur l'amélioration de la simulation hydrologique : cas du bassin versant de la Chiffa (Mémoire de Master). Université Saad Dahleb – Blida 1.

Mazari, S. (2021). Analyse de l'évolution de la couverture hydrique à l'aide de techniques de télédétection (Mémoire de Master). Université de M'Sila – Faculté de Technologie.

Mebarki, A. (2019). Analyse et gestion des bassins versant côtiers algérois (Mémoire de Master). Université de Constantine.

MEDANE. (n.d.). Hydrologie et modélisation pluie-débit : cas du bassin versant de l'Oued Boumessaoud (Tafna NW-Algérien) (Mémoire de Magister). Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen.

Mida, S. (2015). Caractérisation morphométrique du bassin versant de la vallée de l'Isser (Mémoire de Master). Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

Mubaraki, K. (2019). Analyse et gestion des bassins versants côtiers en Algérie (Mémoire de Master). Université de Constantine.

- NASA. (2024). Global Precipitation Measurement. <https://www.nasa.gov/>
- NASA. (2025). Soil Moisture Active Passive. <https://smap.jpl.nasa.gov/>
- NASA Earthdata. (n.d.). Earthdata. <https://earthdata.nasa.gov/>
- Nawal, D. (2020). Estimation de la qualité de l'eau du barrage à l'aide de techniques de télédétection : dam Beni Haroun (Mémoire de Master). Université de Constantine 3.
- Nilsson, B., & Nielsen, K. (2024). Validation of Sentinel-6MF based lake levels – An assessment with in situ data and other satellite altimetry data. *Advances in Space Research*, 73(12), 5806–5821.
- Organisation météorologique mondiale. (2018). Guide des méthodes d'observations météorologiques.
- Paré, S. (2006). Contribution à la détermination d'un terme du bilan hydrologique dans la région d'Errachidia-Tafilalet : évaluation de l'évapotranspiration de référence et de l'évaporation à travers la zone non saturée de la plaine de Tafilalet. *Techno-Science*.
- Pettorelli, N., et al. (2018). Satellite remote sensing for conservation (Technical Note).
- Qara, F. A. Z. (2021). Le rôle de la télédétection dans l'analyse des changements spatiaux des cours d'eau – Vallée du sable (Mémoire de maîtrise). Université de Batna 1.
- Qasimi, A. (2016). Géologie hydrologique de la bande côtière algérienne (Mémoire). Université de Constantine.
- Rantz, S. Y., et al. (1982). Mesure et calcul du débit d'eau. USGS.
- Rabeh, M. (2015). Étude de l'impact du barrage de Tagsabet sur la vallée du Sebaou (Mémoire de Master). Université Mouloud Mammeri – Tizi Ouzou.
- Saadi, A. (2017). Suivi de la qualité des eaux du barrage de Sidi Yagoub (Mémoire de Master). Université de Blida 1.
- Saadi, A. (2015). La télédétection et ses applications en géographie. Dar Al-Huda.
- Saeedi, F., et al. (2018). Humidité relative et microclimats côtiers en Algérie. *Environmental Coastal Research*, 15, 200–215.
- Samira, L. (2018). Utilisation de l'imagerie satellitaire pour surveiller les changements environnementaux (Mémoire de Master). Université de Batna.
- Schumann, G. J.-P., et al. (2018). Unlocking the potential of remote sensing for hydrology. *Water Resources Research*, 54(12), 9727–9738.
- Sharaytiya, E. (2021). Analyse de la qualité de l'eau de Wadi Damar dans le cadre d'activités industrielles (Mémoire de Master). USTHB.
- Sivakumar, M. V. K. (2003). Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology.
- Techno-Science. (2025). Pluviomètre – Définition. <https://www.techno-science.net/>

Tian, L., Wu, X., Tao, Y., Li, M., Qian, C., Liao, L., & Fu, W. (2023). Review of remote sensing-based methods for forest aboveground biomass estimation : Progress, challenges, and prospects. *Forests*, 14(6), 1086.

Toumi, S. (2018). L'hydrologie urbaine et les bassins versants (Mémoire de Magistère). Université d'Alger 1.

Tawahariya, N. (2018). Télédétection et ses applications dans l'environnement (Mémoire de Master). Université de Ouargla.

Tawbia, K., et al. (2017). Bilan hydrique et évaporation dans les bassins méditerranéens. *Hydrology Journal*, 22(6), 155–170.

Wellington, P. (2011). For the Trinidad and Tobago Meteorological Services. www.metoffice.gov.tt

WikHydro. (2024). Moulinet (HU). <http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr>

Youssef, I. (2010). Principes de la télédétection et des systèmes d'information géographique (Mémoire). Université de Damas.

ZEGHDOUDI, I., & Boudjehem, F. (2018). Modélisation des hydrogrammes des crues dans les bassins urbains (Mémoire de Master). Université 08 Mai 1945 de Guelma, Faculté des Sciences et de la Technologie.

Zeroual, N. (2020). L'impact de l'expansion urbaine sur les petites voies navigables – une étude de cas de la vallée de Sidi Ali (Mémoire de Master). Université d'Alger 2.

Annexe

Annexe –A-

Figure A1 : carte des eaux des eaux en 2018



Figure A2 : carte des eaux des eaux en 2019



Figure A3 : carte des eaux des eaux en 2020



Figure A4 : carte des eaux des eaux en 2021



Figure A5 : carte des eaux des eaux en 2022

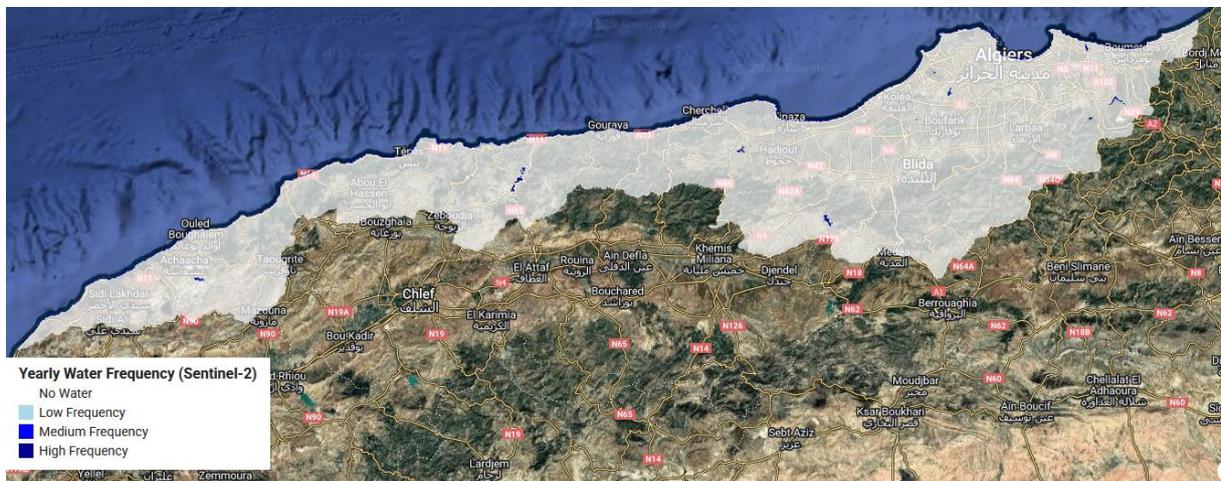


Figure A6 : carte des eaux des eaux en 2023



Annexe –B-

Figure B1 : évolution mensuelle des eaux de surface (2019).

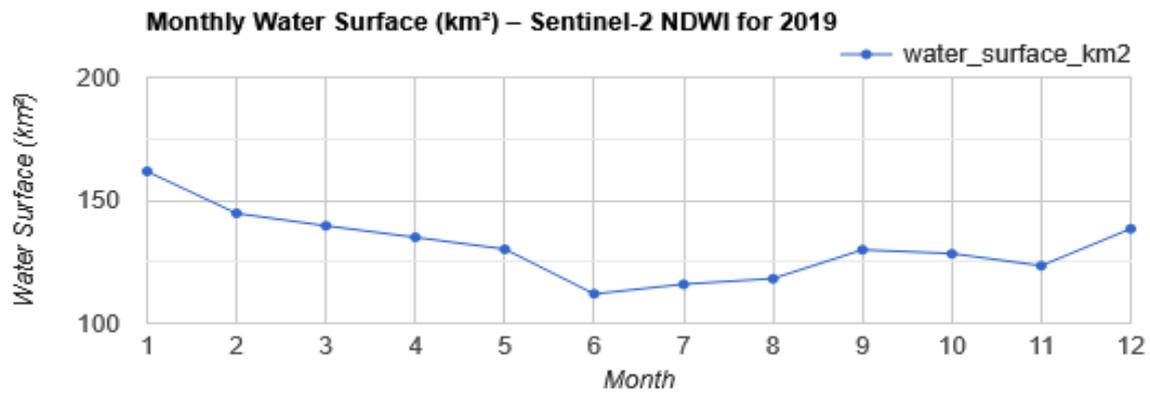


Figure B2 : évolution mensuelle des eaux de surface (2020).

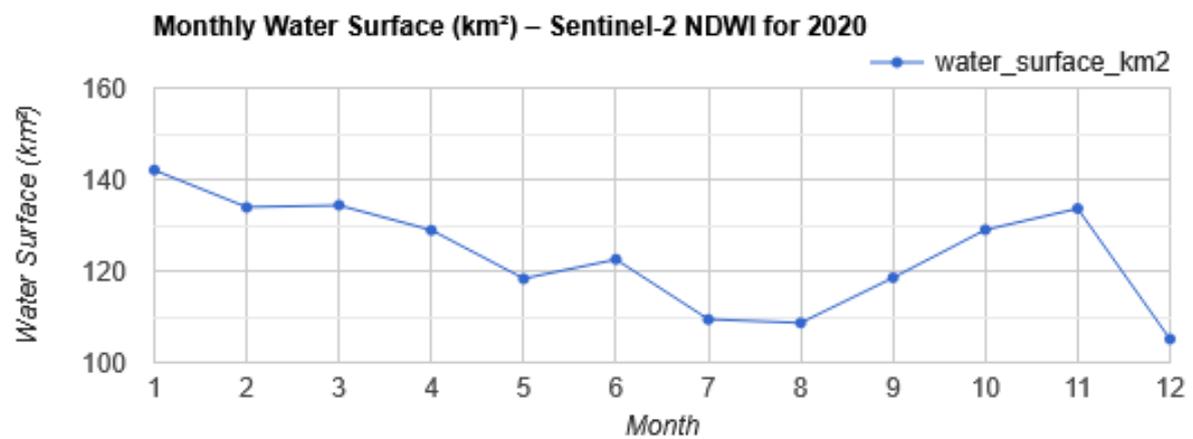


Figure B3 : évolution mensuelle des eaux de surface (2021).

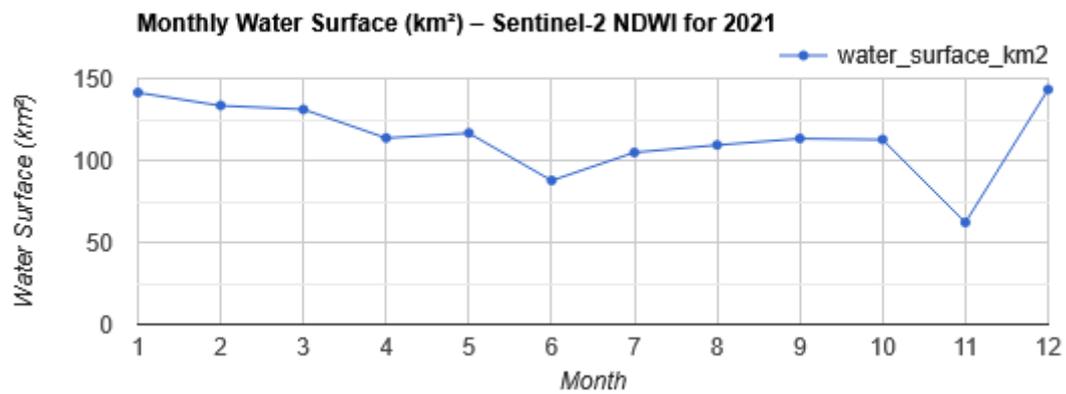


Figure B4 : évolution mensuelle des eaux de surface (2022).

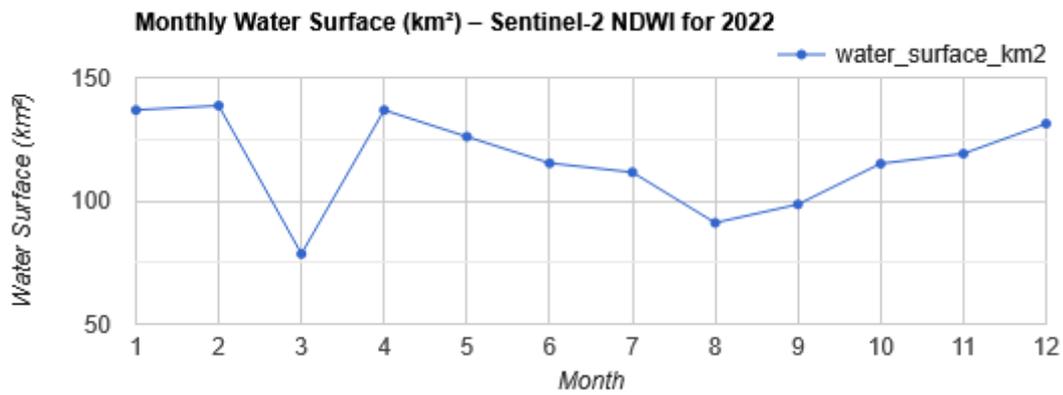


Figure B5 : évolution mensuelle des eaux de surface (2023).

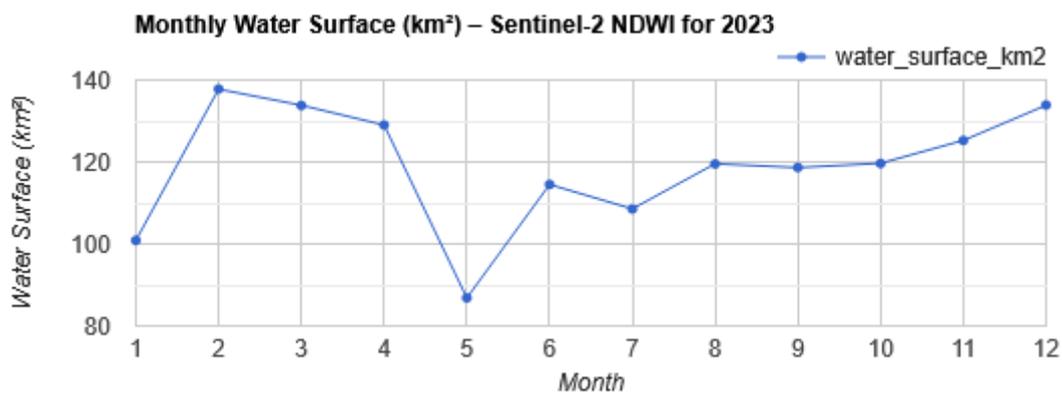
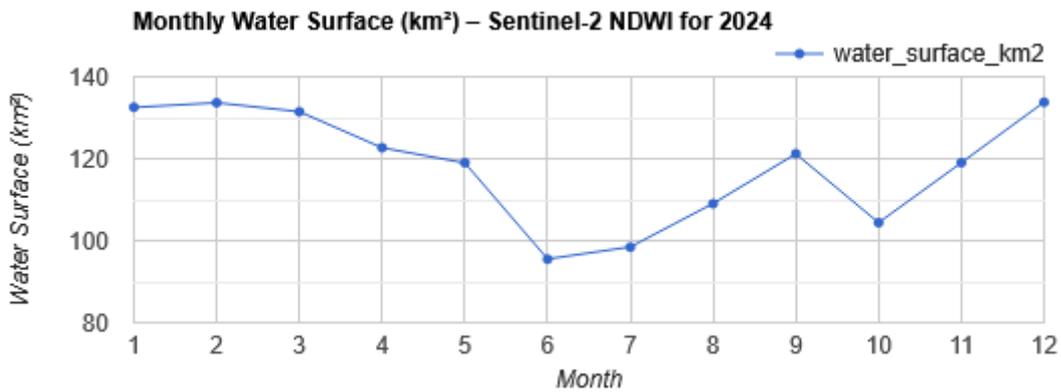


Figure B6 : évolution mensuelle des eaux de surface (2024).



Annexe –C-

Figure C1 : Evolution mensuelle des eaux de surface du barrage de Kramis.

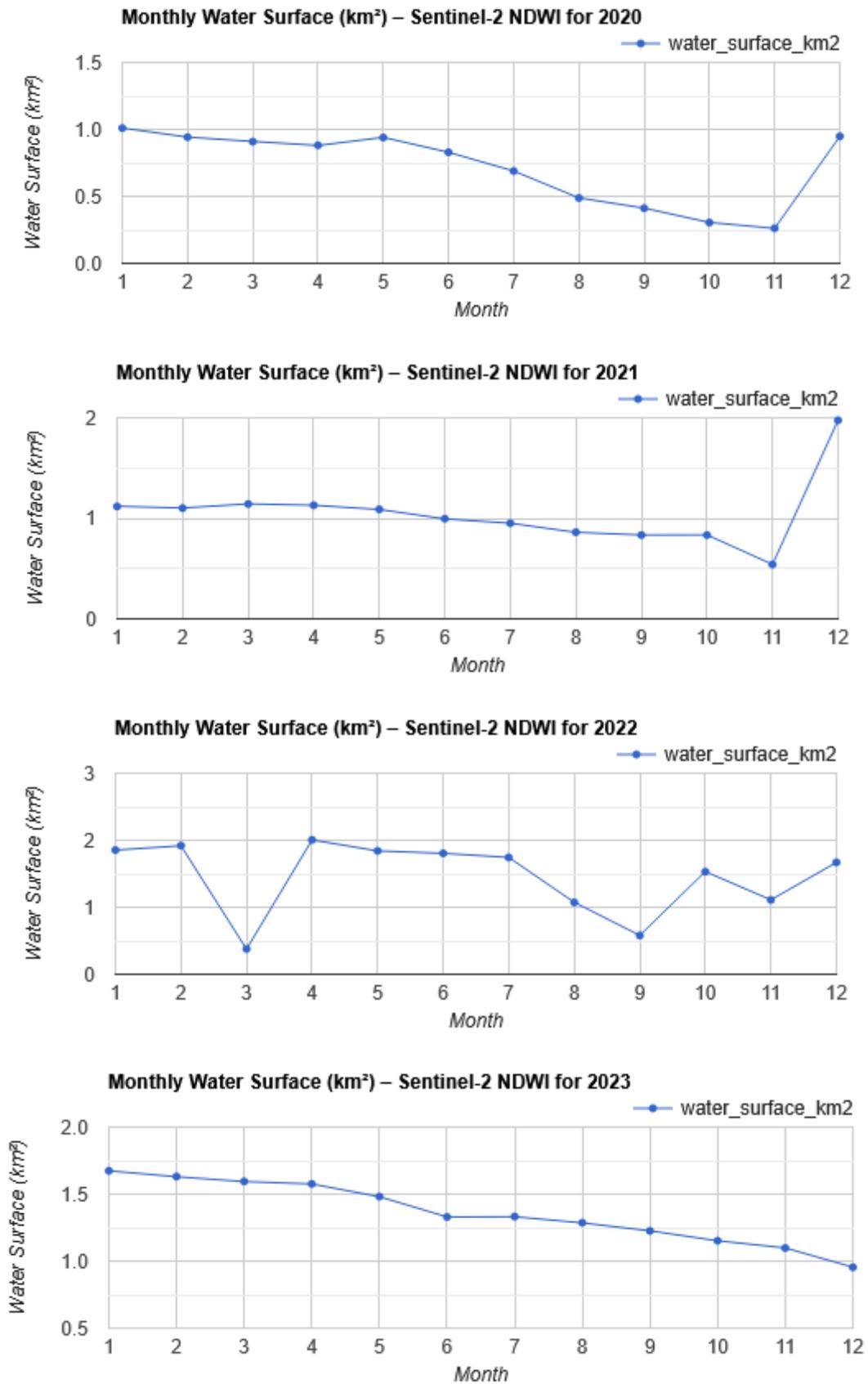
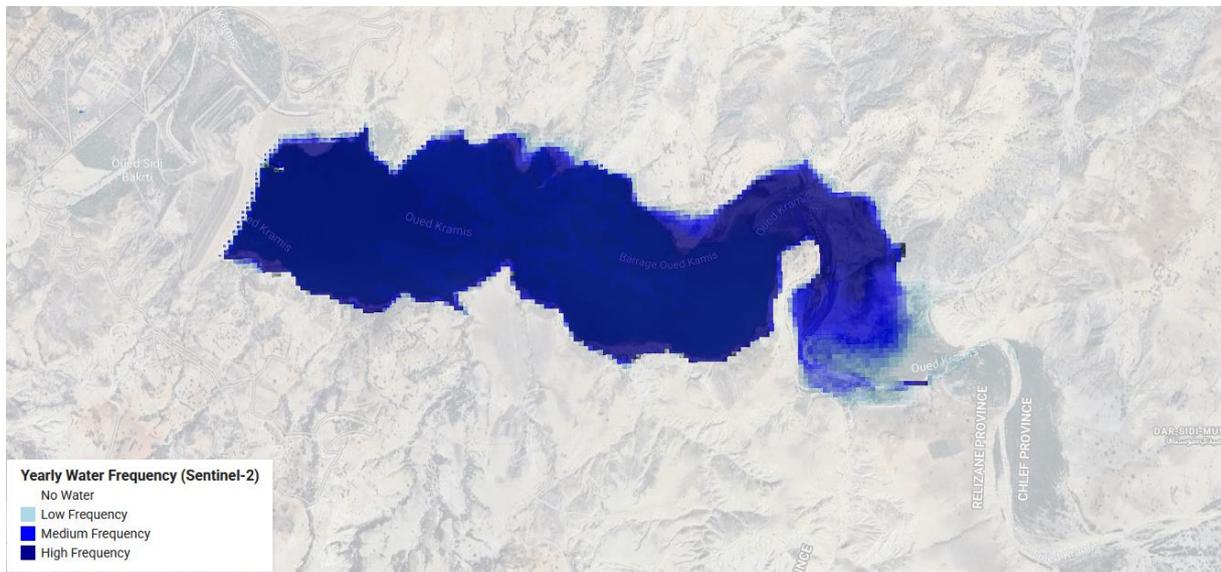
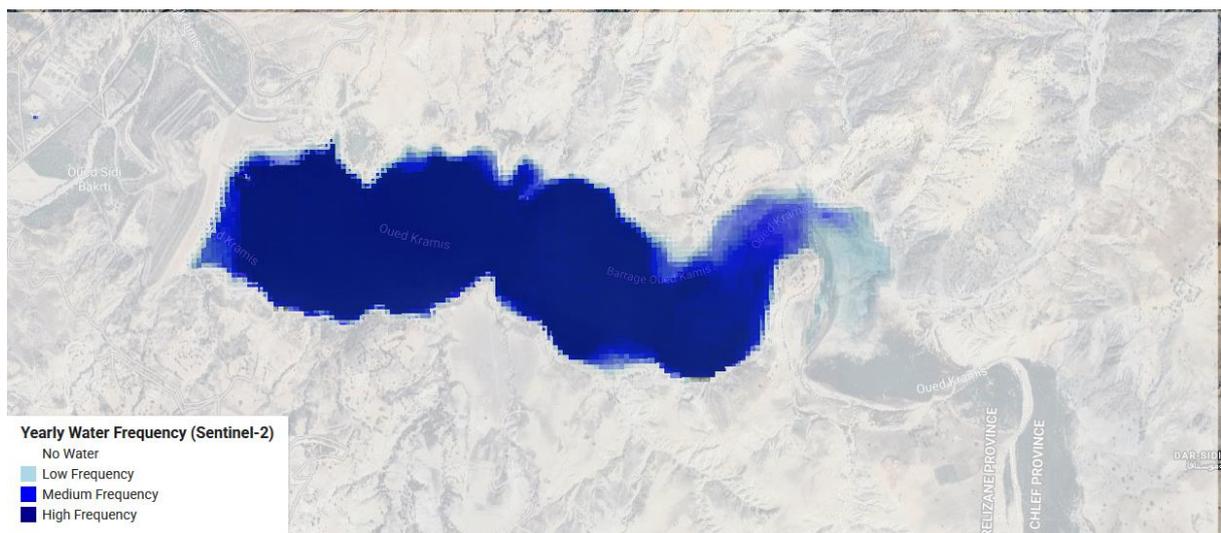


Figure C2 : Image satellitaire de la réserve du barrage de Kramis.

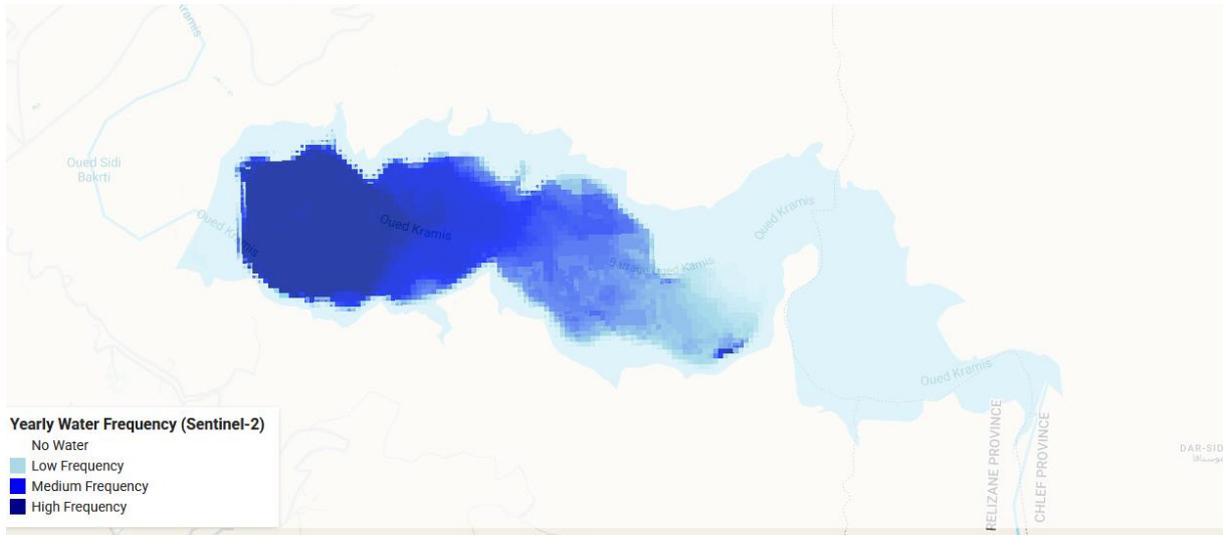
-2018-



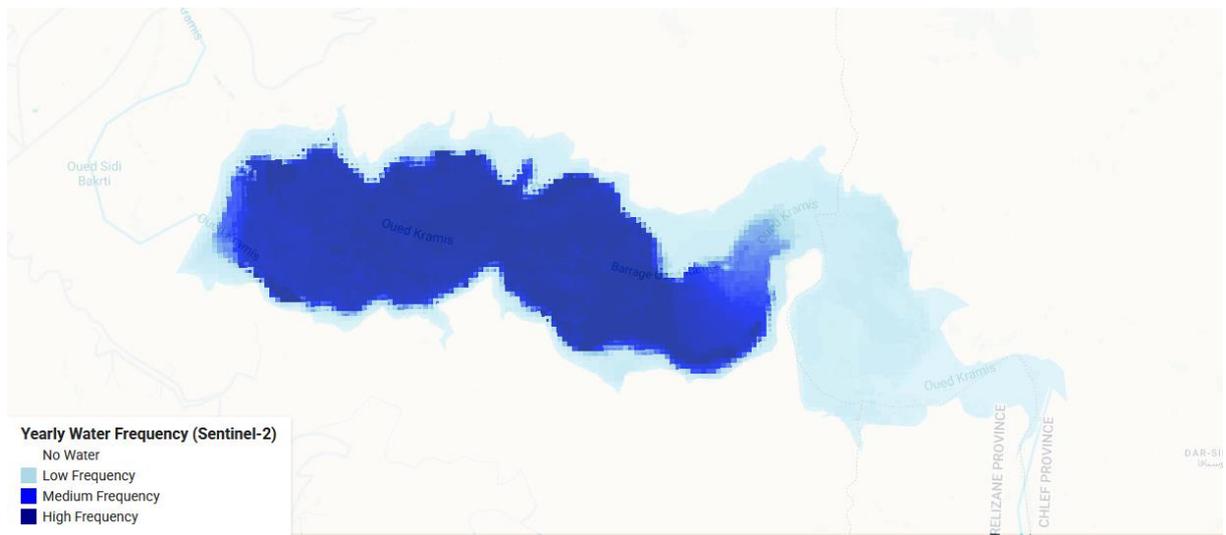
-2019-



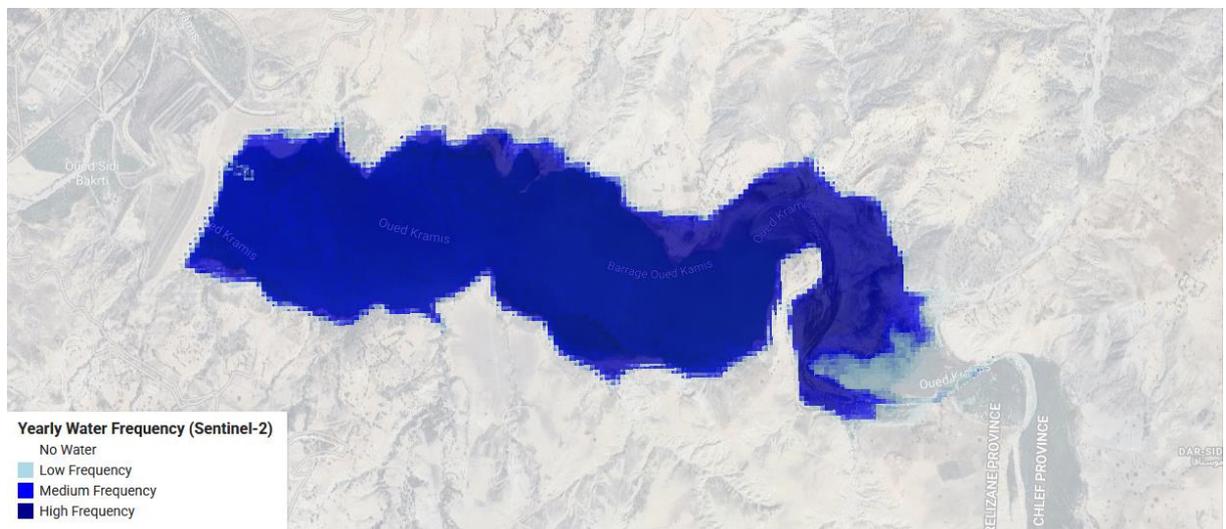
-2020-



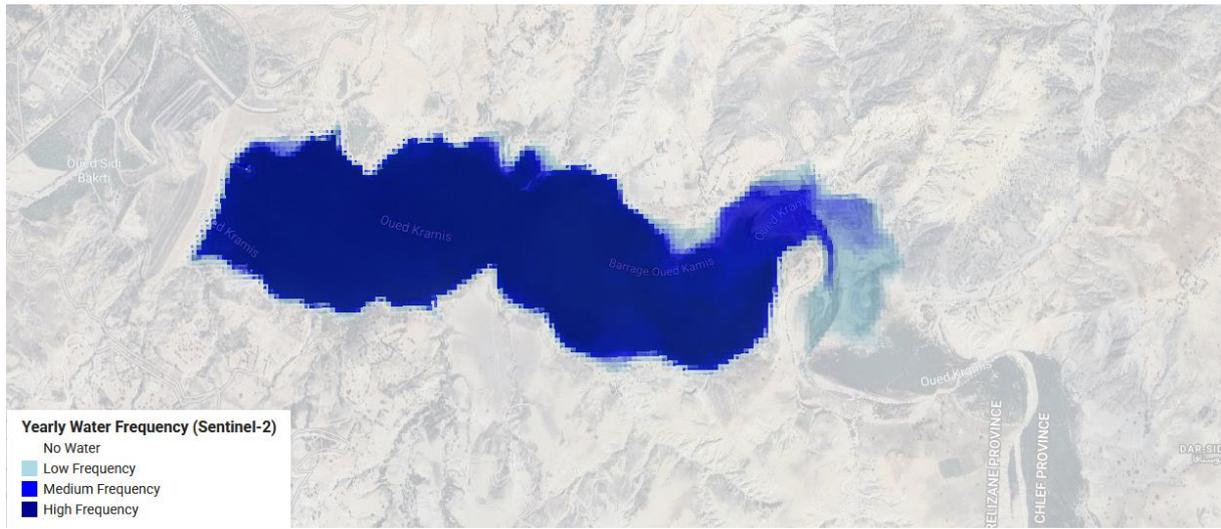
-2021-



-2022-

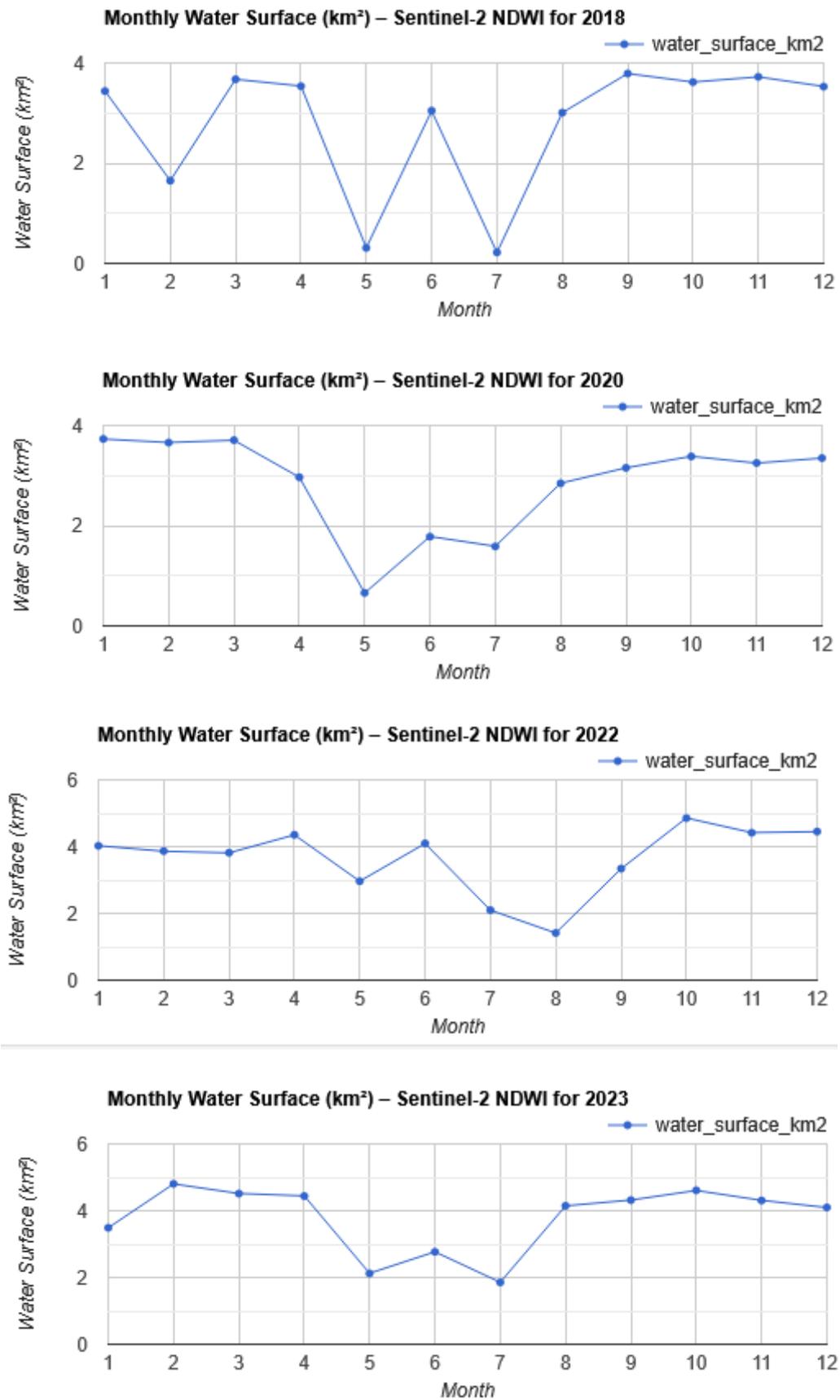


-2023-



Annexe –D-

Figure D1 : Evolution mensuelle des eaux de surface du barrage de Kef Eddir.



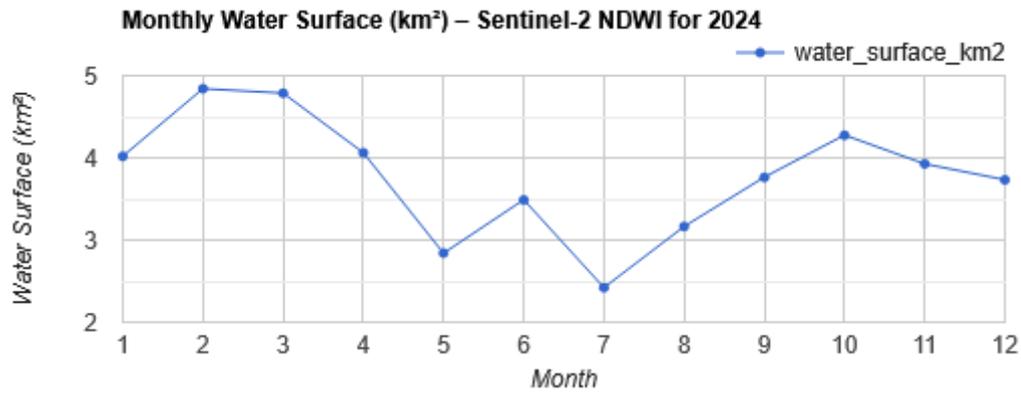
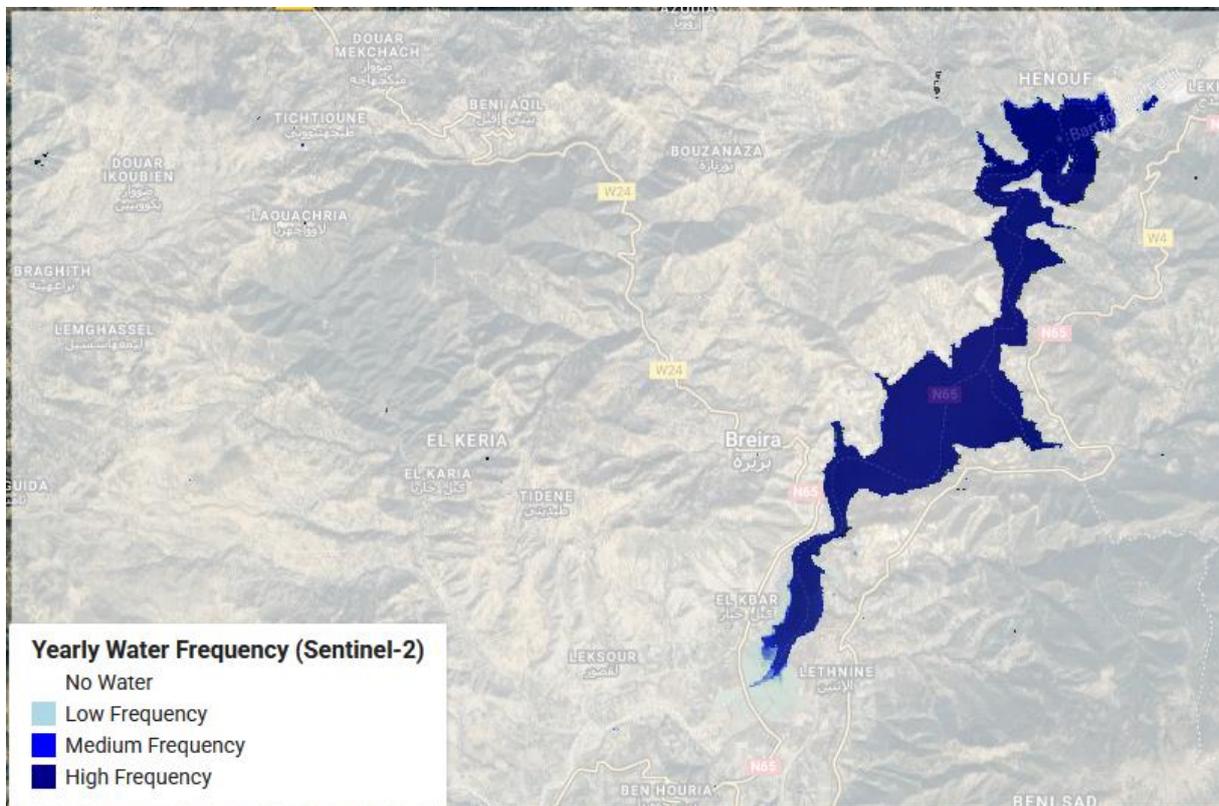
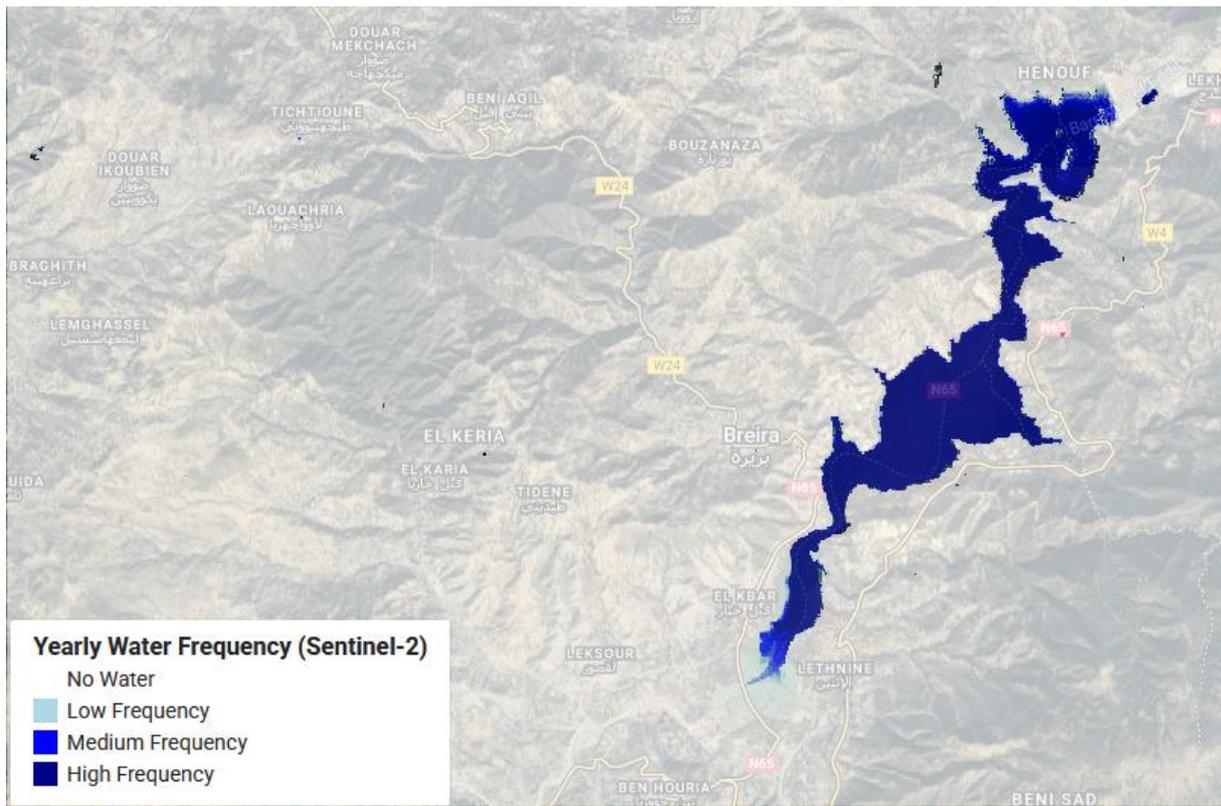


Figure D2 : Image satellitaire de la réserve du barrage de Kef Eddir.

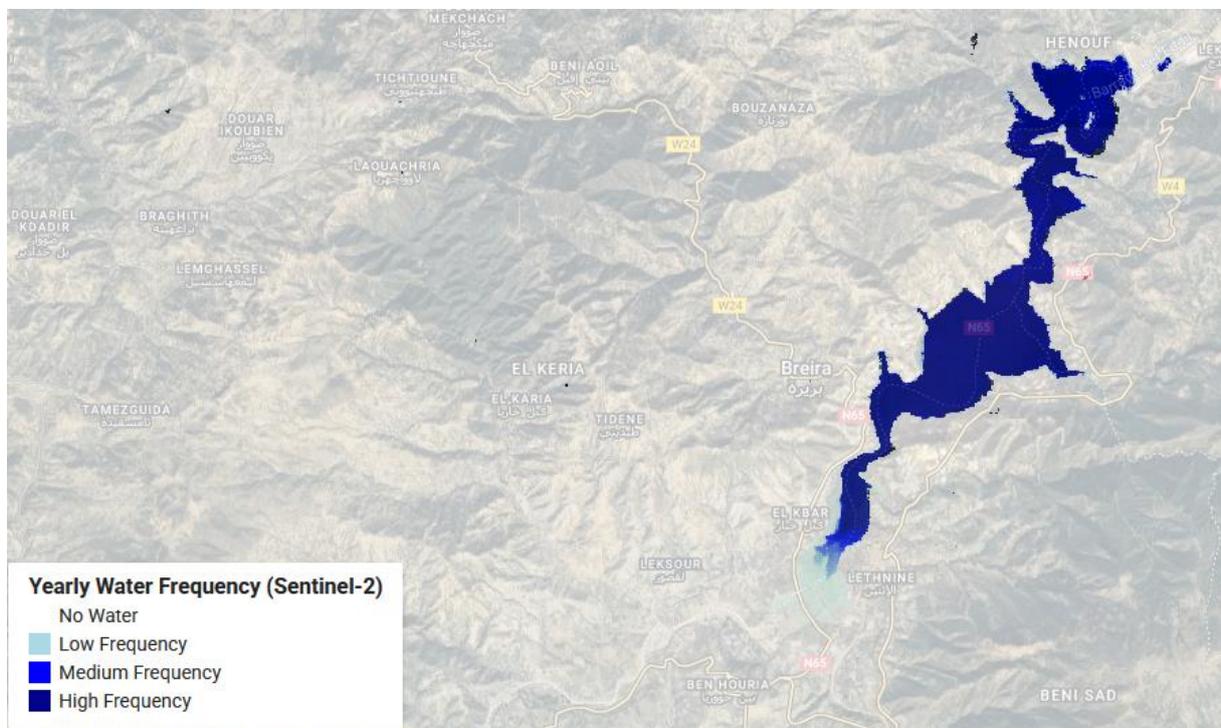
-2019-



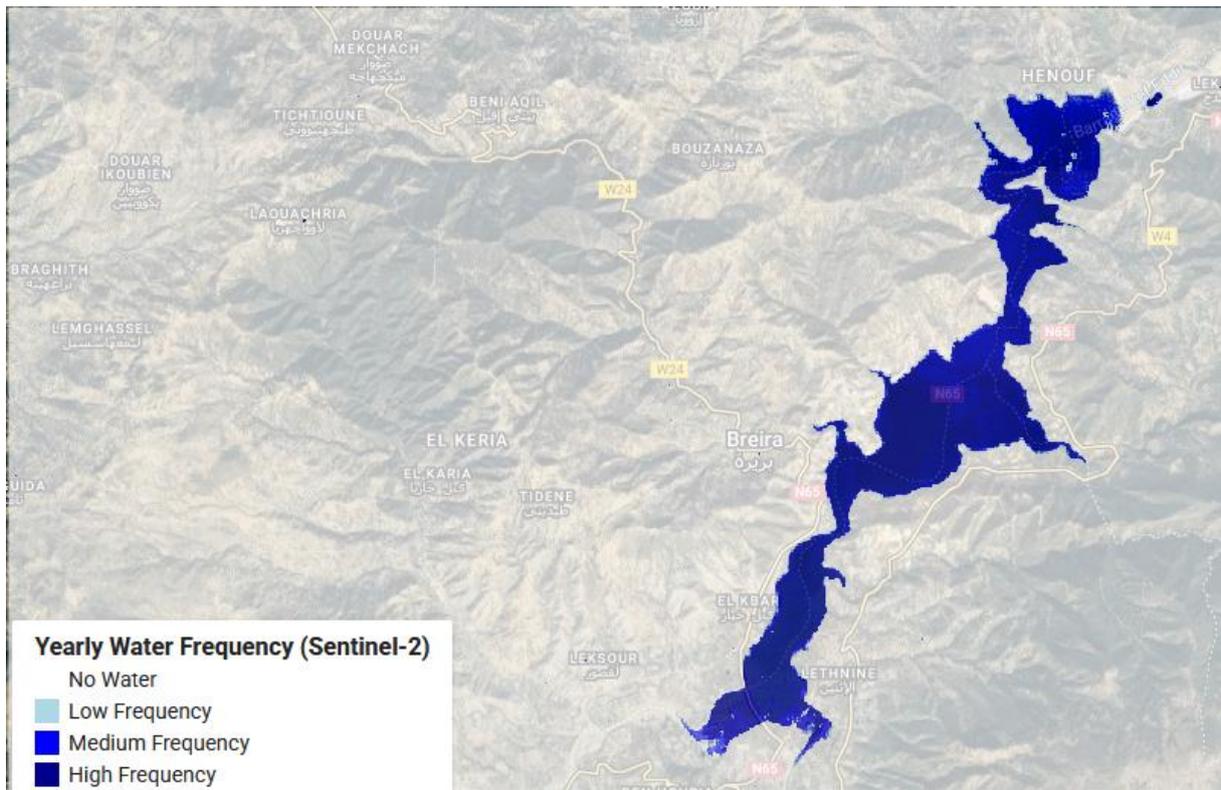
-2020-



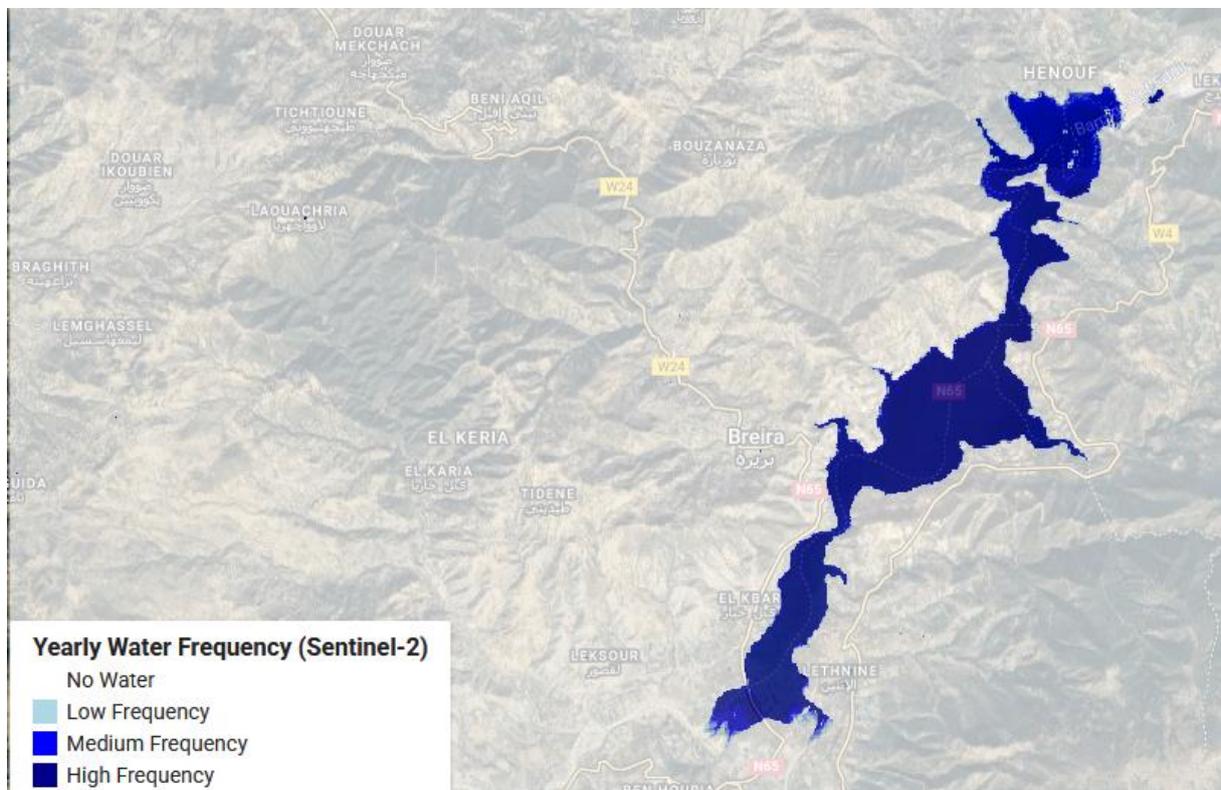
-2021-



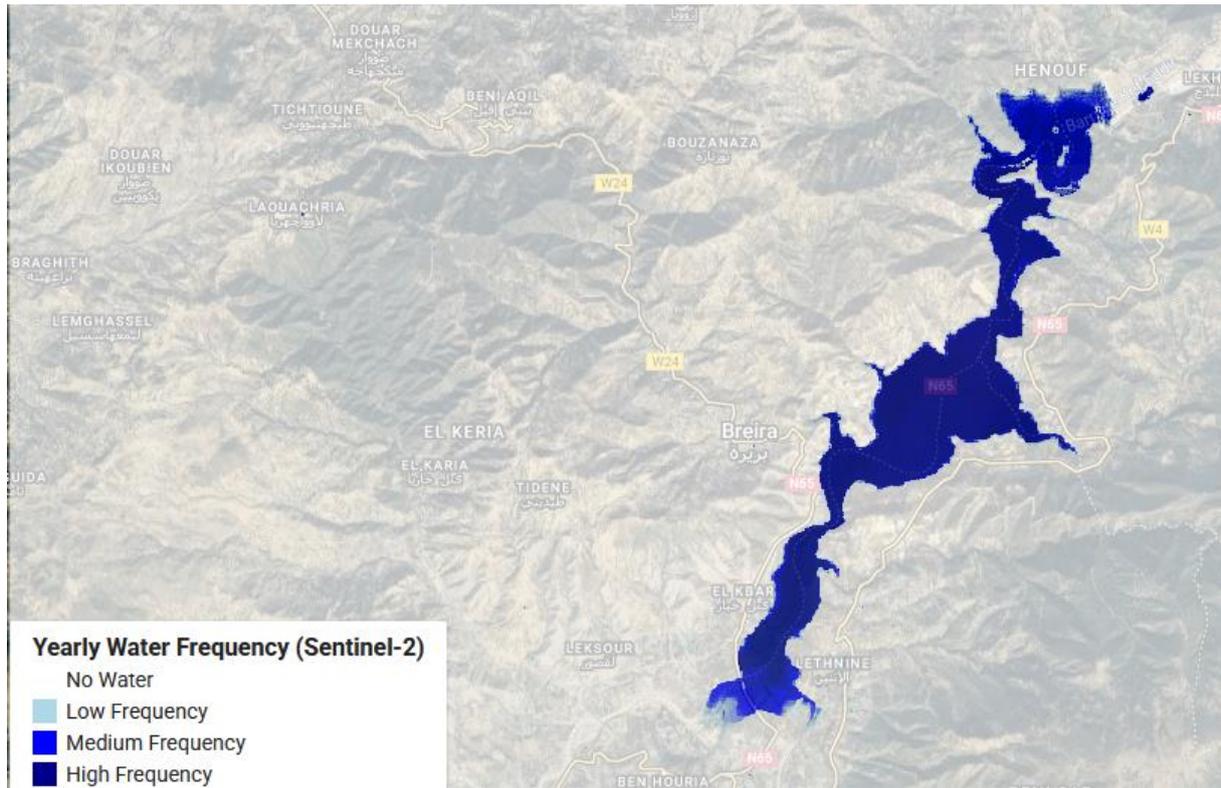
-2022-



-2023-



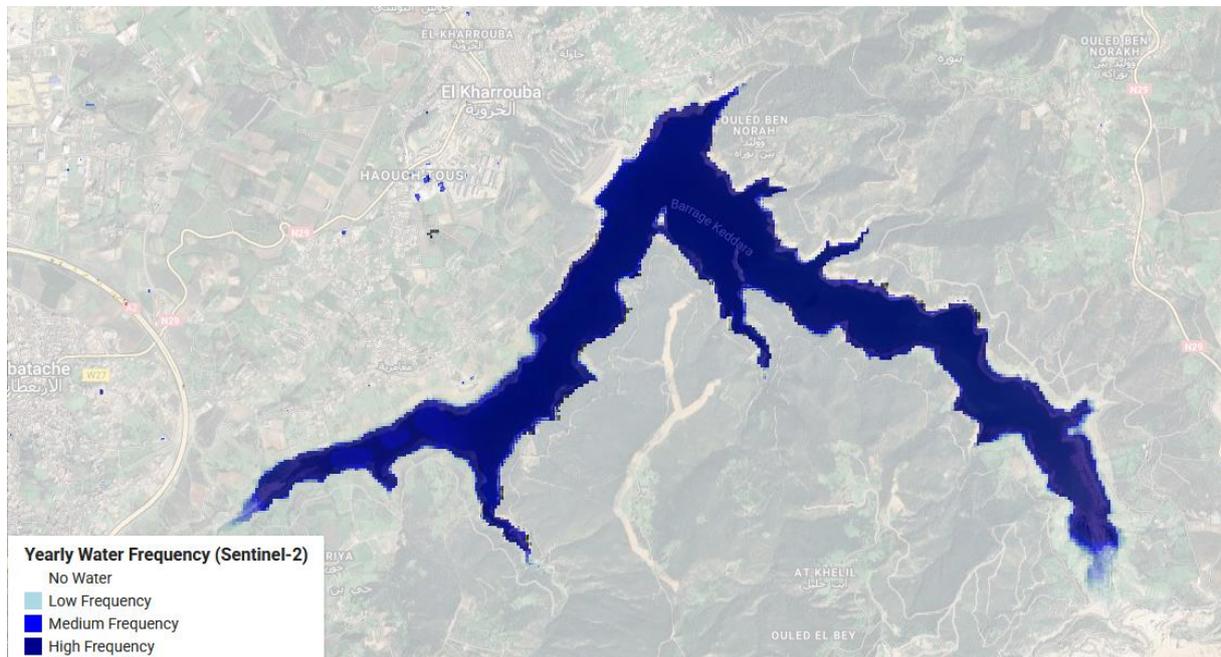
-2024-



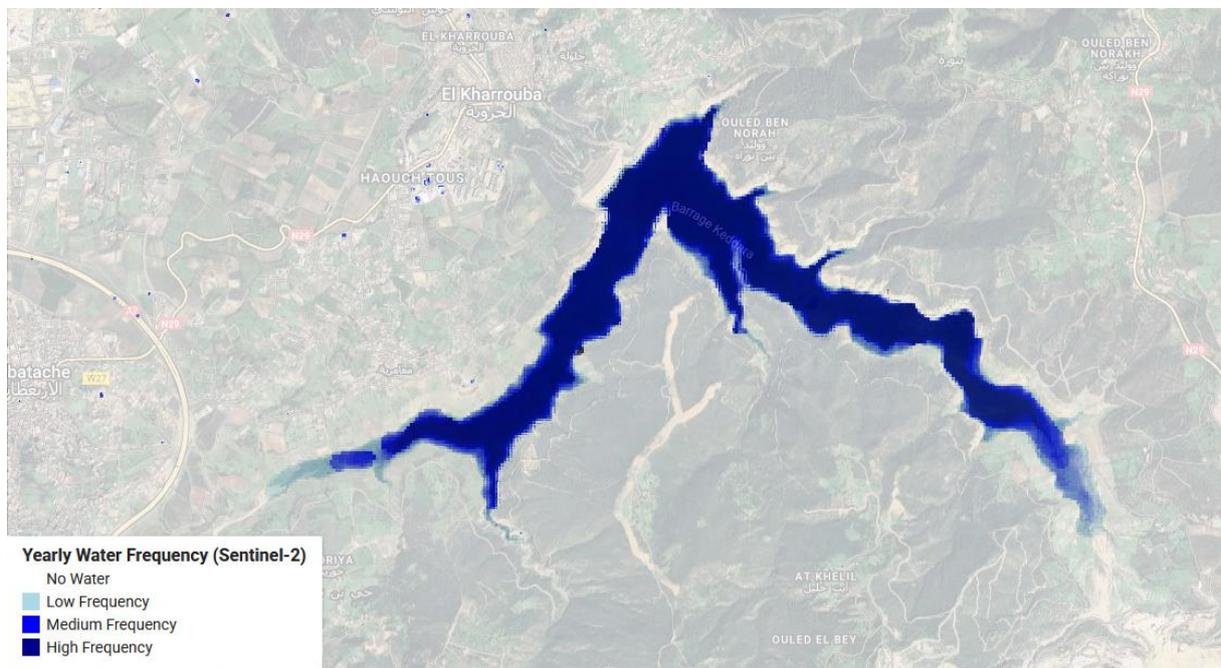
Annexe –E-

Figure E1 : Image satellitaire de la réserve du barrage de Keddara.

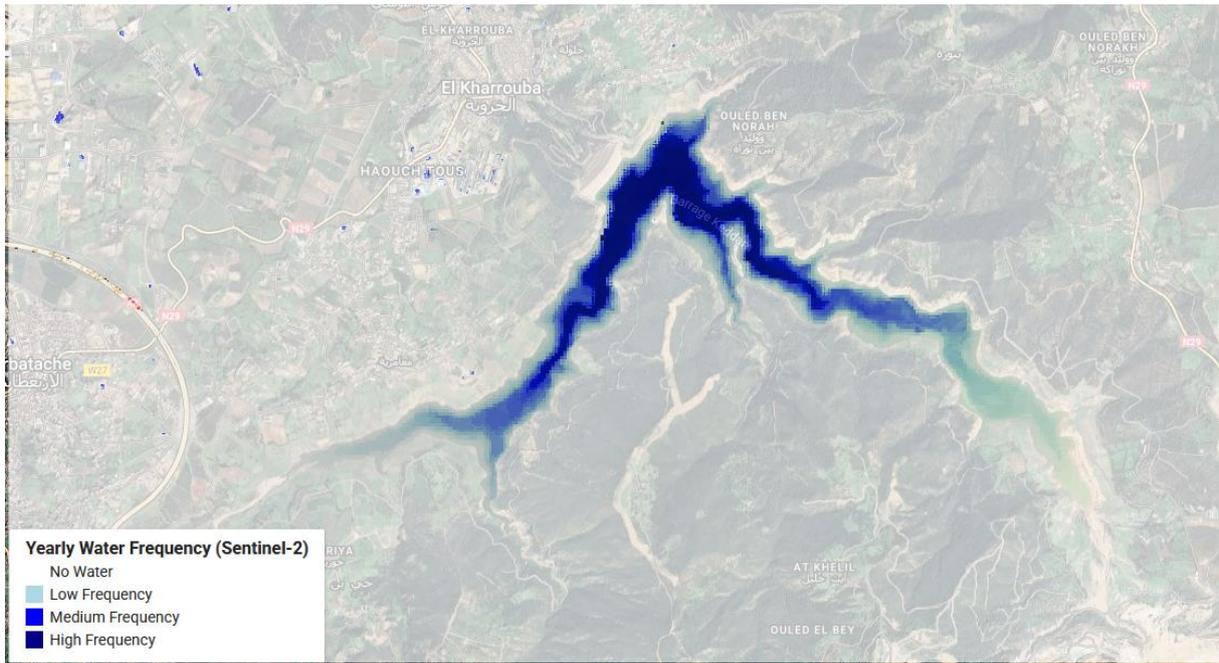
-2019-



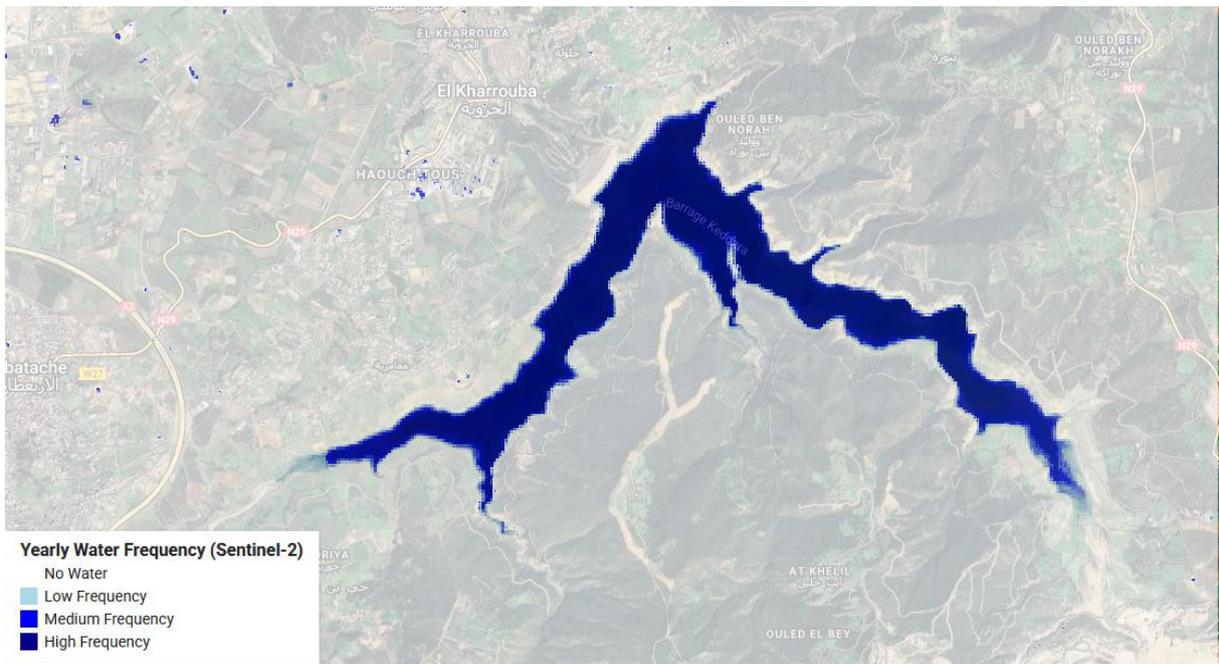
-2020-



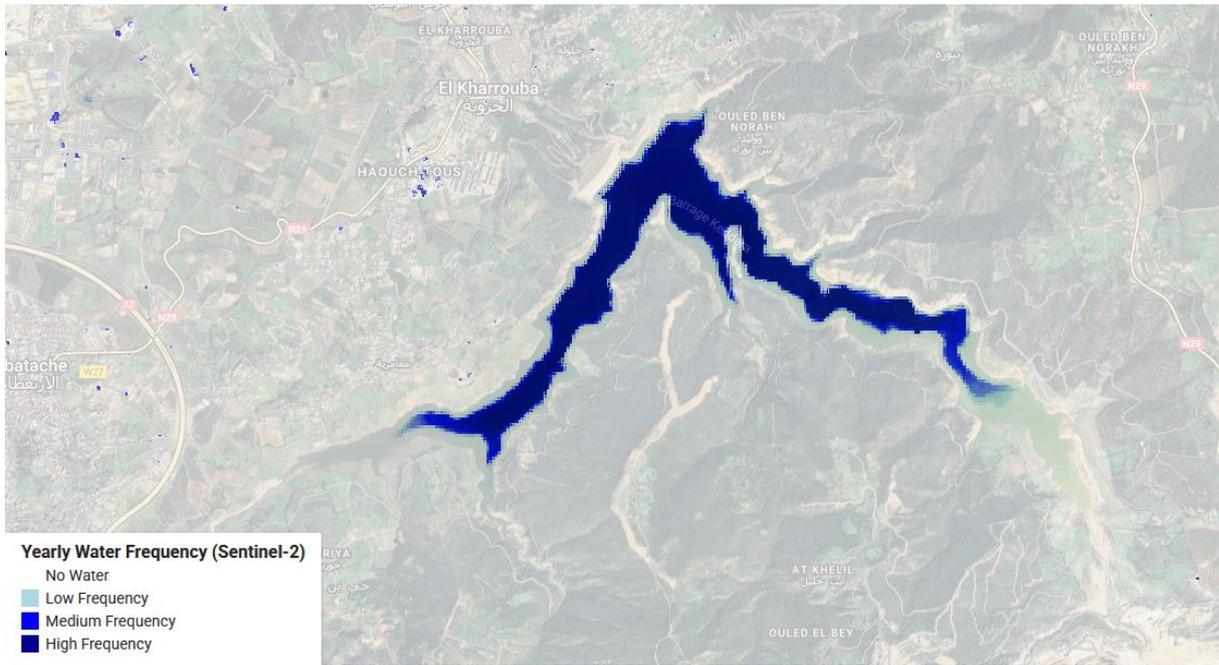
-2021-



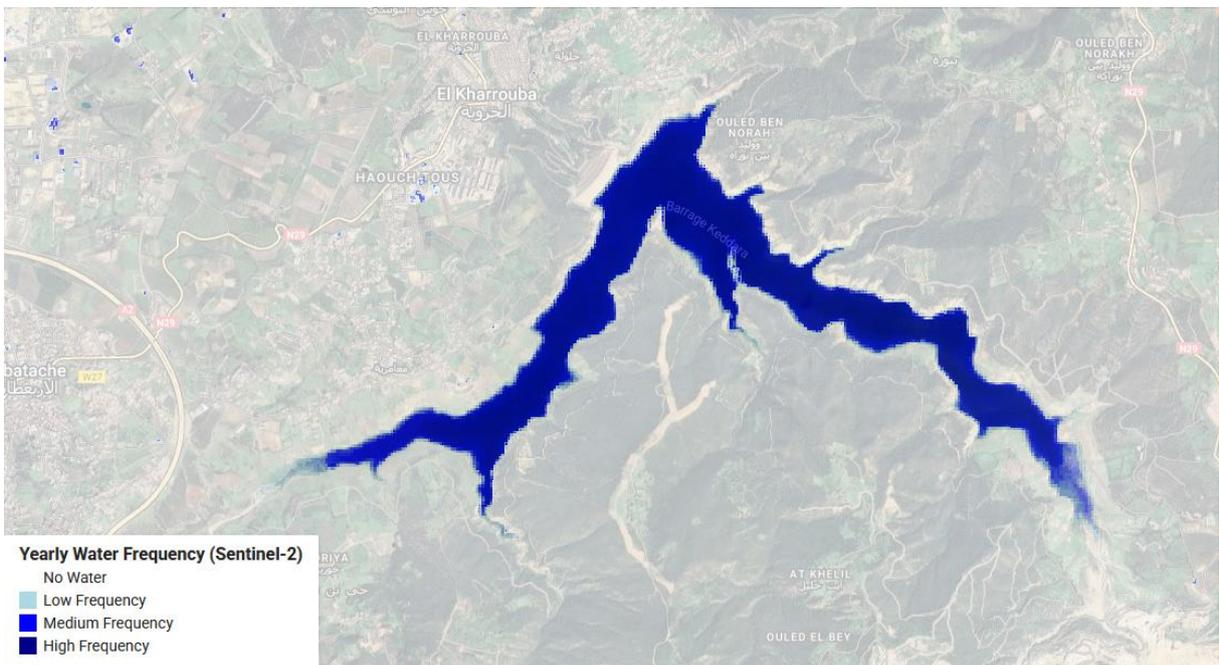
-2022-



-2023-



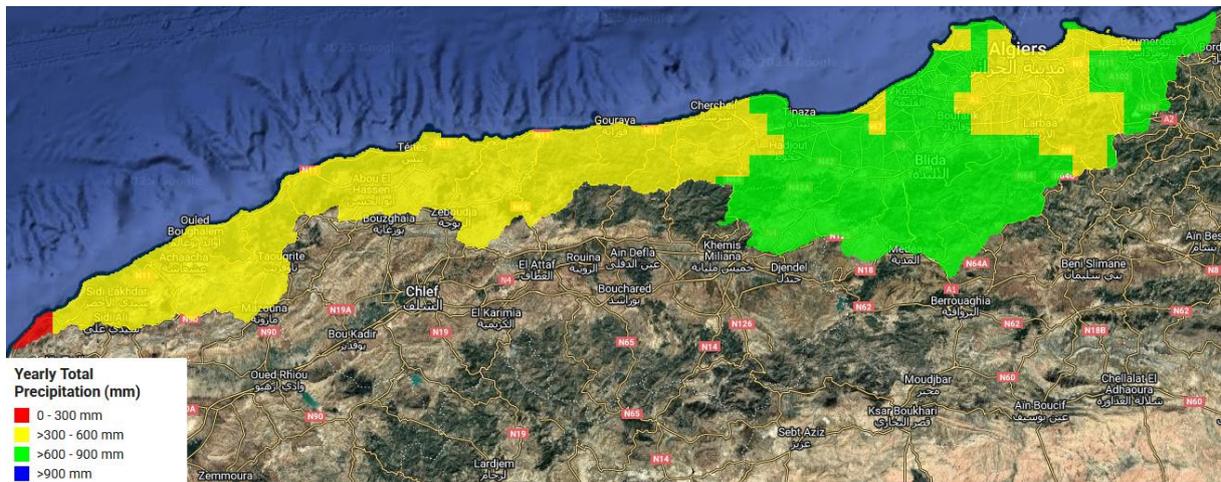
-2024-



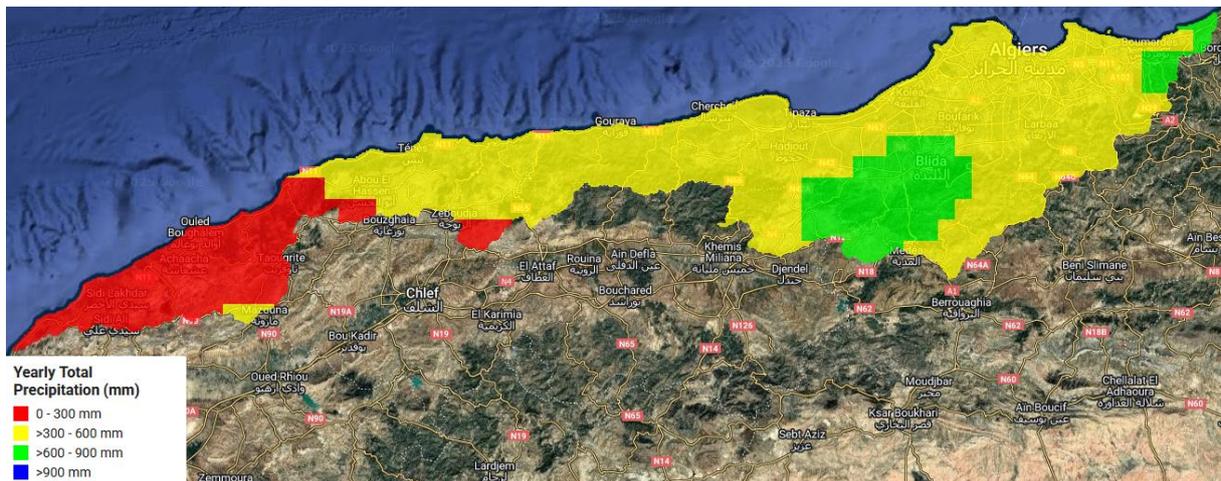
Annexe –F-

Figure F1 : carte des précipitations annuelles

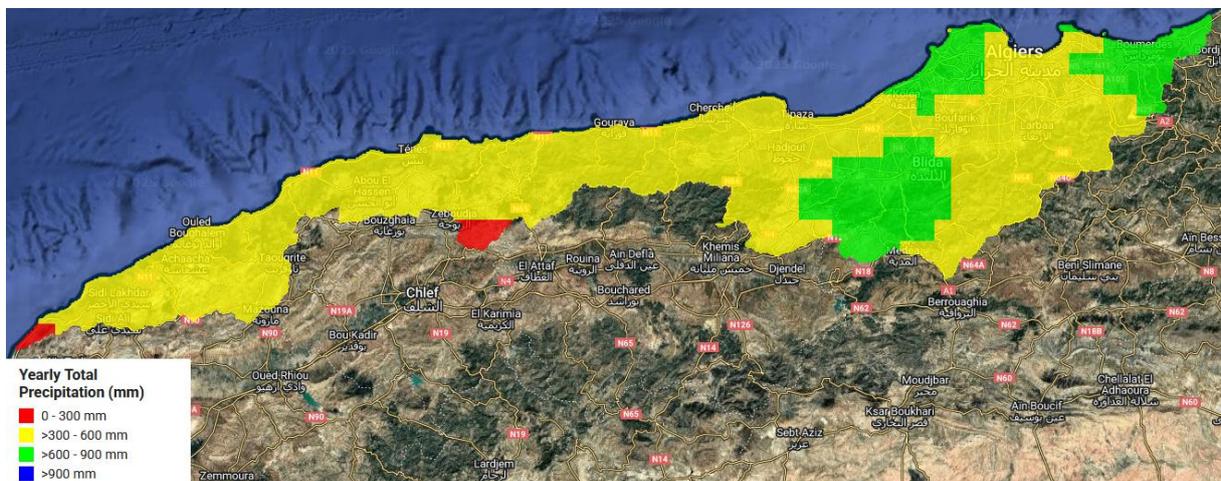
-2019-



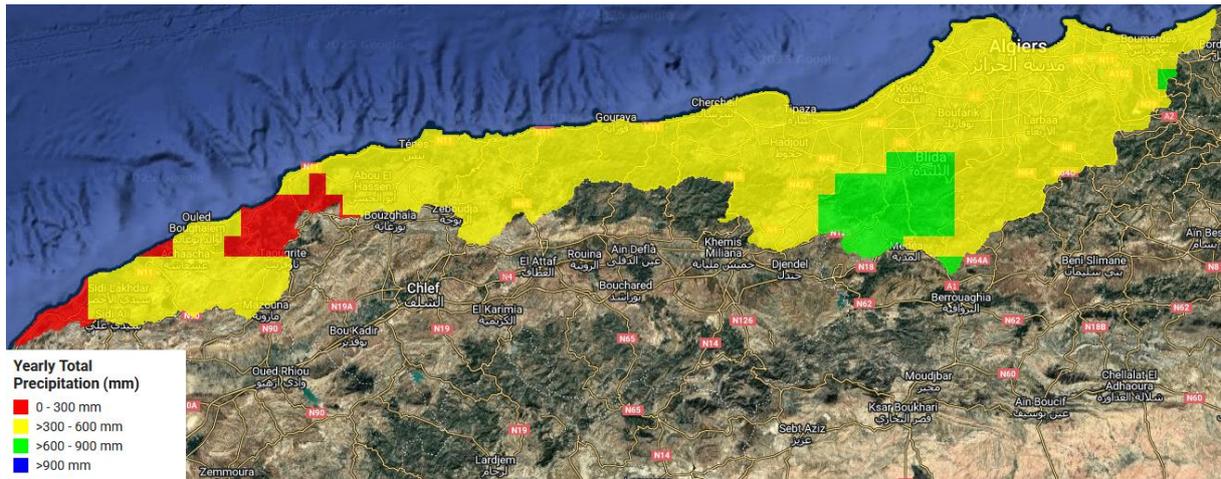
-2020-



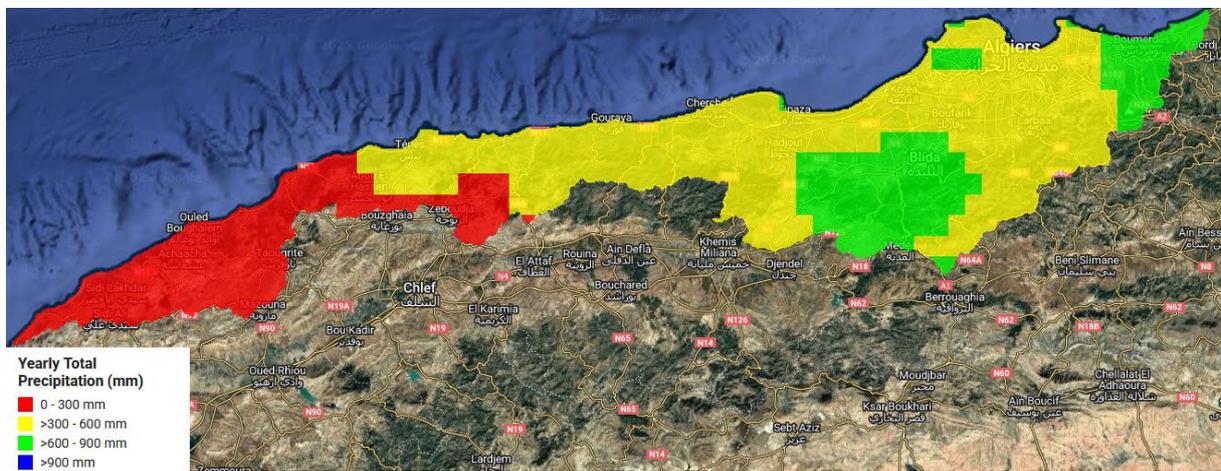
-2021-



-2022-



-2023-



Annexe –G-

Figure G1 : évolution mensuelle des précipitations.

