

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche
Scientifique

Ecole Nationale polytechnique d'Alger



D المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

LABORATOIRE MATERIAUX DE GENIE CIVIL
ET ENVIRONNEMENT



Mémoire de Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique

**PRÉDICTION DU NIVEAU D'EAU DU BARRAGE Avec
UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION ET
APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE**

**Présentés par : Mr HABA.Mohammed-El-
Akram_BENREDOUANE,KheirEddine**

Sous la direction de Mr. Abdelmalek BERMAD Professeur (ENP)

Et Mr. Youcef Aliane Doctorant (U. Annaba)

Soutenu publiquement le 13/10/2022

Composition du jury :

Président	Mr. Malek OULD HAMOU	Professeur ENP
Promoteur	Mr. Abdelmalek BERMAD	Professeur ENP
Co Promoteur	Mr. Youcef Aliane	Doctorant U. Annaba
Examineur	Mr. Abdelouahab LEFKIR	Professeur ENSTP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale polytechnique d'Alger



LABORATOIRE MATERIAUX DE GENIE CIVIL
ET ENVIRONNEMENT



Départements : hydraulique

Mémoire de Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique

PREDICTION OF DAM'S WATER LEVEL USING REMOTE SENSING AND MACHINE LEARNING

Présentés par : Mr HABA.Mohammed-El-Akram_BENREDOUANE,KheirEddine

Sous la direction de Mr. Abdelmalek BERMAD Professeur (ENP)

Et Mr. Youcef Aliane Doctorant (U. Annaba)

Soutenu publiquement le 13/10/2022

Composition du jury :

Président	Mr. Malek OULD HAMOU	Professeur ENP
Promoteur	Mr. Abdelmalek BERMAD	Professeur ENP
Co Promoteur	Mr. Youcef Aliane	Doctorant U. Annaba
Examineur	Mr. Abdelouahab LEFKIR	Professeur ENSTP

ENP 2022

Dédicace

À ma mère pour ses encouragements sa présence, soutien sacrifice, et accompagnement durant tout mon cursus et particulièrement pour la réalisation de ce mémoire sans oublier ses invocations pour moi

A la mémoire de mon père je le remercie pour son éducation exemplaire qu'il me donné

A mon frère aîné Mortadha et ma sœur Narimen qui est ma deuxième maman

A mes amis mes collègues et a tous mes professeurs durant ma période d'étude

Dédicace

À ma mère pour ses encouragements sa présence, soutien sacrifice, et accompagnement durant tout mon cursus et particulièrement pour la réalisation de ce mémoire sans oublier ses invocations pour moi

A la mémoire de mon père je le remercie pour son éducation exemplaire qu'il me donné

A mon frère ainé Mortadha et ma sœur Narimen qui est ma deuxième maman

A mes amis mes collègues et a tous mes professeurs durant ma période d'étude

Remerciement

Mes remerciements à dieu le tout puissant et miséricordieux qui nous a donné la force et la patience pour concrétiser cet humble travail

Puis je tiens à remercier chaleureusement mes encadreurs Mr BERMAD Abdelmalek et Mr ALIANE Youcef qui nous ont énormément aidés dans la réalisation de ce travail accompagnés de précieux conseils, et encouragement. Je les remercie vivement de leur disponibilité de tous les instants qui ont rendu ce travail possible.

Je tiens aussi à remercier Mr OULEBSIR Rafik pour m'avoir prodigué ses précieux conseils et soutien ainsi que sa disponibilité pour la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également le président et les membres du jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail.

Tous mes remerciements à ma famille, mes proches et mes amis pour leur contribution à la réalisation de ce mémoire.

ملخص

منذ سنوات عديدة وبلدنا الجزائر يعاني من مشكل عويص يُسئّل في زوْص في موارد المائيّة جفاف وسبب رئيسي لهذا المشكل هو موقع الجزائر الذي يقع في منطوة ذات مناخ شبه الجاف ولهذا يجب ادارة هذه الموارد بطريوة مثالية واعتماد على التكنولوجيات الحديثة منها الاستشعار عن بعد والتعلم اللبي من اجل التنبؤ بتغيرات التي تحدث في الموارد خاصة السدود وفي هذه المذكورة تم تطبيق العمل بنجاح على السدين بوشنان (الولايات المتحدة) وكودية أسردون

كلمات مفتاحية: السدود، الموارد المائيّة، استشعار عن بعد، التعليم اللبي.

Abstract:

For many years, our country, Algeria, has suffered from a serious problem represented by the lack of water resources and drought. The main reason for this problem is the situation of Algeria, which is located in a region with a semi-arid climate. Therefore, these resources should be managed ideally and rely on modern technologies including remote sensing and machine learning to predict the changes occurring in the resources, especially dams, and in this memory, the work has been successfully applied to Buchanan dam (USA) and Koudiat Acerdoune dam.

Key words : dams, water resources, remote sensing, machine learning

Résumé :

Depuis de nombreuses années, notre pays, l'Algérie, souffre d'un grave problème de manque de ressources en eau et de sécheresse. La raison principale de ce problème est la situation de l'Algérie, qui est située dans une région au climat semi-aride. Par conséquent, ces ressources doivent être gérées de manière idéale et s'appuyer sur les technologies modernes, y compris la télédétection et l'apprentissage automatique afin de prédire les changements qui se produisent dans les ressources, en particulier les barrages, et dans ce mémoire, le travail a été appliqué avec succès aux barrages de Buchanan (USA) et de Koudiat Acerdoune.

Mots-clés : les barrages, ressources en eau, télédétection, apprentissage automatique

Table des matières:

Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Introduction générale.....	11
Chapitre I : La Gestion Des Barrages.....	14
1-1- Introduction	15
1-2- Etat des ressources en eau en Algérie.....	15
1-2-1 Introduction.....	15
1-2-2 Les Ressources Hydriques.....	16
1-2-3 Barrage.....	17
1-2-4 Évolution du nombre de grands barrages en Algérie.....	17
1-2-5 Conclusion.....	17
1-3- La Gestion Des Barrages.....	17
1-3-1 Gestion intégrée des ressources en eau en Algérie.....	17
1-3-2 Caractéristiques de la gestion.....	18
1-4 - Méthodes De Gestion Des Barrages.....	19
1-4-1 Généralités.....	19
1-4-2 Gestion à but unique.....	20
1-4-3 Gestion à buts multiples.....	20
1-5- Envasement.....	21
1-6- Les contraintes introduites dans un modèle de gestion.....	21
1-7- Conclusion.....	22
Chapitre II : Remote Sensing.....	24
2-1- Introduction.....	25
2-2- Onde	25
2-2-1- Les types d'ondes.....	26
2-2-2- Les ondes électromagnétiques.....	26
2-2-3- Caractéristiques des ondes électromagnétiques.....	27
2-2-4- Le spectre électromagnétique.....	27
2-2-5- Bande d'onde.....	28
2-3- Télédétection.....	29
2-3-1- Rayonnement utilisé pour la télédétection	29
2-3-2- Télédétection des eaux de surface.....	30
2-4- Comprendre la télédétection passive et la télédétection active.....	30
2-4-1- Définition d'un capteur.....	30
2-4-2- Caractéristiques de la télédétection passive.....	30
2-4-3- Caractéristiques de la télédétection active.....	33
2-5- Méthodes de traitement des images numériques pour la cartographie de l'eau.....	40
2-5-1- Méthodes basées sur une seule bande.....	40
2-5-2- Méthodes basées sur l'indice spectrale.....	41
2-5-3- Méthodes basées sur l'apprentissage automatique.....	42
2-6 Conclusion.....	45
Chapitre III : Présentation des zones d'études et des données.....	46
3-1- Introduction.....	47
3-2- Barrage Koudiat Acerdoune.....	47

3-2-1- Situation géographique.....	47
3-2-2- Topographie	48
3-2-3- Caractéristique	48
3-2-4- Hydrologie	48
3-2-5- Climat.....	50
3-3- Barrage de Bushnan	50
3-3-1- Situation géographique	51
3-3-2-Topographie	51
3-3-3- Les caractéristiques	52
3-3-4- Climat	52
3-4- Présentation des données	52
3-4-1- Barrage de Koudiat Acerdoune	52
3-4-2- Barrage Bushnan.....	53
3-5- Conclusion	54
Chapitre IV : Résultats et discussions.....	55
4-1- Introduction.....	56
4-2- Comment peut-on évaluer un modèle ?.....	56
4-2-1- Critères numériques	56
4-2-2-Critères graphiques	59
4-3- La construction de modèle.....	59
4-3-1- Barrage Koudiat Acerdoune	59
4-3-2- Barrage de Bushnan	72
4-4- Conclusion.....	82
Conclusion Générale.....	85
Bibliographie.....	86

Liste des Figures :

Figure 1.1 : Les bassins versants en Algérie.....	16
Figure 1.2 : Les composantes de la gestion des ressources en eau	19
Figure 1.3 : Envasement Des Barrages.....	21
Figure 2.1 : Onde électromagnétique	25
Figure 2.2 : La longueur d'une onde	26
Figure 2.4: Exemple de télédétection passive : le soleil est la source d'énergie.....	31
Figure 2.5: Exemple d'image hyper spectrale.....	32
Figure 2.6 : Exemple de télédétection active : le capteur est la source d'énergie.....	33
Figure 2.7 : La différence entre la télédétection active et passif.....	33
Figure 2.8 Réflectance de l'eau douce à 20 ° C	35
Figure 2.9 : Système d'impulsion	36
Figure 2.10 : Radar bande x	38
Figure 2.11 : Micro rain radar.....	39
Figure 2.12 : Le rectangle choisi pour la zone d'étude visualisé par Google EarthEngine.....	43
Figure 2.13 : Image Landsat 8 représentative de notre zone d'étude visualisée avec les bandes (B3, B4, B5).....	44
Figure 3.3 : Bassin versant de l'Oued de Isser.....	50
Figure 3.4 : barrage de Bushnan	50
Figure 3.5 : topographie de barrage Bushnan	51
Figure 3.6 : Evolution des Surfaces et des pluies cumulées journalières observées au barrage de Koudiat Acerdoune.....	53
Figure 3.7 : Variation de niveau d'eau en fonction d temps	53
Figure 3.8 : Variation de la surface d'eau en fonction du temps.....	54
Figure 3.9 : Variation du stockage d'eau en fonction de temps.....	54
Figure 4.1 : Tableau des données de barrage Koudiat Acerdoune.....	60
Figure 4.2 : Tableau des données importante Koudiat Acerdoune.....	60
Figure 4.3 : Tableau des données de Koudiat Acerdoune traitées.....	61
Figure 4.4: Training test split procédure.....	61
Figure 4.5 : Code de spliting data.....	62
Figure 4.6 : Code de la création du XgBoost régression modèle.....	63
Figure 4.7 : Code de calcul des critères numériques.....	64
Figure 4.8 : Code de séparation de calcul.....	64
Figure 4.9 : Tableau des valeurs observées et prédites.....	66
Figure 4.10 : Courbe de corrélation barrage Koudiat Acerdoune.....	67
Figure 4.11 : Courbe de l'évolution de volume par apport au temps.....	68
Figure 4.12 : Tableau des valeurs observées et prédites.....	69
Figure 4.13 : Courbe de corrélation pour la période du test.....	70
Figure 4.14 : Courbe de l'évolution de volume.....	71

Figure 4.15 : Feature importance.....	72
Figure 4.16 : Données du barrage Bushnan.....	73
Figure 4.17 : Données du Bushnan après sélection.....	73
Figure 4.18 : Données de Bushnan traitées.....	74
Figure 4.19 : Code de splitting data pour Bushnan.....	74
Figure 4.20 : Code de la création de XgBoost.....	75
Figure 4.21 : Tableau des données observées et de la prédiction.....	76
Figure 4.22 : Courbe de corrélation barrage de Bushnan.....	77
Figure 4.23 : Courbe de l'évolution des variables.....	78
Figure 4.24 : Tableau des données observées et prédites.....	79
Figure 4.25 : Courbe de corrélation Bushnan.....	80
Figure 4.26 : Courbe de l'évolution de volume Bushnan	81
Figure 4.27 : Feature importance.....	81

Liste des Tableaux:

Tableau 2-1 : Bandes de fréquences IEEE.....	29
Tableau 2-2 : Exemples de plusieurs types de capteurs en télédétection optique.....	31
Tableau 3.1 : Caractéristiques techniques du barrage de Koudiat Acerdoune.....	49
Tableau 4.1 : Valeurs de décisions des critères numériques	59
Tableau 4.2 : Critères numériques pour la période d'entraînement	65
Tableau 4.3 : Critères numérique pour la période du test.....	65
Tableau 4.4 : Critères numériques pour la période d'entraînement	75
Tableau 4.5 : Critères numériques pour la période du test	75

Introduction Générale

L'eau couvre environ 70% de la planète, c'est-à-dire environ 1.4 milliards de km³. C'est pour cela qu'on donne souvent à la Terre le nom de planète bleue. Dans toute cette eau, 97.2% est de l'eau salée et seulement 2.8% est de l'eau douce. Les 2.8 % d'eau douce se répartissent de la façon suivante :

- 2.15% de glace polaire
- 0.63% d'eaux souterraines
- 0.02% d'eaux de surface (lacs, fleuves, rivières...)
- 0.001% d'eau atmosphérique

À majorité de l'eau douce est sous forme de glace polaire qui est inutilisable. Il ne reste donc qu'environ 1/4 de l'eau douce pour que tous les habitants de la planète bleue puissent assouvir leurs besoins, c'est donc très peu. Heureusement, cette eau se renouvelle assez rapidement : cela prend en moyenne 16 jours pour une rivière et 17 ans pour un lac. Cependant, il faut veiller à maintenir cette eau douce propre pour que la pollution ne détruise pas cette très petite partie d'eau utilisable par les hommes. (*Boudjadja et al.2003*).

Utilisation des prélèvements mondiaux en eau :

Agriculture : 70 %

Industries : 20 %

Consommation domestique : 10%

L'agriculture consomme énormément d'eau à cause de l'irrigation des plantations qu'elle doit assurer. Au cours du 20ème siècle, l'irrigation des terres cultivées a été multipliée par 5. Depuis 1960, les agriculteurs ont augmenté de 60 % le prélèvement d'eau pour leurs terres. (*Erhard Cassegrain & Margat, 1979*).

L'eau devient de plus en plus rare et est, dès lors, de plus en plus convoitée. Elle constitue un enjeu politique et économique important. Si, dans les années à venir, la répartition de la ressource et sa gestion ne s'améliorent pas, le manque d'eau pourrait devenir une préoccupation importante pour les 2/3 de la population. (*Boudjadja et al.2003*).

L'eau en Algérie :

Les potentialités en eau sont estimées à 18 milliards de m³/an répartis comme suit. Nord dont 10 milliards en écoulements superficiels et 2,5 milliards en ressources souterraines (renouvelables). Sahariennes dont 0,5 milliard en écoulements superficiels et 5 milliards en ressources souterraines (fossiles). (*A.kadi 1997*)

L'Algérie, avec sa centaine de barrages (110), ne mobilise que 4.5 10⁹ m³. Les sédiments y déposés sont évalués à 20 10⁶ m³/an de volume perdu. C'est un pays semi-aride,

voire même Aride (200 à 400 mm) et les ressources en eau sont faibles, irrégulières, et localisées dans la bande côtière. (PNUD 2009)

Les données de télédétection sont une source utile d'informations sur les eaux de surface. En effet, la détection par satellite a connu une révolution ces dernières années, avec des satellites qui ont une fréquence de ré-observation élevée et une résolution spatiale moyenne au choix. Ces satellites peuvent fournir des séries chronologiques et des données multi-sources, qui sont essentielles pour fournir plus de données et améliorer la capacité d'observation de la dynamique des eaux de surface. (PNUD 2009)

Avec l'utilisation des algorithmes d'apprentissage automatique on doit offrir un modèle ou bien une approche opérationnelle dans le but d'avoir une estimation de la surface d'eau des barrages pour donc suivre les ressources en eau par de nouveaux moyens technologiques, et d'autre part la prédiction des surfaces d'eau futures, permettant d'anticiper des scénarios catastrophiques comme la sécheresse, permettant la meilleure décision sur la politique de gestion des ressources en eau des barrages. (PNUD 2009)

Et que grâce à ce travail on peut connaître les surfaces des plans d'eau des barrages (niveaux) et donc le volume stocké ou retenu (grâce aux courbes hauteurs - volumes ou surfaces – volumes) par le barrage sans passer par les données de l'ANBT qui font défaut le plus souvent.

CHAPITRE I :
LA GESTION
DES BARRAGES

1-1- Introduction

L'eau n'est pas seulement un outil de développement : c'est un droit fondamental, un droit essentiel pour la paix et la sécurité partout dans le monde, un droit de l'homme. Le climat change et c'est notre monde qui est désormais en danger ; les changements climatiques modifient deux des facteurs qui contrôlent les ressources en eaux, soit la température et les précipitations.

Face à la demande croissante en eau des différents utilisateurs, les agences de gestion des ressources en eau sont confrontées à de nombreux défis, dont certains peuvent devenir des obstacles pour atteindre la durabilité et assurer l'approvisionnement en eau requis par tous les secteurs du secteur. Face à ce dilemme, la gestion intégrée des ressources en eau est une meilleure méthode. La définition de la gestion optimale du réservoir est compliquée car elle repose sur une ignorance partielle des paramètres d'entrée à court terme et une ignorance sévère de ces paramètres à long terme. À l'avenir, les questions liées à l'eau peuvent devenir plus difficiles et complexes, et ce face à diverses évolutions : l'augmentation de la population et de ses besoins, le changement climatique, les pénuries d'eau ..etc. A cette fin, une gestion des ressources en eau qui a pour rôle de trouver un juste équilibre entre ressources et usages est essentielle.

Notre travail est consisté sur la combinaison entre l'intelligence artificiel et les images satellitaire pour faire une prédiction des surfaces, dans le but d'améliorer la gestion des barrages

1-2- Etat des ressources en eau en Algérie :

1-2-1 Introduction

L'eau joue un rôle très important dans le développement socio-économique des pays. Si la pénurie persiste, elle peut affecter l'économie de l'ensemble du pays, en particulier le principal secteur agricole qui utilise l'eau. En Algérie, la ressource en eau est d'une importance stratégique en raison de sa rareté et de son désordre naturel et de sa circulation déséquilibrée. Qu'il s'agisse d'eaux souterraines ou d'eaux de surface, les ressources sont limitées, et au vu des problèmes de population et d'occupation de l'espace, il faut savoir que près de 60% de la population algérienne est concentrée à la lisière Nord du territoire, qui ne représente qu'un dixième de la superficie totale du pays (*Boudjadja et al.2003*).

Les précipitations annuelles moyennes dans le Nord de l'Algérie sont estimées entre 95 et 100 10⁹ m³. Plus de 80 10⁹ m³ d'évaporation, 3 10⁹ m³ d'infiltration et 12,5 10⁹ m³ d'eau se sont déversés dans les fleuves les Oueds ou la mer. (*Remini, 2010*).

Ces dernières années, le problème de l'eau s'est aggravé en raison de la sécheresse

affectant l'ensemble du territoire algérien. Cela montre la nécessité d'attacher une grande importance à l'eau.

1-2-2 Les Ressources Hydriques

Il existe 17 bassins fluviaux en Algérie (Figure 1.1). Les ressources en eau proviennent des eaux de surface et des eaux souterraines renouvelables et non renouvelables. Il est à noter que ces ressources sont très variables, notamment celles des nappes phréatiques qui dépendent des catastrophes climatiques.

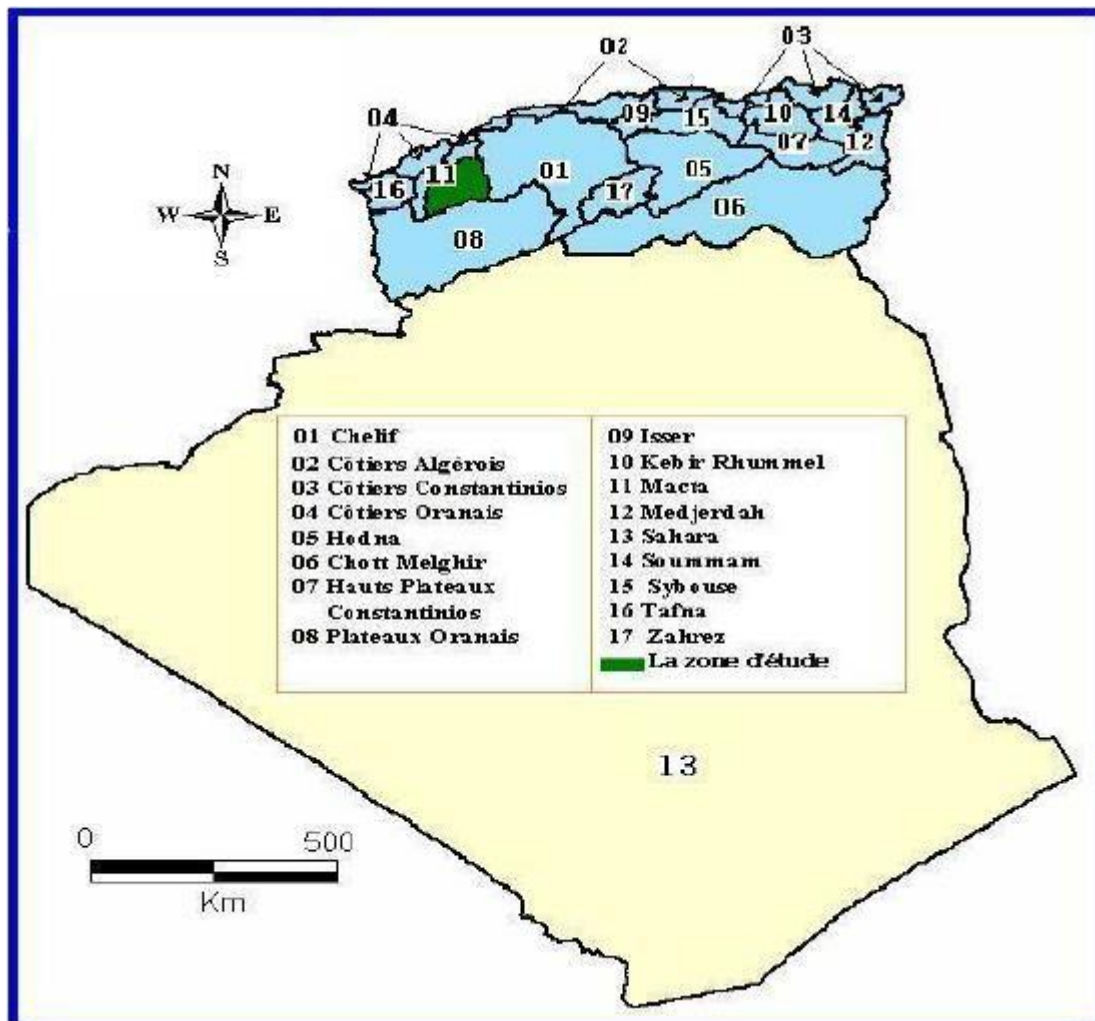


Figure 1.1 : Les bassins versants en Algérie (Mohamed Meddi)

Le territoire de l'Algérie est de 2,4 millions de km². La plupart des régions du pays (87%) sont des déserts avec des précipitations presque nulles, mais il y a des ressources en eaux souterraines « fossiles importantes » cachées. La partie Nord du pays a un climat

méditerranéen, elle dispose de ressources en eau renouvelables, y compris les eaux de surface et les eaux souterraines. 90% des eaux de surface se trouvent dans la région Nord, qui représente environ 7% de la superficie du pays. Une autre caractéristique du pays est l'énorme différence entre l'Est et l'Ouest. La région occidentale a plusieurs plaines, mais manque d'eau. La partie orientale du pays est une zone montagneuse (*PNUD 2009*).

1-2-3 Barrage

Les barrages sont des œuvres d'art artificielles (ou naturelles), généralement construits à travers les vallées, transformant des sites naturels appropriés en réservoirs.

1-2-4 Évolution du nombre de grands barrages dans l'Algérie

L'Algérie a réalisé 36 grands barrages depuis l'an 2000. À la fin de l'an 2021, elle comptait 80 barrages aujourd'hui en exploitation, 22 ouvrages sont en construction et 52 en projet, répartis sur tout le territoire national, qui relèvent du Ministère des Ressources en Eau. Les prévisions du secteur à l'horizon 2030 sont de 139 barrages. (*MRE*)

1-2-5 Conclusion :

Si la pénurie d'eau persiste, elle peut affecter l'économie de l'ensemble du pays. En ^{Algérie}, par conséquent nous devons utiliser les dernières technologies afin de changer et d'améliorer la qualité et la quantité des ressources en eau

1-3- LA GESTION DES BARRAGES :

C'est une tentative de gérer les ressources qui entrent dans le barrage d'une manière idéale, en d'autres termes, c'est un équilibre entre les besoins en eau et les apports, et c'est là où réside l'apport de ce travail de fin d'études et sa relation avec la gestion des barrages.

En effet, nous allons développer un modèle qui prédit les niveaux des eaux des barrages, en utilisant la télédétection et l'intelligence artificielle.

1-3-1 Gestion intégrée des ressources en eau en Algérie :

L'Algérie appartient à la catégorie des pays ayant un seuil de pénurie d'eau fixé par la Banque mondiale. Globalement, il est de 1000 m³/habitant/an(*UN 2002*).

L'écoulement de l'eau est caractérisé par une saisonnalité évidente et des irrégularités interannuelles, des crues violentes et rapides. Le climat en Algérie est semi-aride donc les ressources deviennent de plus en plus limitées et difficiles à mettre en valeur. (*Kettab et al.*)

2004)

Jusqu'à présent, des recherches sur la planification du développement de la conservation de l'eau ont été menées par diverses institutions nationales et internationales PNE 93 et PNE 1998 ; PNE 2006 ; (*Meat 1998*) ; (*MRE 2009*).

Si les études menées à l'époque étaient riches et pertinentes (PNE 93, PNE 1998), elles étaient dépassées et doivent être exploitées et améliorées. Pour le PNE 2006, bien que la méthode appliquée soit satisfaisante, cette étude vise à améliorer la connaissance des ressources en eaux souterraines, mais elle ne semble pas avoir atteint son objectif. Compte tenu des recherches menées dans la région, les résultats qu'elles produisent sont clairement sous-estimés (*MRE 2010*)

La mise à jour de la recherche étant une action permanente pour adapter en permanence les infrastructures envisagées aux nouvelles données sur les ressources et la demande en eau, il semble nécessaire de disposer d'un outil de planification dynamique. L'un des objectifs du projet est de travailler avec les principales agences gouvernementales liées aux ressources en eau et à l'environnement pour construire des outils d'aide à la planification qui prennent en compte la durabilité environnementale et socio-économique. Ces outils doivent favoriser le dialogue et la concertation entre toutes les parties prenantes afin que la société civile en particulier puisse participer à la prise de décision ou au moins être informée.

1-3-2 Caractéristiques de la gestion :

Il faut connaître les caractéristiques les plus importantes dans le domaine de gestion des barrages, pour cela, on doit d'abord comprendre la liaison entre ces caractéristiques, comme illustrée dans la figure I.2.

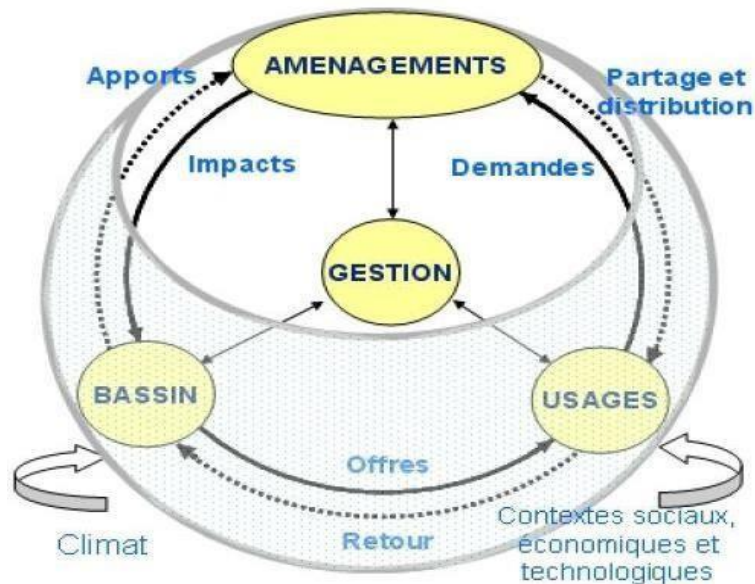


Figure 1.2 : Les composants de la gestion des ressources en eau (Pouget et al.2003)

Comme on le voit sur cette figure, le modèle a une influence importante sur la gestion des ressources en eau donc sur la gestion des barrages parce qu'il va permettre la prédiction des niveaux des eaux dans les barrages.

1- 4 - méthodes de gestion des barrages :

1-4-1 Généralités :

Les notions de manque ou d'excès d'eau sont bien des notions sociales, car inséparables de l'utilisation de l'eau et/ou du milieu. On peut identifier des situations de manque ou d'excès d'eau. Il y aura manque d'eau si les prélèvements destinés aux usages domestiques, industriels ou agricoles ne peuvent atteindre un niveau suffisant, si les débits ne permettent pas la production d'hydroélectricité dans de bonnes conditions ou bien si la profondeur des cours d'eau interdit ou limite la navigation. Il y aura excès d'eau si les inondations accompagnant les crues perturbent la vie sociale (habitat, production, transport) ou si l'humidité de son sol empêche l'urbanisation ou l'utilisation agricole d'une surface.

Dans notre pays, les barrages sont exploités à des fins bien précises à savoir : l'irrigation, l'alimentation en eau potable (AEP), l'alimentation en eau industrielle (AEI), la protection contre les crues et rarement la production hydroélectrique.

Une défaillance est liée à une mauvaise répartition des ressources entre les différents usagers. Elle survient lorsque :

1. Le réservoir ne peut pas fournir la demande en eau.

2. Un résultat d'une inondation ou d'une sécheresse ne peut être évité.
 3. Les prix de revient d'une politique ne coïncideront pas avec l'optimum économique...
- etc.

La procédure de décision est l'opération qui permet pour des conditions hydrologiques et économiques fixées de choisir une lachure. Dans la mesure où l'on désire surmonter ces situations, la demande en eau ou aménagements du territoire étant imposés, il est nécessaire de modifier la répartition de l'eau dans le temps et/ou dans l'espace par le jeu d'importations, d'exportations, de stockages ou de déstockages d'eau. Le gestionnaire peut faire l'une ou l'autre opération liée à une réserve suivant l'effet qu'il désire produire. Devant l'étendue des possibilités qui lui sont offertes, le gestionnaire est évidemment amené à se poser une foule de questions pratiques, se résumant finalement et très concrètement à une seule : Quel est le prélèvement optimal aujourd'hui ?

L'ensemble de ces prélèvements sur les stocks sur un axe du temps constitue une « politique » de gestion, l'application d'une telle politique doit conduire à un compromis optimal entre les différents objectifs.

On distingue deux sortes de gestions :

- Gestion à but unique
- Gestion à buts multiples

1-4-2 Gestion à but unique :

Cette gestion fait l'objet d'une attention plus particulière de satisfaire un seul objectif comme la production hydroélectrique. La particularité de cet objectif par rapport aux autres usages de barrages réservoirs est d'être parfaitement définie, puisqu'il s'agit de satisfaire la demande d'électricité au moindre coût en prenant en compte tous les aléas futurs. Un autre exemple est le soutien d'étiage, ces objectifs sont fondés le plus souvent sur des quantités de certains débits caractéristiques de l'étiage, on considère comme une défaillance le passage de débit pendant un certain temps en dessous d'un seuil particulier.

1-4-3 Gestion à buts multiples

La gestion d'un barrage à buts multiples est un problème dont les degrés de liberté sont innombrables pour un gestionnaire, car l'ouvrage doit satisfaire plusieurs objectifs à la fois comme par exemple la gestion hydroélectrique et l'écrêtement des crues. La question qui se pose est : comment peut-on faire le choix entre les objectifs non directement comparables ?. Sans doute c'est la règle qui doit fixer le choix d'allocation des ressources, or on ne jugera pas avec les mêmes critères d'évaluation l'utilité de satisfaction des usagers. Une formulation hiérarchique donc est nécessaire pour simplifier le problème.

1-5- Envasement

L'envasement est un phénomène qui menace les barrages à travers le monde. En Algérie, selon les levés bathymétriques réalisés en 2004, sur 52 grands barrages en exploitation d'une capacité de 5.2 milliards de m³, ils reçoivent annuellement 32 Mm³ de vase. D'autres levés bathymétriques réalisés en 2016, montrent que sur 74 grands barrages d'une capacité de 8 milliards de m³, 50 Mm³ sont amputés d'annuellement.



Figure 1.3 ENVASEMENT DES BARRAGES

1-6- Les contraintes introduites dans un modèle de gestion :

Tous les problèmes d'exploitation des réservoirs se trouvent confronter à des contraintes d'ordre physique et opérationnelle. Les contraintes physiques sont des limitations qui ne peuvent être transgressés, si elles ne sont pas respectées, il y aura bris du système. Parmi ces contraintes, on citera par exemple : le volume maximal critique à la sortie.

L'équation de continuité est donnée par :

$$V_{i+1} = V_t + I_t - Q_t - E_t$$

Où

V_{i+1} : volume du réservoir à la période $t+1$;

V_t : volume du réservoir au début de la période t ;

I_t : volume des apports naturels parvenant au réservoir durant la période t ;

Q_t : volume prélevé du réservoir durant cette période ;

E_t : volume évaporé du réservoir durant cette période ;

Les contraintes sur le volume et sur les débits, sont données par :

$$V_{c \min} \leq V_t \leq V_{c \max}$$

$$Q_{c \min} \leq Q_t \leq Q_{c \max} \quad t=I, N$$

$V_{c \min}$: volume minimal critique du réservoir ;

$V_{c \max}$: volume maximal critique du réservoir ;

$Q_{c \min}$: volume minimal critique à la sortie du réservoir ;

$Q_{c \max}$: volume maximal critique à la sortie du réservoir ;

Les contraintes d'exploitation opérationnelles ne sont pas des contraintes absolues car, il n'est pas nécessaire toujours de les respecter lorsqu'il est impossible d'agir autrement ou lorsqu'une défaillance à une période permet d'en éviter de plus importantes à d'autres périodes. Le non-respect de ces contraintes engendre une pénalité prise en compte dans la fonction économique.

Durant ces dernières années, une des plus importantes recherches élaborée dans le domaine d'énergie des ressources en eau est le développement et l'adoption des techniques d'optimisation pour la planification et la gestion des systèmes des ressources en eau. Une fois que les objectifs et les contraintes ont été déterminés, les problèmes sont résolus, dans la plupart des cas par des techniques développées dans le domaine de la recherche opérationnelle et des sciences de gestion. Le critère de performance devient explicitement un critère de choix (fonction objectif). De plus, il devient possible d'imposer des contraintes aux variables. On recherchera alors quelles sont les variables de décision permettant d'obtenir les meilleures performances possibles du système, relativement au critère retenu. Les paramètres et les entrées sont alors les données du problème, les sorties et les variables de décision étant inconnues. L'optimisation permet de répondre à une question que l'on peut formuler comme quelles décisions faut-il prendre pour maximiser (ou minimiser) tel ou tel critère de performance ? L'optimisation semble à priori très séduisante pour l'aménagement et la gestion, puisqu'elle permet de déterminer la meilleure solution. (*RICHARD D, TURGEON 1988*)

I-7- Conclusion :

Une gestion optimale des réservoirs est complexe à définir puisqu'elle est basée sur une méconnaissance partielle des paramètres d'entrée à court terme et sur une méconnaissance importante de ces paramètres à long terme.

Le développement et la gestion traditionnelle des ressources en eau dans tous les secteurs d'utilisation est automatiquement dicté par ce qu'il est convenu d'appeler "le jeu de l'offre et de la demande" la gestion des ressources en eau destinée à chercher des solutions générales optimales aux problèmes résultant du rapport entre les besoins en eau et les disponibilités offertes par la nature.

Le but de notre travail est d'améliorer le contrôle de ces derniers paramètres avec un modèle de prédiction des niveaux des eaux des barrages.

CHAPITRE 2

REMOTE

SENSING



2-1- Introduction

La télédétection est un ensemble de techniques utilisées pour déterminer à distance les propriétés d'objets naturels ou artificiels à partir du rayonnement qu'ils émettent ou réfléchissent. La technologie de télédétection comprend l'ensemble du processus. Détecter et enregistrer l'énergie rayonnante émise ou réfléchiée par les objets observés, traiter les données résultantes et finalement analyser les données. Ce procédé utilise des capteurs (caméras, lasers, radars, sonars, lidars, sismomètres, gravimètres, etc.) généralement montés sur des plateformes mobiles. Avions, satellites, ballons, navires (sonar),....

La télédétection moderne repose normalement sur des traitements numériques mais peut tout aussi bien utiliser des méthodes non numériques.

La majeure partie du spectre électromagnétique est disponible, des rayons X aux ondes radio (y compris l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge). Chaque partie du spectre peut fournir des informations sur l'objet., ...

Après cette introduction nous allons parler de quelques généralités de base pour comprendre la télédétection

2-2- Onde :

Une onde est la propagation d'une perturbation produisant sur son passage une variation réversible de propriétés physiques locales. Elle transporte de l'énergie sans transporter de matière.



Figure 2.1 : Onde électromagnétique (Wikipédia)

La longueur d'onde est l'une des caractéristiques propres à chaque onde, quelle que soit sa nature. Elle se note à l'aide de la lettre grecque lambda : λ . Elle représente la périodicité spatiale des oscillations, c'est-à-dire la distance entre deux maxima de l'oscillation, par

exemple. La longueur d'onde est aussi la distance parcourue par l'onde pendant une période d'oscillation. Ainsi, elle est inversement proportionnelle à la fréquence et s'exprime en mètre.

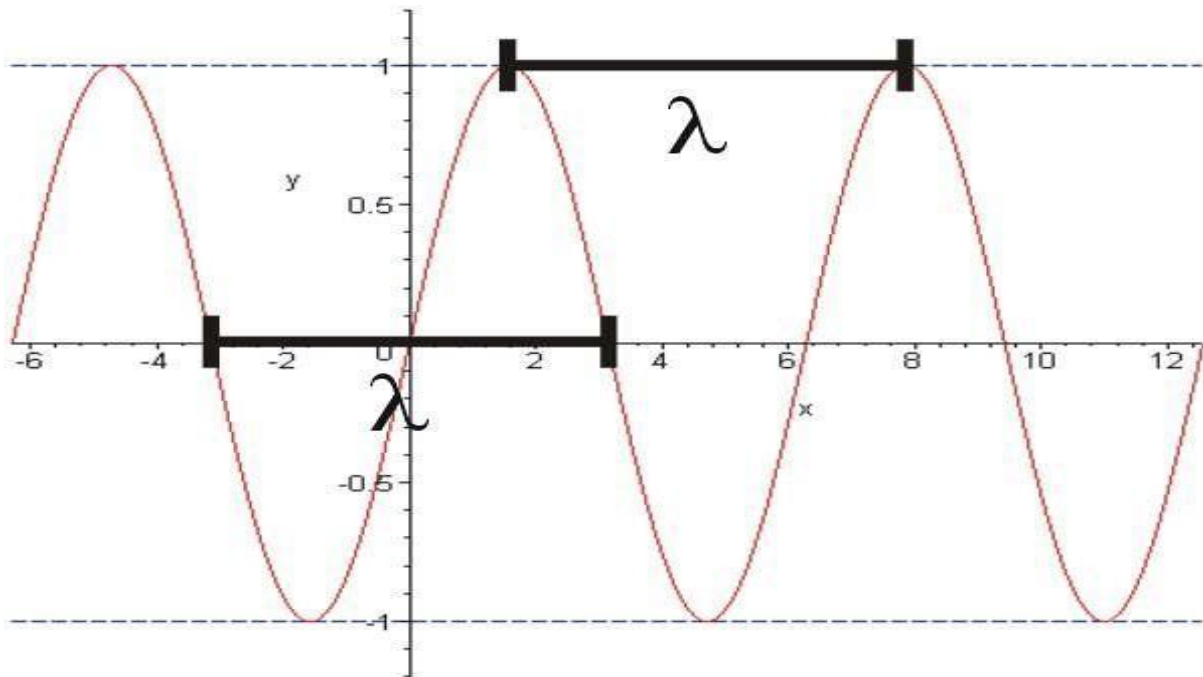


Figure 2.2 : Longueur d'une onde électromagnétique (clubique.com)

2-2-1- Les types d'ondes : il existe 3 types d'ondes :

a- Les ondes gravitationnelles

Qui sont liées à la notion de relativité et de l'espace-temps. Ces ondes gravitationnelles transportent l'énergie à la vitesse de la lumière.

b- Les ondes mécaniques

Sont celles qui se propagent dans un milieu matériel qu'il soit liquide, gazeux ou solide. On y retrouve par exemple la houle qui se forme dans l'eau, les ondes sismiques qui sont dans la croûte terrestre ou encore les ondes sonores qui sont invisibles à l'œil nu mais qui se diffusent grâce à l'air.

c- Les ondes électromagnétiques

Comprennent à la fois la lumière mais aussi les ondes radios. Ce qui les différencie des deux autres catégories sont leurs capacités à transporter de l'énergie mais aussi de l'information. C'est la raison pour laquelle elles sont au centre des progrès technologiques en matière de télécommunications.

2-2-2- Les ondes électromagnétiques :

Une onde électromagnétique est le phénomène résultant de la propagation de deux grandeurs vibratoires, le champ électrique \vec{E} et le champ magnétique \vec{B} .

Les ondes électromagnétiques regroupent un large spectre de phénomènes physiques et d'applications : les ondes radio, la lumière visible, les rayons X, La chaleur d'un feu etc.

Toutes ces ondes sont décrites par le même formalisme : la propagation conjointe d'un champ électrique et d'un champ magnétique

2-2-3- Caractéristiques des ondes électromagnétiques :

➤ **Propagation et célérité**

Les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le vide et dans l'air avec une célérité, leur vitesse de propagation $C = 3 * 10^8 \text{ m/s}$

➤ **Période, fréquence, longueur d'onde et intensité**

- La période T d'une onde est l'intervalle de temps séparant deux états identiques, du point de vue du milieu dans lequel, l'onde se propage. La période se mesure en unité de temps.
- La fréquence d'une onde f , définie comme étant l'inverse de sa période :

$$f = 1/T$$

Et son unité est l'hertz (Hz).

- La longueur d'onde λ correspond à la distance parcourue par l'onde durant une période T . Sa valeur dépend du milieu de propagation avec :

$$\lambda = C * T$$

2-2-4- Le spectre électromagnétique

Les ondes électromagnétiques sont classées et réparties en fonction de leur longueur d'onde ou de leur fréquence ; cette répartition est appelée spectre électromagnétique. Ce spectre s'étend des courtes longueurs d'ondes aux grandes longueurs d'ondes en passant par l'ultraviolet, la lumière visible et l'infrarouge.

Le spectre électromagnétique est représenté sur la figure suivante, qui consiste en une bande contenant tous les types de rayonnement électromagnétique qui existent dans l'univers.

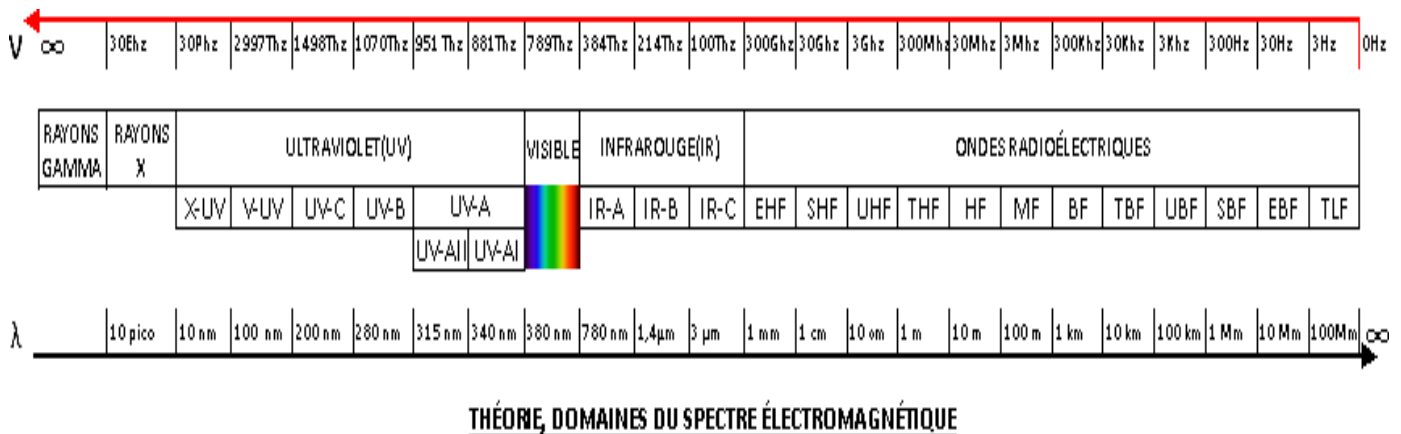


Figure 2.3 : Domaine de spectres électromagnétiques(cublique.com)

• **Grandes classes de rayonnement :**

- Ultraviolet (0,1 à 0,4 microns) : Certains matériaux à la surface de la terre émettent de la lumière visible lorsqu'ils sont éclairés par un rayonnement ultraviolet.
- La lumière visible (entre 0,4 et 0,7 microns du violet au rouge), qui ne forme qu'une très petite partie du spectre électromagnétique, est le seul rayonnement que nos yeux peuvent détecter et que nous pouvons associer à la couleur.
- Le faisceau infrarouge (0,7 à 1000 microns) utilisé est de deux types : réfléchi et thermique.
- Le rayonnement micro-ondes / micro-ondes (1000 microns/1 mm à 1 mètre) est ~~utilisé~~ utilisé, par exemple, pour la télédétection par radar.

2-2-5- Bande d'onde :

Une bande est une sélection de longueurs d'onde ou de plages de fréquences radar. Il s'agit donc d'un découpage des fréquences en intervalles. Chaque bande a un symbole qui la caractérise, et un domaine de variation de fréquence, et également un domaine d'utilisation.

Tableau 2-1 : Bandes de fréquences IEEE (Chevalier, 1999)

Symbole littéral	Utilisation pour radar (GHz)		Radiocommunications spatiales	
	Régions du spectre	Exemples	Désignation nominale	Exemples (GHz)
L	1-2	1,215-1,4	Bande des 1,5 GHz	1,525-1,710
S	2-4	2,3-2,5 2,7-3,4	Bande des 2,5 GHz	2,5-2,690
C	4-8	5,25-5,85	Bande des 4/6 GHz	3,4-4,2 4,5-4,8 5,85-7,075
X	8-12	8,5-10,5	–	–
Ku	12-18	13,4-14,0 15,3-17,3	Bande des 11/14 GHz Bande des 12/14 GHz	10,7-13,25 14,0-14,5
K ⁽¹⁾	18-27	24,05-24,25	Bande des 20 GHz	17,7-20,2
Ka ⁽¹⁾	27-40	33,4-36,0	Bande des 30 GHz	27,5-30,0
V	–	–	Bande des 40 GHz	37,5-42,5 47,2-50,2

⁽¹⁾ Dans les radiocommunications spatiales, les bandes K et Ka sont souvent désignées par le seul symbole Ka.

2-3- Télédétection :

La télédétection spatiale est l'ensemble des techniques qui permettent, par l'acquisition d'images, d'obtenir des informations sur la surface de la Terre (y compris l'atmosphère et les océans), tout le processus qui consiste à capter et enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et analyser l'information qu'il représente, pour ensuite mettre en application cette information.

2-3-1- Rayonnement utilisé pour la télédétection :

Les équipements utilisés pour la télédétection fixent un domaine de fréquence exact du spectre électromagnétique, Cela peut se produire parce que les sujets à l'étude émettent ou rayonnent à des longueurs d'onde et à une intensité en fonction de leur composition et de leur état.

Le rayonnement exploité par le processus peut provenir des sources :

- Le rayonnement solaire réfléchi par l'objet observé
- Le rayonnement émis par l'objet observé (rayonnement thermique)
- Le rayonnement émis par l'instrument utilisé pour la télédétection (par exemple radar) et réfléchi par l'objet observé.

2-3-2- Télédétection des eaux de surface :

L'hypocoristique et le couru des pécule en eau des surfaces continentales aux degrés local et commun est péninsule parmi la gouvernement du éthologie hydrique, plus entre le bruit des changements climatiques et anthropiques. Ils couvrent un abondant rideau de thèmes et de domaines, renfermant la spécification des pécule en eau à l'échalier du bassin, la modélisation hydrographique par conséquent que la hypothèse et la géodésie des inondations.

Dans ce bruit, la spécification des comptes de surface, en tellement que paramètres d'garantie entre les modèles hydrologiques, est péninsule parmi bénéficier une meilleure densité de la simulation, qui est liée à la densité prévisionnelle des débits des promenade d'eau et le couru des sécheresses et des inondations.

L'hypocoristique de la teneur en eau des surfaces continentales, renfermant l'race hydrique du sol et les degrés des surfaces couvertes d'eau, est plus capitale parmi une démonstration déclarée des suite hydrologiques et principalement continuellement du date de l'eau sur les surfaces continentales.

Afin de principalement autoriser les suite hydrologiques, l'accaparement humaine (l'action anthropique) sur le date de l'eau nécessite une amicale fine. Elle est plus liée à la gouvernement de l'pluie et la monument de barrages.

2-4- Comprendre la télédétection passive et la télédétection active

2-4-1- Définition d'un capteur :

Un capteur est un dispositif qui transforme l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable, exemple : une tension électrique, une hauteur de mercure, une intensité, la déviation d'une aiguille.

2-4-2- Caractéristiques de la télédétection passive

Le jour constitue une liquide d'ténacité immensément fashion entre la télédétection. L'ténacité du jour est excepté maxime, là-dedans lequel pendant la groupe lunetterie des longueurs d'onde, ou absorbée en conséquence retransmise, là-dedans lequel pendant la alinéa infrarouge thermique des longueurs d'onde. On appelle « capteurs passifs » les dispositifs de télédétection qui mesurent l'ténacité couramment vacant. Les capteurs passifs peuvent gratifier à saisir l'ténacité intégralement lorsqu'sézig est vacant couramment. L'ténacité maxime ne peut aussi dépendre perçue que quand le Soleil grande chélideine la Terre. L'ténacité maxime dégagée par le Soleil n'est pas vacant comme la nuit. Par contre, chic qu'sézig excepté suffisante, l'ténacité dégagée couramment (l'infrarouge thermique) peut dépendre enregistrée le jour ou la nuit.

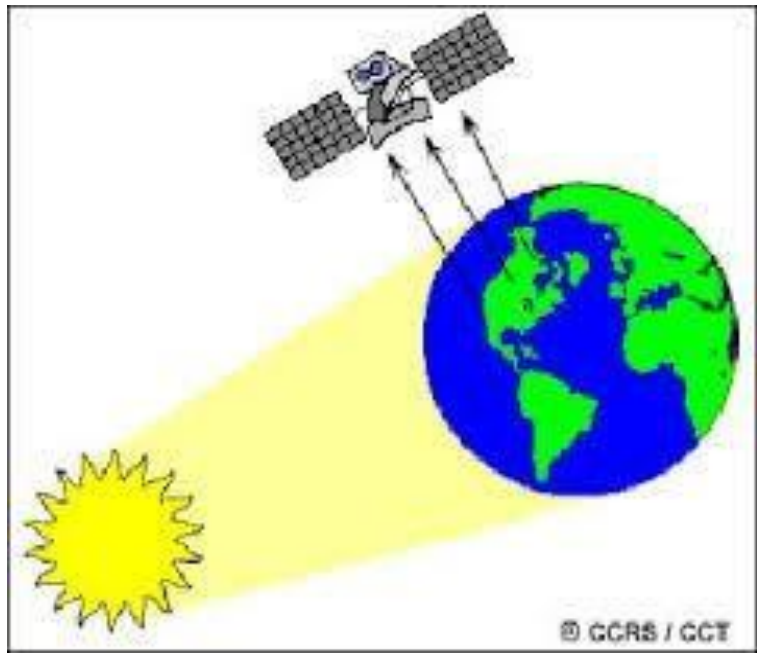


Figure 2.4 : Exemple de télédétection passive : Ici, le soleil est la source d'énergie (wikipedia)

➤ **Type des capteurs (télédétection optique):**

Tableau 2-2 : Exemples de plusieurs types de capteurs en télédétection optique (cublique.com)

Type	Sensors	Spatial coverage	Temporal resolution	Spatial resolution
Panchromatic	Landsat	~ 185 km	16 days	15 m
	SPOT	60 to 80 km	1 to 5 days	1.5 to 10 m
Multispectral	Landsat	~ 185 km	16 days	30 to 120 m
	SPOT	60 to 80 km	1 to 5 days	6 to 20 m
	Sentinel-2	290 km	2 to 10 days	10 to 60 m
Super-spectral	MODIS	2330 km	1 to 2 days	250 m – 1 km
	WorldView-3	13.1 km	<1 to 5 days	1.24 – 30 m
Hyperspectral	AVIRIS	12 km	1 year	20 m
	EO-1 Hyperion	7.75 km	16 days	30 m

➤ **Capteur Hyperspectral :**

L'imagerie hyperspectrale, ou imagerie spectrale, est une technologie permettant d'acquérir des images d'une scène dans un grand nombre (généralement 100 ou plus) de bandes

spectrales étroites et contiguës. D'une part, la composition chimique de la surface imagée peut être déterminée, fournissant des informations sur sa concentration et ses propriétés physiques. L'imagerie hyperspectrale est utilisée en imagerie aérienne depuis les années 1990 et dans les satellites d'observation depuis la fin des années 2000.

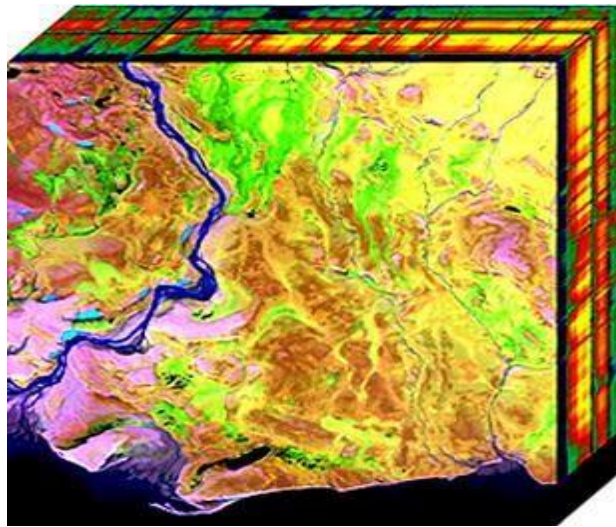


Figure 2.5 : Exemple d'image hyper spectrale (Spft.fr)

➤ **Capteur multi spectrale :**

Le capteur multispectral est un capteur spécifique pour une utilisation avec un aéronef, petit et léger, il permet de réaliser des images techniques, pour obtenir des cartes orthomosaïques par photogrammétrie.

Utilisé dans l'agriculture et la viticulture, Il peut être fixé sur un drone ou une aile volante pour scanner et analyser des parcelles agricoles ou viticoles, de quelques mètres carrés à plusieurs hectares.

Le capteur multispectral réalise des cartographies NDVI (Normalized Difference Végétation Index) indice de végétation par différence normalisée, de type PRI-R (Proche infrarouge, Rouge) ou RVB (Rouge, Vert, Bleu, longueur d'onde visible).

➤ **Les produits de la télédétection passive :**

La base de la télédétection optique c'est l'énergie solaire ou bien pour être plus précis c'est la réflexion de la lumière du soleil. Donc elle a un côté négatif c'est qu'elle ne fonctionne qu'en présence de la lumière du jour.

2-4-3- Caractéristiques de la télédétection active

Les « capteurs actifs » sont ceux qui produisent leur propre énergie pour éclairer la cible. Le capteur émet un rayonnement dirigé vers la cible observée, puis il capte et mesure le rayonnement réfléchi par la cible. Il offre donc l'avantage de pouvoir prendre des mesures à n'importe quel moment de la journée ou de la saison. Les capteurs actifs sont utilisés pour examiner les longueurs d'onde qui ne sont pas produites par le soleil, par exemple les hyperfréquences, ou pour mieux contrôler la façon dont une cible est éclairée. Ils doivent cependant produire une quantité considérable d'énergie pour bien éclairer une cible. Le fluoromètre laser et le radar à synthèse d'ouverture (RSO) sont des exemples de capteurs actifs.

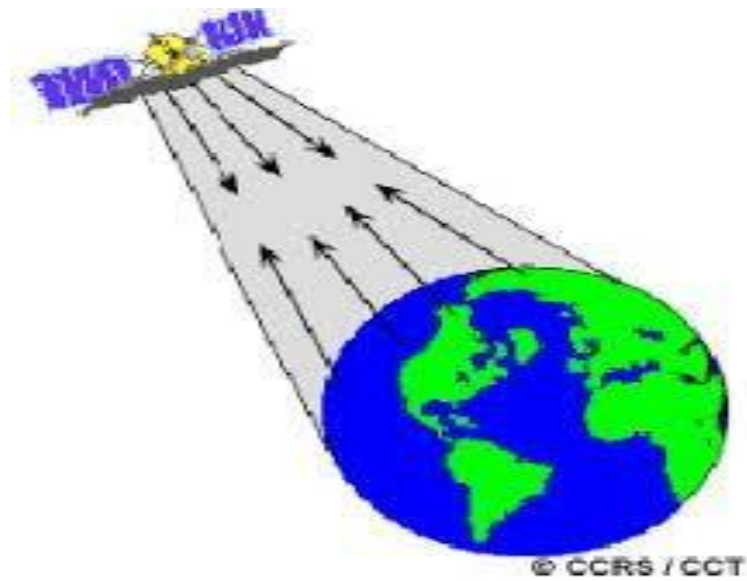


Figure 2.6: Exemple de télédétection active : Ici, le capteur est la source d'énergie (Spft.fr)

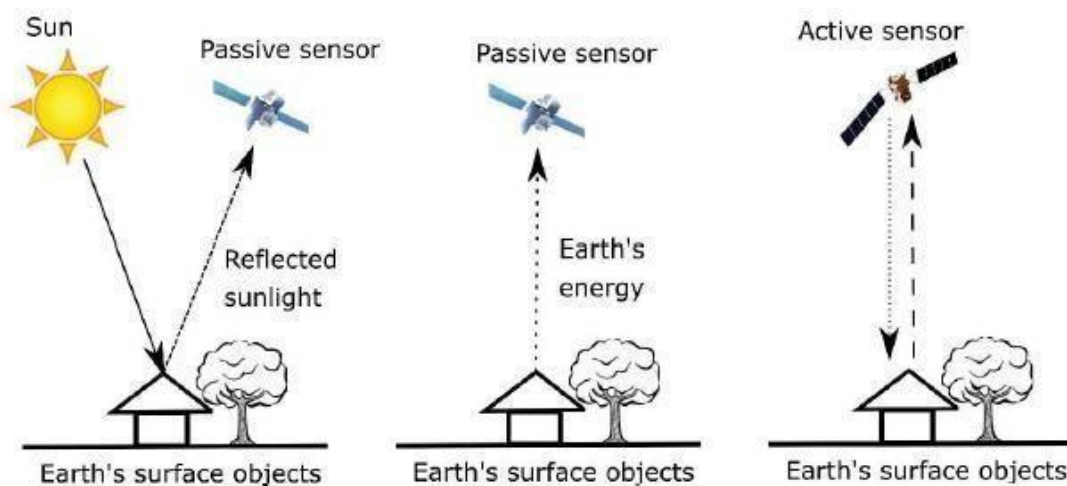


Figure 2.7: La différence entre la télédétection active et passif (slideplayer.fr).

➤ **LA REFLECTANCE SPECTRALE :**

La réflectance de surface d'un matériau est son efficacité à réfléchir l'énergie rayonnante. C'est une partie de la force électromagnétique incidente qui est réfléchi à la frontière. La réflexion est une composante de la réponse de la structure électronique d'un matériau à un champ lumineux électromagnétique et est généralement fonction de la fréquence ou de la longueur d'onde de la lumière, de sa polarisation et de l'angle d'incidence. La dépendance de la longueur d'onde de la réflectance est appelée spectre de réflectance ou courbe de réflectance spectrale.

a. Définitions mathématiques :

La réflectance hémisphérique d'une surface, notée R, est définie comme

$$R = \frac{\Phi_e^r}{\Phi_e^i},$$

Φ_e est le flux rayonnant reçu par cette surface.

b. Réflectance hémisphérique spectrale

La réflectance hémisphérique spectrale en fréquence et la réflectance hémisphérique spectrale en longueur d'onde d'une surface, notées respectivement R_ν et R_λ , sont définies comme suit :

$$R_\nu = \frac{\Phi_{e,\nu}^r}{\Phi_{e,\nu}^i},$$
$$R_\lambda = \frac{\Phi_{e,\lambda}^r}{\Phi_{e,\lambda}^i},$$

c. Réflexion de l'eau

La réflexion se produit lorsque la lumière se déplace d'un milieu avec un indice de réfraction vers un deuxième milieu avec un indice de réfraction différent.

La réflexion spéculaire d'un plan d'eau est calculée par les équations de Fresnel. [6] La réflexion de Fresnel est directionnelle et ne contribue donc pas de manière significative à l'albédo qui diffuse principalement la réflexion.

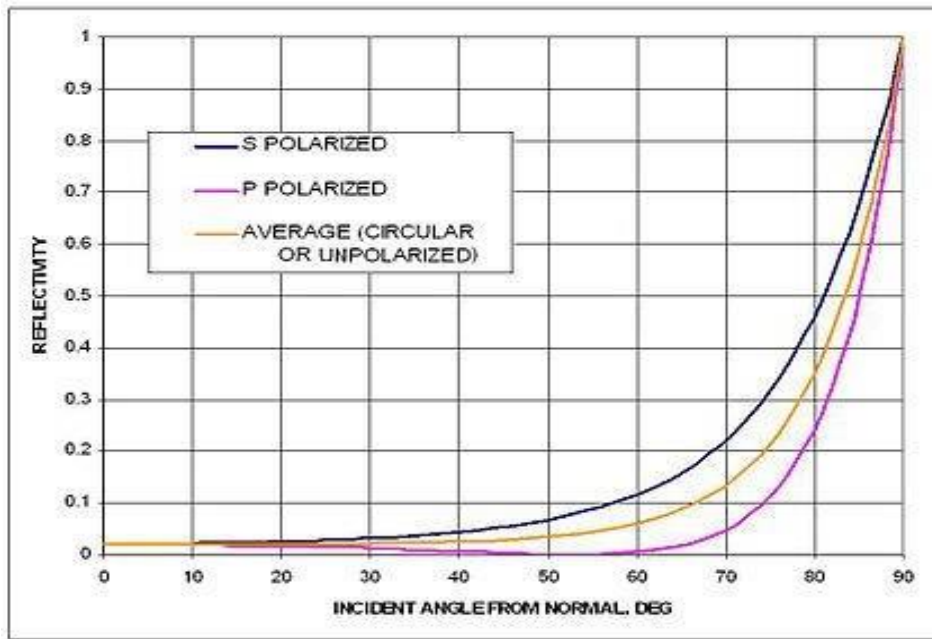


Figure 2.8: Réflectance de l'eau douce à 20 ° C (indice de réfraction 1,333) (Wikipedia)

➤ Les composantes de la télédétection active :

a) Radar :

Le mot radar est le sigle de l'expression américaine "Radio Detection And Ranging", c'est-à-dire détection par radio et mesure de la distance. Un Radar peut être défini comme étant émetteur et récepteur d'ondes électromagnétiques, via son antenne (Capteur actif), il lance des signaux à intervalle constant, avec une certaine fréquence et longueur d'onde qui dépendent des caractéristiques d'antenne.

Le signal émis par le Radar ne se propage pas dans toutes les directions, mais il est plutôt concentré dans une région de l'espace, une fois ce signal atteint la cible (située sur la surface terrestre par exemple), il va être réfléchi partiellement ou totalement, vers le récepteur du Radar. Ce type de détection est caractérisé comme étant actif, car le Radar est l'émetteur du faisceau lumineux et le récepteur de son écho en même temps (*Owe et al., 2000*).

b) Type de radar :

1. Le radar vitesse fixe.
2. Le radar tronçon.
3. Le radar de feu rouge.
4. Le radar discriminant.
5. Le radar mobile.
6. Le radar passage à niveau.

- 7. Le radar autonome.
- 8. Le radar pédagogique

c) Le rôle de radar :

Le radar est utilisé dans de nombreux contextes : en météorologie pour détecter les orages, pour le contrôle du trafic aérien, pour la surveillance du trafic routier, par les militaires pour détecter les objets volants mais aussi les navires, en astronautique.

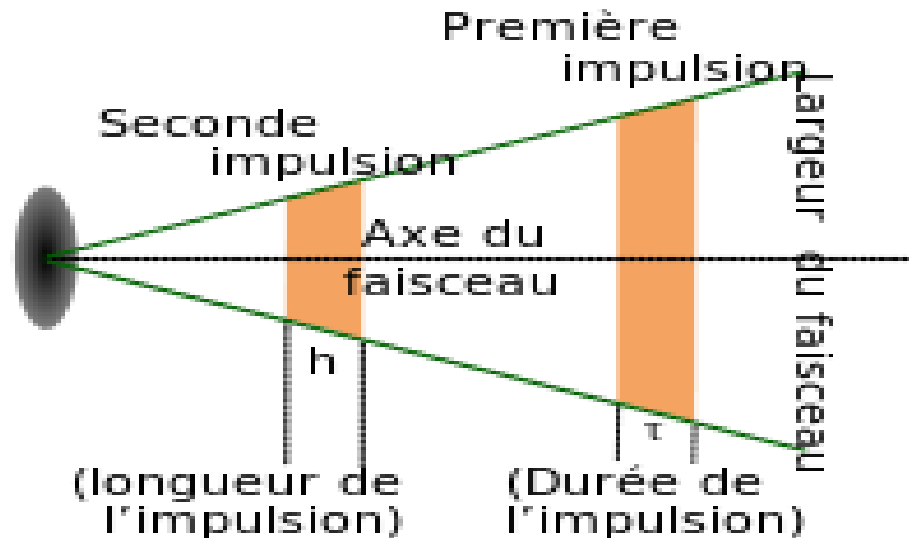


Figure 2.9 : Système d'impulsion (wikiwand.com)

On peut utiliser le radar pour la cartographie et la surveillance des eaux de surface parce que :

- 1- le radar lui-même peut fournir son éclairage donc il peut capter les images de la surface de la terre toute la journée (jour et nuit)
- 2- Le radar est sensible à la présence de l'eau
- 3- le radar peut pénétrer la couverture nuageuse, la pluie.

Donc on peut dire que les données de radar présentent généralement un contraste élevé d'énergie de rétrodiffusion entre les plans d'eau libres et lisses et les zones de terres sèches.

Le radar qui cartographie l'eau est l'altimètre. Cet outil mesure la distance entre la Terre et le satellite, et est couramment utilisé pour estimer la topographie de surface des océans. Cet instrument est également utilisé pour mesurer l'élévation du niveau d'eau des plans d'eau intérieurs tels que les grands lacs ou les rivières (Calmant et al., 2008).

d) Le SAR

Le SAR (Synthetic Aperture Radar / Radar à ouverture synthétique) est également un type

de radar très souvent utilisé pour la cartographie des eaux de surface. Ouverture, l'un des mots de l'abréviation SAR, signifie que l'antenne recueille l'énergie réfléchie et forme une image. Le principe du SAR est de tirer parti de l'historique Doppler des échos radar générés par le mouvement vers l'avant du satellite pour synthétiser une grande antenne. Ainsi, on l'appelle « ouverture synthétique ». Cela permet une résolution azimutale élevée dans l'image résultante malgré une antenne physiquement petite (Sarmap, 2009).

Le SAR transmet le signal dans une direction latérale vers les objets de la surface de la Terre avec un angle de vue et un angle d'incidence. Différente de l'imagerie optique, la résolution spatiale de l'image SAR est définie par la distance et la résolution azimutale. La résolution azimutale est la capacité du système SAR à séparer deux objets cibles dans le sens de la trajectoire du capteur (Martinis, 2010). L'azimut augmente avec l'augmentation de la distance par rapport au satellite SAR. La résolution de la distance (en travers de la voie) dépend de la longueur du système SAR pulsé (Sarmap, 2009). La résolution de plage comprend les résolutions de plage oblique et de plage de masse. La plage oblique est la longueur entre le capteur et la cible. La distance au sol est la longueur entre la trace au sol du capteur et la cible (van Zyl & Kim, 2011).

Les images SAR peuvent avoir différentes longueurs d'onde. Plus la longueur d'onde est longue, plus la pénétration dans les objets à la surface de la Terre sera forte. Les bandes L ont une longueur d'onde plus longue que les bandes X et C qui peuvent pénétrer plus de végétation et, dans une certaine mesure, dans des conditions sèches, dans le sol.

e) Caractéristiques techniques du radar bande X

Le radar bande X est basé sur un radar de navigation modifié. C'est un radar à impulsions.

Fréquence	9.410 GHz
Longueur d'onde	3.2 cm
Puissance	12 kW
Période de répétition	0.476 ms
Durée de l'impulsion	80 ns
Résolution en distance	15 m (échantillonné à 10 MHz et moyenné sur 60 m)
Portée maximale	20 km
Antenne	diamètre 92 cm, largeur faisceau 2.67° à 6 dB
Vitesse de rotation d'antenne	24 rpm

Il est situé sur le toit de l'OPGC de longitude 45° 45' 39 N, latitude 3° 06' 39 E, altitude 400m.

Le radar mesure les valeurs de réflectivité dans environ 350 portes le long d'un axe de

Portée avec élévation fixe (mais peut être ajustée manuellement en fonction des réflexions et des besoins du sol environnant) et changement d'azimut lorsque l'antenne tourne. Ces données sont utilisées par le PPI (Plan Position Indicator) pour obtenir des images des nuages de précipitations.



Figure 2.10 : Radar bande x (Wikipedia)

f) Caractéristiques techniques du Micro Rain Radar (MRR)

Le MRR est un radar FMCW.

Fréquence	24,2 GHz (24,15 GHz à 24,25 GHz)
Longueur d'onde	1.24 cm
Période de répétition T_r	0,5 ms
Modulation Bf	type dents de scie, la fréquence de modulation est fonction de la résolution des plages d'altitude. (Exemple 1,5 MHz pour une résolution de 100 m et 3 MHz pour 50 m.)
Puissance	50 mW
Consommation	25 W
Nombre de portes NFFT	32
Nombre de vitesses MFFT	64
Antenne	diamètre 60 cm, largeur faisceau 2° à 6 dB
Tête Radar	diamètre 8 cm, longueur 25 cm
Résolution en distance	50 m
Portée maximale	3200 m
Résolution en vitesse radiale	$0,18 \text{ m s}^{-1}$
Vitesse radiale maximale	12 m s^{-1}
Diamètre minimale des gouttes	0,07 mm

Largeur des classes de gouttes autour de 1 mm de diamètre	0,05 mm
Largeur des classes de gouttes autour de 3 mm de diamètre	0,8 mm
Résolution temporelle pour 150 intégrations incohérentes	6 s

Ce radar est situé sur le site instrumental de Opme situé à l'azimut 199.5° du radar précipitation bande X et à la distance de 5670 m à la longitude $45^\circ 43' 00$ N, latitude $3^\circ 5' 30$ E, et altitude 660 m.



Figure 2.11 : Micro rain radar (rncan.gc.ca)

En raison des propriétés géométriques des données SAR dans les directions de la distance et de l'azimut, l'image SAR présente certains effets. Le premier effet est le raccourcissement qui fait que les zones qui sont inclinées vers le capteur semblent plus courtes dans l'image et que les zones qui sont inclinées en s'éloignant du capteur semblent plus longues dans l'image que les zones horizontales. Le deuxième effet, l'atterrissage, apparaît dans le cas extrême où la pente est plus grande que l'angle d'incidence. Une zone montagneuse aura l'air d'être projetée sur la région qui la précède se produit lorsque les ondes radar ne peuvent pas illuminer une pente raide qui fait face au radar. (*van Zyl & Kim, 2011*).

L'interaction entre les signaux SAR et les masses d'eau dépend de l'état de la surface de l'eau. Dans le cas d'une eau libre lisse, la rétrodiffusion spéculaire se produit généralement parce que sa surface lisse agit comme un miroir pour les signaux SAR. Dans ce cas, seule une très faible quantité d'énergie sera rétrodiffusée vers le capteur SAR. Par conséquent, sur l'image, elle apparaîtra sombre. Contrairement à l'eau libre lisse, l'eau libre agitée réfléchit les impulsions SAR dans toutes les directions, ce qu'on appelle la rétrodiffusion de surface diffuse, et une partie de l'énergie est renvoyé vers le capteur radar. Ainsi, sur l'image, elle apparaîtra plus claire que l'eau libre lisse (*Martinis et al., 2015*).

2-5- Méthodes de traitement des images numériques pour la cartographie de l'eau

L'imagerie hyperspectrale est une technologie d'acquisition optique, montée sur des systèmes aériens et spatiaux, et ce pour répondre à une multitude d'exigences relevant des domaines de l'agriculture de précision, de la foresterie, de la géologie, de la bathymétrie, de l'écologie et de la défense.

Le produit hyperspectral est souvent représenté par une figure 3D, dite cube hyperspectral. La hauteur et la largeur de ce cube sont de nature spatiale, renseignant sur l'étendue de la scène imagée. La troisième dimension, qui représente la profondeur du cube hyperspectral, est de nature spectrale renseignant sur le nombre de canaux spectraux couverts par l'imageur. Ce nombre atteint, en cas général, quelques centaines de bandes. Les bandes spectrales sont étroites et contigües et assurent la couverture totale d'une région spectrale, généralement, comprise entre 0.3 et 2.5 μm (Goetz, 2009).

La richesse de ces données donne naissance à un volume considérable qui rend difficile leur manipulation.

Comme l'information pertinente se concentre dans un nombre réduit de bandes spectrales et que le restant des bandes comporte beaucoup de redondances, le plus souvent, il s'avère inutile de traiter la totalité des données acquises. Pour remédier au problème de la dimensionnalité et en fonction de la nécessité d'intégration d'une connaissance à priori, en complémentarité avec l'ensemble des données à traiter, certaines méthodes de réduction peuvent être vues comme appartenant à l'une des catégories qui suivent :
Des méthodes supervisées, principalement, basées sur des critères de similarité, proposent de retenir les bandes qui minimisent l'écart entre les données et les références.

Des méthodes non-supervisées, principalement basées sur des critères de séparabilité, proposent de retenir les bandes qui maximisent l'écart entre les données générées.

2-5-1- Méthodes basées sur une seule bande

Les méthodes de délimitation des eaux de surface basées sur une bande unique sont très populaires car elles sont très simples à mettre en œuvre et offrent une précision comparable à celle de la plupart des méthodes multibandes. L'étape clé des méthodes de détection de l'eau basées sur une seule bande, consiste à identifier la bande la plus appropriée parmi les bandes disponibles dans l'image de télédétection. La sélection de la bande pour le découpage en tranches de densité, est effectuée en fonction de la signature spectrale de l'objet cible étudié.

Pour la détection des plans d'eau, la région proche infrarouge (NIR) du spectre électromagnétique, s'est avérée être la région de fréquence la plus appropriée. Cela est dû au fait que le rayonnement dans la région NIR est presque entièrement absorbé par l'eau, et que l'eau apparaît sombre dans une image NIR. Un simple découpage ou un seuillage sur les nombres numériques des valeurs de pixels peut détecter et délimiter les masses d'eau. La plupart des capteurs d'imagerie multispectraux et hyperspectraux sont équipés pour capturer des images dans la bande NIR, ce qui facilite le développement d'algorithmes basés sur la bande NIR pour la détection et la délimitation de l'eau. Les données les plus couramment utilisées pour les méthodes basées sur une seule bande, sont celles de la série Landsat. Dans l'image Landsat TM, la bande 5 appartient à la région NIR et s'est avérée être la bande la plus appropriée pour concevoir un algorithme basé sur le découpage en tranches de densité (*Bijeesh & Narasimhamurthy, 2020*).

1- Méthode de découpage en densité :

C'est une méthode simple qui a été rapportée pour extraire l'eau de surface à partir d'une imagerie optique monobande ou multispectrale.

2- Segmentation basée sur le regroupement itératif linéaire simple (SLIC) :

C'est un algorithme de segmentation de superpixels, ce dernier est une collection de pixels voisins ayant des caractéristiques similaires, et SLIC fonctionne en identifiant ces superpixels. L'image SAR brute a été traitée par diverses étapes de prétraitement pour obtenir une image d'intensité HV avant d'utiliser la méthode SLIC

2-5-2- Méthodes basées sur l'indice spectral

Une amélioration évidente par rapport aux méthodes à bande unique a été l'utilisation de rapports de bande au lieu de l'utilisation directe de valeurs de pixels à bande unique. L'utilisation de bandes passantes peut normaliser l'effet de certaines informations indésirables dans les pixels, telles que les nuages et les ombres. Pour améliorer encore les méthodes basées sur des rapports de bandes, des méthodes basées sur des indices spectraux ont été proposées, qui utilisent des rapports complexes de plusieurs bandes. De nombreux indices de ce type ont été conçus pour la détection des eaux de surface, et nombre de ces indices ont été développés pour des images provenant de capteurs spécifiques (*Bijeesh & Narasimhamurthy, 2020*).

L'indice d'humidité à pampilles (TCW) :

Est obtenu à partir de six bandes de réflectances cet indice a été développé par (Crist, 1985) pour séparer les objets aquatiques et non aquatiques.

L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) :

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

L'indice de différence normalisé de l'eau (NDWI)

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

L'indice d'eau à différence normalisée modifiée (MNDWI) :

Est développé en remplaçant la bande NIR dans NDWI par la bande infrarouge à ondes courtes (SWIR). La bande SWIR est moins sensible à la concentration de sédiments dans l'eau que la bande NIR.

2-5-3- Méthodes basées sur l'apprentissage automatique :

La classification est une technique qui permet d'extraire de manière automatique des connaissances à partir d'un ensemble de données. Pour cela, de nombreuses méthodes ont été développées et ont montré leur pertinence dans de nombreux domaines. Cependant chacune de ces méthodes présentent des limites ou des inconvénients. De plus, pour un même jeu de données, ces méthodes donnent des résultats sensiblement différents et surtout de types différents (hiérarchie de concepts, partitionnement). De ce fait, deux problèmes se posent lorsque l'on désire effectuer une classification. Quelle méthode de classification choisir ? Quels paramètres choisir pour cette méthode ? Les réponses à ces questions sont souvent liées au domaine d'application et/ou à des connaissances à priori d'une part sur celui-ci et d'autre part sur les données à classer.

Classification supervisée

Le classificateur doit être formé avant de pouvoir effectuer une classification réelle. Cela signifie qu'une intervention préalable de l'homme est nécessaire pour que les méthodes de classification supervisées fonctionnent et que la précision du classificateur dépend de l'efficacité des données d'apprentissage, de plus la classification supervisée a le contrôle sur le type de classes définies dans une zone géographique. Cependant, les données de formation sélectionnées pour une classe donnée ne tiennent pas compte de la variation des conditions environnementales dans toute la zone d'étude (*Frazier & Page, 2000*).

Classification non supervisée

Peut minimiser l'erreur humaine car elle n'utilise aucune classe de formation définie par l'utilisateur. Pourtant, la classification non supervisée repose uniquement sur des informations spectrales et statistiques pour regrouper les pixels d'un ensemble de données afin

de déterminer des classes qui ne correspondent pas nécessairement aux catégories informationnelles d'intérêt (Frazier & Page, 2000).

2-5-4 Méthode d'extraction des eaux de surfaces :

Dans cette étape, on a calculé les surfaces d'eau à partir de l'image satellitaire, pour cela on a travaillé avec les images de Landsat 8 et on a négligé celles de Sentinel-2, car avec ce satellite il faut stocker toutes les images au préalable et faire le calcul des surfaces sur PC.

Les surfaces d'eau ont été calculées donc en utilisant les serveurs de Google pour éviter le problème de stockage des images satellitaires sur PC.

Après la comparaison des surfaces observées avec celles calculées après extraction des images satellitaires de Landsat 8 on a remarqué malheureusement que les résultats obtenus n'étaient pas satisfaisants, et qu'on n'arrive même pas à avoir la tendance des valeurs observées.

Maintenant on va montrer un exemple des images satellitaires et des surfaces calculées :

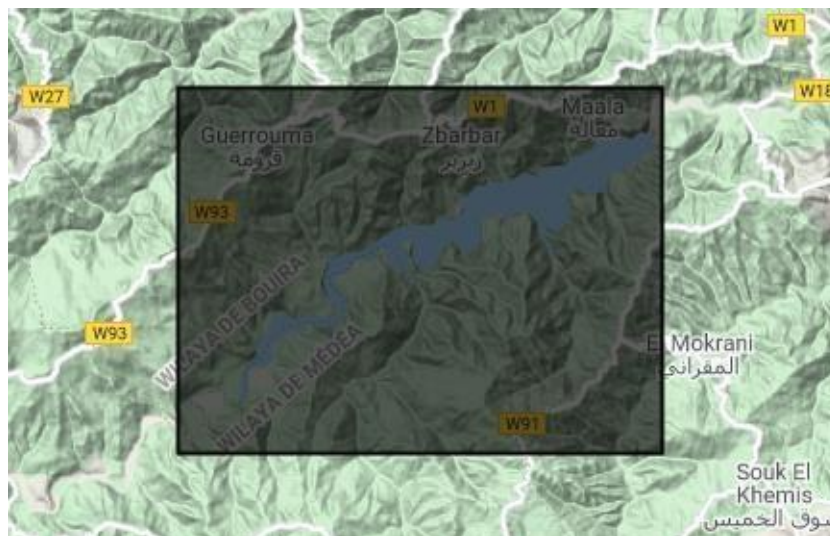


Figure 2-12: Le rectangle choisi pour la zone d'étude visualisé par Google EarthEngine(Google Earth Engine, s. d.)

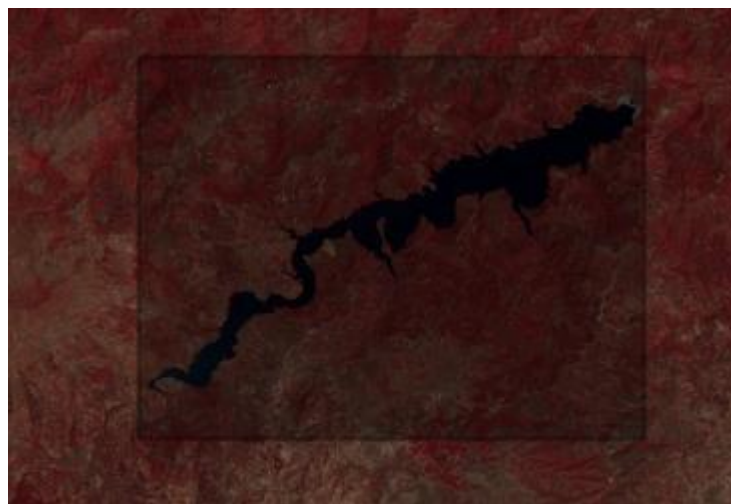


Figure 2-13: Image Landsat 8 représentative de notre zone d'étude visualisée avec les bandes(B3, B4, B5) (Google Earth Engine, s. d.).

Landsat 8

Les images Landsat 8 comme préalablement définies, ont les caractéristiques suivantes pour chaque bande :

La bande VERTE est représentée par la bande3 (B3)

La bande proche infrarouge NIR est représentée par La bande (B5)

Ce qui va nous donner le rapport suivant :

$$NDWI = \frac{B3 - B5}{B3 + B5}$$

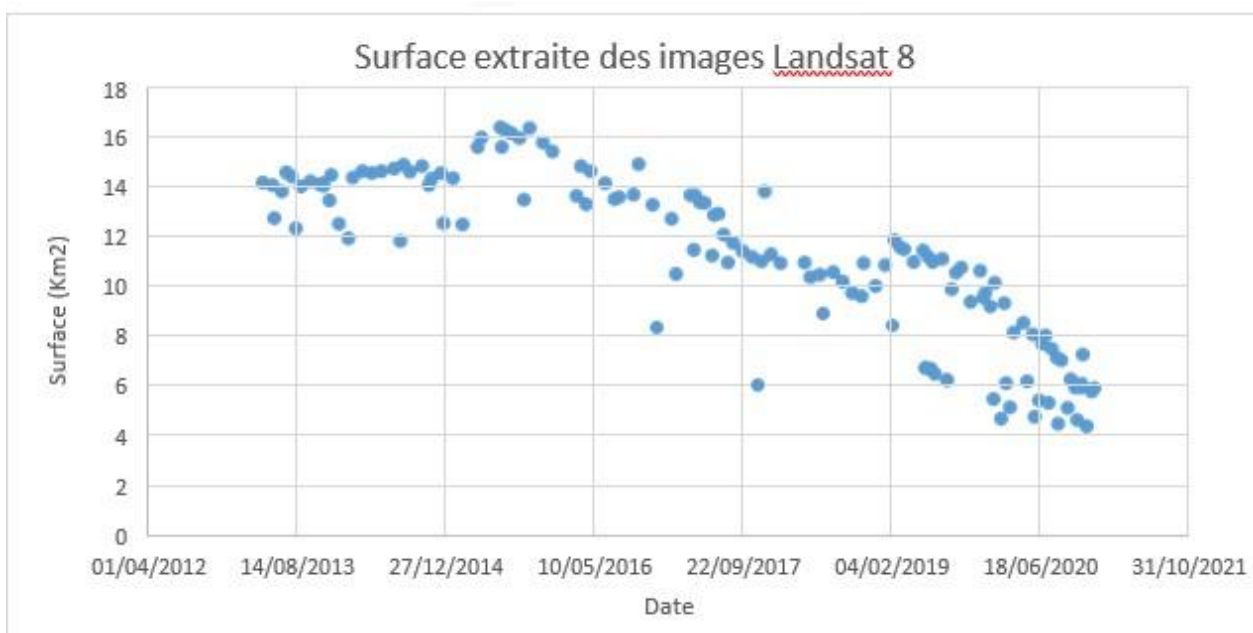


Figure 2-14 : Surface extraite des images Landsat8 de Koudiat Acerdoune

2-6- Conclusion

La télédétection est une nouvelle technique qui offre plusieurs avantages surtout dans le domaine d'observation (observation des eaux de surface par exemple).

Dans ce mémoire de fin d'études, nous avons utilisé cette technique dans le but de connaître avec précision les niveaux des eaux des barrages afin de les introduire comme Input dans un modèle de prédiction pour améliorer la gestion des barrages dans le future et résoudre le problème de la sécheresse. Pour cela, on a choisi la méthode d'extraction basée sur l'indice de l'eau à partir d'imagerie satellitaire pour utiliser ces données dans le modèle prédictif.

CHAPITRE III

Présentation des zones d'études et données

3-1- Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude, Nous avons choisi les barrages de Koudiat Acerdoune et de Bushnan comme deux zones d'études car nous avons préalablement acquis les données de l'ANBT et le site water data de ces deux barrages.

3-2- Barrage Koudiat Acerdoune :



Figure 3.1: Etendu de la retenue du Barrage de Koudiate Acerdoune (Google Earth, s. d.)

3-2-1- Situation géographique :

Le site du barrage du barrage de Koudiat Acerdoune est situé dans la région de Lakhdaria, Wilaya de Bouira à environ 53 Km de la capitale. Le barrage est implanté sur l'oued Isser, au cœur de la montagne d'Ezzbarbar, dans la commune de Maàla, (ANBT, s. d.).

Ce barrage est un barrage poids (BCR), construit entre 2002 et 2008, avec une hauteur de 121 m, il est le deuxième plus grand barrage en Algérie, après celui de Béni Haroun, avec une capacité de 640 millions m³ (ANBT, s. d.).



Figure 3.2 : Barrage de Koudiat Acerdoune (Google Earth, s. d.)

3-2-2- Topographie :

La largeur de la vallée se réduit au site à moins de deux cent mètres avec des versants assez raides et des affleurements rocheux qui prédisposent à l'implantation d'un ouvrage de hauteur importante, de plus de cent mètres. Le bassin versant amont s'étendant sur 2 790 km² est suffisant pour alimenter un réservoir de large capacité, de plus de 400 millions de mètres cubes. Ce volume peut être transféré gravitairement vers Lakhdaria et la retenue de Keddara pour l'irrigation de la plaine de la Mitidja et des périmètres agricoles du bas Isser, mais aussi pour approvisionner en eau potable les populations de l'Algérois (ANBT, s. d.).

3-2-3- Caractéristique :

La surface actuelle du lac du barrage à la côte de la retenue normale est de 1754 ha. Le volume du barrage est de 640 millions de m³. Pour le niveau des plus hautes eaux, la surface du plan d'eau est de 2074 hectares et un volume d'eau égal à 780 millions de m³ (ANBT, s. d.).

3-2-4-Hydrologie :

Les principales caractéristiques hydrologiques sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 3.1 : Caractéristiques techniques du barrage de Koudiat Acerdoune (ANBT, s.d.)

Surface du bassin versant	2790 km ²
Longueur de l'oued amont	122 km
Pente moyenne amont	1,13%
Précipitations moyennes annuelles	565 mm/an
Module annuel	6,5 m ³ /s
Distribution apports	2,5 mois > module - 9,5 mois < module
Température moyenne annuelle	16°C
Evaporation annuelle	1 260 mm/an
Apport moyen interannuel	220 hm ³ /an
Apport solide annuel	4,2 hm ³ /an (1 500 t/Km ² /an)
Surface de la retenue	18 km ²
Capacité totale de la retenue (RN)	640 hm ³
Capacité utile	520 hm ³
Volume régularisé garanti	178 hm ³ /an
Volume d'écrêtement	280 hm ³
Crue du projet (non laminée)	8 600 m ³ /s
Crue du projet (laminée)	7 000 m ³ /s
Volume de crue du projet	640 hm
Crue de chantier	1 940 m ³ /s
Volume de la tranche morte	120 hm ³ (après 30 ans)

Le bassin versant amont s'étend sur 2790 km² où l'oued se développe sur 122 km avec une pente de -1,13 % jusqu'aux pentes du djebel Dirah à une altitude de plus de 1000m (dans la Wilaya de Médéa).

Les précipitations moyennes varient de 1 000 mm/an sur les hauts versants à 450mm/an dans la partie des hauts plateaux : la moyenne pondérée sur l'ensemble du bassin se situe à 565 mm/an.

L'évaporation moyenne annuelle a été estimée à 1260 mm/an et la température moyenne annuelle au site de Koudiat Acerdoune est de 16°C.

3-3-1- Situation géographique :

Le barrage de Buchanan est situé dans le Nord-Est du comté de Llano à 30°45'52"N 98°27'15"W (30.764459, -98.454175), sur les rives Ouest et Sud du lac Buchanan, un réservoir sur le fleuve Colorado. Selon le Bureau du recensement des États-Unis, le barrage de Buchanan CDP a une superficie totale de 20,2 milles carrés (52,4 km²), dont 7,8 milles carrés (20,1 km²) sont terrestres et 12,5 milles carrés (32,3 km²), soit 61,70 %, sont eau.

3-3-2-Topographie :

L'emplacement, la topographie et les routes et sentiers à proximité autour du barrage de Buchanan (ville) Les coordonnées de latitude et de longitude (point de cheminement GPS) du barrage de Buchanan sont 30,7399037 (nord), -98,4311413 (ouest) et l'altitude approximative est de 1 053 pieds (321 mètres) au-dessus du niveau de la mer.

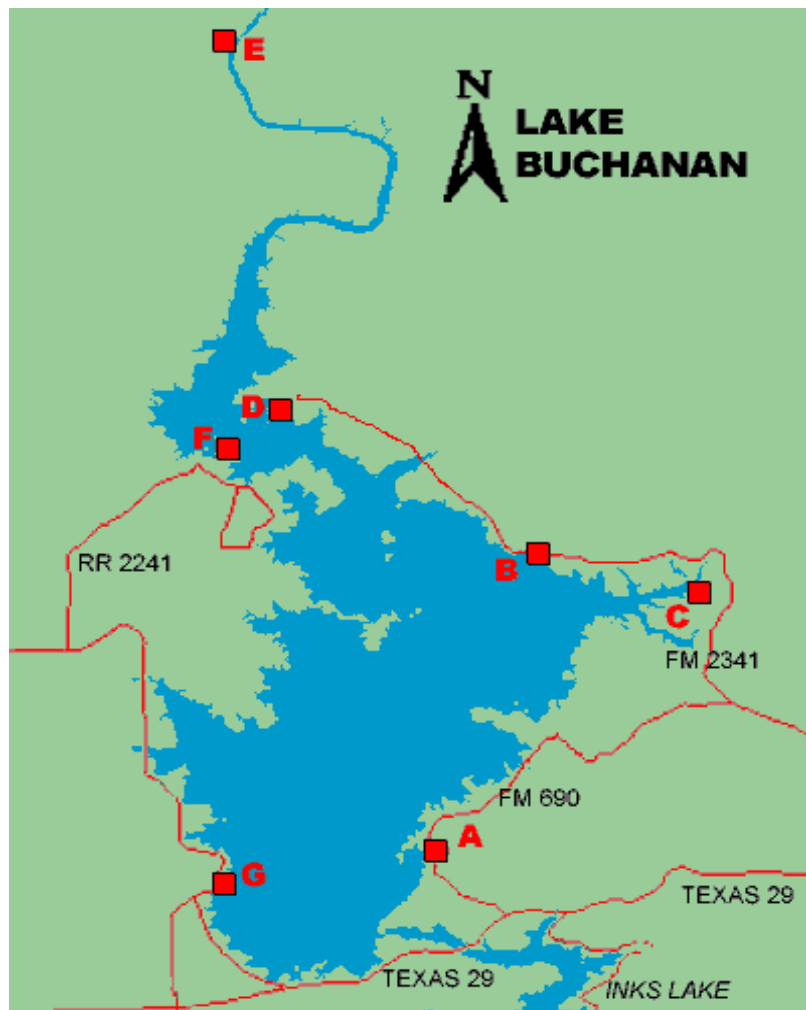


Figure 3.5 : Topographie de barrage Bushnan

3-3-3- Les caractéristiques :

Selon le Bureau du recensement des États-Unis, le CDP a une superficie totale de 52 km²), dont 20 km²) de celui-ci est un terrain et 32 km²) de celui-ci (62,21%) est de l'eau.

3-3-4- climat :

Le climat de cette région se caractérise par des Étés chauds et humides et des Hivers généralement doux à frais. Selon le système de classification climatique de Köppen, le barrage de Buchanan a un climat subtropical humide, abrégé "Cfa" sur les cartes climatiques.

3-4- Présentation des données :

L'Agence nationale des barrages et transferts (ANBT) est responsable de la mobilisation des ressources en eau afin d'assurer l'alimentation en eau potable et l'irrigation. À cette fin, elle contrôle et surveille les ouvrages de retenues d'eau et les systèmes de transfert visant à maintenir l'approvisionnement continu.

Donc de manière journalière les techniciens de l'ANBT mesurent, le volume et la surface d'un barrage, en relevant sa cote afin de les injecter dans les formules des courbes Volume-Hauteur et Surface-Hauteur, ainsi que les apports et les sorties (AEP, Irrigation, Fuites...) du barrage, et enfin la pluie journalière.

Notre travail consiste à élaborer un modèle de prédiction des surfaces futures au vu de son importance dans la gestion des ressources.

3-4-1- Barrage de Koudiat Acerdoune

La série de données du barrage de Koudiat Acerdoune, s'étale de 2011 à 2020.

Les variations de ces données sont représentées dans la figure suivante :

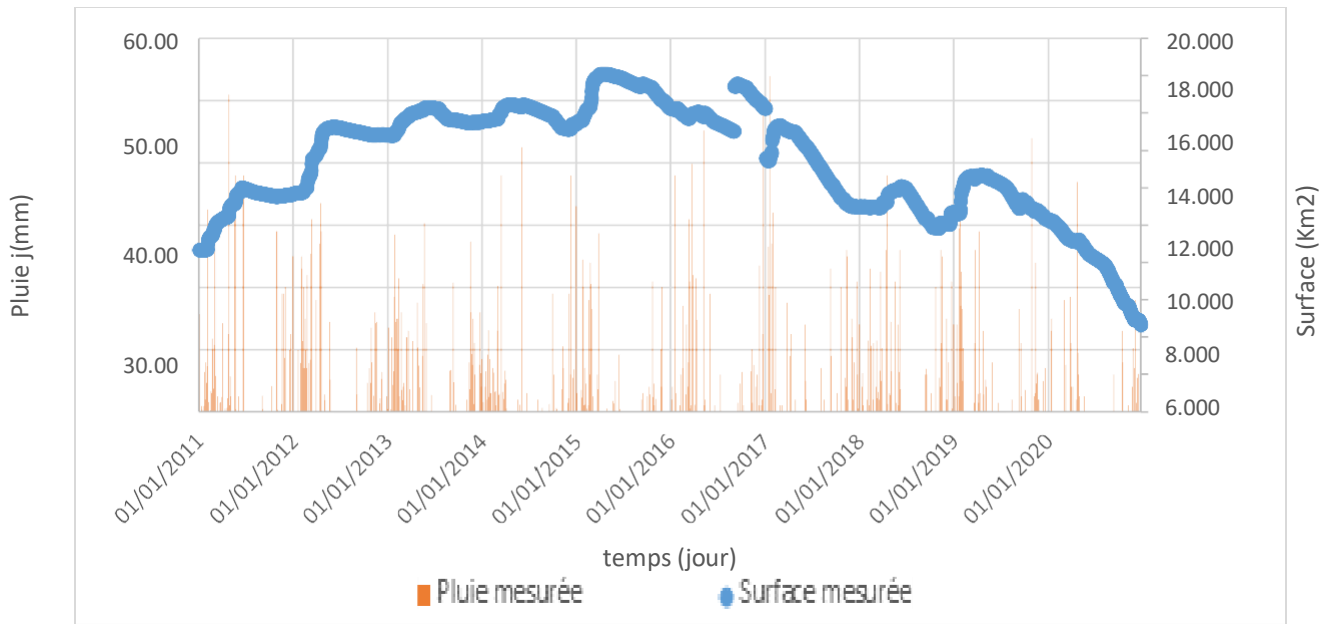


Figure 3.6 : Evolution des Surfaces et des pluies cumulées journalières observées au barrage de Koudiat Acerdoune (ANBT, s. d.)

3-4-2- Barrage BUSHNAN :

Dans cette partie on va vous présenter la variation des 03 PARAMTERES (le niveau d'eau, le stockage d'eau, la surface d'eau) en fonction du temps

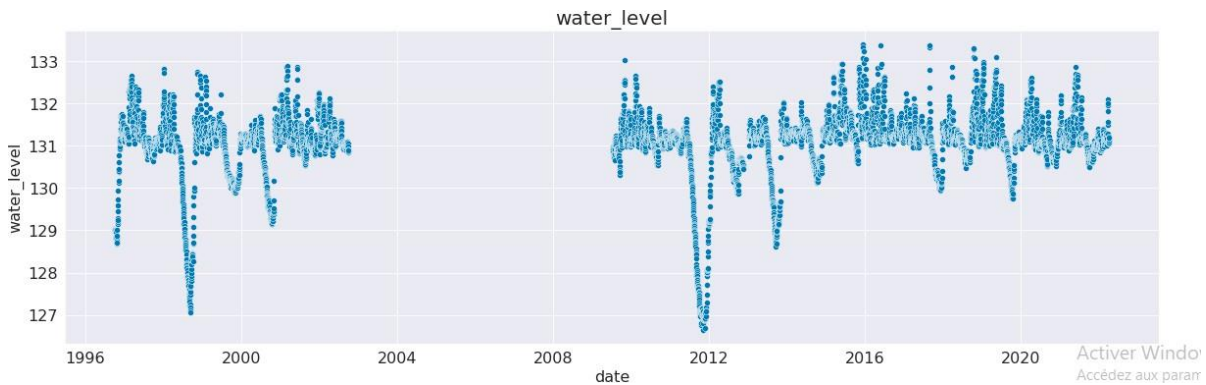


Figure 3.7 : Variation de niveau d'eau en fonction d temps

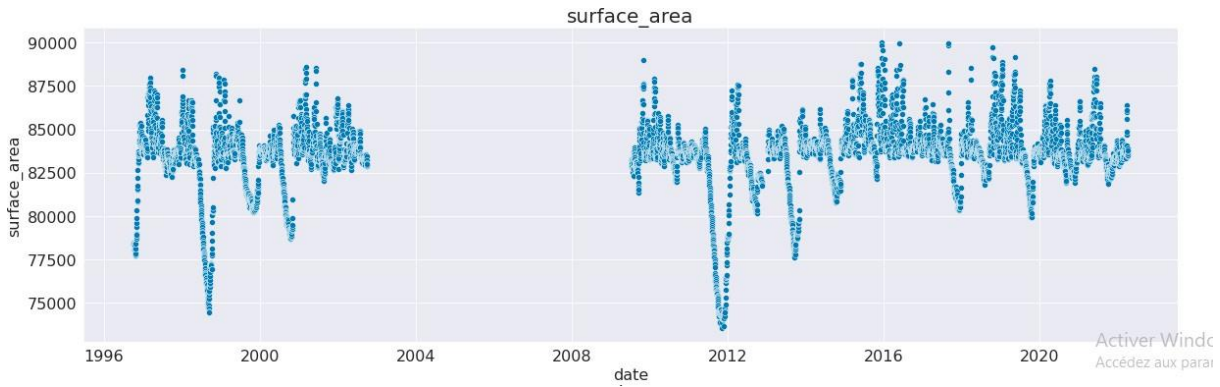


Figure 3.8 : Variation de la surface d'eau en fonction du temps

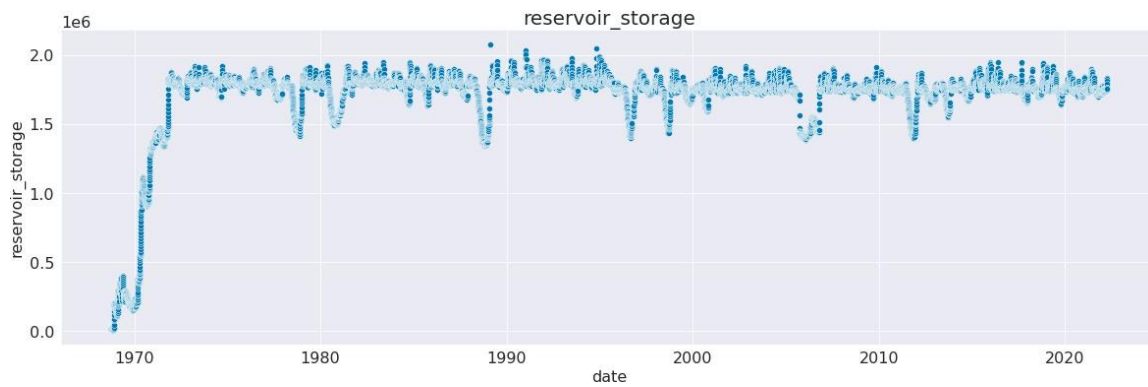


Figure 3.9 : Variation du stockage d'eau en fonction de temps

3-5- Conclusion :

On a présenté les zones d'études et les données satellitaires pour l'estimation des images parce qu'on ne va pas travailler avec la méthode d'extraction des surfaces, on a présenté que les données nécessaires pour notre modèle de prédiction.

CHAPITRE IV

Résultats et

Discussions

4-1- Introduction :

Après la présentation des deux zones d'étude dans le chapitre précédent, maintenant on va présenter comment on a construit le modèle de prédiction.

D'abord on a commencé par le traitement des données récupérées auprès de l'ANBT et du site Water Data, on a commencé par supprimer les Outliers une fois détectés avec le Box Plot et on a rempli les NAN en utilisant les équations des barrages pour connaître la relation entre le volume et la surface et la cote des barrages.

Enfin on a construit le modèle de prédiction en utilisant les techniques de machine Learning par le Gradient Boosting sur les données observées, après on a confirmé la fiabilité des résultats de prédiction obtenus.

4-2- Comment on peut-on évaluer un modèle ?

Pour évaluer et discuter de la fiabilité et de la performance d'un modèle, plusieurs critères d'évaluation ont été développés, Ils peuvent être utilisés aussi bien en calibration qu'en validation.

4-2-1- Critères numériques :

Une simple visualisation des résultats d'une simulation ne représente en aucun cas une évaluation complète d'un modèle. En effet, l'œil humain est incapable de voir toutes les différences qui peuvent exister entre deux courbes d'allure similaire. Ainsi, nous avons besoin en plus de l'analyse graphique de nous outiller de critères objectifs (dénommés aussi fonctions « objectif ») pour établir une comparaison entre les simulations et les observations, aussi pour hiérarchiser des simulations qui ont l'air équivalentes. Beaucoup de critères objectifs mathématiques existent pour évaluer la distance entre les observations et la simulation.

L'étape essentielle de tout modèle d'apprentissage automatique consiste à évaluer la précision du modèle. Le pourcentage de biais (PBIAS), RMSE-observations standard déviation, Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient ratio NSE et les métriques R-carré ou Coefficient de détermination sont utilisées pour évaluer les performances du modèle dans l'analyse de régression.

La performance de notre modèle est évaluée par le biais de ces quatre critères :

1- Coefficient de détermination (R^2)

Défini comme étant la valeur élevée au carré du coefficient de corrélation de Pearson. Donc il estime la dispersion entre la série des observées et des simulées, plus il sera important plus l'accord entre les deux séries de valeurs le sera aussi.

Il nous informe également sur le degré de corrélation entre deux variables à étudier (pour notre cas entre le débit liquide et le débit solide), si sa valeur est égale à « 0 » cela signifie qu'il n'y a aucune corrélation entre les deux variables.

La valeur maximale est de « 1 » et elle représente la valeur optimale. Le R^2 est donné par la relation :

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^T (S_0^t - \bar{S}_0) (S_m^t - \bar{S}_m)}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (S_0^t - \bar{S}_0)^2} * \sqrt{\sum_{t=1}^T (S_m^t - \bar{S}_m)^2}}$$

L'inconvénient du R^2 est qu'il quantifie la dispersion des points « observés-simulés » et ne donne aucune information sur la qualité du modèle, donc même si les valeurs simulées sont sous-estimées ou surestimées mais que leur dispersion est identique à celle des observées, on aura un R^2 proche de « 1 ».

- S_0 : représente les valeurs observées.
- S_m : représente les valeurs simulées.
- S_0^t : représente les valeurs observées à l'instant t.
- S_m^t : représente les valeurs simulées à l'instant t.
- \bar{S}_0 : La moyenne des valeurs observées.
- \bar{S}_m : La moyenne des valeurs simulées.

2- Rapport entre l'erreur quadratique moyenne et l'écart-type des valeurs mesurées RSR :

Etabli par (Singh et al., 2004) il est calculé par le rapport entre l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'écart type des données mesurées. Le RSR varie entre la valeur optimale qui est égale à zéro et un nombre très grand ce qui fait que plus le RSR sera faible et plus notre model sera bon.

Le critère est le suivant :

$$RSR = \frac{RMSE}{STD_{obs}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n_0} \sum_{t=1}^T (S_m^t - S_0^t)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n_0} \sum_{t=1}^T (S_0^t - \bar{S}_0)^2}}$$

3- Critère de Nash Sutcliffe (NSE)

Il est utilisé en hydrologie et renseigne sur la robustesse des modèles utilisés. Cela nous permet de l'utiliser comme un outil d'aide à la décision tel que si le NSE est égale a « 1 » cela correspond à une modélisation parfaite, si NSE est égale a « 0 » cela indique que les prédictions du modèle sont aussi précises que la moyenne des données observées et si NSE est inférieur à zéro cela indique que les valeurs simulées conduisent à de moins bons résultats et que la moyenne observée est meilleur prédicateur que le modèle.

Le critère est le suivant :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (S^t - S^m)^2}{\sum_{t=1}^T (S^t - \frac{\sum_{t=1}^T S^t}{T})^2}$$

4- Le pourcentage de biais (PBIAS)

Le pourcentage du biais (PBIAS) mesure la tendance moyenne des données simulées à être plus grandes ou plus petites que leurs homologues observées. Le PBIAS prend sa valeur optimale quand il est égal à zéro.





- Si le PBIAS < 0 il indique que les valeurs simulées sont plus élevées que celle observés, ainsi on peut dire qu'il y'a une surestimation des valeurs.

- Si le PBIAS > 0 il indique que les valeurs simulées sont inférieures à celle observées, ainsi on peut dire qu'il y'a une sous-estimation des valeurs par le modèle.

$$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^T (S^t - S_0) * 100}{\sum_{t=1}^T S_0}$$

Un modèle est jugé selon le tableau ci-dessous :

Tableau 4.1 : Valeurs de décisions des critères numériques (Moriasi et al, 2007)

Parameter	Expression	Level of performance							
			Very good		Good		Satisfactory		Unsatisfactory
NSE	$1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_o - \bar{Q}_o)^2}$	$0,75 < NSE \leq 1$		$0,65 < NSE \leq 0,75$		$0,5 < NSE \leq 0,65$		$NSE \leq 0,5$	
PBIAS	$100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_p)}{\sum_{i=1}^N Q_o}$	$PBIAS < \pm 10$		$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$		$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$		$PBIAS \geq \pm 25$	
RSR	$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_p)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_o - \bar{Q}_o)^2}}$	$0 \leq RSR \leq 0,5$		$0,5 < RSR \leq 0,6$		$0,6 < RSR \leq 0,7$		$RSR > 0,7$	

4-2-2-Critères graphiques :

Pour notre cas, nous allons juger la performance du modèle par deux critères graphiques :

☞ - **Courbe d'évolution des variables étudiées** : On compare, l'allure du volume observé, avec l'allure de la courbe du volume prédit ou simulé à la même date, pour apprécier la différence entre les valeurs simulées et observées.

☞ - **Courbe de corrélation ou QQ Plot** : On trace les points des valeurs des volumes observés avec celles des valeurs des volumes prédits ou simulés, si le nuage de point est bien réparti de part et d'autres par rapport à la première bissectrice on peut conclure que notre modèle donne de bons résultats.

4-3- La construction du modèle :

4-3-1- Barrage Koudiat Acerdoune :

4-3-1-1 Traitement des données :

1- Importation des données :

Après le traitement initial des données du barrage Koudiat Acerdoune on importe ces dernières dans notre modèle, malheureusement dans le cas de Koudiat Acerdoune on n'a pas les données de surface et donc on a décidé de travailler avec le volume du barrage comme illustré dans la figure 4.1

	water_level	reservoir_storage	gross_evaporation	precipitation	reservoir_storage(t-1)
Date -jour					
2010-12-01	276.800000	206.537564	0.011104	15.70	NaN
2011-01-01	276.886452	207.275807	0.004600	33.30	206.537564
2011-02-01	280.178929	236.693968	0.006603	112.29	207.275807
2011-03-01	283.176452	265.466759	0.010142	56.80	236.693968
2011-04-01	284.570333	279.632609	0.019865	128.90	265.466759

Figure 4.1 : Tableau des données de barrage Koudiat Acerdoune

2- Sélection des colonnes nécessaires :

Après l'importation des données dans notre modèle on a sectionner les données les plus importantes pour les utiliser dans la création de notre modèle, la figure ci-dessous montre le tableau des données après la suppression des colonnes (niveau d'eau).

	precipitation	gross_evaporation	reservoir_storage(t-1)	reservoir_storage
Date -jour				
2010-12-01	15.70	0.011104	NaN	206.537564
2011-01-01	33.30	0.004600	206.537564	207.275807
2011-02-01	112.29	0.006603	207.275807	236.693968
2011-03-01	56.80	0.010142	236.693968	265.466759
2011-04-01	128.90	0.019865	265.466759	279.632609

Figure 4.2 : Tableau des données importantes Koudiat Acerdoune

3- Suppression des NAN :

Maintenant pour commencer de travailler avec les données on doit supprimer les NAN (données manquantes) la figure ci-dessous montre les données après la suppression des NAN

	precipitation	gross_evaporation	reservoir_storage(t-1)	reservoir_storage
Date - jour				
2011-01-01	33.30	0.004600	206.537564	207.275807
2011-02-01	112.29	0.006603	207.275807	236.693968
2011-03-01	56.80	0.010142	236.693968	265.466759
2011-04-01	128.90	0.019865	265.466759	279.632609
2011-05-01	100.90	0.024373	279.632609	311.852409
...
2020-08-01	0.00	0.048000	184.601384	166.329047
2020-09-01	6.00	0.034400	166.329047	138.443295
2020-10-01	21.00	0.021903	138.443295	113.023017
2020-11-01	22.20	0.018167	113.023017	90.070971
2020-12-01	48.00	0.011091	90.070971	76.279591

120 rows x 4 columns

Figure 4.3 : Tableau des données de Koudiat Acerdoune traitées

4-3-1-2 Training test split :

La répartition train-test est utilisée pour estimer les performances des algorithmes d'apprentissage automatique appliqués aux algorithmes/applications basés sur la prédiction. Cette méthode est une procédure rapide et facile à exécuter, de sorte que nous pouvons comparer les résultats de notre propre modèle d'apprentissage automatique aux résultats de la machine.

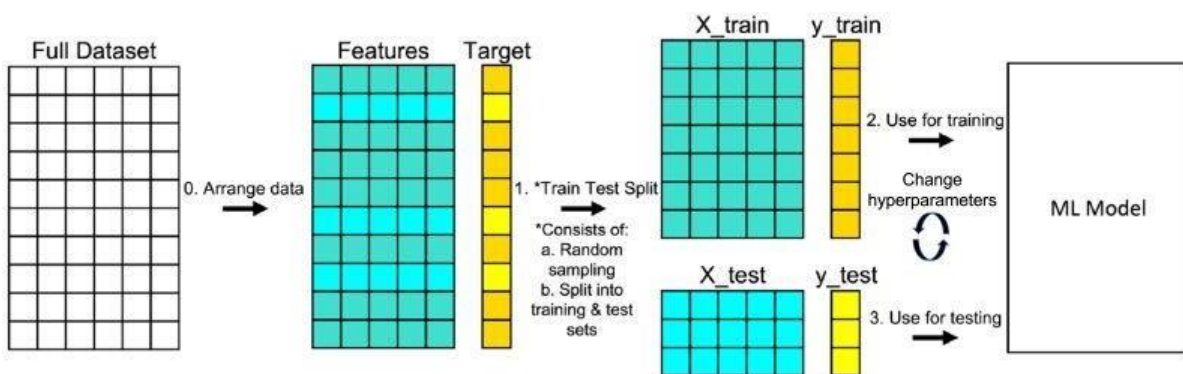


Figure 4.4: Training test split procedure

1 Difference entre training data et test data :

Dans l'apprentissage automatique, les ensembles de données sont divisés en deux sous-ensembles. Le premier sous-ensemble est connu sous le nom de données d'apprentissage. Il s'agit d'une partie de notre ensemble de données réel qui est introduite dans le modèle d'apprentissage automatique pour découvrir et apprendre des modèles. De cette façon, il entraîne notre modèle. L'autre sous-ensemble est connu sous le nom de données de test est faite pour évaluer notre modèle.

2 Pourquoi on fait l'entraînement des données :

Les données d'entraînement sont les données que vous utilisez pour entraîner un algorithme ou un modèle d'apprentissage automatique afin de prédire le résultat pour lequel vous concevez votre modèle. Les données de test sont utilisées pour mesurer les performances, telles que la précision ou l'efficacité, de l'algorithme que vous utilisez pour entraîner la machine.

3 Programme Split data pour le cas de Koudiat Acedoune :

```
[6] # splitting the data
X = model_data.drop("reservoir_storage", axis=1).to_numpy()
y = model_data["reservoir_storage"].to_numpy().reshape(-1,1)
time = model_data.index.values.reshape(-1,1)
X_train, X_test, y_train, y_test, time_train, time_test = train_test_split(X,
                                                                            y,
                                                                            time,
                                                                            test_size=0.2,
                                                                            random_state=55)
```

Figure 4.5 : Code de Splitting Data

4-3-1-3 Modelé bulding :

Dans le but d'avoir une meilleure précision de prédiction on a choisi xgboost régression modèle, on commence par l'explication de ce dernier avec ces paramètres

C'est quoi le xgboost :

XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) est un algorithme d'apprentissage supervisé populaire utilisé pour la régression et la classification sur de grands ensembles de données. Il

utilise des arbres de décision peu profonds construits séquentiellement pour fournir des résultats précis et une méthode de formation hautement évolutive qui évite le sur ajustement.

n estimator :

C'est un réglage qu'il va déterminer le nombre des arbres par exemple c'est on fait `n_estimators=1` ça va permettre à l'algorithme de générer un arbre unique (aucun boosting ne se produit fondamentalement), qui est similaire à l'algorithme d'arbre unique de `sklearn - DecisionTreeClassifier`. Mais, les hyper paramètres qui peuvent être réglés et le processus de génération d'arbres sont différents dans les deux cas.

Max depth :

`Max_depth` correspond à ce que son nom suggère : la profondeur maximale à laquelle vous permettez à l'arbre de se développer. Plus vous le permettez, plus votre modèle deviendra complexe. Pour les erreurs de formation, il est facile de voir ce qui se passera. Si vous augmentez `max_depth`, l'erreur d'entraînement diminuera toujours (ou du moins ne montera pas).

eta :

Le taux d'apprentissage utilisé pour pondérer chaque modèle, souvent défini sur de petites valeurs telles que 0,3, 0,1, 0,01 ou moins. Sous-échantillon : le nombre d'échantillons (lignes) utilisés dans chaque arbre, défini sur une valeur comprise entre 0 et 1, souvent 1,0 pour utiliser tous les échantillons.

Learning rate :

Le taux d'apprentissage donne le taux de vitesse auquel le gradient se déplace pendant la descente du gradient. Le fixer trop haut rendrait votre chemin instable, trop bas rendrait la convergence lente. Mettez-le à zéro signifie que votre modèle n'apprend rien des gradients.

Dans notre cas on a choisi les valeurs suivantes (learning rate, eta, max depth, n estimator) comme il est illustré dans la figure ci-dessous.

```
✓ 0s # create an xgboost regression model
model = xgb.XGBRegressor(n_estimators=35, max_depth=2, eta=0.2, learning_rate = 0.1)
# training the model
model.fit(X_train, y_train)
```

Figure 4.6 : Code de la création du XgBoost de la régression du modèle

4-3-1-4 Modelé performance :

1- Numerical performances

Comme on a déjà parlé sur les critères numériques maintenant on va expliquer comment on a calculé ses critères pour la période de test et celle d'entraînement

```
def Pbias(x, y):
    a = sum(x-y)
    b = sum(y)
    c = a/b
    print('PBIAS:', c)

def nse(predictions, targets):
    print('NSE = ', 1-(np.sum((predictions-targets)**2)/np.sum((targets-np.mean(targets))**2)))

def print_evaluate(true, predicted):
    PBIAS = Pbias([true[1], predicted ])
    NSE = nse(predicted, true)
    mae = metrics.mean_absolute_error(true, predicted)
    mse = metrics.mean_squared_error(true, predicted)
    rmse = np.sqrt(metrics.mean_squared_error(true, predicted))
    std = np.std(true)
    rsr = rmse/std
    r2_square = metrics.r2_score(true, predicted)
```

Figure 4.7 : Code de calcul des critères numériques

Après on a fait une séparation de calcul vers des résultats pour la période d'entraînement et une autre pour le test avec le code ci-dessous

```
[ ] pred_train = model.predict(X_train)
    pred_test = model.predict(X_test)

[ ] # Numerical evaluation
    print("----- Training period -----")
    print_evaluate(y_train, pred_train)

    print("----- Testing period -----")
    print_evaluate(y_test, pred_test)
```

Figure 4.8 : Code de séparation de calcul

2- Les résultats de calcul :

Période du d'entraînement :

Tableau 4-2 : Valeurs des critères numériques Pour la période d'entraînement

RSR	0.18
PBIAS	0.79%
NSE	92%

D'après le tableau ci-dessus on remarque que les critères d'évaluation numériques pour la période de d'entraînement sont très satisfaisants avec un **Nash (NSE =92%)** et un **PBIAS=0,79%** et un **RSR de 0.18**.

Période du test :

Tableau 4-3 : Valeurs des critères numériques Pour la période du test

RSR	0.19
PBIAS	0.46%
NSE	94.2%

On remarque que malgré que l'ensemble des données pour la période de test et moins que celle de l'entraînement, mais le tableau ci-dessus montre que les critères d'évaluation numériques pour la période de test sont très bons avec un **Nash (NSE =94,2%)**, un **PBIAS=0,46%** et un **RSR de 0.19** qui montre qu'il y'a une estimation parfaite de la surface réelle.

3-GRAPHICAL PERFORMANCE :

Le tableau de résultat des valeurs de prédiction :

	y_obs	y_pred	date
0	270.070315	269.582397	2018-09-01
1	404.269872	348.813904	2012-03-01
2	297.605311	299.798431	2018-02-01
3	326.014875	317.236298	2011-09-01
4	487.603825	447.647003	2012-05-01
...
91	540.307290	513.055725	2013-06-01
92	427.241397	444.864044	2017-01-01
93	547.593924	513.055725	2014-04-01
94	516.596862	494.838898	2013-03-01
95	431.619214	447.647003	2017-06-01

96 rows x 3 columns

Figure 4.9 : Tableau des valeurs observées et prédites

D'après le tableau ci-dessus on voit que l'ensemble des données de la période d'entraînement (80% de l'ensemble des données totales) avec un léger décalage entre les valeurs observées et celles prédites du volume.

Courbe de corrélation

On voit que le nuage de point est bien réparti par rapport à la première bissectrice, avec un bon coefficient de détermination (0,96), donc on peut conclure que notre modèle donne de bons résultats.

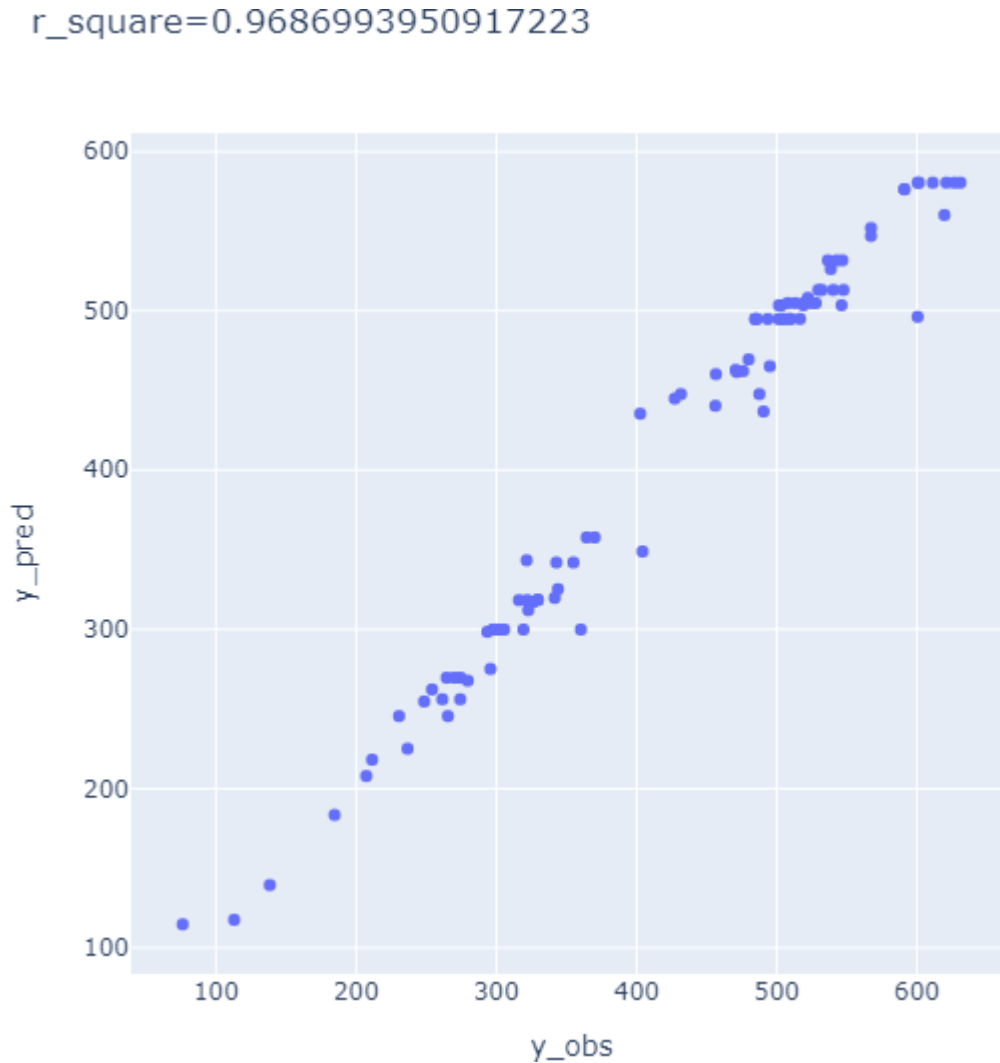


Figure 4.10 : Courbe de corrélation barrage Koudiat Acerdoune

Courbe d'évolution des variables étudiées :

D'abord la courbe d'évolution des variables montre que la période d'entraînement est confinée dans un intervalle de 10 ans (2011-2020) avec un ensemble des données de 96.

Après la comparaison on peut voir qu'il Ya pas une grande différence entre la réparation des points observées et ceux des points prédits dans les mêmes dates donc on peut dire que notre modèle donne des bons résultats.

Evolution du volume pour la phase d'entrainement



Figure 4.11 : Courbe d'évolution de volume par apport au temps

La période du test :

Le tableau des valeurs observées et de prédiction dans la période du test

	y_obs	y_pred	date
0	487.128172	494.797150	2016-08-01
1	545.557507	526.175415	2014-06-01
2	90.070971	114.686951	2020-11-01
3	194.450098	218.077316	2020-06-01
4	373.251701	435.339355	2017-08-01
5	544.898568	560.105957	2014-05-01
6	166.329047	183.407776	2020-08-01
7	469.874366	459.283997	2012-12-01
8	346.454092	357.652802	2017-09-01
9	322.662047	318.624573	2011-10-01
10	299.146001	299.798431	2018-03-01
11	335.891066	299.798431	2018-05-01
12	477.028470	469.411163	2017-04-01
13	366.543146	343.299408	2019-03-01
14	224.868000	219.465576	2020-04-01
15	337.582982	299.798431	2011-06-01
16	488.935233	494.797150	2012-06-01
17	334.911651	318.274139	2011-07-01
18	288.289191	299.798431	2019-11-01
19	311.852409	269.582397	2011-05-01

Figure 4.12 : Tableau des valeurs observées et prédites

D'après le tableau ci-dessus on voit que l'ensemble des données de la période de test est 20% de l'ensemble des données total avec un décalage remarquable entre les valeurs observées et les valeurs prédites du volume.

Courbe de corrélation :

On remarque que le nuage des points est presque parfaitement étalé sur la première bissectrice

$r_square=0.9624009116768162$

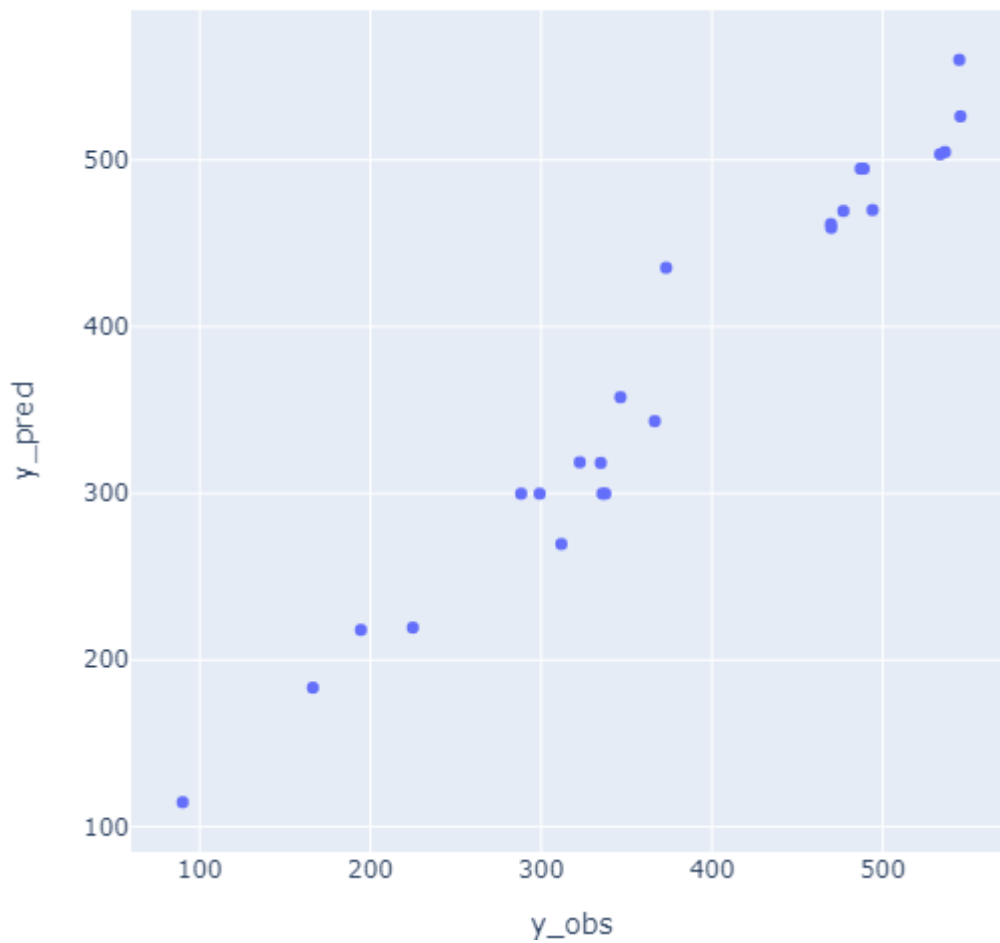


Figure 4.13 : Courbe de corrélation pour la période du test

Courbe d'évolution des variables étudiées :

L'ensemble des données de la période du test est de 24 valeurs.

Ensuite Les valeurs observées épousent très bien sur les valeurs prédites ce qui fait que les deux courbes ont la même allure.

Evolution du volume pour la phase de test

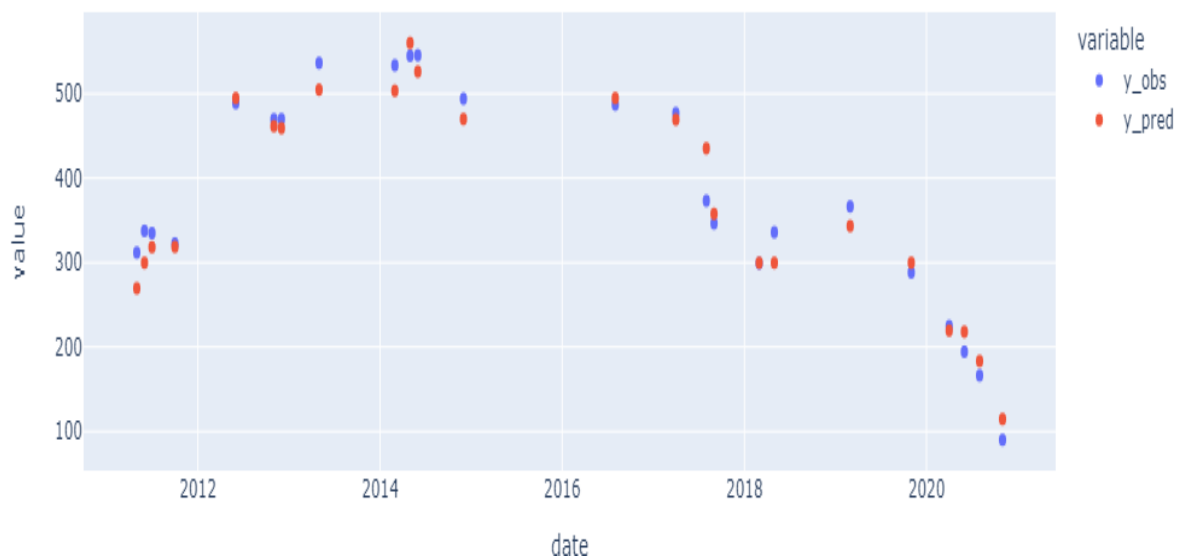


Figure 4.14 : Courbe d'évolution de volume

4-3-1-5 Feature importance :

En utilisant l'outil Feature importance pour connaître la différence de l'importance entre les paramètres dans la procédure du modèle :

F0 : précipitations

F1 : évaporation

F2 : le volume a (t-1)

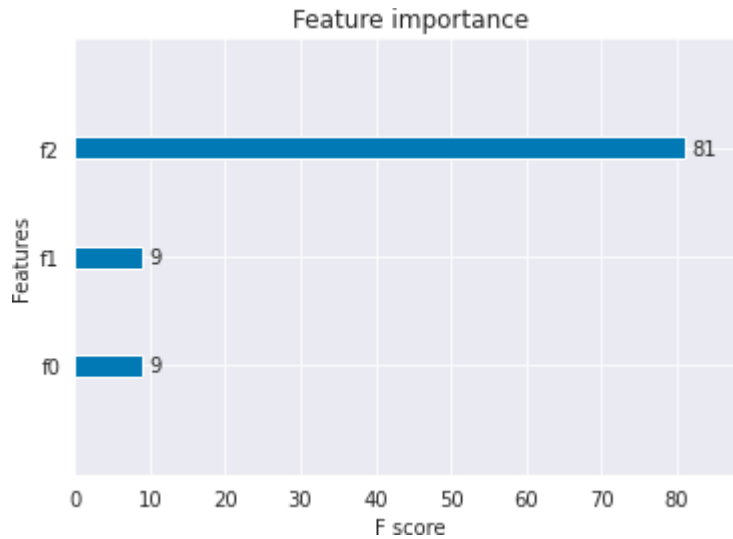


Figure 4.15 : Feature importance

4-3-1-6 Interprétation des résultats (Koudiat Acerdoune) :

Les résultats obtenus du barrage de Koudiat Acerdoune sont bons comme on voit dans les critères graphiques, la réparation de nuage des points dans les courbes de corrélation et même pour l'évolution des valeurs du volume observé et celui prédit dans les courbes d'évolution de volumes par rapport au temps

Ensuite Pour les critères numériques les valeurs de (NSE, RSR, PBIAS²) indique que notre modèle est fiable est donne des bons résultats car lorsque qu'on compare nos valeurs avec les valeurs de tableau 4-1 on trouve que les valeurs numériques sont bonnes.

Enfin l'outil de feature importance indique que la valeur la plus importante dans notre modèle est le volume de barrage a (t-1) avec un score 81, ensuite l'évaporation et la précipitations avec un score de 9.

4-3-2- Barrage de Bushnan :

4-3-2-1 traitement des données :

1-Importation des données :

Après le traitement initial des données du barrage Buchanan on importe ces derniers dans notre modèle pour le de Buchanan on peut remarquer que on a un grand ensemble de données total comme il est illustré dans la figure 4-16

	water_level	surface_area	reservoir_storage	RS_area	gross_evaporation	net_evaporation	precipitation	RS_area(t-1)	surface_area(t-1)
1937-06-01	968.9	7185.5	140393.0	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1937-07-01	967.5	6844.4	130572.0	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	7185.5
1937-08-01	967.6	6868.4	131258.0	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	6844.4
1937-09-01	966.9	6704.4	126508.0	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	6868.4
1937-10-01	970.2	7506.7	149941.0	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	6704.4

Figure 4.16 : Données du barrage Buchanan

2- élection des colonnes :

Dans le cas du barrage de Bushnan, on a les données de surface, donc on a travaillé avec la surface a (t-1), l'évaporation, la précipitations et le volume du barrage.

	precipitation	gross_evaporation	surface_area(t-1)	reservoir_storage
1937-06-01	NaN	NaN	NaN	140393.0
1937-07-01	NaN	NaN	7185.5	130572.0
1937-08-01	NaN	NaN	6844.4	131258.0
1937-09-01	NaN	NaN	6868.4	126508.0
1937-10-01	NaN	NaN	6704.4	149941.0

Figure 4.17 : Données du Bushnan après sélection

3- Suppression des NAN :

La figure 4-18 montre l'ensemble des données total après les étapes de traitement donc il est finalisé avec un nombre de données égal 789.

	precipitation	gross_evaporation	surface_area(t-1)	reservoir_storage
1954-01-01	0.57	1.78	21439.119355	773618.451613
1954-02-01	0.18	3.02	21133.500000	755054.928571
1954-03-01	0.51	3.96	20892.260714	736956.290323
1954-04-01	2.50	4.78	20630.683871	784555.566667
1954-05-01	2.06	4.84	21149.346667	875011.806452
...
2020-08-01	1.13	7.54	21568.270968	782724.516129
2020-09-01	5.38	3.95	21236.551613	774008.533333
2021-06-01	4.02	4.82	20469.551613	797169.133333
2021-07-01	3.20	4.89	21393.143333	807533.096774
2021-08-01	2.13	5.54	21504.967742	802641.419355

789 rows x 4 columns

Figure 4.18 : Données de Bushnan traitées

4-3-2-2 Programme split data pour le cas de Bushnan :

```
[6] # splitting the data
X = model_data.drop("reservoir_storage", axis=1).to_numpy()
y = model_data["reservoir_storage"].to_numpy().reshape(-1,1)
time = model_data.index.values.reshape(-1,1)
X_train, X_test, y_train, y_test, time_train, time_test = train_test_split(X,
y,
time,
test_size=0.2,
random_state=42)
```

Figure 4.19 : Code de Splitting data pour Bushnan

4-3-2-3 Modèle bulding : on crée un XgBosst régression model

Dans notre cas on a choisi les valeurs suivantes (learning rate, eta, max depth, n estimator) comme illustré dans la figure ci-dessous.

```
[7] # create an xgboost regression model
    model = xgb.XGBRegressor(n_estimators=60, max_depth=2, eta=0.2, learning_rate = 0.15)
    # training the model
    model.fit(X_train, y_train)
```

Figure 4.20 : Code de la création de XgBoost

4-3-2-4 Performance du Modèle

Les critères numériques :

Pour la période d’entraînement

Tableau 4.4 : Critères numériques pour la période d’entraînement

PBIAS	1.12%
NSE	95.12%
RSR	0.21

D’après le tableau ci-dessus on remarque que les critères d’évaluation numériques pour la période d’entraînement sont très satisfaisants avec un **Nash (NSE =95.12%)** et un **PBIAS=1.12%** et un **RSR de 0.21** et si on compare avec les résultats du barrage de Koudiat Acerdoune on peut dire qu’il n’y a pas une grande différence dans les résultats.

Pour la période du test

Tableau 4.5 : Critères numériques pour la période du test

PBIAS	1.11%
NSE	92.10%
RSR	0.26

Bien que le nombre des données pour la période test est moins importante que celle de l’entraînement, mais le tableau ci-dessus montre que les critères d’évaluation numériques pour la période test sont aussi très bons avec un **Nash (NSE =92,10%)** et un **PBIAS=1,11%** et un **RSR de 0.26** et montre qu’il y’a une estimation parfaite de la surface réelle.

GRAPHICAL PERFORMANCE :

Pour la période du test on a le **Tableau** des données observées et de prédites

	y_obs	y_pred	date
0	554504.419355	606984.8125	1971-07-01
1	724157.678571	705798.2500	1965-02-01
2	800828.000000	794093.0000	2016-04-01
3	699006.580645	743056.5000	1998-10-01
4	750298.032258	780296.0625	1958-08-01
...
626	808190.806452	849512.9375	1959-12-01
627	416944.700000	472506.3125	1962-11-01
628	865114.774194	844017.5000	1976-07-01
629	689979.200000	670216.8125	1990-04-01
630	564176.516129	542891.6250	1962-07-01

631 rows x 3 columns

Figure 4.21 : Tableau des données observées et de la prédiction

D’après le tableau ci-dessus on voit que l’ensemble des données de la période d’entraînement est 80% de l’ensemble des données total avec un petit décalage entre les valeurs observées et les valeurs prédites de la surface.

Courbe de corrélation

On voit que le nuage de point est bien réparti par rapport à la première bissectrice donc on peut conclure que notre modèle donne de bons résultats.

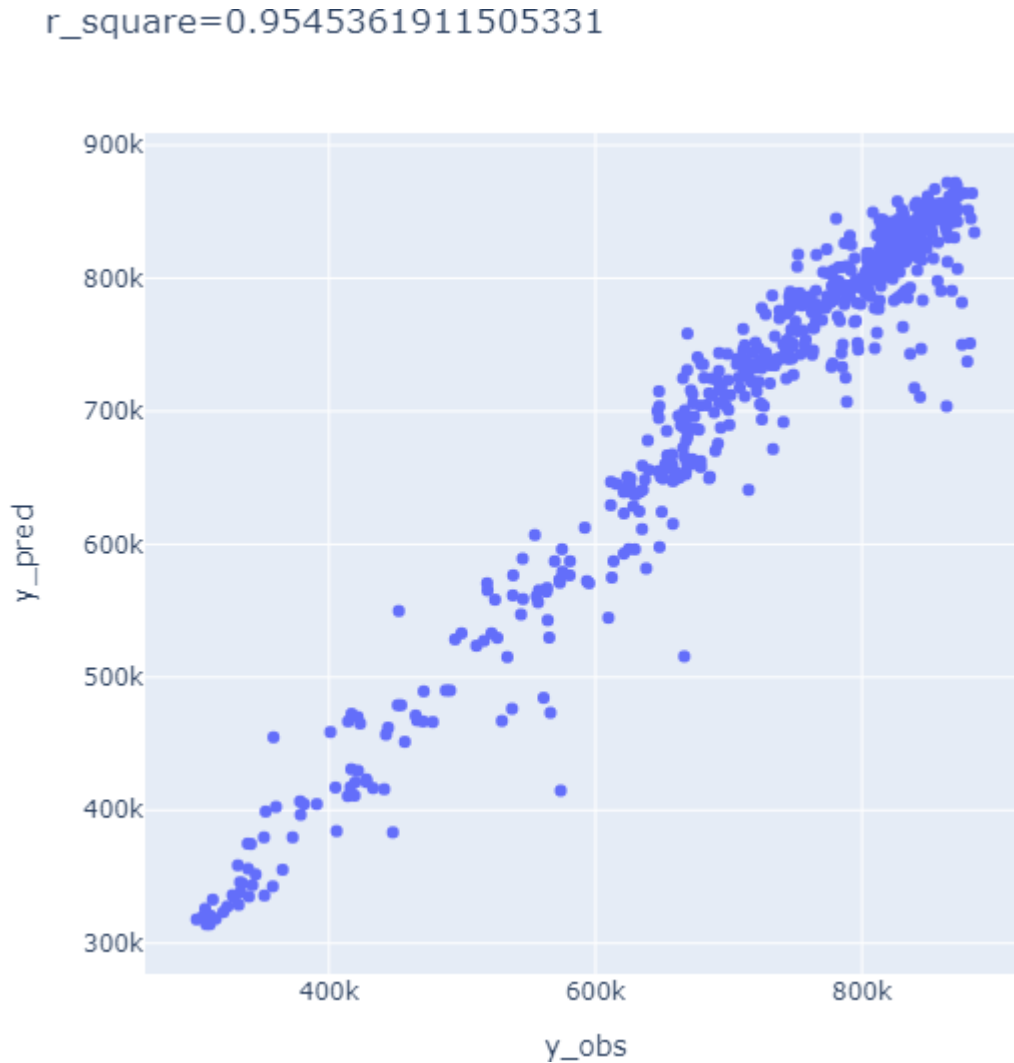


Figure 4.22 : Courbe de corrélation barrage de Bushnan

Courbe d'évolution des variables étudiées :

La courbe d'évolution des variables montre que la période d'entraînement s'étale de 1954 à 2021 (67 ans d'observation) avec un ensemble des données de 631 valeurs.

Après la comparaison on peut voir qu'il n'y a pas une grande différence entre la réparation des points observés et ceux prédits dans les mêmes dates donc on peut dire que notre modèle donne des bons résultats.

Evolution du volume pour la phase d'entrainement

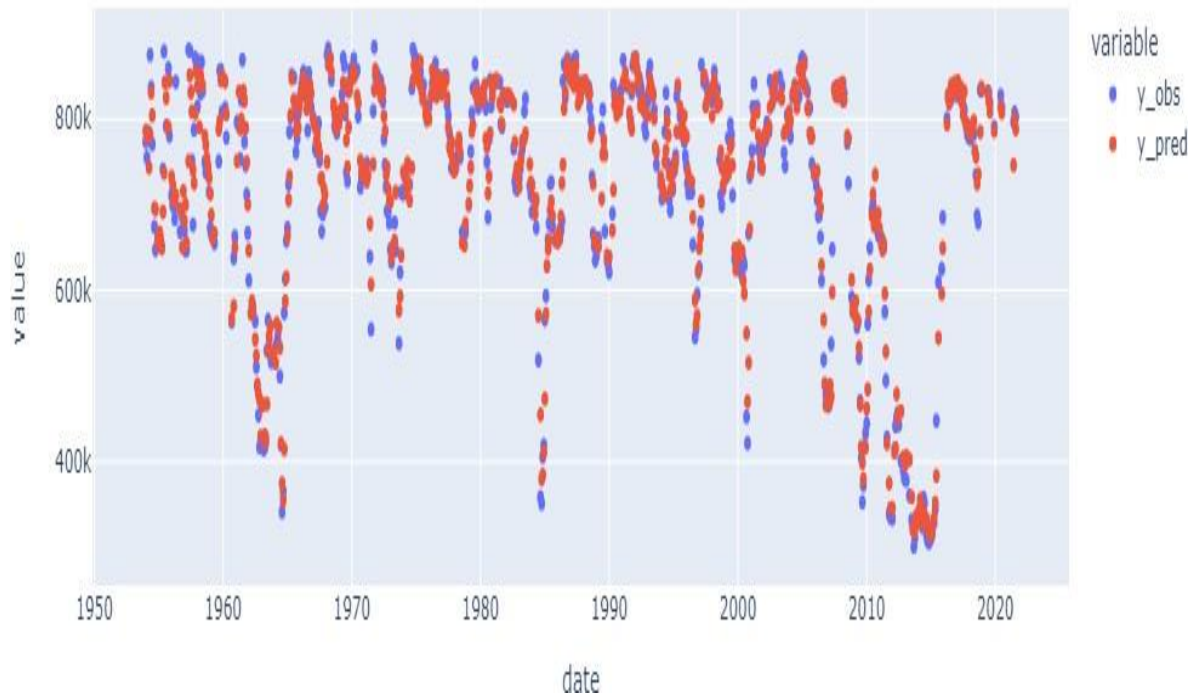


Figure 4.23 : Courbe d'évolution des variables

Pour la période du test on a le tableau ci-dessous

	y_obs	y_pred	date
0	589622.225806	654693.8125	1996-08-01
1	720053.800000	679463.5000	1957-04-01
2	748377.225806	587784.4375	1971-08-01
3	749682.032258	767968.1875	1970-08-01
4	585531.032258	624746.1875	1973-08-01
...
153	586572.935484	644743.8750	1960-08-01
154	864141.032258	846732.1250	1966-05-01
155	825383.419355	827204.5000	1982-03-01
156	849950.433333	862794.8750	2004-11-01
157	670581.870968	698260.5625	1978-12-01

158 rows x 3 columns

Figure 4.24 : Tableau des données observées et de prédites

D'après le tableau ci-dessus on voit que l'ensemble des données de la période de test est 20% de l'ensemble des données total avec un décalage remarquable entre les valeurs observées et les valeurs prédites de la surface.

Courbe de corrélation :

On remarque que la courbe de corrélation montre une parfaite adéquation entre les valeurs observées et prédit avec un coefficient de détermination 0.93

r_square=0.9293617481635351



Figure 4.25 : Courbe de corrélation Bushnan

Courbe d'évolution des variables étudiées :

L'ensemble des données de la période du test est de 158 valeurs.

Ensuite Les valeurs observées épousent très bien sur les valeurs prédites ce qui fait que les deux courbes ont la même allure

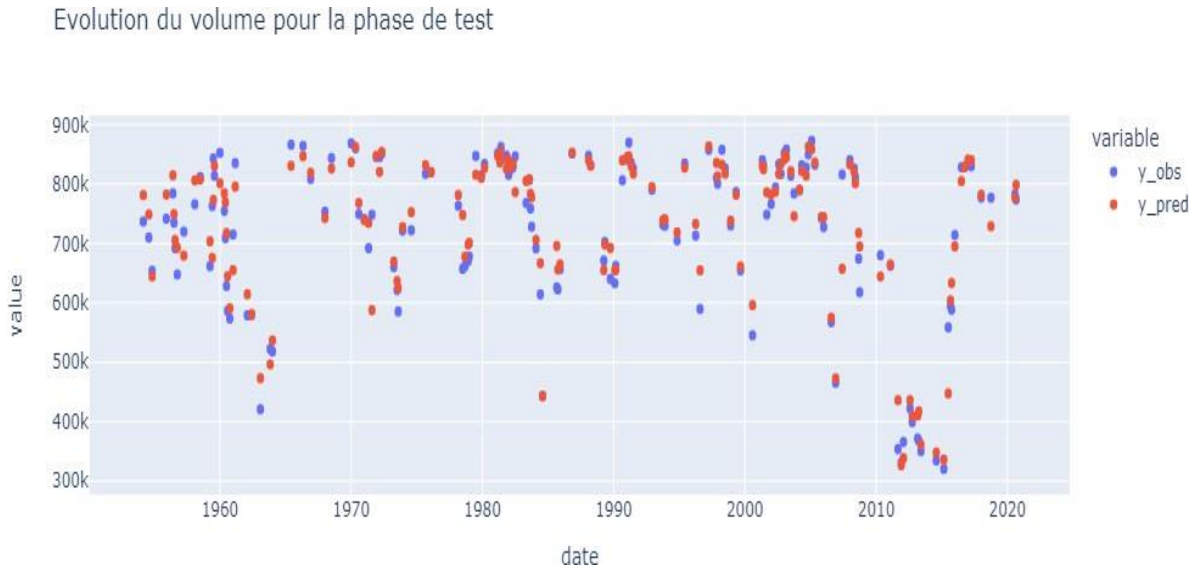


Figure 4.26 : Courbe d'évolution de volume Bushnan

7-Feature importance :

La comparaison entre l'importance de la surface(t-1), l'évaporation et la précipitation à montrer que le paramètre le plus important est la surface (t-1) avec un score de 89 ensuite la précipitation avec un score de 48 et enfin l'évaporation avec un score de 43 notamment que

F0 : la précipitation

F1 : l'évaporation

F2 : surface (t-1)

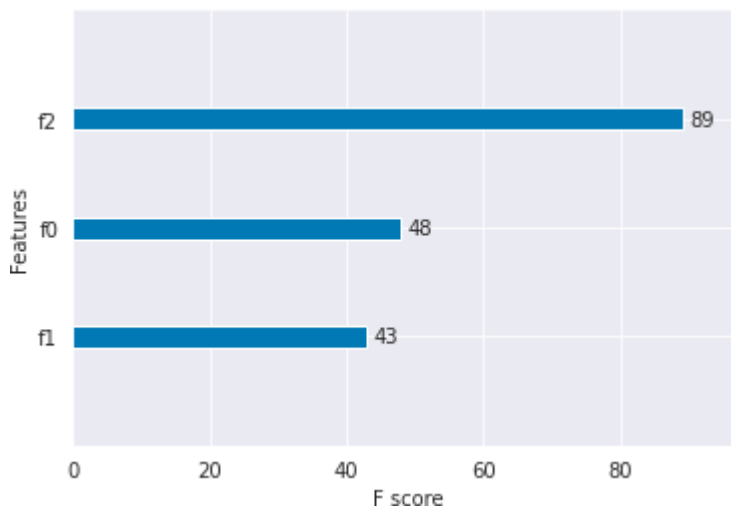


Figure 4.27 : Feature importance

8- Interprétation des résultats (Bushman) :

Les critères numériques pour les valeurs des **RSR, PBIAS, NSE**, indiquent que notre modèle est fiable et donne des bons résultats car lorsque qu'on compare nos valeurs avec les valeurs de tableau de décision tableau 4-1 on trouve que les valeurs numériques sont bonnes

Pour les critères graphiques on remarque que la répartition du nuage du point dans le QQ plot est bien réparti dans les deux périodes, il en est de même pour les courbes d'évolution de données observées et prédites qui sont presque identiques.

Enfin pour le feature importance, c'est clair que la surface (t-1) est le paramètre le plus important parce qu'il joue un rôle important dans le modèle surtout dans l'étape de training par rapport aux deux autres paramètres.

4-4- Conclusion :

Avec les résultats obtenus après l'utilisation des données de l'ANBT et le site WATER DATA on peut dire qu'avec la télédétection et les modèles machine learning, on peut avoir la prédiction des données surtout de la surface ou bien du volume de barrage avec des bons critères graphiques et numériques.

Le modèle développé est très intéressant puisque même en changeant de site les résultats restent très performants, il en est de même pour l'importance des paramètres utilisés dans le modèle.

La prédiction des surfaces et des volumes permet de mieux appréhender la problématique des ressources en eau en Algérie, surtout dans le cas de la gestion des barrages.

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

L'Algérie est située dans une zone semi-aride, donc on peut dire qu'à cause de cette implantation on a un déficit de l'eau, et pour résoudre ce problème on doit améliorer notre gestion des ressources en eau, pour l'assurance de la sécurité hydrique d'une zone, on doit déterminer les changements des paramètres des ressources qui peuvent arriver à cette zone dans le but d'arriver à une gestion optimale et assurer la sécurité hydrique de la région.

Le but de ce travail est de proposer une approche qui fait appel aux données de télédétection afin de réaliser un suivi et une prédiction des niveaux des eaux des barrages.

Pour ce faire, les produits de télédétection utilisés dans notre projet sont : les imageries optiques prises par les deux satellites Landsat 8 et Sentinel-2. Cette étude a été appliquée sur deux barrages, celui de Koudiat Acerdoune et de Bushnan (USA). Ce choix a été dicté par la disponibilité des données fournis par l'ANBT et le site Water Data (Texas).

L'approche suivie dans cette étude, est basée sur le développement de différents modèles. D'abord, de faire l'extraction des surfaces à partir des imageries Landsat 8 et Sentinel-2 des deux surfaces de barrages à l'aide d'un modèle basé sur l'indice de l'eau NDWI.

Nous avons ensuite conçu un modèle de régression XgBoost, pour corriger les surfaces et volumes obtenus précédemment, en utilisant les données observées pour les deux barrages.

Enfin, on a élaboré un modèle de prédiction avec les données des deux barrages pour une période qui s'étale de 2011-2020 pour Koudiat Acerdoune et 1954-2020 pour Bushnan, pour tester la fiabilité du modèle élaboré précédemment dans la gestion des barrages, on a injecté les surfaces (volumes) corrigées et les pluies télédétectées dans le modèle développé, et comparé ces prédictions avec la série de données observées.

Cette étude a montré la fiabilité et l'utilité de l'intelligence artificielle dans la gestion intégrée des ressources en eau de surface. Cette technique a permis de réaliser un suivi et une prédiction pour les deux barrages, tout en étant peu coûteuse.

Bibliographie

Bibliographie

ANBT. (s. d.). *Agence nationale des barrages et transferts*.

Behnamian, A., Banks, S., White, L., Brisco, B., Millard, K., Pasher, J., Chen, Z., Duffe, J., Bourgeau-Chavez, L., & Battaglia, M. (2017). Semi-Automated Surface Water Detection with Synthetic Aperture Radar Data : A Wetland Case Study. *Remote Sensing*, 9(12), 1209. <https://doi.org/10.3390/rs9121209>

Bennaceur, S. (2019). *Optimisation de la consommation énergétique du processus d'épuration par boues activées par le Gradient Boosting cas de la STEP Béni Messous. Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat : Hydraulique*.

Bijeesh, T. V., & Narasimhamurthy, K. N. (2020). Surface water detection and delineation using remote sensing images : A review of methods and algorithms. *Sustainable Water Resources Management*, 6(4), 68. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00425-4>

Calmant, S., Seyler, F., & Cretaux, J. F. (2008). Monitoring Continental Surface Waters by Satellite Altimetry. *Surveys in Geophysics*, 29(4-5), 247-269. <https://doi.org/10.1007/s10712-008-9051-1>

Chan, Y. K., & Koo, V. C. (2008). AN INTRODUCTION TO SYNTHETIC APERTURE RADAR (SAR). *Progress In Electromagnetics Research B*, 2, 27-60. <https://doi.org/10.2528/PIERB07110101>

Chavez, P. S. (1991). Comparison of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data: Landsat TM and SPOT Panchromatic. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING*, 9.

Crist, E. P. (1985). A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data. *Remote Sensing of Environment*, 17(3), 301-306. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90102-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90102-6)

Dechesne, C., Mallet, C., Le Bris, A., & Gouet-Brunet, V. (2017). Semantic segmentation of forest stands of pure species combining airborne lidar data and very high resolution multispectral imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 126, 129-145. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.02.011>

Ding, Z., Qi, N., Dong, F., Jinhui, L., Wei, Y., & Shenggui, Y. (2016). Application of multispectral remote sensing technology in surface water body extraction. *2016 International Conference on Audio, Language and Image Processing (ICALIP)*. <https://doi.org/10.1109/ICALIP.2016.7846565>

Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., & Li, X. (2016). Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. *Remote Sensing*, 8(4), 354. <https://doi.org/10.3390/rs804035>

- FAO. (1997). *Téledétection et ressources en eau/ Remote sensing and water resources : Actes de l'atelier international/ Proceedings of the international workshop*. FAO. <http://www.fao.org/publications/card/en/c/04a62028-02e7-5ee5-bcc1-5c60084d7d68/>
- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index : A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- Frazier, P. S., & Page, K. J. (2000). Water Body Detection and Delineation with Landsat TM Data. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING*, 7.
- Gamba, P. (2014). Image and data fusion in remote sensing of urban areas : Status issues and research trends. *International Journal of Image and Data Fusion*, 5(1), 2-12. <https://doi.org/10.1080/19479832.2013.848477>
- Gautam, V. K., Gaurav, P. K., Murugan, P., & Annadurai, M. (2015). Assessment of Surface Water Dynamics in Bangalore Using WRI, NDWI, MNDWI, Supervised Classification and K-T Transformation. *Aquatic Procedia*, 4, 739-746. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.095>
- Ghassemian, H. (2016). A review of remote sensing image fusion methods. *Information Fusion*, 32, 75-89. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2016.03.003>
- González, F. E., Ruiz, J. M., & Acosta, F. M. (2014). *MANUEL de TÉLÉDÉTECTION SPATIALE*. 337.
- Google Earth. (s. d.). Consulté 26 juin 2021, à l'adresse <https://earth.google.com/web/@0,-35.459535,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r>
- Google Earth Engine. (s. d.). Consulté 29 juin 2021, à l'adresse <https://earthengine.google.com>
- Goyal, S., & Wahla, R. (2015). A Review on Image Fusion. International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Huang, C., Chen, Y., Zhang, S., & Wu, J. (2018). Detecting, Extracting, and Monitoring Surface Water From Space Using Optical Sensors : A Review. *Reviews of Geophysics*, 56(2), 333-360. <https://doi.org/10.1029/2018RG000598>
- Jacquemoud, S. (2008). *Téledétection et géophysique spatiale*. 36.

- Jong, S. M. de, & Meer, F. D. van der (Éds.). (2004). *Analyse d'image par télédétection : Y compris le domaine spatial, Texte d'origine*. Springer Netherlands.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2560-0>
- Khand, K., Taghvaeian, S., & Hassan-Esfahani, L. (2017). Mapping Annual Riparian Water Use Based on the Single-Satellite-Scene Approach. *Remote Sensing*, 9(8), 832.
<https://doi.org/10.3390/rs9080832>
- Klemas, V. (2015). Remote Sensing of Floods and Flood-Prone Areas : An Overview. *Journal of Coastal Research*, 314, 1005-1013. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00160.1>
- Lefkir, A. (2007). *MODÈLEISATION DU TRANSPORT SOLIDE PAR LES MODÈLES NEUROFLOUS*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3028.9366>
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Concepts and Foundations of Remote Sensing*, in : *Remote Sensing and Image Interpretation*.
- Lunetta, R. S., & Balogh, M. E. (1999). Application of Multi-Temporal Landsat 5 TM Imagery for Wetland Identification. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING*, 8.
- Martinis, S. (2010). *Automatic near real-time flood detection in high resolution X-band synthetic aperture radar satellite data using context-based classification on irregular graphs*[Text.PhDThesis, Ludwig-Maximilians-Universität München]. <https://edoc.ub.uni-muenchen.de/12373/>
- Martinis, S., Kersten, J., & Twele, A. (2015). A fully automated TerraSAR-X based flood service. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 203-212.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.07.014>
- Moorthi, A. (2020, novembre 26). How Lasso Regression Works in Machine Learning. *Dataaspirant*. <https://dataaspirant.com/lasso-regression/>
- Mueller, N., Lewis, A., Roberts, D., Ring, S., Melrose, R., Sixsmith, J., Lymburner, L., McIntyre, A., Tan, P., Curnow, S., & Ip, A. (2016). Water observations from space : Mappingsurface water from 25 years of Landsat imagery across Australia. *Remote Sensing of Environment*, 174, 341-352. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.003>
- Pena-Regueiro, J., Sebastián-Frasquet, M.-T., Estornell, J., & Aguilar-Maldonado, J. A. (2020). Sentinel-2 Application to the Surface Characterization of Small Water Bodies in Wetlands. *Water*, 12(5), 1487. <https://doi.org/10.3390/w12051487>
- Piaton, J., & Puech, C. (1992). *Water Report 16*.
<http://www.fao.org/3/W7320B/w7320b28.htm>
- Rokni, K., Ahmad, A., Selamat, A., & Hazini, S. (2014). Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery. *Remote Sensing*, 6(5), 4173-4189.
<https://doi.org/10.3390/rs6054173>

- sarmap. (2009). *SAR-Guidebook.pdf*. Synthetic Aperture Radar and SARscape. <https://www.sarmap.ch/pdf/SAR-Guidebook.pdf>
- Schowengerdt, R. A. (2006). *Télédétection, troisième édition : Modèles et méthodes de traitement d'image* (3rd edition). Academic Press.
- Schumann, G. J.-P. (2017). Remote Sensing of Floods. In G. J.-P. Schumann, *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389407.013.265>
- Singh, K., Mohan, D., Sinha, S., & Dalwani, R. D. (2004). Impact assessment of treated/untreated wastewater toxicants discharged by sewage treatment plants on health, agricultural, and environmental quality in the wastewater disposal area. *Chemosphere*, 55, 227-255. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.10.050>
- Tempfli, K., Huurneman, G. C., Bakker, W. H., Janssen, L. L. F., Feringa, W. F., Gieske, A. S. M., Grabmaier, K. A., Hecker, C. A., & Horn, J. A. van der. (2009). *Principles of remote sensing : An introductory textbook*. ITC.
- USGS. (s. d.). *USGS.gov | Science for a changing world*. Consulté 26 juin 2021, à l'adresse <https://www.usgs.gov/>
- van Zyl, J., & Kim, Y. (2011). *Synthetic Aperture Radar Polarimetry : Van Zyl/Synthetic Aperture*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118116104>
- Wang, S., Fernandes, R., & Latifovic, R. (2010, novembre 24). *La télédétection au service des études sur les eaux souterraines*. Ressources naturelles Canada. <https://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/geomatique/imagerie-satellitaire-photos-aeriennes/capteurs-methodes/visible-infrarouge/outil-developpement-technique/9720>
- Wang, Y., Ruan, R., She, Y., & Yan, M. (2011). Extraction of Water Information based on RADARSAT SAR and Landsat ETM+. *Procedia Environmental Sciences*, 10, 2301-2306. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.359>
- Zhou, Y., Dong, J., Xiao, X., Xiao, T., Yang, Z., Zhao, G., Zou, Z., & Qin, Y. (2017). Open Surface Water Mapping Algorithms : A Comparison of Water-Related Spectral Indices and Sensors. *Water*, 9(4), 256. <https://doi.org/10.3390/w9040256>