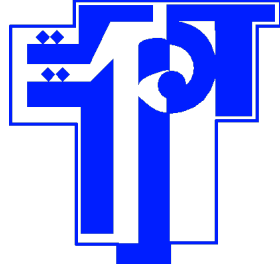


UNIVERSITÉ DE CARTHAGE

ECOLE POLYTECHNIQUE DE TUNISIE



RAPPORT DU MINI PROJET DE DATA SCIENCE

prévoir le volume du lac à partir d'images satellites

Travail Elaboré par:

BEN HAJ MOULDI Akrem
BELHAJ Sirine
CHOUCHEN Karim
DHAOUADI Amira
HAMMEMI Nacim

Sous la direction de:

Dr. ATTIG BAHAR Faten
; Dr. NAJAR Fehmi
Dr. Guetari Ramzi

June 1, 2022

Contents

1	Introduction	1
2	Présentation du problème	2
2.1	Lac Ichkeul	2
2.2	Position du problème	2
2.3	Les contraintes du problèmes	3
2.4	impact social du projet	4
3	Solution proposée	5
3.1	Choix du modèle: CNN	5
3.1.1	Traitement de profondeur sans chevauchement	5
3.1.2	Traitement de profondeur et chevauchement	5
3.1.3	Avantage du modèle	6
3.2	Les données satellitaires	6
3.3	Traitement des données	7
3.4	Création du modèle	8
4	Analyse des résultats	10
4.1	Accuracy et train loss	10
4.2	Test de prédiction	10
4.3	Discussion des résultats	10
5	Conclusion	12

List of Figures

3.1	Imageries staellites des lacs	6
3.2	Les volumes corresponds aux imageries satellites	7

1 Introduction

Les problèmes d'accès aux ressources en eau sont devenus un enjeu majeur sous les effets conjugués de la variabilité climatique, de l'accroissement démographique, de l'urbanisation et de l'industrialisation. L'irrigation des cultures représentant 70% de la consommation d'eau dans le monde, une bonne gestion des ressources en eau est nécessaire pour la mise en place de pratiques agricoles durables. Les ressources en eau sont évaluées de trois manières différentes : au moyen des mesures in situ, par modélisation hydrologique, et par télédétection satellitaire. Etant données la chute du nombre de réseaux de mesures à travers le monde et les difficultés rencontrées pour modéliser l'ensemble des réserves mondiales en eau, être capable de mesurer depuis l'espace les niveaux des eaux de surface est devenu un enjeu pour les hydrologues dans les années à venir.

Des études récentes ont montré qu'il est possible d'estimer les variations de volume d'eau de surface par combinaison d'images satellitaires des algorithmes d'Apprentissage Automatique. Des techniques similaires n'ont pour l'instant jamais été appliquées à des lacs de faible superficie. Dans cette étude, nous proposons une solution parmi les plusieurs solutions possible, basée sur le réseau de neurones convolutionnel pour le traitement d'imagerie satellite.

2 Présentation du problème

2.1 Lac Ichkeul

Le lac Ichkeul est un lac du nord de la Tunisie. Il fait partie du parc national de l'Ichkeul. Le lac est relié par le canal de Tinja au lac de Bizerte, lui-même relié à la mer Méditerranée. Il s'agit d'une zone humide couvrant une superficie totale de 12 600 hectares et servant d'hivernage pour 180 espèces d'oiseaux dont certaines sont rares. Il est formé du lac Ichkeul d'une superficie de 8 500 hectares, de marais d'une superficie de 2 737 hectares et d'un massif montagneux culminant à 510 mètres d'altitude et appelé djebel Ichkeul. Le lac offre la particularité d'être alimenté par six oueds en eau douce durant l'hiver et d'être relié à la mer Méditerranée via le lac de Bizerte par le canal de Tinja durant l'été, ce qui augmente fortement la salinité de ses eaux. Le lac est l'ultime vestige d'une chaîne de lacs qui s'étendait jadis à travers l'Afrique du Nord.

Les villes de Tinja, Mateur et Menzel Bourguiba sont les principales villes aux alentours du lac. Menzel Bourguiba et Tinja sont situées sur l'isthme séparant le lac Ichkeul du lac de Bizerte.

Le lac Ichkeul est le dernier grand lac d'eau douce d'une chaîne qui s'étendait autrefois le long de l'Afrique du Nord. Caractérisé par un fonctionnement hydrologique très particulier basé sur une double alternance saisonnière de niveaux d'eau et de salinité, le lac et les marais qui l'entourent constituent un relais indispensable pour des centaines de milliers d'oiseaux migrateurs qui viennent hiverner à l'Ichkeul.

Le Parc National de l'Ichkeul contient des habitats naturels importants en tant que site d'hivernage essentiel des oiseaux du paléarctique occidental. Chaque hiver, le bien accueille une densité exceptionnelle d'oiseaux d'eau avec des effectifs pouvant atteindre certaines années plus de 300.000 canards, oies et foulques présents au même moment. Parmi ces oiseaux, trois espèces dont la protection est d'intérêt mondial sont présentes : l'éristure à tête blanche (*Oxyura leucocephala*), le fuligule nyroca (*Aythya nyroca*) et la sarcelle marbrée (*Marmaronetta angustirostris*). De par la diversité de ses habitats, le bien abrite une faune et une flore très riches et diversifiées avec plus de 200 espèces animales et plus de 500 espèces végétales.

2.2 Position du problème

Selon un **rapport de l'ONG WWF**, le parc naturel d'Ichkeul en Tunisie figure parmi la liste des 114 sites naturels inscrits au Patrimoine mondial menacés par des activités industrielles néfastes. Cela n'est pas la seule chose menacée le lac. Le surpâturage, les conditions climatiques: les hautes températures pendant l'été, le rejet des déchets plastiques et carton,.... Cela endommage la structure de la terre d'un part et d'autre part, endommage la vie naturelle dans cette position vue que plusieurs espèces, à fortiori les oiseaux, migrent vers cette zone pendant cette période de l'année. Le problème existe au niveau de la qualité de l'eau qui circule dans le lac et par la suite dans le canal de Tinja: puisque le lac présente l'habitat de plusieurs espèces comme les poissons, ainsi, qu'une multitude des espèces consomme de l'eau provenant de cette zone. En outre, le problème touche la quantité de l'eau présente dans le lac et ses impacts sur la vie marine. Une diminution de l'eau entraîne une diminution de l'oxygène dans l'eau ce qui risque de faire mourir plusieurs espèces marines, ainsi que plusieurs espèces sauvages qui consomment l'eau provenant

de ce lac.

Toutefois, le site est menacé par la construction de barrages sur les cours d'eau en amont, ce qui accentue la salinité des eaux et perturbe l'écosystème. Une écluse est censée aider à mieux réguler les apports d'eau douce. Le site reste protégé par la modestie des aménagements d'accueil limités à un petit écomusée ainsi qu'à quelques sentiers de randonnée pédestre. En 1996, le site est inscrit sur la liste du patrimoine mondial en péril en raison d'une augmentation de la salinité de ses eaux qui menace des centaines de milliers d'oiseaux migrateurs. Un projet d'urgence est mis en œuvre par l'Unesco pour protéger le site en développant un plan de suivi pour le parc, en mettant en place une nouvelle stratégie de gestion et en conduisant à une meilleure gestion et utilisation des ressources hydrauliques du site. Les autorités tunisiennes ont mis fin à l'utilisation agricole des eaux du lac, réduisant la salinité et permettant le retour de nombreuses espèces d'oiseaux dans le parc.

Notre projet s'insiste sur l'évolution de la quantité de l'eau présente dans le lac tout au long de l'année sous l'effet des conditions climatiques comme l'humidité, les hautes températures pendant l'été... et ses impact sur la vie écologique dans cette zone. Nous avons l'accès aux différentes imageries satellites du lac à partir desquelles nous allons élaborer un modèle d'apprentissage automatique permettant de prévoir le volume du lac, à partir de ces imageries.

2.3 Les contraintes du problèmes

L'idée est basée sur le traitement des images satellites en se basant sur le fonctionnement d'un réseau de neurones convolutionnel. Cela n'est pas assez facile comme prévu à cause de la présence de plusieurs contraintes:

1. **Absence de données nécessaires:** En effet, nous avons trouvé plusieurs difficultés dans la récupération des données pour ce lac tout au long de l'année, même pour une durée courte. Pour ce type de problème, nous avons besoin d'une base des données contenant au moins deux choses: les imageries satellites ainsi que les volumes correspondantes à chaque imagerie. Pour cela, le modèle qui sera élaboré permet de prévoir le volume d'un lac à partir d'une telle base des données, donc nous avons préparé une base des données contenant les données ainsi mentionnées. La base préparée est insuffisante pour entraîner le modèle mais c'est tout ce que nous pouvons faire puisque les données doivent être présentes dès le début.
2. **Intervalle de prédiction:** Cela permet d'insister sur l'intervalle des volumes du lac sur les différentes années. c'est-à-dire, il faut définir des labels convenables sur les intervalles de la volume du lac pour ne tomber pas en erreur d'explosion des résultats.
3. **Les conditions climatiques:** Cela constitue un problème très difficile dans le traitement des données, puisque les conditions climatiques varient d'une façon rapide entre les années: La température d'aujourd'hui n'est pas la même température dans le même jour en l'année dernière et de même pour les autres conditions comme l'humidité, les radiations solaires, vitesse du vent... Pour mettre cela en considération, nous allons donner des labels sous forme d'intervalle pour donner une estimation du volume minimale et du volume maximale.
4. **Besoins en matière de protection et de gestion:** Les soucis essentiels consistent à gérer le bien de manière à contrôler l'impact sur l'écosystème des hivers moins pluvieux, à contrôler l'effet sur l'Ichkeul de l'accroissement de la demande d'eau en Tunisie en général, à restaurer complètement les marais et la ceinture de roseaux et, surtout, à reconstituer l'effectif d'oiseaux d'eau hivernants. La mise en œuvre d'un suivi scientifique régulier des principaux paramètres biotiques et abiotiques indicateurs de l'état de conservation des écosystèmes, et l'utilisation d'un modèle mathématique de prévision de leurs besoins en

eau, sont essentiels pour compléter les dispositifs mis en place et aboutir à l'utilisation optimale de la ressource en eau en vue de la conservation des écosystèmes.

2.4 impact social du projet

Dans l'optique d'une amélioration de la gestion de la ressource en eau, il est crucial de pouvoir estimer les quantités d'eau continues dans les petits lacs. En fait, la prédiction de volume permet de nous préparer en cas d'échéance ou d'inondation de l'eau. Dans les deux cas, nous pouvons prendre des mesures afin de traiter ces types de problèmes. Dans le cas d'échéance d'eau, le gouvernement peut publier des alertes en ce qui concerne ce sujet ce qui nous entraîne de prendre des précautions dans cette période d'échéance. De même, dans le cas d'inondation, les citoyens proches du lac peuvent prendre des précautions afin de traiter l'inondation de l'eau pour éviter la destruction des récoltes agricoles.

3 Solution proposée

3.1 Choix du modèle: CNN

En apprentissage automatique, un réseau de neurones convolutifs est un type de réseau de neurones artificiels acycliques, dans lequel le motif de connexion entre les neurones est inspiré par le cortex visuel des animaux. Les neurones de cette région du cerveau sont arrangés de sorte qu'ils correspondent à des régions qui se chevauchent lors du pavage du champ visuel. Leur fonctionnement est inspiré par les processus biologiques, ils consistent en un empilage multicouche de perceptrons, dont le but est de prétraiter de petites quantités d'informations. Les réseaux neuronaux convolutifs ont de larges applications dans la reconnaissance d'image et vidéo, les systèmes de recommandation et le traitement du langage naturel. L'ensemble des sorties d'une couche de traitement permet de reconstituer une image intermédiaire, qui servira de base à la couche suivante.

Un réseau neuronal convolutif se compose de deux types de neurones artificiels, agencés en couches traitant successivement l'information :

- **les neurones de traitement:**, qui traitent une portion limitée de l'image appelée **champ réceptif** au travers d'une fonction de convolution.
- **es neurones de mise en commun des sorties** dits de pooling.

3.1.1 Traitement de profondeur sans chevauchement

Dans le cadre de la reconnaissance d'image, cette dernière est pavée, c'est-à-dire découpée en petites zones. Chaque tuile sera traitée individuellement par un neurone artificiel. Tous les neurones ont les mêmes paramètres de réglage. Le fait d'avoir le même traitement, légèrement décalé pour chaque champ récepteur, s'appelle une convolution. Cette strate de neurones avec les mêmes paramètres est appelée **noyau de convolution**. Les pixels d'une tuile sont analysés globalement. Dans le cas d'une image en couleur, un pixel contient 3 entrées (rouge, vert et bleu), qui seront traitées globalement par chaque neurone. Donc l'image peut être considérée comme un volume, et notée par exemple $30 \times 10 \times 3$ pour 30 pixels de largeur, 10 de hauteur et 3 de profondeur correspondant aux 3 canaux rouge, vert et bleu.

3.1.2 Traitement de profondeur et chevauchement

Dans les faits, la zone analysée est légèrement plus grande que la tuile et est appelée **champ récepteur**. Les champs récepteurs se chevauchent donc, afin d'obtenir une meilleure représentation de l'image originale ainsi qu'une meilleure cohérence du traitement au fil des couches de traitement. Le chevauchement est défini par le pas qui représente le décalage entre deux champs récepteurs adjacents.

3.1.3 Avantage du modèle

Un avantage majeur des réseaux convolutifs est l'utilisation d'un poids unique associé aux signaux entrant dans tous les neurones d'un même noyau de convolution. Cette méthode réduit l'empreinte mémoire, améliore les performances et permet une invariance du traitement par translation. C'est le principal avantage du réseau de neurones convolutifs par rapport au perceptron multicouche, qui, lui, considère chaque neurone indépendant et affecte donc un poids différent à chaque signal entrant.

Lorsque le volume d'entrée varie dans le temps, il devient intéressant de rajouter un paramètre le long de l'échelle de temps dans le paramétrage des neurones. On parlera dans ce cas de réseau neuronal à retard temporel.

Comparés à d'autres algorithmes de classification d'image, les réseaux de neurones convolutifs utilisent relativement peu de pré-traitement. Cela signifie que le réseau est responsable de faire évoluer tout seul ses propres filtres (apprentissage sans supervision), ce qui n'est pas le cas d'autres algorithmes plus traditionnels. L'absence de paramétrage initial et d'intervention humaine est un atout majeur des CNN.

3.2 Les données satellitaires

Notre projet consiste de trouver un modèle d'apprentissage automatique permettant de prévoir le volume du lac à partir de son image satellite. Pour cela, nous avons besoins d'une base des données contenant à la fois des images satellitaires pour le lac ainsi que les volumes convenables. Puisque nous n'avons pas d'accès à la base des données du lac en question, et comme le modèle sera capable de trainer sur toutes bases des données de même type que la base en question, alors nous allons récupérer des images satellitaires des différents lacs par l'emploi de plusieurs moyen: **GOOGLE EARTH, EARTH EXPLORER,...**, ainsi que les volumes de ces lacs afin de labeliser ces images. A partir de ces données, nous allons élaborer un modèle de réseau de neurones convolutionnel permettant de prévoir le volume du lac passé en entrée du modèle.

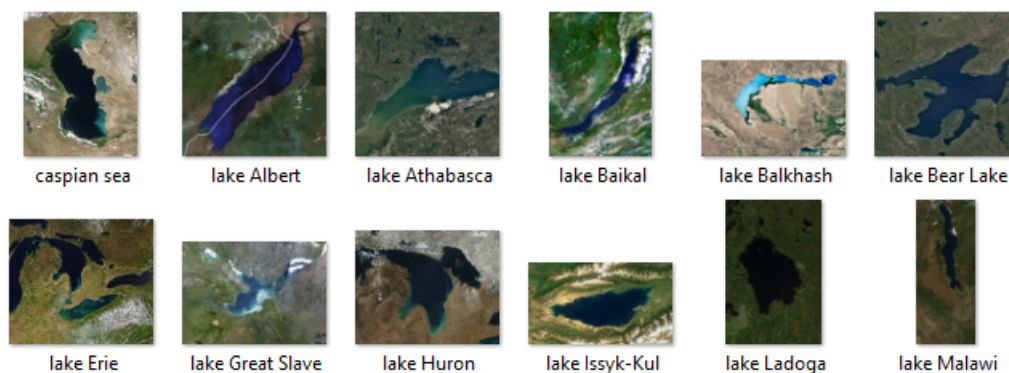


Figure 3.1: Imageries satellitaires des lacs

	A	B	
1	Lake Name	Volume	
2	caspian sea	78200	
3	lake Albert	132	
4	lake Athabasca	110	
5	lake Baikal	23600	
6	lake Balkhash	112	
7	lake Bear Lake	2236	
8	lake Erie	480	
9	lake Great Slave	1580	
10	lake Huron	3540	
11	lake Issy-Kul	1730	
12	lake Ladoga	908	
13	lake Malawi	7725	
14	lake michigan	4920	
15	lake Nettilling	114	
16	lake Nicaragua	108	
17	lake Nipigon	248	
18	lake Onega	295	
19	lake Ontario	1710	

Figure 3.2: Les volumes corresponds aux imageries satellites

3.3 Traitement des données

L'obtention du modèle nécessite la présence des données claires et cela afin d'améliorer la précision du modèle. En effet, le traitement de données comporte les étapes suivantes:

1. **Nomenclature des données:** En effet, il faut que chaque image comporterait son propre nom. Ce nom permet de faciliter l'association des volumes dans la base: la base comportera deux colonnes: une pour indiquer le nom du lac et l'autre pour indiquer le volume correspondant. Comme ci, nous aurons un lien entre l'image du lac et son propre volume.
2. **Nettoyage des données:** Cela est due à la présence des images mal traiter, c'est-à-dire des images qui ne sont pas claires ce qui endommage notre modèle et conduit à des résultats irronnés. Nous avons eliminer tous ces images ainsi que leurs volumes. De plus, nous avons trouvée des volumes non précis pour le lac en question. De même, nous avons éliminer ces volumes. Comme ci, nous avons obtenu une base des donées comportant des imageries claires avec les volumes correspondants.
3. **Classification des images:** Notre objectif est de prévoir le volume à partir des imageries. Pour cela, nous avons classifié les images de la base selon leurs volumes: Nous avons choisi un pas de $500km^3$, c'est-à-dire, les images sont classées comme suit: les images qyant des volumes entre 0 et $500km^3$ sont les premières, suivies par les images ayant un volume entre $500km^3$ et $1000km^3$, et ainsi de suite.
4. **Assemblage des classes:** Après avoir classifier les images selon leurs volumes, nous avons assembler les différentes classes des images dans un seul endroit. Et comme ci, nous avons obtenu une base des données claires, nettoyée et classifiée selon le volume des images.

3.4 Création du modèle

Une fois les données sont prêtes, nous allons commencer de créer notre modèle. En effet, par la classification des images mentionnées ci-dessus, nous avons changé le projet d'un projet de prédiction vers un projet de classification. Maintenant, lorsque nous donnons une nouvelle image au modèle, nous attendons la classe de cette image comme output. Plus précisément, le modèle va présenter des valeurs correspondantes aux probabilités pour cette nouvelle image appartient à une classe quelconque parmi les classes ainsi mentionnées ci-dessus. La création du modèle comporte les étapes suivantes:

1. **Importation des bibliothèques nécessaires:** La première chose à faire est d'importer les bibliothèques nécessaires pour créer le modèle. Les bibliothèques **numpy** et **matplotlib.pyplot** sont utilisées pour la création des vecteurs et d'afficher les images passées en entrées de modèle. De plus, nous avons besoin de la bibliothèque **Keras** et cela pour définir le corps du modèle: la création des filtres convolutionnels et les fonctions d'activation. En outre, la bibliothèque **sklearn** permettant de mélanger les données et de les diviser en des données d'entraînement du modèle et des données de test du modèle. Finalement, les bibliothèques **Os** et **opencv-python** sont utilisées respectivement pour accéder aux emplacements des données et pour lire les images présentes dans cet endroit.
2. **Téléchargement des données dans le modèle:** L'étape suivante consiste à télécharger les données dans le modèle. En effet, on accède aux emplacements des données par l'emploi de la bibliothèque **Os**, puis le téléchargement des données est très simple et cela par placer un compteur dans l'emplacement convenable, et chaque fois, on lit l'image et on la transforme en une matrice qui sera placée dans une variable qui représente les données. Une fois le téléchargement des données est terminé, nous passons à l'étape suivante dans laquelle nous allons définir les classes mentionnées ultérieurement ainsi que les volumes correspondants et tous les propriétés des images.
3. **Division des données:** Les données téléchargées dans le modèle seront divisées en deux parties: une partie qui représente 80% des données permet d'entraîner le modèle: c'est le **Training DATA** et l'autre partie permet de tester le modèle: c'est le **Testing DATA**.
4. **Création d'un modèle CNN:** Maintenant nous allons, définir le corps du modèle: ce modèle comporte des filtres de convolution de dimension 3x3, des fonctions d'activation: nous avons choisi la fonction ReLu comme fonction d'activation, ainsi d'autres propriétés permettant de créer ce type de modèle.
5. **Compilation du modèle:** Une fois le modèle est créé, on passe à l'étape de compilation et cela en utilisant la fonction **compile()** présente dans la bibliothèque **keras**. Une fois la compilation est terminée, on applique ce modèle à nos entrées: c'est les images de la base des données. Il faut donc définir les paramètres de compilation suivants :
 - **Loss:** la fonction de perte qui définira le succès ou l'échec du modèle. À chaque itération de la formation, il calculera sa perte en utilisant cette fonction pour évaluer ses performances actuelles et ajustera les paramètres du modèle en fonction de ce retour.
 - **Optimizer:** il définit comment les paramètres seront peaufinés c'est-à-dire si les paramètres doivent être modifiés de manière importante ou non importante. Vous pouvez utiliser l'optimiseur Rmsprop qui est particulièrement robuste. C'est également un choix standard pour la plupart des modèles d'apprentissage en profondeur.

- **Metrics:** définit les métriques que nous souhaitons que le modèle nous rapporte pendant la formation. La précision (accuracy) nous donne une interprétation plus humaine de la performance actuelle du modèle que la perte.

Le modèle est finalement créé, compilé et appliqué à notre entrée provenant de la base des données préparé. Une petite explication du fonctionnement de modèle: ce modèle prend une matrice, qui présente une image, en entrée, agit sur les différents coefficients de cette matrice par les filtres de convolution et les fonctions d'activation et cela pour extraire les caractéristiques de l'image à partir de cette matrice, puis, à l'aide de la fonction **softmax** il donne en sortie un réel qui correspond à la probabilité pour que l'image en entrée soit appartient à chaque classe initialement créée.

4 Analyse des résultats

4.1 Accuracy et train loss

Le mots "**Accuracy**" dans un réseau de neurones convolutionnel représente le nombre des prédictions correctes par rapport au nombre totale des prédictions. Par contre, La perte n'est rien d'autre qu'une erreur de prédiction d'un réseau de neurones, et la méthode pour calculer la perte s'appelle la fonction de perte. En termes simples, la perte est utilisée pour calculer les gradients. Et les gradients sont utilisés pour mettre à jour les poids du réseau de neurones ce qui permet d'entraîner le modèle en question.

Pour notre cas, et comme nous avons divisé la base des données en Training DATA et Testing DATA, nous pouvons voir la perte, ainsi que la précision, pendant l'entraînement du modèle et pendant le test du modèle. En effet, pendant l'étape d'entraînement du modèle, la perte vaille 0.8006299734115601 et la précision vaille 0.6671826839447021. Autrement dit, 66.72 % des prédictions sont correctes avec une erreur de 0.8 entre la valeur prédite et la valeur réelle ce qui présente un grand avantage dans notre cas: notre modèle est capable de donner des prédictions de volume avec un pourcentage de 66.72% de succès et cela représente un excellent résultat dans un cas d'insuffisance de données comme notre cas.

En ce qui concerne l'étape du test du modèle, la perte vaille 1.3153424263000488 et la précision vaille 0.4753086566925049. C'est-à-dire, le modèle permet de prédire le volume du lac à partir d'une image qui il n'a pas vu avant avec un pourcentage de succès de 47.53% avec une erreur de 1.135 entre la valeur prédite et la valeur réelle.

4.2 Test de prédiction

Afin de vérifier la prédiction du modèle, nous allons l'utiliser dans le but de prédire le volume d'une nouvelle image qui il n'apas vu avant. Nous avons téléchargé cette image dans le code, puis la transférée en une matrice afin de l'implémenter dans le modèle. Nous avons obtenu une prédiction qui montre que la plus probable est que le volume de ce lac soit appartient à l'intervalle $[0, 500Km^3]$. Ce résultat est excellent puisque l'image passé en entrée du modèle a pour volume $113Km^3$.

4.3 Discussion des résultats

Le modèle présenté dans cette étude a démontré un très fort potentiel pour le suivi des volumes d'eau et de leurs variations pour des lacs. La première constatation est qu'on peut utiliser ce modèle afin de prévoir les volumes des réservoirs de petite taille comme ceux utilisés pour l'irrigation. Le problème de ce modèle est qu'il travail à partir des images satellites, c'est-à-dire, il ne peut pas prévoir quel sera le volume du lac la semaine ou l'année prochaine. Pour cela, nous pouvons généraliser cette solution, vue son précision et sa erreur faible par rapport d'autre solution, pour prévoir le volume en donnant l'instant voulu. C'est-à-dire, on suppose par exemple que nous voulons prévoir quel sera le volume du lac l'année prochaine, alors nous pouvons

généraliser notre étude et élaborer un modèle permettant d'approcher le volume au futur en se basant sur les volumes dans l'historique.

Les principales limitations de ces techniques sont relatives :

- à la nécessité de disposer d'une courbe de tarage permettant de relier la mesure satellitaire au volume du lac.
- à la faible couverture spatiale des altimètres qui ne survolent à l'heure actuelle qu'un nombre limité de lacs.
- à la faible répétitivité des mesures spatiales, doublement pénalisante dans le cas de la synergie multi-technique.

En réalité, il existe d'autre méthode permettant de prévoir le volume du lac à l'instar de:

1. **En se basant sur des données in situ:** Les mesures de pluie proviennent d'un pluviomètre de Météo-France situé à moins de 5 km du centre du lac. Les niveaux d'eau du lac sont mesurés automatiquement chaque semaine par des capteurs de pression, et lus sur une règle chaque mois.
2. **Superficie du lac par imagerie haute résolution:** Une classification parallélipédique automatique a été appliquée à chacune des images haute-résolution pour déterminer quels pixels correspondent à de l'eau, suivant la procédure décrite par RICHARDS (1999). Les pixels correspondant à de l'eau ont ensuite été vectorisés pour en déduire la bordure du lac pour chaque image.
3. **Niveaux d'eau altimétriques:** Les hauteurs sont déduites des mesures altimétriques comme la différence entre l'altitude du satellite sur son orbite, la distance entre le satellite-sol déduite du temps d'aller-retour de l'onde électromagnétique émise au nadir et des corrections instrumentales, de propagation et géophysiques. Les niveaux du plan d'eau sont ensuite obtenus par une sélection précise des hauteurs altimétriques correspondant à la surface du lac (entre deux et cinq à chaque passage du satellite) pour obtenir une hauteur moyenne du lac lors de chaque survol du lac.

5 Conclusion

Le parc national de l'Ichkeul est un espace lacustre rétrolittoral du nord-est de la Tunisie. Ce site est aujourd'hui patrimonialisé : réserve de biosphère, site Unesco et Ramsar, Parc national de Tunisie, zone Zico. En 1996, l'Unesco inscrit le bien sur la liste du patrimoine mondial en péril en raison de la dégradation des habitats écologiques. Une série d'enjeux et de préconisations sont alors identifiés et en partie pris en compte. Si le bien a retrouvé sa valeur universelle exceptionnelle en 2006, les vulnérabilités demeurent. La zone est étudiée selon une analyse géohistorique (XVI^e-XX^e siècle) dans l'objectif d'enrichir la compréhension de son évolution et d'aider à la recherche de pistes de gestion durable des territoires. Les sources retenues sont composées de films documentaires de la période coloniale, de cartes à petite échelle et d'écrits régionaux, de cartes topographiques à grande échelle, de cartes postales et de photographies obliques. Cela conduit à démontrer l'influence de la période du protectorat français dans l'amorce de la transformation des paysages et de la vulnérabilisation de l'ensemble rétrolittoral de Bizerte-Ichkeul. Ce projet concerne le problème de prévoir le volume du lac vu que son importance dans la continuité de la vie des citoyens proches et de plusieurs types d'espèces. La prédiction du volume permet de prendre des précautions dans le cas d'échéance ou d'inondation d'eau dans le lac. De plus, il permet de bien étudier la région et cela afin de mieux présenter le système écologique de cette zone. Notre modèle arrive à prévoir le volume du lac à partir d'une imagerie satellitaire avec une bonne précision. Afin d'améliorer la précision du modèle ainsi que de bien étudier et présenter la richesse écologique de cette zone, la base des données doit être plus riche d'informations sur la zone en question.