

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



LABORATOIRE MATÉRIAUX DE GÉNIE CIVIL
ET ENVIRONNEMENT

Département d'Hydraulique

Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

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

**Intégration des produits de télédétection
dans le suivi des réservoirs**

Mohamed Reda BENANTAR

Salah Eddine KHAROUBI

Sous la direction de Mr. Mohamed Amine BOUKHEMACHA, MCA à l'ENP

Présenté et soutenu publiquement le (11/07/2019)

Composition du Jury :

Président	M. Salah Eddine Tachi	MCB	ENP
Promoteur	M. Mohamed Amine Boukhemacha	MCA	ENP
Examineur	M. Khoudir Mezouar	MCA	ENSSMAL
Examineur	M. Ali Yacine Sahnoun	MCB	ENP
Invité	M. Salim Benziada	MAA	ENP

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi 16200 Alger

ENP2019

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Hydraulique

Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

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

**Intégration des produits de télédétection
dans le suivi des réservoirs**

Mohamed RedaBENANTAR

Salah EddineKHAROUBI

Sous la direction de Mr. Mohamed Amine BOUKHEMACHA, MCA a l'ENP

Présenté et soutenu publiquement le (11/07/2019)

Composition du Jury :

Président	M. Salah Eddine Tachi	MCB	ENP
Promoteur	M. Mohamed Amine Boukhemacha	MCA	ENP
Examineur	M. Khoudir Mezouar	MCA	ENSSMAL
Examineur	M. Ali Yacine Sahnoun	MCB	ENP
Invité	M. Salim Benziada	MAA	ENP

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi 16200 Alger

ENP2019

Dédicace

Ce travail est dédié à mes chères parents, Mes Sœurs, Fedoua, Doaa, Farah et mon petit frère Haroune, qui m'encouragent tout le temps, que dieu les garde.

Aux membres de la famille Benantar qui me sont proche.

A tous mes précieux amis, qui m'ont soutenu et aidé pendant cette période de travail.

Un petit clin d'œil à mon binôme et à toutes les longues soirées de travail.

Mohamed Reda BENANTAR

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes chères parents, mon frère et toute la famille Kharoubi et Kebabsa, et plus particulièrement la famille Labdazi qui m'a soutenu et encouragé tout au long de ma formation au sein de l'école nationale polytechnique.

J'aimerais également dédier ce travail à mon binôme, ami et frère, qui a eu la patience de me supporter durant ce mémoire, et qui m'a soutenu pendant tous les moments difficiles vécus.

Salah Eddine KHAROUBI

Remerciement

Nous tenons avant tout à remercier le Dieu tout-puissant, car sans son aide et sa bienveillance, rien de cela n'aurait pu être possible.

La première personne que nous tenons à remercier notre encadreur Mr. Mohamed Amine BOUKHEMACHA, pour son orientation et sa confiance.

Nous remercions également l'ensemble du personnel de l'ANBT pour leur coopération et leur extrême gentillesse à nous fournir les données nécessaires pour l'accomplissement de notre travail.

Nous tenons à exprimer notre entière reconnaissance envers tous les enseignants de L'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, qui ont contribué à notre formation et réussite.

Nous aimerons remercier nos familles, et plus particulièrement nos parents qui par leurs prières et encouragements, nous avons pu surmonter tous les obstacles.

Nous remercions toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'exécution de ce travail, notamment, Mourad, Meriem, Zakaria et Mohamed Amine.

Mohamed Reda BENANTAR & Salah Eddine KHAROUBI

ملخص

تقع الجزائر في منطقة ذات مناخ شبه صحراوي، مما يجعل تسيير الموارد المائية و خاصة السطحية منها ضرورة حتمية في سبيل ضمان الأمن المائي.لهذا يتحتم اللجوء إلى طرق عصرية و حديثة، ومنه يعتبر من العملي الاستعانة بتقنية الاستشعار عن بعد ، و التي تعتبر واحدة من افضل التقنيات الحديثة المعروفة بدقة المعلومات التي توفرها، بالإضافة الى وفرتها الزمكانية، وفي هذا الاطار يهدف هذا المشروع الى استعمال وسائل الاستشعار عن بعد المتمثلة في صور الاقمار الاصطناعية صار و سرتم، بغرض تتبع تغير مساحة وارتفاعات السطوح المائية في الخزانات، و منه طورت منهجية، و جربت بنجاح ، على منطقة تقع في شمال الجزائر، و المتضمنة 12 خزان مائي.

الكلمات الدالة: الاستشعار عن بعد، الخزانات، تسيير الموارد المائية، صور صار، صور سرتم.

Abstract

Algeria is located in an area with semi-Arid climate, which makes the management of water resources, especially the surface one, an absolute necessity in order to ensure water security in the region. Therefore, it may be interesting/practical to rely on remote sensing, which has been recognized as one of the best modern techniques to provide spatiotemporally available data with remarkable accuracy. Within this framework, the present project, aims at integrating the use of remote sensing products as SAR and SRTM images, in monitoring the changes in hydraulic parameters (water levels and surfaces, stored volumes) of dam-reservoirs. Here an approach is developed and successfully tested using a study zone located in the Central-West of the northern part of the country with 12 dam reservoirs.

Key words: remote sensing, reservoirs, integrated water resources management, SAR Images, SRTM images.

Résumé

L'Algérie est située dans une zone au climat semi-aride, ce qui fait de la gestion des ressources en eau, notamment en surface, une nécessité absolue pour assurer la sécurité hydrique dans la région. Par conséquent, il peut être intéressant ou pratique, de s'appuyer sur la télédétection, qui est reconnue comme l'une des meilleures techniques modernes pouvant fournir des données d'une disponibilité spatio-temporelle d'une précision remarquable. Dans cette optique, le présent projet vise à intégrer l'utilisation des produits de télédétection comme les images SAR et SRTM, dans le suivi de l'évolution des paramètres hydrauliques (niveaux et surfaces d'eau, volumes stockés) des grands réservoirs des barrages. Dans cette étude, en utilisant une zone d'étude située au Centre Ouest du Nord Algérien, comprenant 12 réservoirs de barrages, une nouvelle approche est développée et testée avec succès.

Mots clés : télédétection, réservoirs, gestion intégrée des ressources en eau, images SAR, images SRTM.

Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Liste des sigles	
Introduction générale	17
I. Généralités sur les produits de la télédétection	21
I.1 Introduction	21
I.2 Onde électromagnétique.....	21
I.2.1 Définition générale.....	21
I.2.2 Caractéristiques des ondes électromagnétiques	21
I.2.2.1 Propagation et célérité.....	21
I.2.2.2 Période, fréquence, longueur d'onde et intensité.....	21
I.2.2.3 Spectre électromagnétique	22
I.2.2.4 Polarisation des ondes.....	22
I.2.2.5 Bande d'ondes.....	23
I.3 Radar	23
I.3.1 Radar à ouverture synthétique SAR.....	24
I.4 Télédétection spatiale.....	24
I.4.1 Produits de la télédétection spatiale	24
I.4.1.1 Généralités sur les différents formats des images.....	24
I.4.1.1.1 Image matricielle (Raster).....	24
I.4.1.1.2 Image vectorielle	25
I.4.1.1.3 Largeur de bande d'une image	25
I.4.1.2 Télédétection par Images radar	25
I.4.1.2.1 Les caractéristiques des images radar SAR.....	26
I.4.1.3 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).....	29
I.5 Applications du SAR.....	29
I.5.1 Missions satellitaires utilisées pour les études hydrologiques	30
I.5.2 Missions satellitaires utilisées pour l'établissement des produits de modèles numériques d'altitude (MNA)	31
II. Présentation de la zone d'étude	35

II.1	Introduction	35
II.2	Situation géographique.....	35
II.3	Grands bassins versants inclus dans la région d'étude :.....	36
II.4	Réseau hydrographique	36
II.5	Facteur Climatologique	37
II.6	Morphologie, Géologie et Relief.....	38
II.7	Barrages étudiés	39
III.	Approche et données :	42
III.1	Introduction	42
III.2	Outils de la télédétection	42
III.2.1	Outil SAR.....	42
III.2.1.1	Sentinel-1	42
III.2.1.1.1	Caractéristiques de Sentinel 1.....	42
III.2.1.1.2	Capteurs S1A et S1B	43
III.2.1.1.3	Modes opérationnels de Sentinel-1 SAR.....	43
III.2.1.1.4	Architecture et fonctions des instruments CSAR.....	43
III.2.1.1.5	Installations du traitement des instruments CSAR	44
III.2.1.1.6	Niveaux des produits Sentinel-1.....	44
III.2.1.2	SNAP 6.0	44
III.2.2	Outil SRTM.....	45
III.2.2.1	Produits SRTM 1 Arc-second Global:.....	45
III.3	Données de télédétection utilisées.....	45
III.3.1	Données de télédétection SAR	46
III.3.2	Données de télédétection SRTM.....	48
III.3.3	Données de télédétection Pluviométriques	48
III.4	Approche	50
III.4.1	Estimation des surfaces d'eau dans les réservoirs des images SAR:.....	50
III.3.1.1	Prétraitement des images SAR.....	51
III.3.1.1.1	Distorsions du signal radar	51
III.4.2	Procédure de prétraitement des images SAR sur SNAP 6.0	54
III.4.2.1	Calibration radiométrique	54
III.4.2.2	Réduction de l'effet granulaire	55
A.1-Traitement "Multilooking" ou multi-visées	55	
A.2-Traitement par filtrage spatial :	55	

III.4.2.3	Calibration géométrique :	56
III.4.2.4	Histogramme d'intensité et classification.....	57
III.4.3	Courbes Hauteur-Surface des réservoirs à partir des produits SRTM	58
III.4.4	Modélisation de la variation de volume d'eau dans les réservoirs	58
III.4.4.1	Profil convexe	58
III.4.4.2	Profil concave	59
III.4.4.3	Profil linéaire	59
III.4.5	Calcul de l'apport potentiel des pluies au réservoir	59
IV.	Caractéristiques des bassins versants	63
IV.1	Introduction	63
IV.1.1	Partie théorique	63
IV.1.2	Résultats	64
IV.1.2.1	Délimitation des bassins versants	64
IV.1.2.2	Paramètres hydrologiques et topographiques des bassins versants	65
V.	Suivi des réservoirs.....	68
V.1	Introduction	68
V.2	Données de validation	68
V.3	Paramètres statistiques utilisés	68
V.4	Courbes hauteurs-surfaces obtenues	69
V.4.1	Validation des courbes hauteurs-surfaces obtenues	70
V.4.2	Paramètres statistiques de la validation des surfaces SRTM/ANBT	71
V.4.3	Discussion	72
V.5	Suivi de la variation de surface dans les réservoirs.....	72
V.5.1	Discussion	73
V.6	Suivi des niveaux d'eau dans les réservoirs.....	73
V.6.1	Discussion	73
V.7	Suivi de la variation des volumes d'eau stockée dans les réservoirs.....	74
V.7.1	Discussion	78
V.7.2	Validation	80
V.7.2.1	Paramètres statistiques de la validation des variations de volume SRTM/ANBT	83
V.7.2.2	Discussion	84
V.8	Conclusion.....	84
	Conclusion générale.....	86

Bibliographie	88
Annexe	91

Liste des figures

Figure I-1 : Spectre (khan academy, 2018)	22
Figure I-2 : Mécanismes de construction d'images radar et optiques (avec (A): cas de capteur passif; (B): cas de capteur actif) (Ressources naturelles Canada, 2019).	23
Figure I-3 : la largeur de bande d'une image (Kumar, 2013)	25
Figure I-4 : Mécanisme de la rétrodiffusion dans le cas d'une surface lisse (Podest, 2018)...	27
Figure I-5 : Mécanisme de la rétrodiffusion dans le cas d'une surface rigide (Podest, 2018).	27
Figure I-6 : Mécanisme de la rétrodiffusion en volume (Podest, 2018)	28
Figure I-7 : Mécanisme de La rétrodiffusion en double rebond (Podest, 2018)	28
Figure I-8 : Modes d'émission et de réception d'ondes polarisées dans le cas de radars actifs (Podest, 2018).....	29
Figure II-1 : Zone d'étude.....	35
Figure II-2 : les grands bassins en Algérie (ANBT, 2019)	36
Figure II-3 : Réseau hydrographique de la région d'étude (Blog SIG and territoires, 2019) ...	37
Figure II-4 : Diagrammes climatiques des villes représentative de la zone d'étude (avec, P: précipitation mensuelle; Tmin: température moyenne minimale; Tmoy: température moyenne; Tmax: température maximale) (Data Climate, 2019).	38
Figure II-5: Ensemble structuraux géologiques maghrébines (Chanane, 2008)	39
Figure III-1 : Cycles orbitales du Sentinel-1 (Dierking et al., 2012)	42
Figure III-2 : Distribution des images SRTM (SRTM GDEM, 2014).....	48
Figure III-3 : Approche utilisée pour le calcul des variations de volumes d'eau stockés dans les réservoirs a partir des données SAR et SRTM	50
Figure III-4 : Procédure d'estimation des surfaces d'eau dans les réservoirs a partir des images SAR	51
Figure III-5 : Schéma explicatif de la distorsion geometrique : cas du camouflage (Ressources naturelles Canada, 2019).....	51
Figure III-6 : Schéma explicatif de la distorsion géométrique : cas du raccourcissement (Ressources naturelles Canada, 2019).....	52
Figure III-7 : Schéma explicatif de la distorsion géométrique : cas des zones d'ombre (Ressources naturelles Canada, 2019).....	52
Figure III-8 : Procédure de prétraitement des produits SAR	54
Figure III-9 : Résultats de la calibration radiométrique	55
Figure III-10 : Approche du traitement Multilooking (Podest, 2018).....	55
Figure III-11 : Approche du traitement par filtrage spatial (Podest, 2018).....	56
Figure III-12 : Resultat du traitement Multilooking.....	56
Figure III-13 : Résultats de la calibration géométrique.....	57
Figure III-14 : Exemple de résultats de l'analyse et classification; (A) histogramme des valeurs Sigma0_VH_dB dans SNAP 6.0; (B) séparation des classes Eau/Sol.	57
Figure III-15 : Schémas représentatifs de la forme convexe des talus du réservoir.....	58
Figure III-16 : Schémas représentatifs de la forme concave des talus du réservoir.....	59
Figure III-17 : Schéma représentatif du changement linéaire du volume	59
Figure IV-1 : Délimitation des bassins versants de la zone d'étude (SRTM GDEM, 2014) (avec BV : bassin versant).....	65
Figure V-1: Courbes hauteur-capacité pour les bassins de la zone d'étude obtenues par l'approche développée (avec Surface SRTM: surface estimée à partir des courbes hauteur-surface dérivées des images SRTM, Hauteur SRTM: hauteur d'eau dans le réservoir estimé à partir des courbes hauteur-surface dérivées des images SRTM)	70

Figure V-2: Comparaison entre les courbes hauteurs-surfaces dérivées des images SRTM et les courbes de l'ANBT (avec S: Surface d'eau dans le réservoir, Surface SRTM: surface estimée à partir des courbes hauteur-surface dérivées des images SRTM, Surface ANBT: surface estimée à partir des courbes hauteur-surface de l'ANBT)	71
Figure V-3: Séries chronologiques de la variation de la surface et hauteur d'eau (avec S: Surface d'eau dans le réservoir, H: niveau d'eau dans le réservoir)	73
Figure V-4: Séries de temps de la variation de volume pour le profil convexe (avec: ΔV convexe : variation du volume dans le reservoir calculée en utilisant le modele convexe, ΔV ANBT: variation du volume calculée avec les courbes de capacité de l'ANBT, PPotentielle : Pluies tombées sur le bassin).....	75
Figure V-5: Séries de temps de la variation de volume pour le profil concave (avec: ΔV concave : variation du volume dans le reservoir calculée en utilisant le modele concave, ΔV ANBT: variation du volume calculée avec les courbes de capacité de l'ANBT, PPotentielle : Pluies tombées sur le bassin).....	76
Figure V-6 : Séries de temps de la variation de volume pour le profil linéaire (avec: ΔV lineaire : variation du volume dans le reservoir calculée en utilisant le modele lineaire, ΔV ANBT: variation du volume calculée avec les courbes de capacité de l'ANBT, PPotentielle : Pluies tombées sur le bassin).....	77
Figure V-7: Séries de temps de la variation de volume pour le reservoir B12 pour les 3 configurations.....	78
Figure V-8: Comparaison entre la variation de volume calculée par l'approche développée et celle estimée en tilsant les courbes hauteur-capacité-surface de l'ANBT- Profil convexe	81
Figure V-9: Comparaison entre la variation de volume calculée par l'approche développée et celle estimée en utilisant les courbes hauteur-capacité-surface de l'ANBT- Profil concave	82
Figure V-10: Comparaison entre la variation de volume calculée par l'approche développée et celle estimée en utilisant les courbes hauteur-capacité-surface de l'ANBT- Profil linéaire	83

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Bandes de fréquences IEEE (Chevalier, 1999)	23
Tableau I-2: Avantages et inconvénients de la imagerie radar (Ressources naturelles Canada, 2019).....	26
Tableau I-3 : Exemples des missions satellitaires utilisées pour les études hydrologiques (Schumann et al., 2015) (European sapce agency, 2015)	30
Tableau I-4: Quelque exemples de missions satellitaires utilisées pour l'établissement des produit de modèles numériques d'altitude (MNA) (Schumann et al., 2015).	31
Tableau II-1 : Grands bassins hydrologiques Algériens (ANBT, 2019).....	36
Tableau II-2 : Listes des barrages et bassins étudiés.....	39
Tableau III-1 : Différents modes d'acquisition (European sapce agency, 2015)	43
Tableau III-2 : Chronologie de l'acquisition des produits SAR	47
Tableau III-3: Caractéristiques des images SRTM (SRTM GDEM, 2014).....	48
Tableau III-4 : Caractéristiques des données de télédétection pluviométriques utilisées (Data Climate, 2019).....	49
Tableau III-5 : Comparaison entre le filtre Lee Sigma et le traitement Multilooking	56
Tableau IV-1 : paramètres hydrologiques et topographiques calculés	63
Tableau IV-2 : Caractéristiques des bassins versants de la zone d'étude	66
Tableau V-1: Paramètres statistiques utilisés pour la validation (Sorooshian et al., 1993)	68
Tableau V-2 : Niveaux de performance (Moriassi et al., 2007)	69
Tableau V-3 : Valeurs extremes hauteur-surface des reservoirs de barrages	70
Tableau V-4: Paramètres statistiques statistiques de validation des surfaces SRTM	71
Tableau V-5: Parametres statistiques de validation des variations de volumes : cas convexe	83
Tableau V-6: Parametres statistiques de validation des variations de volumes : cas concave.	83
Tableau V-7: Parametres statistiques de validation des variations de volume : cas lineaire ...	84

Liste des abréviations

SAR : Synthetic Aperture Radar

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

H: Horizontal

V: Vertical

ANBT: Agence Nationale des Barrages et transfert

NASA: National American Space Agency

MNA : Modèles Numériques d'Altitude

InSAR : Interferometric Synthetic Aperture Radar

NCAR: National Center for Atmospheric Research

DOD: department of defence

METI: Ministry of Economy, Trade, and Industry

ASTER GDEM: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Global Digital Elevation Map

MNA: modèle numérique d'altitude

MNT : Modele numerique de terrain

DEM: Digital Elevation Modele

OM: Ouled Mellouk

OF: Oued Fodda

SY: Sidi Yakoub

SMBT: Sidi Mhamed Ben Taieba

KR: Koudiat Rosfa

ESA: European Space Agency

IW: Interferometric Wide-swath mode

WV: Wave Mode

EW: Extra Wide swath mode

SM : Strip Map Mode

SES : sous-système électronique de SAR

SAS : sous-système d'antenne SAR

CSAR : instrument SAR en bande C

SLC: Single-look Complex

GRD: Ground Range Detected

BRW: Browse

FR: Full Resolution

HR: High Resolution

SNAP: Sentinel Application Platform

S1TBX: Sentinel-1 Toolbox

USGS: United States Geological Survey

S1A: Sentinel-1 A

S1B: Sentinel-1 B

EQM : Erreur Quadratique Moyenne

ANBT : Agence Nationale des Barrages et Transferts

SIG : Système d'Information Géographique

PBIAS: Percent bias

NSE: Nash-Sutcliffe efficiency

Liste des sigles

f : la fréquence d'une onde

T : la période

λ : la longueur d'onde

c : la célérité d'onde

H_i : hauteur d'eau dans une date de suivi pour un réservoir de barrage

S_i : surface du plan d'eau dans une date de suivi pour un réservoir de barrage

$\Delta V_{i \rightarrow i+1}$: variation de volume de réservoirs de barrage entre deux (02) dates de suivi.

K_G : l'indice de compacité de Gravelius

A : surface du bassin versant

P : périmètre du bassin

l : largeur du rectangle équivalent

L : longueur du rectangle équivalent

H_{moy} : altitude moyenne du bassin versant

h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau

I_{moy} : pente moyenne

D : équidistance entre deux courbes de niveau

t_c : temps de concentration en heure

Y_{obs} : résultats observés utilisés pour la validation.

Y_{sim} : résultats simulés.

Y_{obs}^{moyen} : moyenne des résultats observés.

P_{pot} : pluie potentielle

$H_{(SRTM)}$: hauteur d'eau estimée à partir des courbes hauteur-capacité des images SRTM

$S_{(SRTM)}$: surface des plans d'eau estimée à partir des courbes hauteur-capacité des images SRTM

$S_{(SAR)}$: surface des plans d'eau des réservoirs de barrages estimée à partir des images SAR

Seq : Surface de rectangle équivalent

$Dé$: Dénivelée du bassin versant

Lb : Longueur du talweg principale du bassin versant

H_{max} :altitude max du bassin versant

H_{min} :altitude min du bassin versant

I_{moy} : pente moyenne du bassin versant

ΔV convexe : variation du volume dans le reservoir calculée en utilisant le modele convexe.

ΔV concave : variation du volume dans le reservoir calculée en utilisant le modele concave.

ΔV lineaire : variation du volume dans le reservoir calculée en utilisant le modele lineaire.

ΔV ANBT: variation du volume calculée avec les courbes de capacité de l'ANBT.

$P_{Potentielle}$:Pluies tombées sur le bassin.

Introduction générale

Les eaux de surfaces représentent une ressource inestimable pour la vie sur terre, et plus précisément pour l'homme, qui à travers les années et l'évolution des sciences de l'eau, a compris qu'il fallait un réel moyen de gestion de ces eaux de surfaces pour un meilleur contrôle et prévention des risques menaçant cette ressource. En Algérie la mauvaise répartition de la pluviométrie crée un déséquilibre dans la préservation de l'intégrité environnementale et la gestion durable des ressources naturelles du pays, sa mobilisation et sa gestion rationnelle sont donc incontournables dans toutes les infrastructures agricoles ou utilitaires, d'où la nécessité et l'importance de maîtriser les informations relatives à sa dynamique et aux risques qu'elle engendre.

Les Barrages en Algérie, représentent le pilier de cette ressource, et la plus grande réserve de ses eaux pluviales. Ils comptent une réserve en eau de surface avoisinant les 5.5 Milliard de mètres Cubes, repartis sur les différents réservoirs du pays (PROGRESS, 2016), servant ainsi à l'alimentation en eau potable, l'irrigation des champs agricoles, ou bien de simples transferts vers d'autres réservoirs. Ces derniers sont confrontés depuis plusieurs décennies à des problèmes liés, d'une part à la gestion de l'eau y étant stockée, et d'autre part à l'envasement de leurs retenues, et bien d'autre problèmes dont la solution réside vraisemblablement, dans la compréhension du comportement des paramètres influents dans un tel cas de figure.

La connaissance des variations de niveau d'eau des larges bassins alimentant l'Algérie, représente un des facteurs les plus déterminants pour la gestion intégrée des ressources en eau du pays. Cependant, la collecte de telles données hydrologiques nécessite un déploiement de l'infrastructure physique comme les pluviomètres, les stations pluviométriques, les jauges etc. ainsi que l'utilisation d'équipements coûteux comme les sondeurs, ce qui cause un réel problème dans les pays en voie de développement comme l'Algérie, qui souffre de manque d'infrastructures dédiée à la collecte des données hydrologiques, ou qui sont mal entretenues ou bien hors du service (PROGRESS, 2016). L'une des solutions à une telle problématique, est la télédétection, qui est au fil des récentes années en constant développement pour la diversité de ses applications.

L'objectif principal de la présente étude est donc d'élaborer une approche méthodologique et opérationnelle, faisant recours à différents produits de télédétection (imagerie SAR, SRTM et données météorologiques), qui puissent permettre dans un premier temps, et à partir de la télédétection, de maîtriser les informations spatiales et géo-référencées relatives aux caractéristiques morpho-dynamiques, morphologiques et hydrologiques des bassins versants Algériens, pour une gestion rationnelle des eaux stockées dans les barrages, et dans un second temps d'intégrer ces informations dans un SIG pour permettre d'obtenir des données référentielles pour le suivi de la gestion des ressources en eau. Ceci a été fait à travers la quantification des variations des réserves d'eau de surface dans une séries des réservoirs, en se basant sur la réalisation d'une série temporelle de la variation des niveau d'eau, en calculant les surfaces des plans d'eau de différents bassins du nord algérien.

Cette étude démontre l'utilité et l'efficacité d'utiliser la télédétection, pour appréhender les paramètres dynamiques de fonctionnement d'un barrage, et de disposer d'informations fiables, permettant de connaître la situation des ressources en eau, et d'estimer les causes de

dégradation d'un bassin versant, pour ensuite mettre en place des dispositifs de gestion et de suivi à l'échelle locale

Ce présent travail est composé de trois (03) parties avec cinq (05) chapitres. La première partie contient un (01) chapitre, la deuxième partie deux (02) chapitres et une dernière partie contenant deux (02) chapitres.

Le premier chapitre est une synthèse des généralités sur la télédétection, contenant une recherche bibliographique sur les pré-requis, et les différentes utilisations des produits de télédétection dans le domaine hydraulique.

Le deuxième chapitre est une présentation de la zone d'étude choisie pour ce travail, qui est la région centre ouest du nord algérien. Le choix de cette zone s'est fait selon des critères intégrant les données de télédétection disponibles, de manière à contenir le plus grand nombre de réservoirs de barrages.

Le troisième chapitre traite l'approche abordée durant ce travail, en passant par les données utilisées, la méthodologie afin d'aboutir aux résultats convoités.

Le quatrième chapitre est une synthèse des résultats sur les caractéristiques hydrologiques et topographiques des bassins versants des réservoirs étudiés.

Le cinquième chapitre est une présentation, validation et interprétation des résultats obtenus, comme séries de temps du suivi des hauteurs d'eau, des surfaces et des variations de volumes dans les réservoirs des barrages de la zone d'étude. Il est suivi par une conclusion générale qui englobera les points les plus importants à retenir.

Partie I:
Recherche bibliographique

Chapitre I :
Généralités sur les produits de la
télédétection

I. Généralités sur les produits de la télédétection

I.1 Introduction

Dans ce premier chapitre, nous commençons par introduire les prérequis concernant la télédétection spatiale, la terminologie correspondante ainsi que les différentes applications de cette technologie. Et cela, à travers la définition des paramètres essentiels de la télédétection en générale, en outre, les caractéristiques des ondes électromagnétiques et puis de la détection par radio et mesure de la distance (**Radar**) (*Radio detection and ranging*). Ainsi, nous pourrions par la suite parler des images satellitaires et présenter au mieux les informations qu'elles pourront apporter dans la suite de notre travail.

I.2 Onde électromagnétique

I.2.1 Définition générale

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, etc. Toutes ces ondes sont décrites par le même formalisme : la propagation conjointe d'un champ électrique et d'un champ magnétique (Chevalier, 1999).

I.2.2 Caractéristiques des ondes électromagnétiques

I.2.2.1 Propagation et célérité

Les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le vide et dans l'air avec une célérité $C=3 \times 10^8$ m/s. Elles peuvent se propager dans d'autres milieux, leur vitesse de propagation dans ces milieux est alors strictement inférieure à la célérité de propagation dans le vide.

I.2.2.2 Période, fréquence, longueur d'onde et intensité

- ♦ La période T d'une onde est le plus petit intervalle de temps pour lequel l'onde retrouve sa valeur initiale. La période se mesure en unité de temps.
- ♦ La fréquence d'une onde f , définie comme étant l'inverse de sa période :

$$f = \frac{1}{T} \quad (I.1)$$

Et son unité est le hertz (Hz), avec 1 Hz est équivalent à 1 s^{-1} .

- ♦ 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 :

$$\lambda = c \cdot T \quad (I.2)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (I.3)$$

Avec :

λ [m]: la longueur d'onde; c [m/s]: la célérité d'onde; T [s] : la période et f [Hz]: la fréquence.

- ♣ L'intensité électromagnétique est l'énergie électromagnétique traversant une surface unité par unité de temps, elle dépend directement de l'énergie d'onde électromagnétique.

I.2.2.3 Spectre électromagnétique

Le classement du rayonnement électromagnétique appelé spectre électromagnétique. Il représente une subdivision en bandes de fréquences liées aux applications ou à la provenance du rayonnement, c'est aussi ce spectre qui définit les domaines de fréquences, et permet leurs classements comme donné dans Figure I-1.

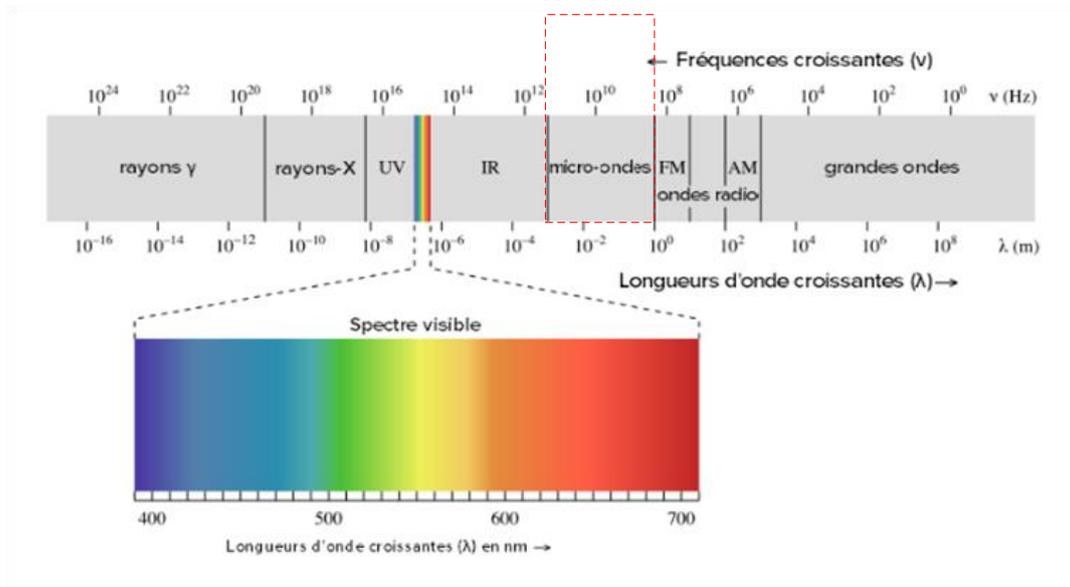


Figure I-1 : Spectre (khan academy, 2018)

Le domaine du visible correspond à des longueurs d'onde très faible (i.e. fréquences élevées) de l'ordre du micromètre (10^{-6} m), et son spectre comprend les couleurs que nous connaissons. Tandis ce que les Micro-oncles, peuvent pénétrer à travers les différents objets et ne dépendent pas de la lumière émise par d'autres objets rayonnant avec une plus faible longueur d'onde. En d'autre termes, plus grande est la longueur d'onde, moins grande sera la pénétration de l'onde à travers divers objets (Chevalier, 1999).

I.2.2.4 Polarisation des ondes

Lors de la propagation, les vecteurs \vec{E} et \vec{B} sont perpendiculaires à la direction de propagation. Mais tout en restant dans le plan, ils peuvent se déplacer et décrire différentes figures. La direction et la trajectoire décrites par les champs électromagnétiques lors de la propagation sont appelées la polarisation de l'onde. Il existe deux types de polarisation pour les ondes électromagnétiques, une polarisation verticale (V) et une deuxième horizontale (H) (Chevalier, 1999).

I.2.2.5 Bande d'ondes

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 à un symbole qui la caractérise, et un domaine de variation de fréquence, et également un domaine d'utilisation.

Le Tableau I-1 donne le découpage des bandes utilisée par IEEE (Institute of Electrotechnical and Electrical Engineers) (Chevalier, 1999).

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

Désignation	Domaine de fréquences (GHz)	Désignation	Domaine de fréquences (GHz)
Bande L	1 - 2	Bande K	18 - 26.5
Bande S	2 - 4	Bande Ka	26.5 - 40
Bande C	4 - 8	Bande Q	33-50
Bande X	8 - 12	Bande U	40 - 60
Bande Ku	12 - 18	Bande V	50 - 75

I.3 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 (Omar, 2005). 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).

Il existe également un deuxième type de détection passive, c'est lorsque un capteur capte la réflexion du faisceau de lumière du soleil redirigé par une cible, dans ce cas le capteur joue le rôle d'un récepteur seulement, et l'image résultante de ce type de détection est caractérisée comme étant optique.

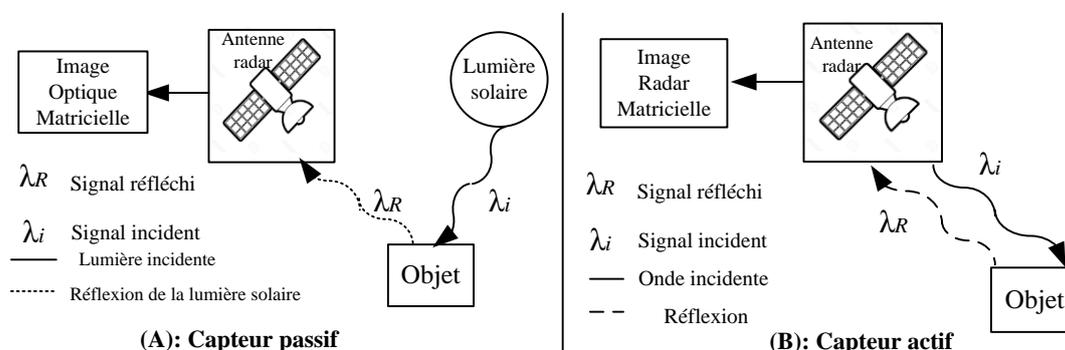


Figure I-2 : Mécanismes de construction d'images radar et optiques (avec (A): cas de capteur passif; (B): cas de capteur actif) (Ressources naturelles Canada, 2019).

I.3.1 Radar à ouverture synthétique SAR

L'antenne Radar est l'équipement responsable de la détection d'échos provenant d'une cible sur la surface de la terre pour laquelle la résolution des images satellitaires est améliorée (une résolution plus fine) en augmentant la longueur d'antenne. Cependant, obtenir une résolution utilisable n'est pas possible en augmentant la taille physique de l'antenne, mais plutôt de façon virtuelle. Pour faire ceci, il suffit de combiner tous les échos en phase lors du mouvement d'antenne entre deux émissions d'impulsion, donc construire une antenne virtuelle de très grande taille (Omar, 2005). C'est le principe d'un Radar à ouverture synthétique (*Synthetic Aperture Radar* ou SAR). Lors du passage du Radar, il envoie un faisceau d'ondes, la réflexion de ce dernier faite par une cible présente un écho qui sera capté par le Radar pour la durée du passage de la cible devant le faisceau, cette durée définit la longueur virtuelle d'antenne. Donc un Radar à ouverture synthétique utilise son mouvement selon sa trajectoire pour combiner les échos de plusieurs impulsions, redirigés par une cible pour produire une image avec une résolution plus fine.

I.4 Télédétection spatiale

La télédétection spatiale est l'ensemble des techniques qui permettent, par l'acquisition d'images, d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre (y compris l'atmosphère et les océans), sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe 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 (Ressources naturelles Canada, 2019).

I.4.1 Produits de la télédétection spatiale

I.4.1.1 Généralités sur les différents formats des images

I.4.1.1.1 Image matricielle (Raster)

L'image matricielle est certainement celle la plus répandue et la plus couramment utilisée. Elle est constituée d'une grille de Pixels représentant les points de couleur successifs de l'image. Chaque Pixel est un tout petit carré ayant une place bien définie avec sa propre couleur et l'image devient alors un quadrillage de Pixels, placés les uns à côté des autres. (Poutarédy, 2015).

I.4.1.1.1.1 Résolution d'une image matricielle

Pour certains instruments de télédétection, la distance entre la cible observée et la plate-forme joue un rôle important puisqu'elle détermine la grandeur de la région observée et le détail qu'il sera possible d'obtenir. Un capteur placé sur une plate-forme éloignée de la cible pourra observer une plus grande région, mais ne sera pas en mesure de fournir beaucoup de détails (Ressources naturelles Canada, 2019). Les images de télédétection sont composées d'une matrice d'éléments appelés pixels. Il est normalement carré et représente une partie de

l'image. Si un capteur a une résolution spatiale de 20 mètres, chaque pixel de l'image produite représentera une superficie correspondant à 20 m sur 20 m au sol (Ressources naturelles Canada, 2019).

1.4.1.1.2 Image vectorielle

L'image Vectorielle utilise également la technique du Pixel, mais cette fois, leur position et leur couleur ne sont pas figées puisqu'elles sont calculées dynamiquement par le logiciel. Autrement dit, pour afficher une ligne par exemple, le logiciel détermine le point de départ, le point d'arrivée puis la trajectoire à suivre. Ensuite, il calcule et positionne l'ensemble des pixels nécessaires pour afficher cette ligne. Il en va de même pour des formes et des couleurs plus complexes (Poutarédy, 2015).

1.4.1.1.3 Largeur de bande d'une image

La largeur de bande d'une image spatiale est la largeur de la zone située sur la surface de la Terre captée par le satellite lors de son passage (voir Figure I-3).

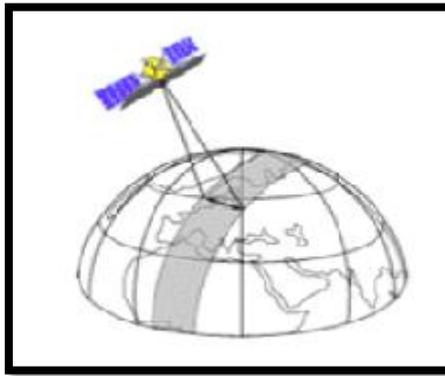


Figure I-3 : la largeur de bande d'une image(Kumar, 2013)

1.4.1.2 Télédétection par Images radar

Le produit final de la télédétection spatiale par la technologie SAR est une imageradar matricielle, avec une résolution qui varie selon plusieurs paramètres, plus particulièrement par les caractéristiques des instruments SAR utilisés, des méthodes de détection des signaux, ainsi que le matériel de façon générale. Le radar permet d'extraire deux (02) informations à partir de la rétrodiffusion du signal émis, qui sont, l'amplitude (l'intensité de l'écho réfléchi), ainsi que la phase.

La particularité des images radar, est leur efficacité lors de la télédétection, contrairement aux images optiques, qui présentent une grande dépendance vis à vis des conditions climatologiques. Tableau I-2 donne une synthèse des avantages et inconvénients des images radar.

Tableau I-2: Avantages et inconvénients de la imagerie radar (**Ressources naturelles Canada, 2019**)

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Capacité de détection durant approximativement toute condition météorologique ◆ Capacité de détection en périodes de nuit ou jour ◆ Pénétration à travers les couvertures végétales ◆ Pénétration en sous-sol ◆ Effets atmosphériques minimum ◆ Sensibilité aux propriétés diélectriques des matériaux, et aux structures (différenciation entre les objets et états de la matière liquide ou solide) 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Différence du contenu des informations des fois difficile à interpréter, par rapport à l'image optique ◆ Effet granulaire dans les images ◆ Effet de la topographie sur le contenu des images

1.4.1.2.1 Les caractéristiques des images radar SAR

1.4.1.2.1.1 La phase

La phase détermine la déformation du terrain, et donc la topographie et la géométrie des plans d'eau. Lors du passage du radar au delà d'une région, il envoie des faisceaux d'ondes, et il reçoit par la suite ces échos, la durée prise par le signal pour qu'il soit capté de nouveau par le radar est appelée la phase. Elle caractérise la distance entre la cible et le radar, donc qui définit la déformation de la zone captée par l'image.

1.4.1.2.1.2 La rétrodiffusion

La rétrodiffusion est la partie du signal radar sortant que la cible redirige vers l'antenne du radar; c'est l'intensité du signal réfléchi par la surface d'une région de la terre. Cette intensité se manifeste dans l'image sous forme de couleur, qui varie en fonction du coefficient de réflexion de la cible captée, et du type de la rétrodiffusion.

Pour résumer, la phase dans une image radar détermine la géométrie de la cible, ce qui est le cas des réservoirs de barrages, la forme du plan d'eau. Tandis que la rétrodiffusion permet la séparation entre les surfaces de natures différentes i.e. Eau et sol.

La rétrodiffusion est mesurée par le calcul du **coefficient de réflexion (σ_0)**, qui représente la mesure classique de l'intensité des signaux radar réfléchis, habituellement exprimé en dB. Il s'agit d'un nombre adimensionnel normalisé, comparant la puissance du signal réfléchi observée à celle attendue, d'une surface d'un (01) mètre carré. σ_0 est défini par rapport au plan horizontal nominal, et présente en général une variation significative avec l'angle d'incidence, la longueur d'onde et la polarisation, ainsi qu'avec les propriétés de la surface réfléchissante même (Podest, 2018).

LES MECANISMES DE LA RETRODIFFUSION

A. Rétrodiffusion en surface

A1. Surface lisse (plan d'eau, routes, etc.) :

Ce phénomène aura lieu quand la cible redirige le signal venant du Radar avec un angle d'inclinaison très important, ce qui conduit à la non détection du signal réfléchi par l'antenne du satellite. Ce phénomène résulte dans l'apparition de pixels d'une couleur noir sur les surfaces lisses dans l'image radar (Figure I-4).

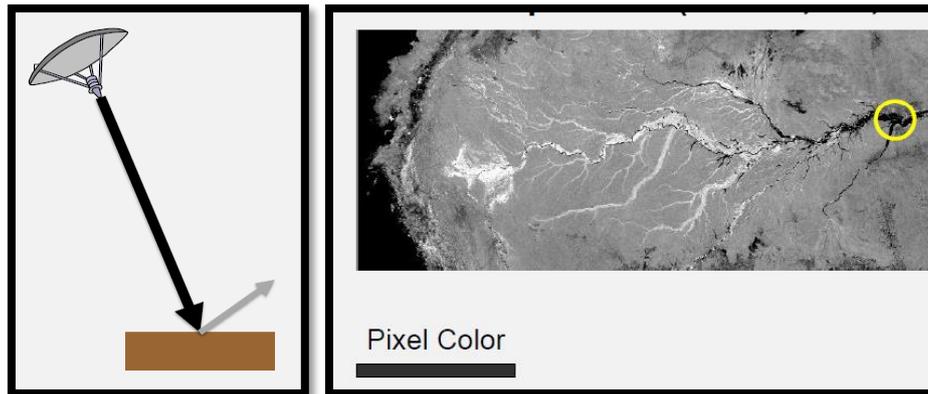


Figure I-4 :Mécanisme de la rétrodiffusion dans le cas d'une surface lisse(Podest, 2018)

A2. Surface rugueuse (surfaces déboisées)

Pour les surfaces rugueuses (non lisse), le radar capte un faisceau lumineux réfléchi affecté par les déformations de cette surface rugueuse. Ceci tend à générer plusieurs échos de retour, dont une partie va être redirigée vers le radar, et les autres parties vont être dissipées comme montré dans Figure I-5.

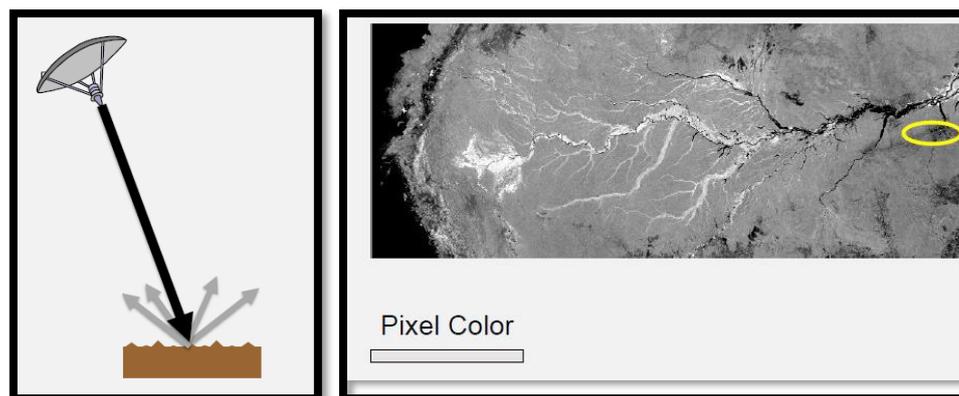


Figure I-5 :Mécanisme de la rétrodiffusion dans le cas d'une surface rugueuse(Podest, 2018)

B. Rétrodiffusion en volume (végétation)

Ce type de rétrodiffusion se produit dans le cas où le signal est renvoyé vers le satellite par une couverture végétale comme présenté dans Figure I-6.

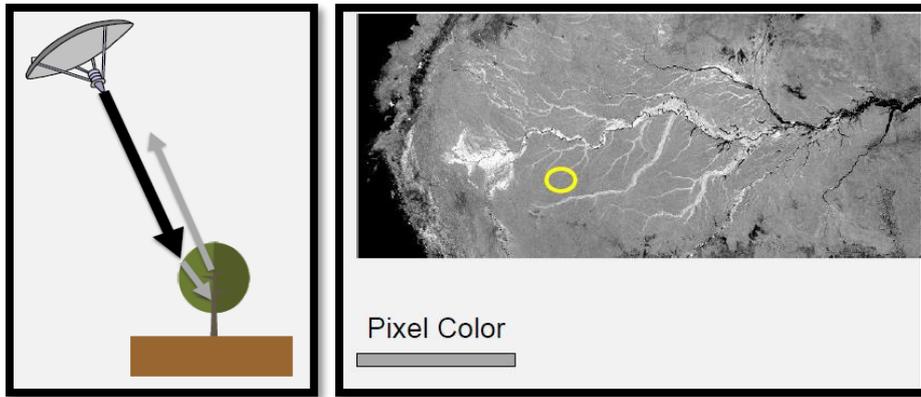


Figure I-6 :Mécanisme de la rétrodiffusion en volume (Podest, 2018)

C. Rétrodiffusion en double rebond (les zones inondées)

Ce cas se produit quand la cible redirige complètement le signal vers une autre cible, qui va par la suite renvoyer le signal vers le satellite. Dans ce cas, on dit que le signal a fait un double rebond afin qu'il soit capté de nouveau par le radar (voir Figure I-7).

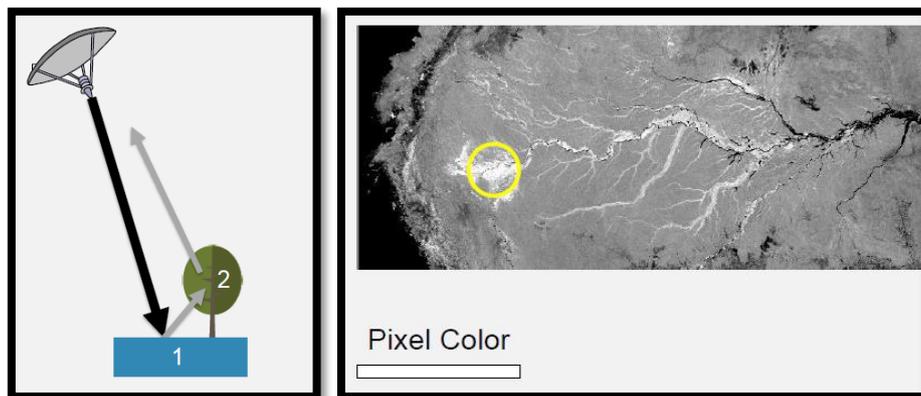


Figure I-7 :Mécanisme de La rétrodiffusion en double rebond(Podest, 2018)

I.4.1.2.1.3 Polarisation d'une image SAR

Un système radar est doté d'une antenne conçue pour transmettre et capter des ondes dans une polarisation définie (voir Figure I-8). Dans les systèmes radar simples, où l'antenne sert à l'émission et à la réception, elle est conçue pour émettre et capter la même polarisation:

- ◆ HH (Emission Horizontale - Réception Horizontale);
- ◆ VV (Emission Verticale - Réception Verticale);
- ◆ HV(Emission Horizontale - Réception Verticale);
- ◆ VH (Emission Verticale - Réception Horizontale).

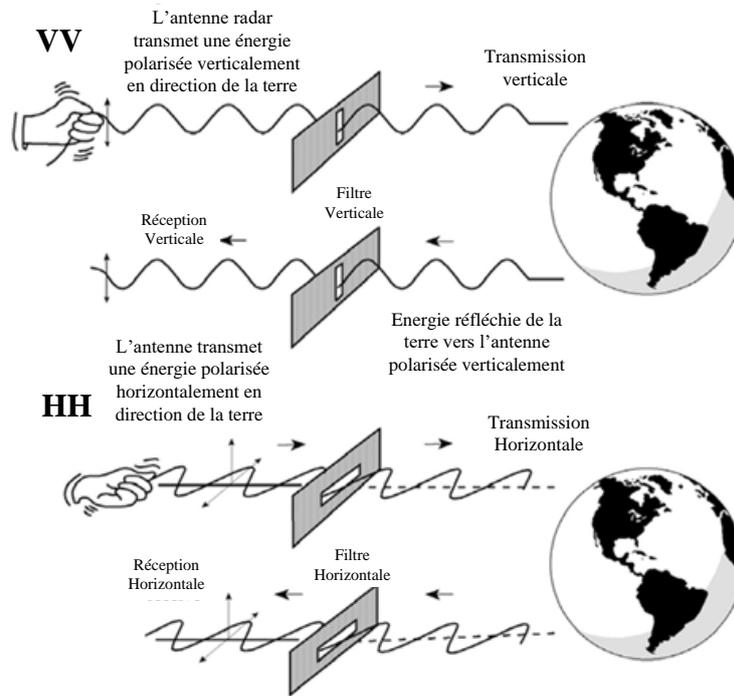


Figure I-8 : Modes d'émission et de réception d'ondes polarisées dans le cas de radars actifs (Podest, 2018).

Les systèmes radar plus complexes sont conçus pour émettre et capter les ondes dans plus d'une polarisation, donc envoyer par exemple une onde avec une polarisation horizontale ou bien verticale, et recevoir par la suite une onde rétrodiffusée horizontale et verticale (Ressources naturelles Canada, 2019). De façon générale, un système radar peut présenter différents degrés de complexité du point de vue de la polarisation :

- ◆ Polarisation simple : HH, VV, HV ou VH;
- ◆ Double polarisation : HH et HV, VV et VH ou HH et VV;
- ◆ Quadruple polarisation : HH, VV, HV et VH en même temps.

La polarisation est un paramètre très important vu de sa forte sensibilité face à la variation des propriétés des objets détectés, nous verrons par la suite, plus d'exemples sur ces faits.

I.4.1.3 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)

La SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) est une mission lancée par plusieurs agences spatiales notamment la NASA, et qui a comme but l'obtention des images de la surface terrestre par le biais d'un radar à ouverture synthétique (SAR) monté sur une navette spatiales qui survole la terre. Les données obtenues sont converties en données altimétriques appelées Modèle numérique d'altitude (MNA) et servent à produire une carte tridimensionnelle précise de la forme de la surface d'observation (Japan aerospace exploration agency, 1999).

I.5 Applications du SAR

La collecte de données hydrologiques nécessite un déploiement de l'infrastructure physique comme les pluviomètres, les stations pluviométriques, les jauges etc. ainsi que l'utilisation d'équipements coûteux comme les sondeurs, ce qui cause un réel problème dans les pays en voie de développement comme l'Algérie, qui souffre de manque d'infrastructures dédiée à la collecte des données hydrologiques, ou qui sont mal entretenues ou bien hors du

service (Musa et al., 2015). La télédétection spatiale peut résoudre ce problème, et combler les lacunes de manque de données hydrologiques, car maintenant on peut constater que les données satellitaires sont couramment utilisées pour la cartographie des plans d'eau, la mise à l'essai de modèles d'inondation, la surveillance des précipitations et la cartographie de l'étendue des inondations. Le radar est une source de données de télédétection qui acquiert des données au moyen d'instruments émettant un signal radar vers l'objet d'intérêt et mesurant l'énergie réfléchi par cet objet. Le radar peut pénétrer la couverture nuageuse et peut être acquis à tout moment, indépendamment de la disponibilité de la lumière du soleil. La caractéristique de pénétration des satellites SAR permet de mesurer l'humidité du sol, ce qui en fait un outil utile pour les études d'utilisation des sols et de couverture terrestre ainsi que pour l'observation et la surveillance de la Terre (Owe et al., 2000).

Les images SAR peuvent être utilisées également pour (Musa et al., 2015) :

- ◆ Surveillance des zones de glace et de l'environnement polaire ;
- ◆ Cartographie pour l'aide humanitaire dans les situations de crise
- ◆ Surveillance des milieux marins ;
- ◆ Surveiller les risques liés aux mouvements de la surface du sol ;
- ◆ Cartographie des surfaces terrestres : forêt, eau, sol, et agriculture.

I.5.1 Missions satellitaires utilisées pour les études hydrologiques

Nombreuses sont les missions lancées par les différentes agences spatiales, qui ont comme but l'utilisation des produits de la télédétection spatiale pour des études hydrologiques, et environnementales. Généralement la durée de vie d'un satellite est très limitée, ce qui rend le lancement de nouvelles missions primordial, pour maintenir la continuité des surveillances et l'acquisition des données. Le Tableau I-3 présente quelques missions satellitaires dédiées pour la surveillance de la surface terrestre utilisant les technologies à Micro-ondes.

Tableau I-3 : Exemples des missions satellitaires utilisées pour les études hydrologiques (Schumann et al., 2015) (European space agency, 2015)

Mission/Satellite	Agence	Bande (GHz)	Cycle de revisite (jours)	Résolution Spatiale (m)	Applications
Sentinel-1	ESA	SAR, Bande C	12	5-100	- Surveillance des zones de glace et de l'environnement polaire - Cartographie des surfaces terrestres : forêt, eau, inondations, sol, et agriculture. - Surveillance des milieux marins - Humidité des sols à faible échelle
Radarsat-2	CSA & MDA	SAR bande C	24	3-100	- Cartographie/modélisation des inondations
TanDEM-X	DLR	SAR bande X	11	3	- Modélisation des inondations.

					- Topographie de la dynamique des niveaux d'eau.
ALOS	JAXA	SAR bande L	46	10-100	- Humidité des sols à faible échelle - Cartographie des inondations
TerraSAR-X	DLR	SAR bande X	11	1-18	Ressources terrestres, océanographie. Cartographie des inondations à haute résolution.
CryoSat-2	ESA	SAR Bande Ku Radar altimètre interférométrique (SIRAL)	369	250	-Surveillance des glaces dans les eaux polaires. -Mesure de la différence de hauteur entre la glace dans les mers et l'eau adjacente, ainsi l'épaisseur de la glace.
SMOS	ESA	SAR Bande L	2-3	30-50	-Cartographier la salinité des sols et des océans. fournir des données à utiliser dans les études sur la cryosphère.

I.5.2 Missions satellitaires utilisées pour l'établissement des produits de modèles numériques d'altitude (MNA)

Le Tableau I-4 donne quelques missions satellitaires dédiées à l'élaboration des modèles numériques d'altitude (MNA).

Tableau I-4: Quelques exemples de missions satellitaires utilisées pour l'établissement des produits de modèles numériques d'altitude (MNA) (Schumann et al., 2015).

MNA	Agence	Technique	Résolution Spatiale	Précision verticale	Couverture
LiDAR	(NCAR)	Nuage de points laser	<1 - 5 m	10-20 cm	Locale
Space-borne InSAR	DOD	Interférométrie par paires d'images SAR	20 - 30 m	1.5- 3 m	Régionale a Nationale
Tan DEM-X	DLR	Interférométrie par paires d'images satellites en tandem	< 12 m	< 2 m	Régionale a globale
ASTER GDEM	NASA METI	Imagerie ortho stéréoscopique par satellite	30m	7 - 14 m	Globale
SRTM	NASA NGA	Interférométrie SAR à double antenne	90m	7 - 16 m	Globale

Il est également important de noter que l'acquisition par télédétection de données topographiques de hauteur, signifie que les irrégularités liées au traitement des données (vides et collines artificielles) ou au processus d'acquisition (ex. couvert végétal) doivent être enlevées ou éliminées.

Les produits de télédétection conduisent à des modèles numériques d'altitude (MNA) très précis; cependant, dans le cas du SRTM par exemple, les procédures d'enlèvement de

végétation sont beaucoup moins bien appréhendées et seulement en phase de recherche, ce qui implique que les MNT issues d'une image SRTM, ne constituent pas actuellement par défaut un modèle MNA à sols nus, il faudra donc éliminer la végétation pour pouvoir utiliser le modèle numérique du terrain, dans les travaux de cartographie des inondations, ou autres travaux de modélisation à faible échelle. Toutefois, il convient de noter que les gradients du modèle SRTM-MNA à des échelles suffisamment importantes (Schumann et al., 2015), peuvent être utilisés pour déduire des pentes de surface fiables de l'eau, à condition que la portée sur laquelle les gradients sont pris soit assez large pour tenir compte des erreurs dans les mesures de hauteurs SRTM, ce qui est le cas pour notre présente étude, ou nous utilisons un produit SRTM-MNA 1 Arc-Second Global, avec une résolution de 30 m, pour l'établissement des courbes de variations altitudes-surfaces, à grande échelle.

Conclusion

La télédétection est un outil qui a pris de l'envergure dans les études dans le domaine de l'hydrologie en ses différents secteurs. Malgré la diversité des techniques existantes, l'utilisation des images SAR reste une des techniques les plus efficaces dans ce domaine.

Dans ce qui suit, nous allons présenter la zone étudiée objet de notre travail, cette zone est choisie sur la base de certains critères liés aux produits de télédétection utilisés.

Partie II:
Méthodes et données

Chapitre II:

Présentation de la zone d'étude

II. Présentation de la zone d'étude

II.1 Introduction

En concordance avec notre présent travail, ou il est nécessaire de prouver l'efficacité de l'approche utilisée à grande échelle, la zone d'étude doit être choisie d'une manière judicieuse et concise, nous avons donc réalisé un recensement sur les régions du Nord Algérien, où se trouve une grande partie des réservoirs à grandes capacités dans le pays, en se basant sur les critères suivants :

- ◆ La disponibilité d'une image radar, de la zone Nord Algérien;
- ◆ Zone comportant le plus grand nombre de réservoirs possibles;
- ◆ La disponibilité des images radar plus ou moins de même empreinte ayant une récurrence temporelle consistante depuis le lancement de la mission Sentinel-1.

Après avoir fait une analyse complète basée sur les points précédemment cités, nous avons pu faire ressortir la zone du Centre-Ouest du Nord Algérien (voir Figure II-1).

II.2 Situation géographique

La région en question est comprise entre $00^{\circ} 34' 50''$ et $02^{\circ} 50' 08''$ de longitude Est, ainsi qu'entre $35^{\circ} 48' 36''$ et $36^{\circ} 46' 54''$ de latitude Nord (Figure II-1) et s'étend sur une surface de 20732.7 km^2 , et englobe cinq (05) wilayas différentes, dont les wilayas de Ain Defla, Chlef, Ghilizane, Tissemsilt, ainsi que la wilaya de Tipaza.

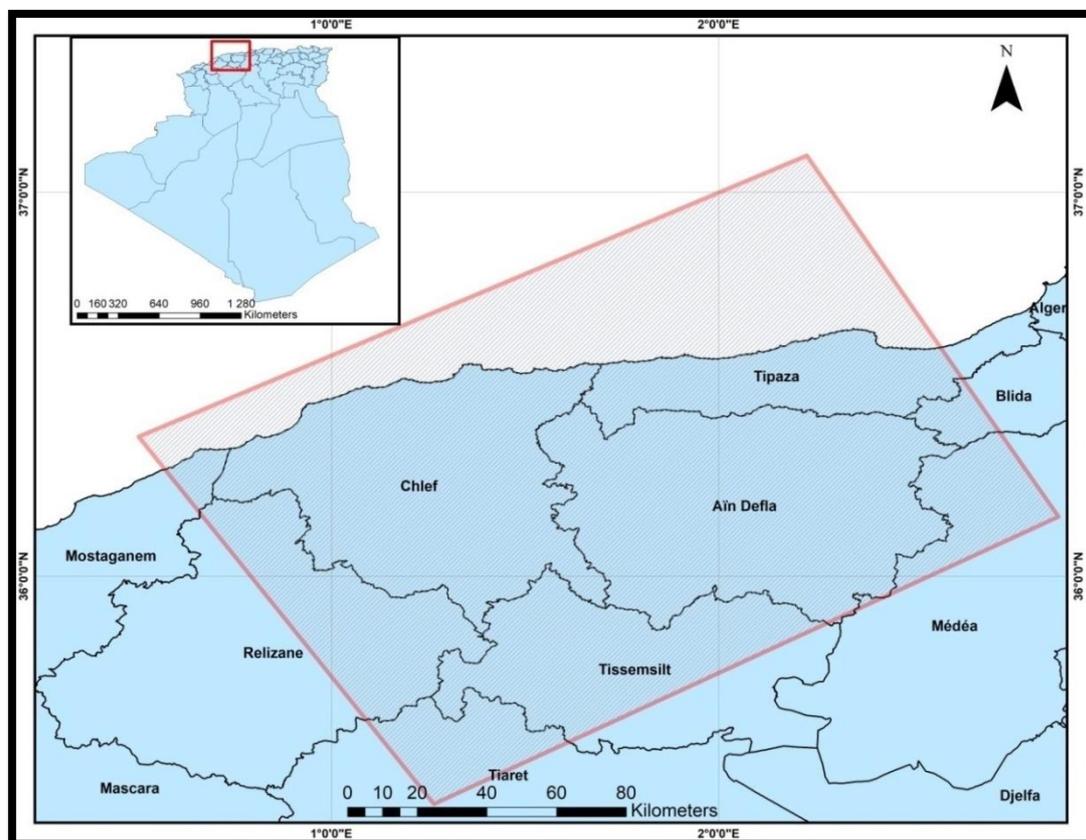


Figure II-1 :Zone d'étude

II.3 Grands bassins versants inclus dans la région d'étude :

L'Algérie est divisée en dix sept (17) grands bassins versant (voir Figure II-2).Pour notre région étude, trois (03) grands bassins y sont compris, il s'agit des bassins versants du Chélif (01), côtiers Algérois (02), et le bassin des Isser (09).

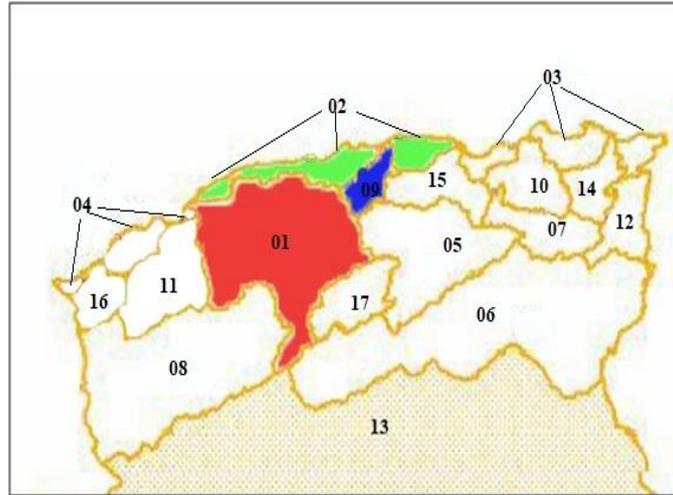


Figure II-2 :les grands bassins en Algérie (ANBT, 2019)

La légende de la figure II-2 est présentée dans leTableau II-1ci-dessous.

Tableau II-1 :Grands bassins hydrologiques Algériens(ANBT, 2019)

Numéros du bassin	Nom du bassin	Numéros du bassin	Nom du bassin
01	Chélif	10	KebirRhumel
02	Côtiers Algérois	11	Macta
03	Côtiers Constantinois	12	Medjerdah
04	Côtiers Oranais	13	Sahara
05	Chott Hodna	14	Seybouse
06	Chott Melghir	15	Soummam
07	Hautes plaines Constantinois	16	Tafna
08	Hautes plaines Oranais	17	Zahrez
09	Isser		

II.4 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de la région étudiée est présenté dansFigure II-3. Ce réseau peut être caractérisé comme étant très dense, ce qui explique le nombre important des barrages situés dans la région.Parmi les cours d'eau principaux de la région, on peut citer :

- ♣ Oued Fodda;
- ♣ Oued Sly;
- ♣ Oued Baâdoud;
- ♣ Oued Tsigout;
- ♣ Oued Tiffilès;
- ♣ Oued Talassa;

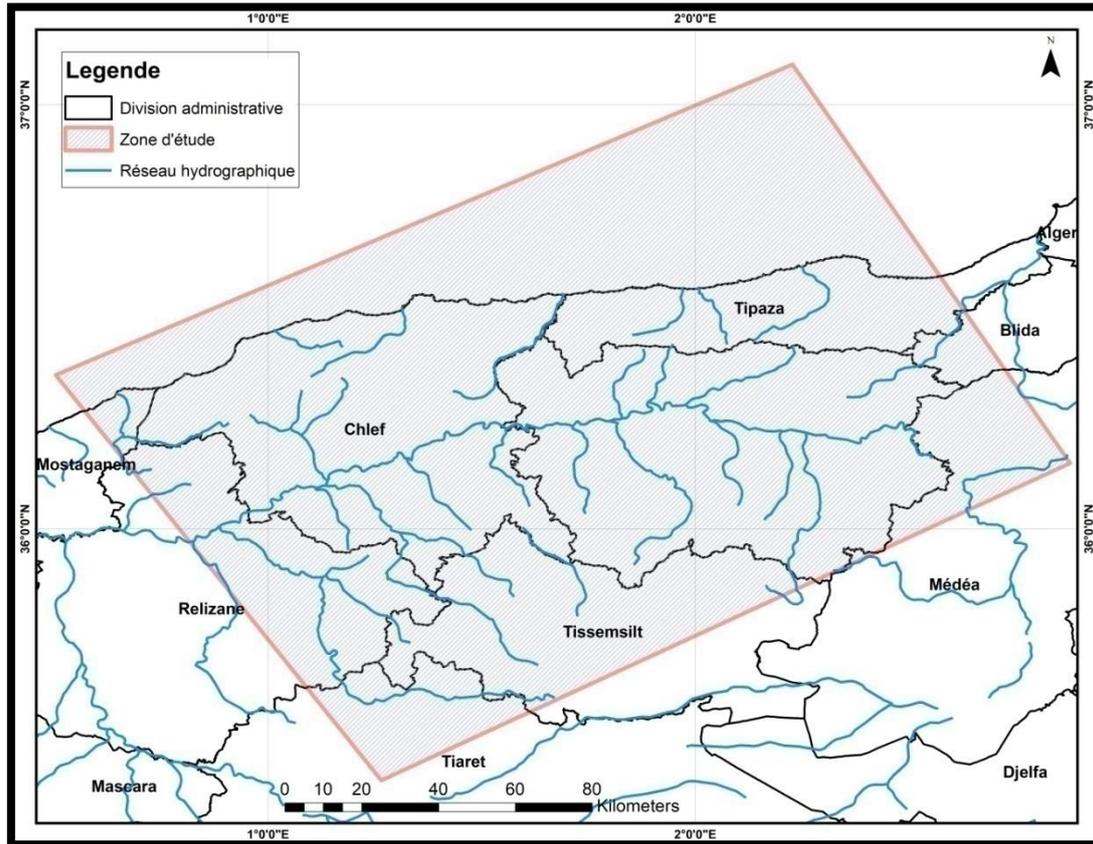


Figure II-3 :Réseau hydrographique de la région d'étude(Blog SIG and territoires, 2019)

II.5 Facteur Climatologique

Le fait de la grande étendue de la zone choisie, engendre un haut gradient de température entre les différents bassins en vu de la différence des climats entre chaque région, variant d'un Climat tempéré Méditerranéen, dans les bassins se situant au nord i.e. (les barrages Boukerdane, et Kef Eddir), avec des températures moyennes comprises entre 18.6°C et 21.4°C et des précipitations annuelles de 631 mm , à un climat chaud et tempéré en ce qui concerne les autres barrages situés plus au sud dans les Wilaya de Ain Defla et Chlef, avec des températures moyennes de 14.6°C et une pluviométrie plus importante avec une moyenne de 756 mm(Data Climate, 2019).

La Figure II-4 donne une synthèse des paramètres climatiques pour quelques villes dans la zone étudiés :

- ◆ Tipaza (Kef eddir et Boukerdane)
- ◆ Ain Defla (SMBT, OM et Harezza)
- ◆ Lardjem (Kodiat Rosfa et Deurdeur)
- ◆ Chlef (OF, Sidi Yakoub et Gergar)
- ◆ Medea (Bouroumi et Ghrib)

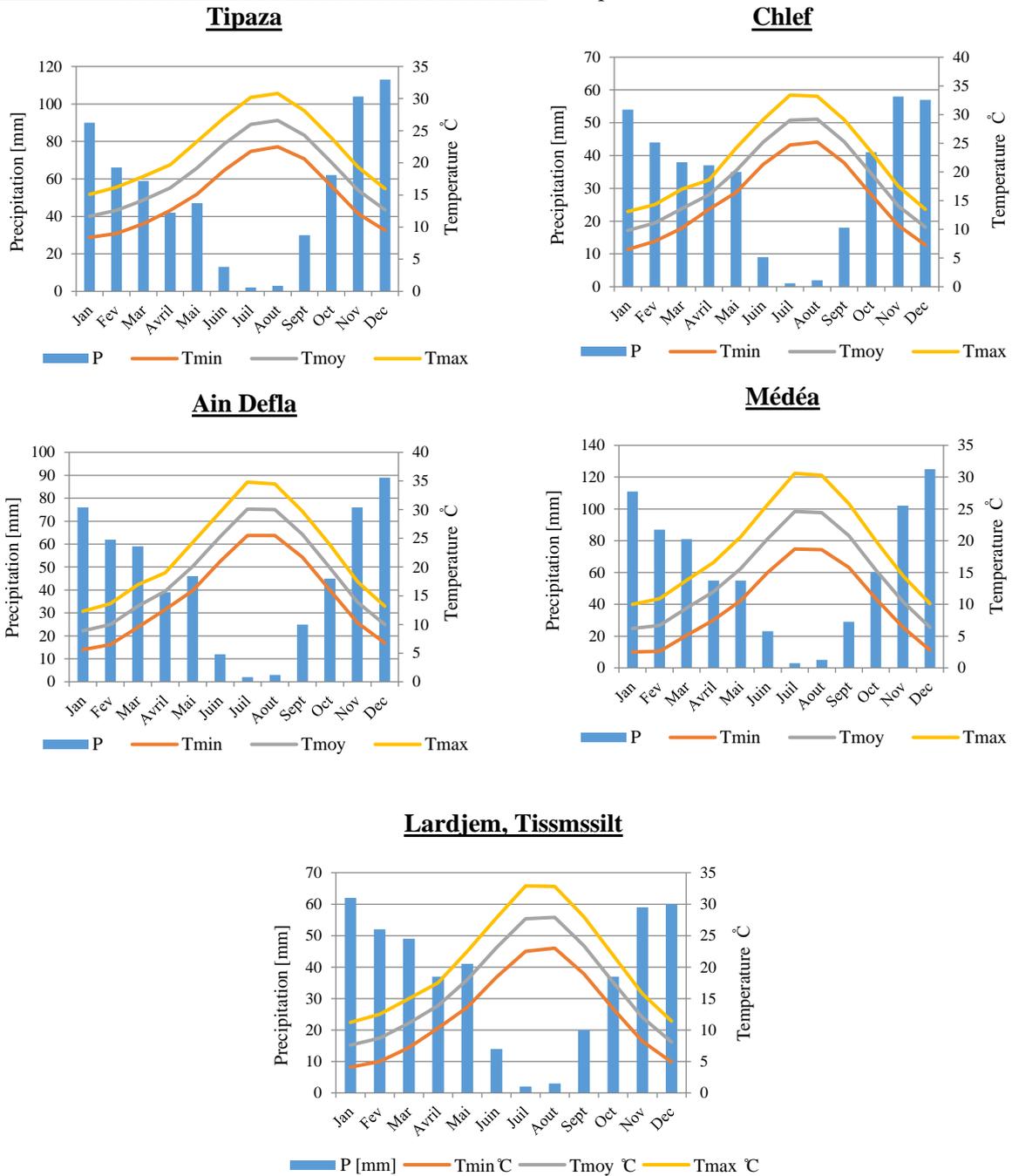


Figure II-4 : Synthèse des paramètres climatiques des villes représentative de la zone d'étude(avec, P: précipitation mensuelle; Tmin: température moyenne minimale; Tmoy: température moyenne; Tmax: température maximale)(Data Climate, 2019).

De ce fait, On peut prévoir que le climat sera un paramètre décisif dans la dynamique de la variation des volumes de ces différents bassins.

II.6 Morphologie, Géologie et Relief

La zone d'étude choisie appartient au domaine Tellien, qui représente le carrefour des grandes unités structurales de la géologie de l'Algérie du Nord, et aussi du domaine externe de l'orogène alpin de la zone méditerranéenne, ce qui revient à dire que la chaîne tellienne fait partie d'un vaste système montagneux, très bien développé, appelé géosynclinal(Chanane, 2008).Le domaine tellien correspond au Tell externe du géosynclinal, séparé du tell interne (domaine Littoral) par des nappes de flysch. Ce domaine, est structuré autour d'une chaîne

très plissée et noyée dans les surfaces du socle, elle correspond aussi à des zones de déformations structurales, indiquant des faiblesses lithosphériques absorbant les effets de collision, et témoignant d'une compression généralisée provoquant des déformations sur les rebords du bloc Sud européen et Nord africain, voirFigure II-5.

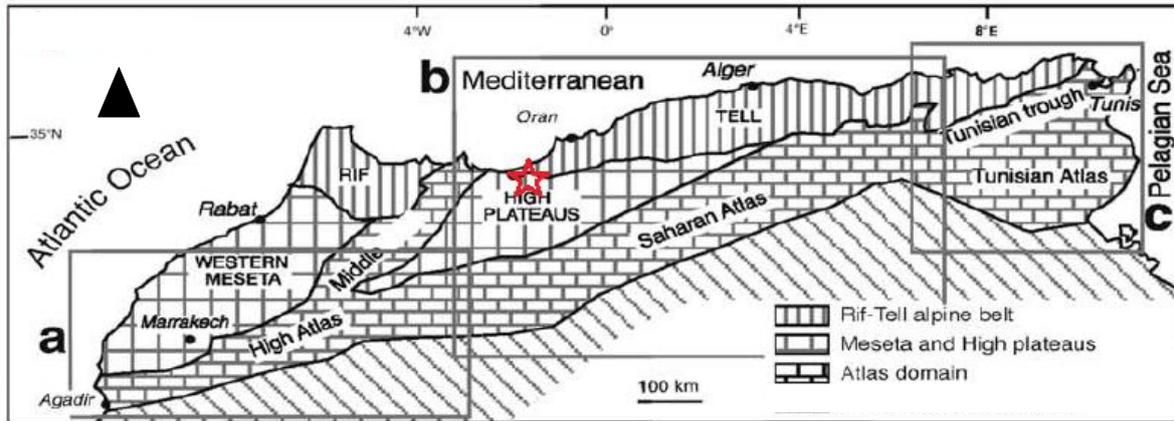


Figure II-5: Ensemble structuraux géologiques maghrébines (Chanane, 2008)

II.7 Barrages étudiés

Les réservoirs contenus dans la zone choisit appartiennent au Bassin du Chéelif, avec la présence de deux (02) réservoirs dans le bassin du Centre selon la classification de l'Agence Nationale des Barrages et Transfert (ANBT, 2019). Les bassins choisis sont présentés dans le Tableau II-2 :

Tableau II-2 :Listes desbarrages et bassins étudiés

Bassin versant	Identifiant du réservoir du barrage	Nom du barrage	Wilaya	Type du barrage	Hauteur de la crête (m)	Niveau normal de la retenue (NGA)
Bassin 1	B1	Bouroumi	Ain Defla	En terre	98	323 m
Bassin 2	B2	Sidi Mhamed Ben Taieb (SMBT)	Ain Defla	En remblai zoné	58	317 m
Bassin 3	B3	Ouled Mellouk (OM)	Ain Defla	En remblai zoné	51	243 m
Bassin 4	B4	Oued Fodda (OF)	Chlef	Poids Béton	101	370.5 m
Bassin 5	B5	Sidi Yakoub (SY)	Chlef	En terre	94	264 m
Bassin 6	B6	Gergar	Ghilizane	En remblai zoné	70	118 m
Bassin 7	B7	Boukerdane	Tipaza	En remblai	75	119.5 m
Bassin 8	B8	Harreza	Ain Defla	Homogène en limons argileux	41	313 m
Bassin 9	B9	Ghrib	Ain Defla	Enrochements	105	427.5 m
Bassin 10	B10	Derdeur	Ain Defla	En remblai zoné	56	605 m
Bassin 11	B11	Koudiat Rosfa (KR)	Tissemssilt	En remblai zoné	57	642 m
Bassin 12	B12	Kef Eddir	Chlef	En remblai zoné	95	111.25 m

NB : La présente numérotation est celle adoptée pour le reste du travail.

Cette région est connue pour la présence de nombreux barrages ayant un rôle significatif dans l'alimentation en eau potable des villes adjacentes, ainsi que leur importance capitale à desservir les agriculteurs en vue du climat semi-aride prédominant et du manque de précipitations qu'a connue la zone pendant les dernières années. Ces barrages ont aussi longtemps été sujet du phénomène d'envasement, et qui a été la cause de variations importantes dans non seulement la bathymétrie des réservoirs, mais en particulier dans leurs capacités de stockage, cas du barrage du Ghrib, et le barrage de Oued Fodda i.e. (Bassin 9 et Bassin 4 respectivement), envasés tout deux à 50% (PROGRESS, 2016).

Conclusion

Le choix de la zone d'étude est lié à la présence d'un grand nombre de réservoirs de barrages, ainsi qu'à la disponibilité des produits de télédétection englobant cette zone. Cette zone est intéressante vu l'importance des barrages s'y trouvant dans l'asservissement en eau des différents secteurs de consommation.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les différentes données de télédétection relatives à la zone d'étude, à savoir, les images radar, les images du modèle numérique d'altitude, ainsi que les données climatologiques de la zone. Ensuite, nous allons décrire notre approche dédiée à l'analyse et à l'exploitation des données citées précédemment.

Chapitre III :

Approches et données

III. Approche et données :

III.1 Introduction

Ce chapitre présente l'approche développée pour le suivi des ressources en eau de surface stockées dans des réservoirs de barrages, en utilisant des produits de télédétection qui sont pour le cas de cette étude, les images satellitaires (notamment les images SAR et SRTM) et les différents éléments dérivés de ces produits, dans le but de fournir des informations pouvant être utilisées dans la gestion des ressources hydriques.

III.2 Outils de la télédétection

III.2.1 Outil SAR

III.2.1.1 Sentinel-1

La mission Sentinel-1 comprend deux satellites SAR en bande C: (1) Sentinel-1A (S1A), lancé le 03 avril 2014, ainsi que (2) Sentinel-1B (S1B), mis en service le 25 avril 2016. Sentinel-1 fait le balayage de toute la surface terrestre, pour élaborer une archive de données cohérentes à long terme conçue pour les applications basées sur de longues séries chronologiques (Dierking et al., 2012). Sentinel-1 est la première des cinq missions que l'ESA (agence spatiale européenne) a développé pour des différentes applications (Dierking et al., 2012), notamment pour :

- ◆ Cartographie des surfaces terrestres : forêt, eau, sol, et agriculture;
- ◆ Cartographie des masses continentales, des zones côtières;
- ◆ Surveillance des routes maritimes.

III.2.1.1.1 Caractéristiques de Sentinel 1

Les satellites de Sentinel-1 tournent autour de la terre, suivant une orbite polaire (voir Figure III-1), sur une altitude de 693 km. Chaque satellite Sentinel-1 fait un balayage de tout le globe terrestre sur 175 cycles, dont la période est de 98.6 minute pour chaque cycle, et qui résulte d'une période de 12 jours pour couvrir toute la surface de la terre. Profitant de la rotation de la Terre sur son propre axe, chaque fois de nouveaux segments de la Terre seront visibles par le satellite. L'orbite du satellite et la rotation de la Terre fonctionnent ensemble pour permettre une couverture complète de la surface terrestre, après un cycle complet d'orbites (Dierking et al., 2012), (Kumar, 2013).

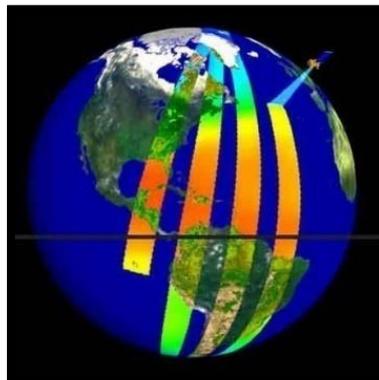


Figure III-1 :Cycles orbitales du Sentinel-1 (Dierking et al., 2012)

Ainsi, la mission Sentinel-1 permet par le biais de ses deux (02) satellites S1A et S1B, la couverture d'une zone sur le globe terrestre avec une fréquence d'acquisition de 6 jours, et une fréquence de 12 jours en se basant sur l'un des deux satellites (i.e. S1A ou S1B).

III.2.1.1.2 Capteurs S1A et S1B

Un satellite de la mission Sentinel-1, porte un seul instrument radar à ouverture synthétique (SAR) en bande C fonctionnant à une fréquence centrale de 5,405 GHz. Il comprend une antenne réseau à commande de phase active à l'apparence droite offrant un balayage rapide en altitude et en azimut avec une capacité de stockage de données de 1410 Gb (Dierking et al., 2012).

III.2.1.1.3 Modes opérationnels de Sentinel-1 SAR

Les principaux modes d'acquisitions pour la mission Sentinel-1 sont (European space agency, 2015):

(1) le mode interférométrique à large bande (IW - *Interferometric Wide-swath mode*); (2) le mode d'onde (WV - *Wave Mode*) et pour des raisons de continuité et pour satisfaire les nouveaux besoins des utilisateurs deux (02) autres modes sont ajoutés par la suite (le mode EW et SM), le mode de bande extra large et carte à bandes. Plus de détails sur les différentes modes d'acquisition sont présentés dans Tableau III-1.

Tableau III-1 : Différents modes d'acquisition (European space agency, 2015)

mode d'acquisition	abréviation	Résolution spatiale (mxm)	Largeur de bande (km)	utilisation
Mode interférométrique à large bande	(IW)	5x20	250	Imagerie routine des sols
Mode d'onde	(WV)	5x5	50	Imagerie routine des surfaces océaniques
Mode de bande extra-large	(EW)	25x40	400	Surveillance des côtes et des océans
Mode Carte à bandes	(SM)	5x5	80	Commande spéciale seulement

III.2.1.1.4 Architecture et fonctions des instruments CSAR

L'instrument CSAR est un radar à ouverture synthétique fonctionnant dans la bande C en polarisation horizontale et verticale pour l'émission et la réception. Il est composé de deux sous-systèmes principaux :

- ◆ Le sous-système électronique de SAR (SES)
- ◆ Le sous-système d'antenne SAR (SAS).

Le premier système (SES) joue le rôle d'un générateur de signal Radar à base bande C. Ce signal est distribué aux amplificateurs à haute puissance à l'intérieur des modules d'émission/réception. Le rayonnement du signal et la réception de l'écho sont réalisés avec la

même antenne à l'aide de radiateurs à guide d'ondes à fentes. En réception, le signal écho est amplifié par les amplificateurs à faible bruit à l'intérieur des modules d'émission/réception. Après filtrage SES, le signal d'écho est numérisé pour l'enregistrement (Dierking et al., 2012).

III.2.1.1.5 Installations du traitement des instrumentes CSAR

Après avoir accompli l'acquisition d'image, les installations du traitement au niveau des instruments peuvent générer des produits :

- ◆ Slant Range, Single-look Complex (SLC);
- ◆ Ground Range, Multi-look, Detected (GRD);
- ◆ Browse (BRW).

Les images sont classées par la suite selon leurs résolutions en 3 catégories suivantes:

- ◆ *Full Resolution* (FR) (résolution pleine) obtenue à partir du mode d'acquisition SM;
- ◆ *High Resolution* (HR) (haute résolution) obtenue à partir du mode d'acquisition SM, IW et EW ;
- ◆ *Medium Resolution* (MR) (résolution moyenne) obtenue à partir du mode d'acquisition SM, IW, EW et WV.

III.2.1.1.6 Niveaux des produits Sentinel-1

A-Niveau 0

Les produits de niveau 0 contiennent les paquets source, non traités qui vont être stockés pour la conservation à long terme des données et peuvent être utilisés pour générer tout type de produit à partir des archives pendant la durée de la mission et pendant 25 ans après la fin des opérations du segment spatial. Ce produit est généré à la station de réception juste après l'acquisition. Les produits de Niveau 0, sont généralement les produits (RAW), autrement dit, produits brutes.

B-Niveau 1

Données reconstituées à pleine résolution, référencées dans le temps est accompagnées avec des informations auxiliaires, y compris les coefficients d'étalonnage radiométrique et géométrique et les paramètres de géoréférencement. Les données peuvent être corrigées et étalonnées par radiométrie à pleine résolution spatiale.

Dans notre cas, les données de niveau 1, sont les plus aptes à répondre aux exigences de notre travail, c'est à dire pour le suivi des plans d'eau en surface, n'ayant pas besoin de données plus raffinées. Les produits de Niveau 1, sont généralement les produits de type (SLC), (GRD) et (BRW) définis précédemment.

C-Niveau 2

Ce sont des données et des paramètres géophysiques dérivés des données de niveau 1.

III.2.1.2 SNAP 6.0

SNAP est un outil développé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA), et constitue une plateforme commune pour tous les produits Sentinel, appelée "Sentinel Application Platform" (SNAP). Il permet le traitement et l'analyse des images provenant des différentes

missions Sentinel. L'architecture SNAP est élaborée sur la base d'innovantes technologies qui entame des boîtes à outils d'affichage et navigation très rapides pour les images, même avec celles composées de giga-pixel, et aussi la possibilité de créer des chaînes de traitement définies par l'utilisateur pour la gestion avancée des couches d'images (European sapce agency, 2015).Le logiciel SNAP 6.0 est open source et peut être accessible et téléchargé sous toutes ses versions via le site web : (<http://step.esa.int/main/download>).

Pour notre part, et en vu de notre cas d'étude, nous avons téléchargé, en plus du logiciel SNAP 6.0, le (S1TBX), qui est la boîte à outil contenant les commandes et outils de traitement relatif aux produits de la mission Sentinel1, sous laquelle nous avons effectué le prétraitement des images satellitaires utilisées.

III.2.2 Outil SRTM

Dans le but de calculer les caractéristiques des réservoirs de barrage et bassins versants correspondants, et y extraire les informations topographiques concernant les différents bassins étudiés, il est nécessaire d'avoir recours à des cartes topographiques représentant le profil altimétrique de la région étudiée. Pour ce faire, nous avons opté pour un produit de la télédétection, qui est les images SRTM(SRTM GDEM, 2014).

La couverture totale de notre zone d'étude nécessite la combinaison de six (6) images SRTM de type 1 Arc-second Global. Les images SRTM(SRTM GDEM, 2014)utilisées représentent un modèle numérique d'élévation, et sont disponibles gratuitement sur la plateforme d'USGS.

III.2.2.1 Produits SRTM 1 Arc-second Global:

Le produit de "The Shuttle Radar Topography Mission" (SRTM),est obtenue grâce à une technique appelée interférométrie radar où deux images radar sont prises à des endroits légèrement différents. La différence d'attribues entre ces images, permet de calculer l'élévation ou le changement de surface.La NASA et l'agence d'intelligence géo spatiale (NGA)ont lancé la première mission SRTM pour participer à un projet international d'acquisition de données radar qui a servi à créer le premier ensemble quasi mondial d'élévations terrestres.Les données d'élévation offrent une couverture mondiale à une résolution de 1 seconde d'arcet fournissent une distribution ouverte de cet ensemble de données globales à haute résolution.

III.3Données de télédétection utilisées

L'approche développée dans cette étude pour le suivie hydrologique des réservoirs de barrage de est basée sur les jeux de données (produits de télédétections) suivants :

- ◆ Les données SAR (31 images);
- ◆ Les données SRTM (6 images);
- ◆ Les données pluviométriques (12 séries de temps).

III.3.1 Données de télédétection SAR

La collecte des données SAR s'est basée sur une analyse complète de l'ensemble des images S1A et S1B relatives à notre zone d'étude (couverture spatiale et temporelle), disponibles gratuitement dans le portail web d'acquisition des données la mission Sentinel-1 (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). Ceci nous a permis dans un deuxième temps, de ressortir à partir des données recueillies, un calendrier contenant les différentes dates possible pour l'acquisition des images de la zone d'étude, et puis de choisir un pas de temps constant entre les images de la zone d'étude.

Bien que la mission Sentinel-1 permet à travers ses deux satellites S1A et S1B, d'avoir une récurrence périodique de six (06) jours, nous avons dans un premier temps, choisit pour ce projet de travailler avec une résolution temporelle de trente (30) jours, et ceci afin d'augmenter la longueur de la période de suivi (tout en réduisant le volume de données nécessaire pour réaliser un suivi sur la même période avec une plus grande résolution temporelle). Notons que pour le future, il serait judicieux d'entrevoir un pas de temps plus fin, pour permettre un meilleur suivi à l'échelle hebdomadaire (06 jours), et ainsi obtenir plus de précision dans le suivi des niveaux d'eau des réservoirs.

Le choix du pas de temps s'est fait en tenant compte des points suivant :

- ◆ La récurrence d'une même image acquise d'un même satellite (S1A ou S1B) est de 12 jours;
- ◆ La récurrence d'une image couvrant approximativement une même zone en alternant les satellites (combinaison S1A/S1B) est de 6 jours;
- ◆ Il existe une légère différence ou décalage spatial entre les images des différents satellites (S1A et S1B). Il faudra donc tenir compte des images des fois trop décalées, et trouver une date plus proche pour la remplacer (un (01) jour maximum).
- ◆ S'assurer de la disponibilité d'une image dans le même passe d'orbite, soit *Ascendant* ou *Descendant*; car le changement dans l'orientation du passe d'orbite, peut générer des effets d'ombres d'orientation différentes.

L'approche utilisée dans l'acquisition de ces données, a permis de dégager un calendrier des différents produits relatifs à chaque date de télédétection donné dans le Tableau III-2, mettant en évidence les images SAR utilisées et leurs caractéristiques.

Tableau III-2 : Chronologie de l'acquisition des produits SAR¹

Numéro Image	Date	Passé d'orbite	Mission	Mode d'acquisition	Type de produit	Résolution	Niveau de processing	Polarisation
01	08/10/2016	Ascendant	S1A	IW	GRD	HR	Niveau 1	VV+VH
02	07/11/2016	Ascendant	S1B					
03	07/12/2016	Ascendant	S1A					
04	06/01/2017	Ascendant	S1B					
05	05/02/2017	Ascendant	S1A					
06	08/03/2017	Descendant	S1B					
07	06/04/2017	Ascendant	S1A					
08	07/05/2017	Descendant	S1B					
09	05/06/2017	Ascendant	S1A					
10	05/07/2017	Ascendant	S1B					
11	04/08/2017	Ascendant	S1A					
12	03/09/2017	Ascendant	S1B					
13	03/10/2017	Ascendant	S1A					
14	02/11/2017	Ascendant	S1B					
15	02/12/2017	Ascendant	S1A					
16	01/01/2018	Ascendant	S1B					
17	31/01/2018	Ascendant	S1A					
18	02/03/2018	Ascendant	S1B					
19	01/04/2018	Ascendant	S1A					
20	01/05/2018	Ascendant	S1B					
21	31/05/2018	Ascendant	S1A					
22	30/06/2018	Ascendant	S1B					
23	30/07/2018	Ascendant	S1A					
24	29/08/2018	Ascendant	S1B					
25	28/09/2018	Ascendant	S1A					
26	28/10/2018	Ascendant	S1B					
27	27/11/2018	Ascendant	S1A					
28	27/12/2018	Ascendant	S1B					
29	26/01/2019	Ascendant	S1A					
30	25/02/2019	Ascendant	S1B					
31	27/03/2019	Ascendant	S1A					

Remarque : Il convient de mentionner qu'il a été nécessaire d'utiliser deux images avec le passe d'orbite Descendant, pour cause de manque de données sur quelques bassins pour deux dates, au niveau des images en orbite Ascendant.

¹<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

III.3.2 Données de télédétection SRTM

Les caractéristiques des six (06) images SRTM, de type 1 arc seconde globale utilisée dans le but d'obtenir un MNA couvrant l'étendu spatial de la zone d'étude sont présentées dans la Figure III-2 :

Tableau III-3: Caractéristiques des images SRTM(SRTM GDEM, 2014)

Nr.	Référence de l'image	Résolution [m x m]	Date d'acquisition	Couverture
01	n35_e000_1arc_v3	30 x 30	23/ 09/2014	35°N_36°N; 0°E_1°E
02	n35_e001_1arc_v3	30 x 30	23/ 09/2014	35°N_36°N; 1°E_2°E
03	n35_e002_1arc_v3	30 x 30	23/ 09/2014	35°N_36°N; 2°E_3°E
04	n36_e000_1arc_v3	30 x 30	23/ 09/2014	36°N_37°N; 0°E_1°E
05	n36_e001_1arc_v3	30 x 30	23/ 09/2014	36°N_37°N; 1°E_2°E
06	n36_e002_1arc_v3	30 x 30	23/ 09/2014	36°N_37°N ; 2°E_3°E

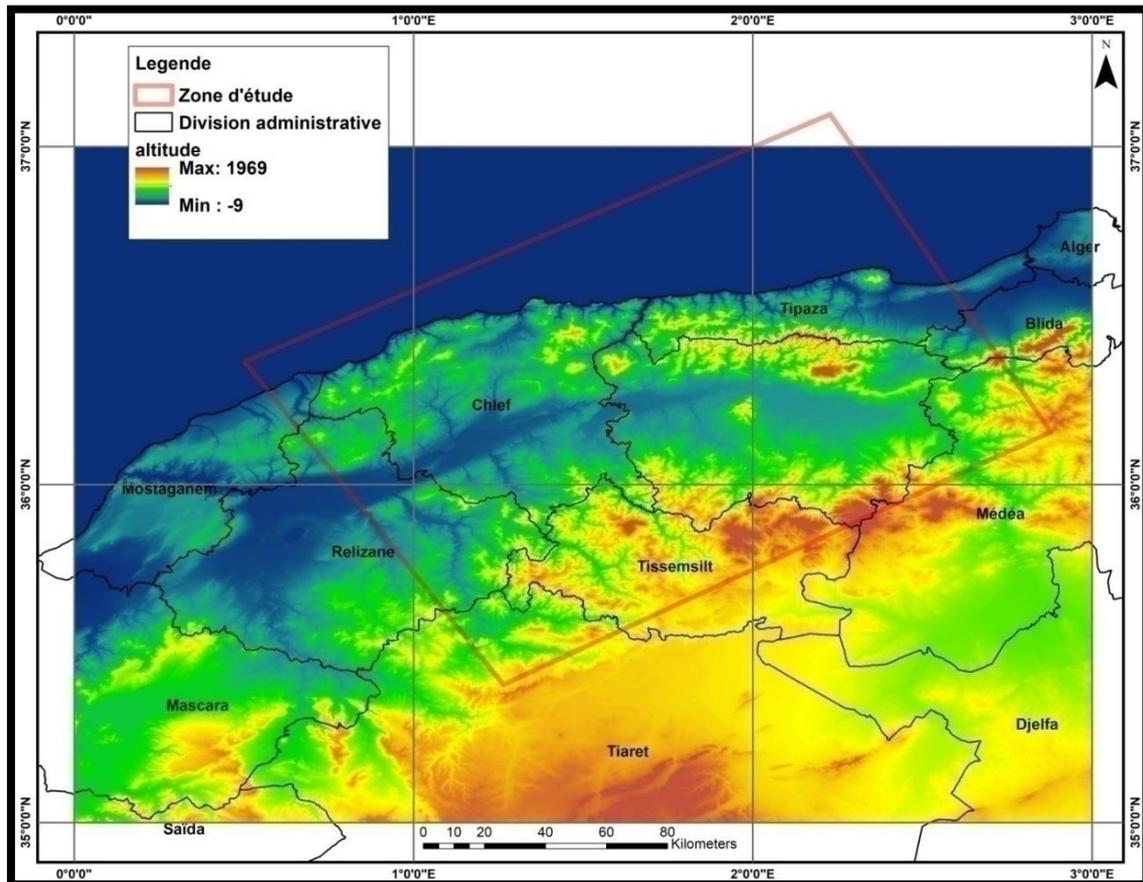


Figure III-2 : Distribution des images SRTM(SRTM GDEM, 2014)

III.3.3 Données de télédétection Pluviométriques

Les données pluviométriques utilisées dans le cadre de cette étude, ont été acquies à partir de la base de données de NASA POWER Data Access Viewer, un portail Web à accès gratuit

à des données climatologiques établis dans le cadre du programme de recherche en science de la terre de la NASA, visant à promouvoir les systèmes satellitaires pour la recherche.

Ces produits satellitaires modélisés se sont avérés suffisamment précis, pour être un bon compromis, et fournir des données fiables sur les ressources solaires et météorologiques dans les régions, où les mesures de surface sont rares ou inexistantes, comme (Chandler & Whitlock, 2003) ont prouvé dans leur étude intitulée « *NASA CLIMATOLOGICAL DATA FOR RENEWABLE ENERGY ASSESSMENT* ».

▪ **Méthodologie d'acquisition et de stockage des données de NASA POWER :**

L'acquisition des données météorologiques est achevée par le biais des satellites météorologiques utilisant des capteurs optiques fonctionnant sous les bandes visible, infrarouge et proche infrarouge. Les paramètres contenus dans les archives de POWER Data Access Viwer, sont basés sur des observations satellitaires à partir desquelles des valeurs d'insolation de surface sont déduites. Les paramètres météorologiques sont basés sur le modèle d'assimilation MERRA-2 (Stackhouse et al., 2018).

Remarque : Pour acquérir les données sur la plateforme de POWER Data Access Viwer, l'utilisateur doit introduire les coordonnées d'un point sur la surface de la terre où il souhaite avoir des informations. Dans notre cas, et afin d'avoir des données pluviométriques plus représentatives sur les bassins versants des réservoirs étudiés, nous avons posé comme hypothèse, de prendre comme coordonnées, les centre de gravité des différents bassins versants. Cette hypothèse permet d'approximer les pluies tombées, à des pluies potentielles uniformes sur l'ensemble du bassin versant.

Les caractéristiques des données pluviométriques obtenues à partir de cette source sont synthétisées dans le Tableau III-4 :

Tableau III-4 : Caractéristiques des données de télédétection pluviométriques utilisées (**Data Climate, 2019**)

Nr.	Bassin versant	Coordonnées		Période	Résolution temporelle
		Latitude	Longitude		
01	Bouroumi	36.3149	2.61861	2016-2019	Un (01) jour
02	SMBT	36.379	2.10351		
03	Ouled Mellouk	36.0395	1.91351		
04	Oued Fodda	35.8668	1.75251		
05	Sidi Yakoub	35.8169	1.49531		
06	Gergar	35.6411	1.27941		
07	Boukerdane	36.4768	2.25031		
08	Harreza	36.12671	2.07651		
09	Ghrib	36.05311	2.74711		
10	Derdeur	35.92141	2.19481		
11	Koudiat Rosfa	35.79331	1.83641		
12	Kef Eddir	36.39871	1.59961		

III.4 Approche

En vue de fournir un produit pouvant être utilisé pour le suivi de l'évolution des paramètres les plus influents dans le suivi de l'état de remplissage des réservoirs dans le temps, nous avons adopté une approche se basant sur l'utilisation de deux (02) produits de la télédétection, qui sont les images SAR chronologiques et les images SRTM.

L'approche consiste en l'utilisation des images SAR, pour estimer pour chaque réservoir de barrage dans la zone d'étude, les surfaces d'eau S_i correspondantes à une date i , et construire des séries de temps de la variation des surfaces S_i . En parallèle, on utilisera les produits SRTM pour dériver à l'aide d'un SIG, les courbes Altitude-Surface de chaque réservoir de barrage. En combinant ces deux éléments, on transforme les séries décrivant la variation des surfaces d'eau des réservoirs, en série de temps de la variation des hauteurs d'eau (H_i), puis modéliser la variation des volumes d'eau stockés (ΔV_i) dans chaque réservoir.

Les différentes étapes de l'approche développée dans cette étude sont présentées dans la Figure III-3.

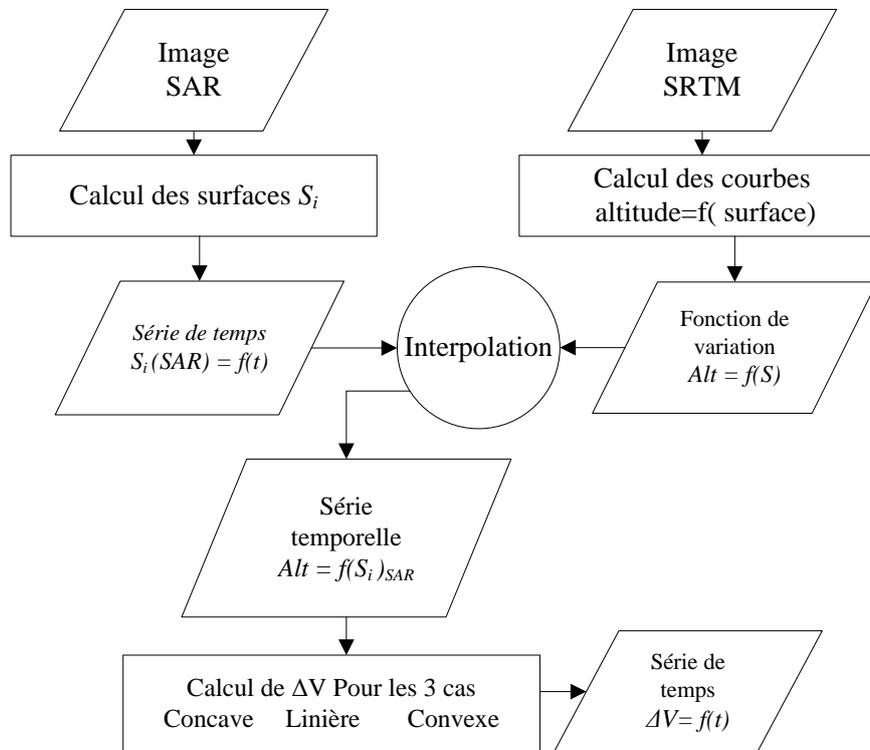


Figure III-3 : Approche utilisée pour le calcul des variations de volumes d'eau stockés dans les réservoirs à partir des données SAR et SRTM

III.4.1 Estimation des surfaces d'eau dans les réservoirs des images SAR:

Dans ce projet, l'estimation des surfaces d'eau dans les réservoirs des barrages de la zone d'étude se fait à partir des données satellitaires radar (SAR). Cette estimation est basée sur l'utilisation de l'intensité des ondes rétrodiffusées, dans la classification de parcelle de la zone d'étude en deux classes (Eau/Sol). Pour ce faire, la chaîne de traitement donnée dans Figure III-4 a été utilisée. Les différentes étapes de cette procédure sont détaillées ci-dessous.

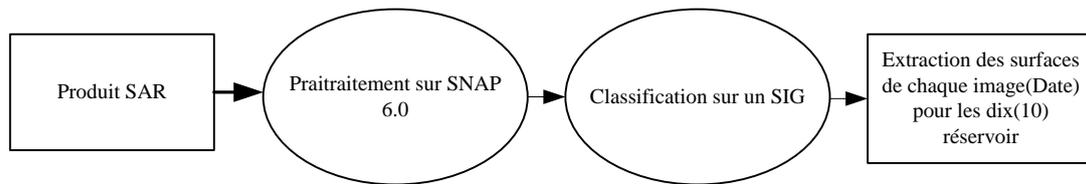


Figure III-4 : Procédure d'estimation des surfaces d'eau dans les réservoirs à partir des images SAR

III.3.1.1 Prétraitement des images SAR

Le signal réfléchi du radar, tend à avoir des distorsions de nature géométriques et radiométriques durant la phase de sa propagation, ceci implique la déformation du produit final qui est l'image SAR. Les informations dans ces dernières, y sont altérées, ce qui rend difficile l'interprétation des résultats. Pour cela, un prétraitement des images radar est nécessaire pour produire des images dont l'interprétation est plus commode.

III.3.1.1.1 Distorsions du signal radar

Le signal radar, au cours de sa réflexion, est sujet à multiples déformations. Ces distorsions, sont dues à différents paramètres que capte le radar, et sont généralement: (A) géométriques, (B) radiométriques.

A-DISTORSIONS GEOMETRIQUES

Ces déformations sont dues à la topographie du milieu détecté par le radar, et elles se divisent en trois types : (1) camouflage et (2) raccourcissement et (3) zones d'ombre.

A.1- Camouflage (Layover)

Le camouflage se produit, lorsque le faisceau du radar capte le sommet d'un élément avant de capter sa base. Ceci implique un déplacement du sommet vers le radar depuis sa vraie position sur la terre, et se pose sur la base de l'élément en question sur l'image. Ainsi, une déformation se crée sur l'image (Figure III-5).

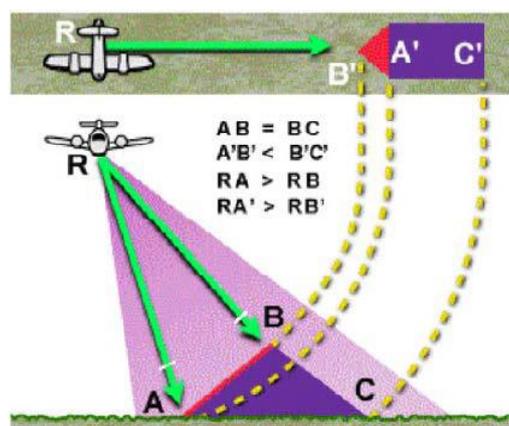


Figure III-5 : Schéma explicatif de la distorsion géométrique : cas du camouflage (Ressources naturelles Canada, 2019)

Le camouflage est plus sévère pour des angles d'incidences très petits, ainsi que dans le cas des terrains montagneux.

A.2-Raccourcissement (Foreshortening)

Le raccourcissement se produit, lorsque le faisceau radar atteint la base d'un élément de grande élévation (ex. montagne) qui est incliné vers le radar, avant qu'il n'atteigne son sommet. Car le radar mesure la distance dans la trajectoire en inclinaison (soit la pente entre les points A et B) (Podest, 2018) (Figure III-6).

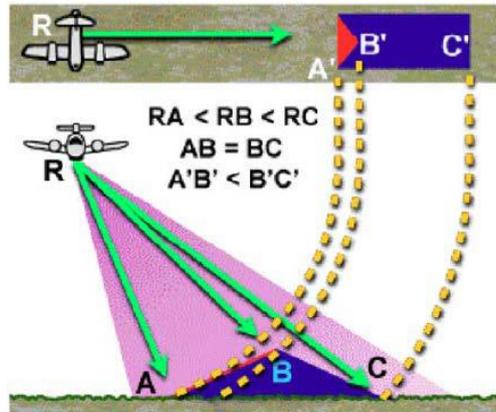


Figure III-6 :Schéma explicatif de la distorsion géométrique : cas du raccourcissement(Ressources naturelles Canada, 2019)

Dans ce cas, l'image apparaîtra comprimée et la longueur de la pente sera représentée de façon incorrecte (c'est-à-dire de A' à B'). Ainsi, en fonction de la variation de l'angle du talus ou du versant de la montagne par rapport à l'angle d'incidence du faisceau radar, la sévérité de l'effet de rapprochement varie. Ces distorsions peuvent compliquer la classification des couvertures de terrain.

A.3-Effet d'Ombre (Shadow Effect) :

Cet effet se produit, lorsque le faisceau radar, est incapable d'illuminer une portion de la surface terrestre. Les ombres apparaissent derrière les éléments verticaux, ou avec des pentes aux talus très raides (Figure III-7). De ce fait, les régions non illuminées par le faisceau radar, apparaissent sombre sur l'image, car il n'y a aucune énergie qui puisse être réfléchie vers le radar (Figure III-7).

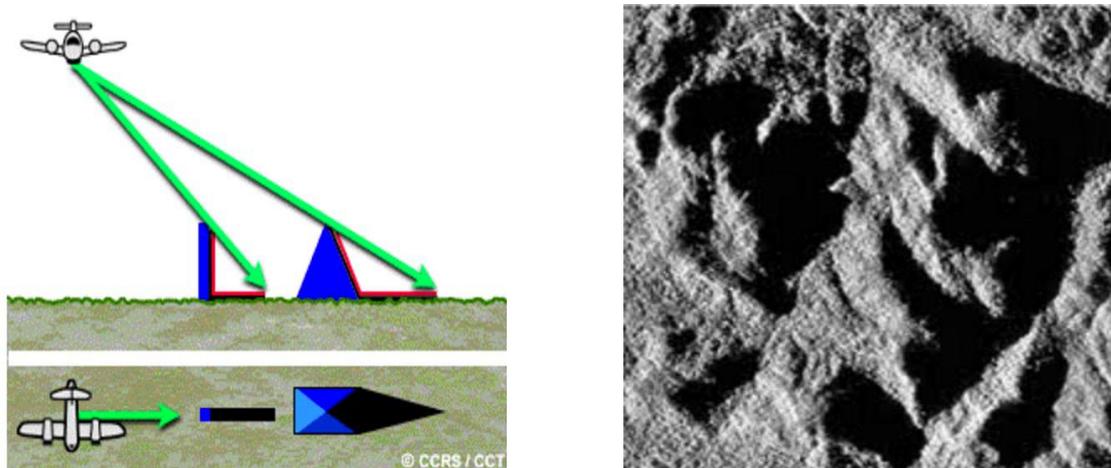


Figure III-7 :Schéma explicatif de la distorsion géométrique : cas des zones d'ombre(Ressources naturelles Canada, 2019)

Les zones ombrées, sont souvent traitées en pratiquant une interpolation entre les zones captées et les zones d'ombre. Cependant, il est aussi préférable en soit, de laisser ces zones subsister dans l'image, et les considérer comme étant des zones "no data" ou des zones à données nulles (Podest, 2018).

B.DISTORSIONS RADIOMETRIQUES

B.1- Effet granulaire(Speckle-effect)

Les changements dans la surface de la terre captée par les antennes des radars (tant bien pour ce qui est des déformations, des changements de température, changement de la topographie, etc.) impliquent une répartition hasardeuse des données dans un pixel donné, affectant ce dernier et générant un bruit (noise) dans ce pixel. Cela produit ce que l'on appelle l'effet granulaire ou "speckle effect", qui est défini comme étant un bruit granulaire qui est inhérent aux images SAR, et qui en dégrade leurs qualités et leurs résolutions, et rend l'interprétation des informations produites dans l'image difficile.

Afin de réduire cet effet, il existe plusieurs méthodes basées sur des calculs probabilistes et statistiques en interpolant les valeurs des pixels adjacents. Parmi ces méthodes de réduction de bruits ou de "filtrage de l'effet granulaire", on peut citer:

- ♦ Les méthodes " *Refined Lee Sigma* ", qui est un filtre se basant sur un critère impliquant l'erreur quadratique moyenne minimale (EQMM), générée dans le calcul de l'information dans une grille de pixels (e.g. (Boutarfa et al., 2015)), ayant une répartition aléatoire des informations variant entre une information bien captée, et une information corrompue (i.e. bruit);
- ♦ Méthodes basées sur le calcul des paramètres statistiques de l'image où l'effet granulaire est considéré comme un bruit multiplicatif statistiquement indépendant de ce qui est capté par le radar (e.g. (Jong-Sen et al., 2009)).

B.2- Effet de la polarisation

La polarisation constitue un paramètre très déterminant, en vue de son utilité dans les applications liées à la cartographie des zones d'inondations, et la limitation des zones humides (séparation des plans d'eau du sol ou zone végétalisée). De façon générale les co-polarisations (HH en particulier), permettent de mieux limiter les zones inondées sous une grande surface de végétation, et les polarisations HV et VV, permettent d'améliorer les données HH existantes et doivent être considérées comme des contributeurs importants à la détection des inondations (Henry et al., 2006). De plus, les radars avec des fréquences et polarisations multiples (e.g. Sentinel-1), apportent plus d'information sur la surface imagée que les radars à fréquence et polarisation unique (Smith, 1997).

Choix de la polarisation

Pour cette étude, en tenant compte de la nature des informations des images SAR (délimitation des surfaces d'eau des réservoirs de barrages), il a été considéré comme suffisant de se limiter à une seule polarisation. Et entre les deux polarisations des images SAR de S1A et S1B (VV et VH), une simple analyse visuelle nous a permis de constater que la polarisation VH offre une délimitation des surfaces d'eau légèrement plus clairement démarquée et avec moins de bruits que la polarisation VV.

Remarque : Pour le reste du travail, nous allons nous limiter aux bandes polarisées en VH.

III.4.2 Procédure de prétraitement des images SAR sur SNAP 6.0

Le prétraitement des images SAR consiste à appliquer une multitude d'opérations sur le produit initial. Ces opérations sont nécessaires pour pouvoir générer des produits géo-référencés, exploitables par l'application ciblée par l'étude. Le prétraitement des images SAR se fait à travers l'outil de traitement d'image SNAP 6.0, et la ToolBox S1TBX 6.0.6. Celle-ci inclue une multitude de commandes, servant à corriger les différents types de distorsions.

Pour cette étude, chaque image SAR acquise a été traitée en utilisant procédure de prétraitement donnée dans Figure III-8.

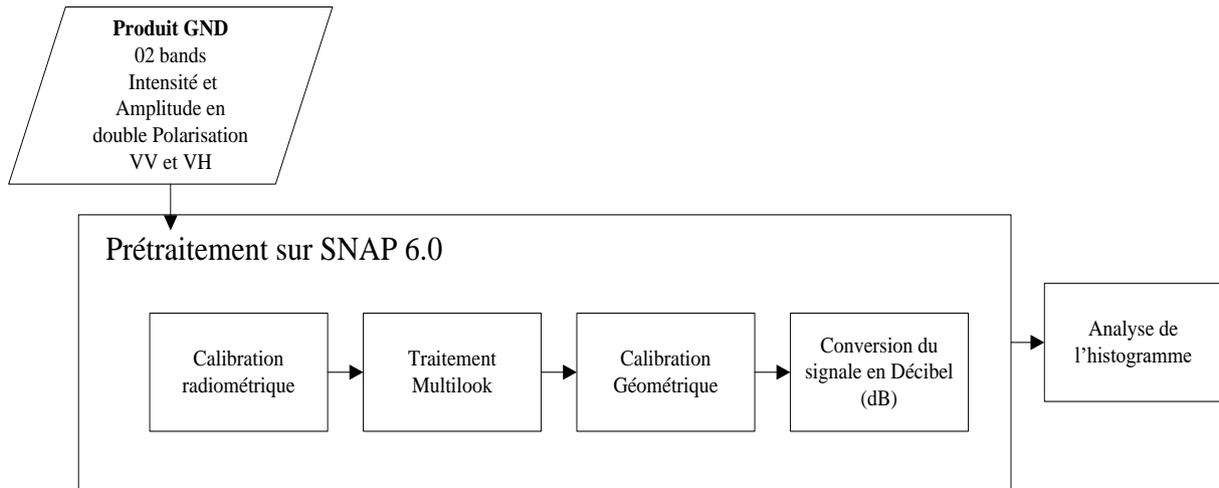


Figure III-8 : Procédure de prétraitement des produits SAR

III.4.2.1 Calibration radiométrique

L'objectif de la calibration est de créer une image dont la valeur de chaque pixel est directement liée à la rétrodiffusion de la surface. Ce processus est essentiel pour l'analyse quantitative des images. Il est également important pour comparer des images provenant de différents capteurs, modalités, processeurs ou images acquises à différents moments (Podest, 2018). Les principales distorsions radiométriques traitées par calibration radiométrique sont dues à :

- ◆ Perte du signal lors de sa propagation;
- ◆ Différence de gain ;
- ◆ Effet granulaire.

La Figure III-9 donne un exemple sur les résultats de cette étape de traitement, où il est possible de remarquer une légère différence entre le signal radar pré et post calibration radiométrique (une différence d'intensité du signal, ainsi qu'une réduction de la rétrodiffusion des zones trop lumineuses).

Produit original (Image du 06/04/2017, Barrage de Sidi Yakoub)

Même Image Après Calibration radiométrique

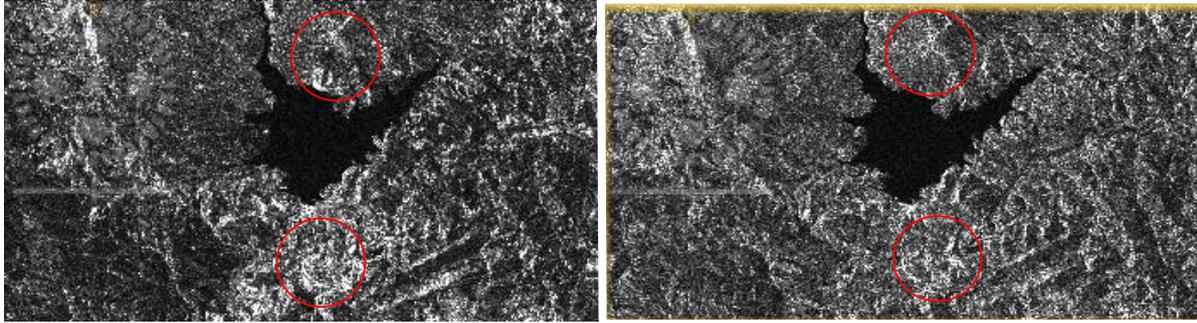


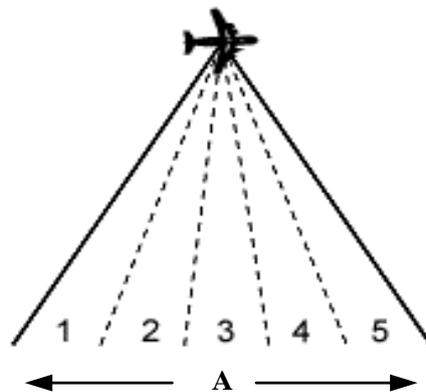
Figure III-9 : Résultats de la calibration radiométrique

III.4.2.2 Réduction de l'effet granulaire

Parmi les méthodes les plus utilisées (en particulier pour des applications de type classification eau/sol) pour la réduction de l'effet granulaire rencontré sur une image radar, il est possible de citer : (A) le *Multilooking* et (B) le filtrage spatial.

A.1-Traitement "*Multilooking*" ou multi-visées :

Le "*Multilooking*" est une méthode de réduction de l'effet granulaire, basé sur un traitement multi-visées d'un radar (où le faisceau radar est divisé en plusieurs sous-faisceaux plus étroits); par exemple cinq (05) faisceaux (voir Figure III-10). Chaque sous-faisceau est une visée ou un "*look*" sur la zone. Cette méthode propose que chaque visée est sujet à un effet granulaire du signal séparément, et qu'en additionnant et moyennant les différentes visées ensemble, la quantité de taches produites par l'effet granulaire sera réduite dans l'image résultante (Podest, 2018).

Figure III-10 : Approche du traitement *Multilooking* (Podest, 2018)

A.2-Traitement par filtrage spatial :

Ce type de traitement repose sur la variation spatiale le long des dimensions x et y d'une fenêtre fictive (voir Figure III-11), de façon à balayer tous les pixels d'une image, un par un, tout en y effectuant un calcul mathématique sur les valeurs s'y trouvant. De ce fait, le pixel central sur la fenêtre est toujours remplacé par la nouvelle valeur interpolée à partir du calcul statistique.

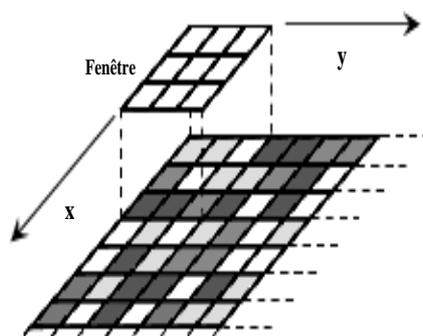


Figure III-11 : Approche du traitement par filtrage spatial (Podest, 2018)

L'utilisation d'une des deux méthodes précédentes va réduire l'effet granulaire dans l'image, et engendrer un effet de lissage, tout en dégradant (réduisant) ainsi la résolution spatiale de l'image (Podest, 2018). Pour cette étude, nous avons réalisé une comparaison entre ces deux filtres (voir Figure III-5). Sur la base de cette comparaison, et à la nécessité de notre travail, il a été considéré d'opter le traitement *Multilooking* pour la réduction de l'effet granulaire.

Tableau III-5 : Comparaison entre le filtre *Lee Sigma* et le traitement *Multilooking*

Filtre Lee Sigma (taille fenêtre = 7x7)	Multilooking (avec nombre de look = 5)
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Meilleure résolution ◆ Moindre réduction de grains sur l'image 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Moindre résolution ◆ Meilleure réduction de grains sur l'image

Dans la Figure III-12, il est possible de remarquer une grande différence, entre le signal pré et post traitement *Multilooking* (réduction importante des grains, ainsi qu'une réduction assez importante de la résolution, avec l'apparition d'un signal plus lumineux et plus lisse).

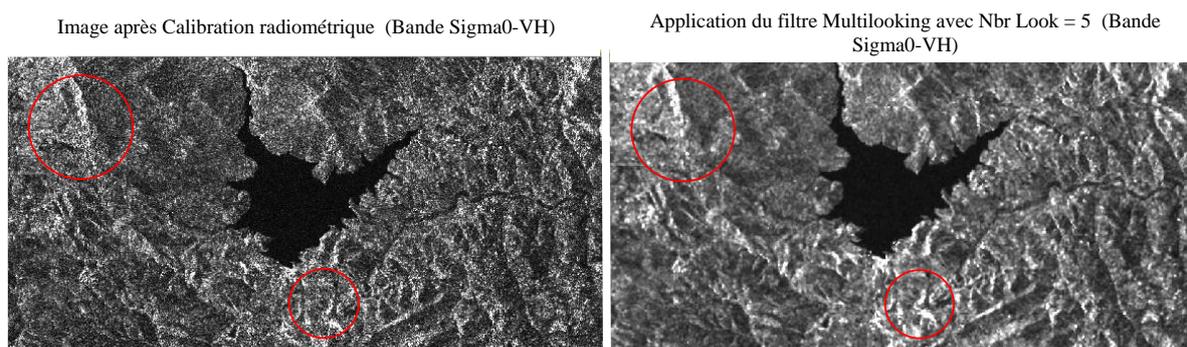


Figure III-12 : Résultat du traitement Multilooking

III.4.2.3 Calibration géométrique :

Cette opération vise à traiter et corriger les principales distorsions géométriques qui se produisent pendant la propagation du signal.

L'algorithme de calibration géométrique utilise un Modèle Numérique d'Altitude (MNA), pour effectuer ces corrections, qui est pour le cas de cette étude, le SRTM 1 Arc-sec global. L'effet de la calibration peut être observé dans la Figure III-13, où nous pouvons

remarquer que l'orientation et certaines distances sur l'image sont corrigées. Il s'agit d'un produit géo-référencé et prêt à être exploité par un SIG.

Image après application du filtre Multilooking (5 looks, Bande Sigma0-VH)

Image Apres Terrain correction (Bande Sigma0-VH)

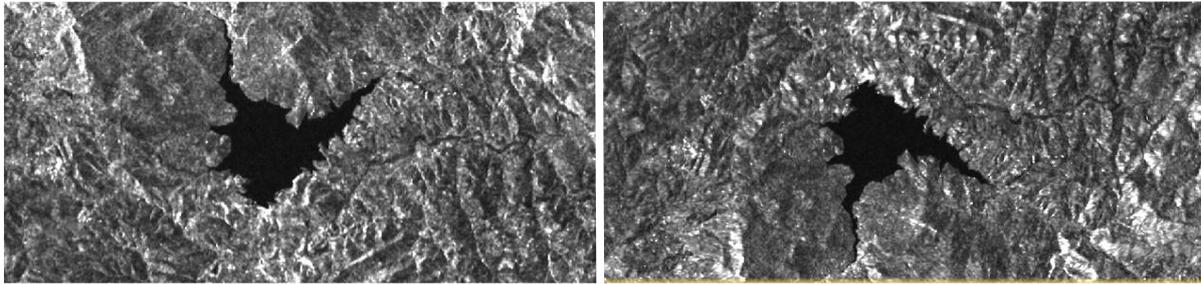


Figure III-13 : Résultats de la calibration géométrique

III.4.2.4 Histogramme d'intensité et classification

La délimitation des surface d'eau, se fait sur la base d'une classification de l'intensité du signal de la rétrodiffusion Sigma0 en deux classes, pour lesquels la deux types de surfaces sont parfaitement distinct. Pour un meilleur contraste entre classes, l'analyse s'effectue en décibels (dB) (Figure III-14).

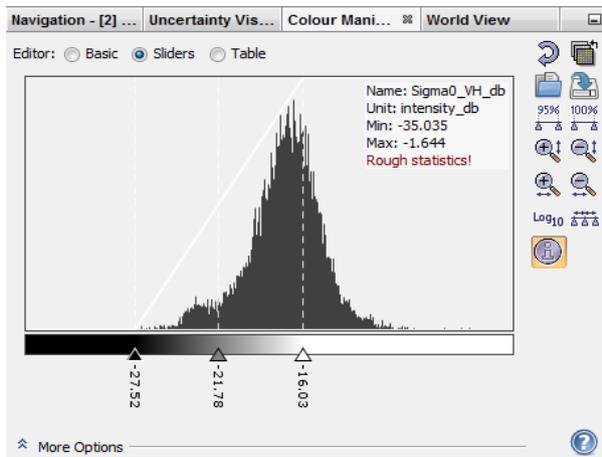


Image en Bande Sigma0-VH dB (avec Sigma0 = -21.78dB)



(A)

(B)

Figure III-14 : Exemple de résultats de l'analyse et classification; (A) histogramme des valeurs Sigma0_VH_dB dans SNAP 6.0; (B) séparation des classes Eau/Sol.

L'analyse des histogrammes d'intensité des images SAR utilisées dans cette étude nous a permis d'observer que le seuil de séparation entre classes (eau/sol) en terme de Sigma0-dB est généralement entre -22.75dB et -19.75 dB. Après avoir achevé la classification, il est désormais possible de délimiter et de calculer les surfaces des réservoirs des barrages dans la zone d'étude à partir des différentes images SAR analysées (i.e. pour différentes dates).

III.4.3 Courbes Hauteur-Surface des réservoirs à partir des produits SRTM

L'élaboration des modèles de variation de hauteur (niveau d'eau dans le réservoir), surface (du réservoir), volume (d'eau stockée) pour les différents réservoirs de barrage s'est basée sur les produits SRTM (SRTM GDEM, 2014), (6 images fusionnée en mosaïque) analysées spatialement sur un SIG, est établie par le biais de la procédure suivante :

- ◆ **Délimitation des bassins versants** : par une simple analyse spatiale des MNA obtenus des produits SRTM sur SIG, les douze (12) bassins versants correspondants aux 12 barrages de la zone d'étude ont été délimités;
- ◆ **Construction des courbes hauteur-surface des réservoirs** : la délimitation sur SIG des courbes de niveau (avec un pas de 1 m) nous permet de délimiter, pour chaque ligne (altitude ou niveau d'eau dans le réservoir) l'étendue de surface d'eau, et donc de construire la courbe hauteur-surface pour chaque réservoir. Il faut prendre en considération que les produits SRTM utilisés pour cette étude, ont été captés en 2014 avec un équipement CSAR, donc on ne peut pas avoir des données sur la bathymétrie du fond pour chaque barrage, c'est pour cette raison qu'on a supposé que le niveau d'eau du 23 septembre 2014, représente le niveau initial des barrages, à partir duquel on va tracer la variation de l'altimétrie, et calculer par la suite la surface comprise dans chaque contour.

III.4.4 Modélisation de la variation de volume d'eau dans les réservoirs

L'estimation de la variation de volume ΔV , se base sur la variation de niveau d'eau et le changement de surface S_i et S_{i+1} , qui ont eu lieu entre deux (02) moments de temps consécutifs donnés.

Tout d'abord, il faut déterminer le niveau d'eau H_i correspondant à chaque surface S_i estimée d'une image SAR et décrivant l'état du réservoir au pas de temps i , et cela en utilisant les courbes hauteurs-surfaces des réservoirs dérivées des données SRTM. Ainsi, il devient possible de calculer la variation, entre deux pas de temps consécutifs, du volume $\Delta V_{i \rightarrow i+1}$ d'eau stockée dans un réservoir, et ceci, en posant trois hypothèses sur cette variation, en terme de la forme des talus des réservoirs, selon les cas suivants :

III.4.4.1 Profil convexe

Le talus du réservoir ayant une forme convexe (voir Figure III-15), et dans le cas extrême, la variation de volume entre 2 niveaux peut être calculée par la formule suivante :

$$\Delta V_{i \rightarrow i+1} = \begin{cases} \text{Min}(S_i \cdot S_{i+1}) * (H_{i+1} - H_i) & \text{Si; } H_i < H_{i+1} \text{ (cas de la montée des eaux)} & \text{(III.1)} \\ \text{Max}(S_i \cdot S_{i+1}) * (H_{i+1} - H_i) & \text{Si; } H_i > H_{i+1} \text{ (cas de la descente des eaux)} & \text{(III.2)} \end{cases}$$

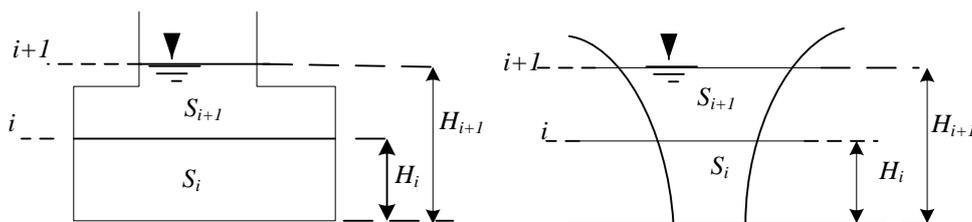


Figure III-15 : Schémas représentatifs de la forme convexe des talus du réservoir

III.4.4.2 Profil concave

Le talus du réservoir ayant une forme concave (voir Figure III-16), et dans le cas extrême, la variation de volume entre 2 niveaux peut être calculée par la formule suivante :

$$\Delta V_{i \rightarrow i+1} = \begin{cases} \text{Max}(S_i \cdot S_{i+1}) * (H_{i+1} - H_i) & \text{Si; } H_i < H_{i+1} \text{ (cas de la montée des eaux)} & \text{(III.3)} \\ \text{Min}(S_i \cdot S_{i+1}) * (H_{i+1} - H_i) & \text{Si; } H_i > H_{i+1} \text{ (cas de la descente des eaux)} & \text{(III.4)} \end{cases}$$

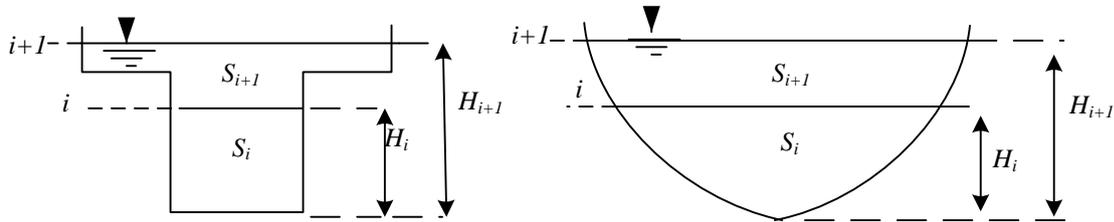


Figure III-16 : Schémas représentatifs de la forme concave des talus du réservoir

III.4.4.3 Profil linéaire

Dans ce cas on suppose que la variation de volume est linéaire (voir Figure III-17), donc pour calculer la variation, on prend la moyenne des surfaces :

$$\Delta V_{i \rightarrow i+1} = \text{Moy}(S_i \cdot S_{i+1}) * (h_{i+1} - h_i) \quad \text{(III.5)}$$

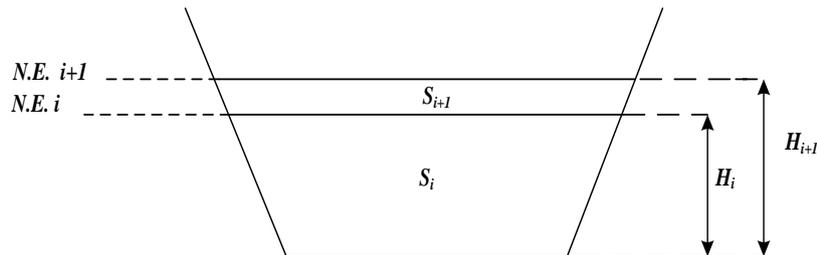


Figure III-17 : Schéma représentatif du changement linéaire du volume

III.4.5 Calcul de l'apport potentiel des pluies au réservoir

Etant donné que les précipitations représentent potentiellement la source principale des débits liquide alimentant les réservoirs dans la zone d'étude, il a été considéré d'estimer l'apport potentiel de cette source générer sur chaque réservoir. Ainsi l'importance de cette source est étudiée en analysant les corrélations entre les séries de temps de l'apport potentiel des pluies pour chaque réservoir et les séries de temps donnant la variation du volume d'eau dans chaque réservoir.

Le calcul hydrologique s'est basé sur les données de pluie journalière précipitée dans chaque bassin versant, qui ont été acquis à partir de la base de données de NASA POWER Data Access Viewer. Il a été considéré de prendre comme données pluviométriques représentatives sur les bassins versants des réservoirs étudiés (en considérant une distribution uniforme des pluies sur un bassin versant donné), celle observées au centre de gravité des

différents bassins versants. Cette hypothèse simplificatrice permet d'estimer les pluies tombées, à des pluies potentielles uniformes sur l'ensemble du bassin versant. Le calcul de l'apport potentiel des pluies se fait par le calcul du volume cumulé des pluies entre deux pas de temps consécutifs (date i et date $i+1$) avec un décalage de cette intervalle de temps égale au moins (-) le volume précipité correspondant au temps de concentration du bassin versant.

Conclusion

Après l'acquisition des différents produits de télédétection, nous avons exploité les images SAR pour extraire les surfaces des plans d'eau des réservoirs de la zone d'étude, alors que les images SRTM ont servi à la détermination des courbes de niveau au voisinage de chaque réservoir.

Pour obtenir des informations sur les différents réservoirs de la zone d'étude, le recours à l'exploitation des données des images SRTM est nécessaire, et qui fait l'objet de la suite du travail.

Partie III :
Résultats et discussions

Chapitre IV :

Caractéristiques des bassins versants

IV. Caractéristiques des bassins versants

IV.1 Introduction

Afin de pouvoir dimensionner un barrage, une étude hydrologique doit être mise en place pour déterminer sa localisation, estimer sa capacité de stockage, et autres paramètres qui vont influencer son comportement. Le but de cette partie sera de réaliser une étude détaillée sur les douze (12) bassins versants des différents réservoirs contenus dans notre zone d'étude, afin de calculer ainsi, les paramètres topographiques, hydrologiques, et géométriques de chaque bassin versant.

IV.1.1 Partie théorique

Les paramètres théoriques calculés pour les bassins versants de la zone d'étude sont présentés dans le Tableau IV-1.

Tableau IV-1 : paramètres hydrologiques et topographiques calculés

Caractéristiques	Formule	Paramètre	Référence
Périmètre du bassin versant	A partie du SIG	/	(SRTM GDEM, 2014)
Surface du bassin versant	A partie du SIG	/	(SRTM GDEM, 2014)
Indice de compacité de GRAVELIUS	$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} \approx 0.28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$	K_G : l'indice de compacité de Gravelius A : surface du bassin versant [km ²] P : périmètre du bassin [km]	(André, 2005)
Longueur de rectangle équivalent	$L = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G}\right)^2}\right)$	L : longueur du rectangle équivalent [km] A : surface du bassin versant [km ²] K_G : coefficient de Gravelius	(André, 2005)
Largeur de rectangle équivalent	$l = \frac{A}{L}$	l : longueur du rectangle équivalent [km] L : longueur du rectangle équivalent [km] A : surface du bassin versant [km ²]	(André, 2005)
Dénivelée du bassin versant	A partir du SIG	/	(SRTM GDEM, 2014)

Altitude moyenne	$H_{moy} = \frac{\sum (h_i \cdot A_i)}{A_i}$	<p>H_{moy} : altitude moyenne du bassin versant [m]</p> <p>A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [km²]</p> <p>h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m]</p> <p>A : superficie totale du bassin versant [km²]</p>	(André, 2005)
Longueur du talweg principale	A partir du SIG	/	(SRTM GDEM, 2014)
altitude max	A partir du SIG	/	(SRTM GDEM, 2014)
altitude min	A partir du SIG	/	(SRTM GDEM, 2014)
pente moyenne	$I_{moy} = \frac{D \cdot L}{A}$	<p>I_{moy} : pente moyenne [km/km]</p> <p>L : longueur totale de courbes de niveau [km],</p> <p>D : équidistance entre deux courbes de niveau [km],</p> <p>A : surface du bassin versant [km²].</p>	(André, 2005)
Temps de concentration*	$t_c = \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot \sqrt{H_{moy}}}$	<p>t_c : temps de concentration en heure</p> <p>A : surface du bassin versant en km²</p> <p>L : longueur maximal parcouru par l'eau dans le bassin hydrologique en (km).</p> <p>H_{moy} : altitude moyenne (m)</p>	(André, 2005)

* Pour le cas de cette étude, la formule de Giandotti est la plus convenable pour estimer le temps de concentration de chaque bassin versant des barrages étudiés, vu la similitude entre la nature des bassins pour lesquels cette formule a été établie et ceux de la zone étudiée, plus la surface importante de ces derniers, qui élimine l'application des autres formules.

IV.1.2 Résultats

IV.1.2.1 Délimitation des bassins versants

La délimitation des douze (12) bassins versant a été faite par le moyen d'un SIG, et on se basant sur un modèle numérique d'altitude (MNA), composé de six (6) images SRTM.

La délimitation des bassins versant est présentée dans laFigure IV-1 ci-dessous :

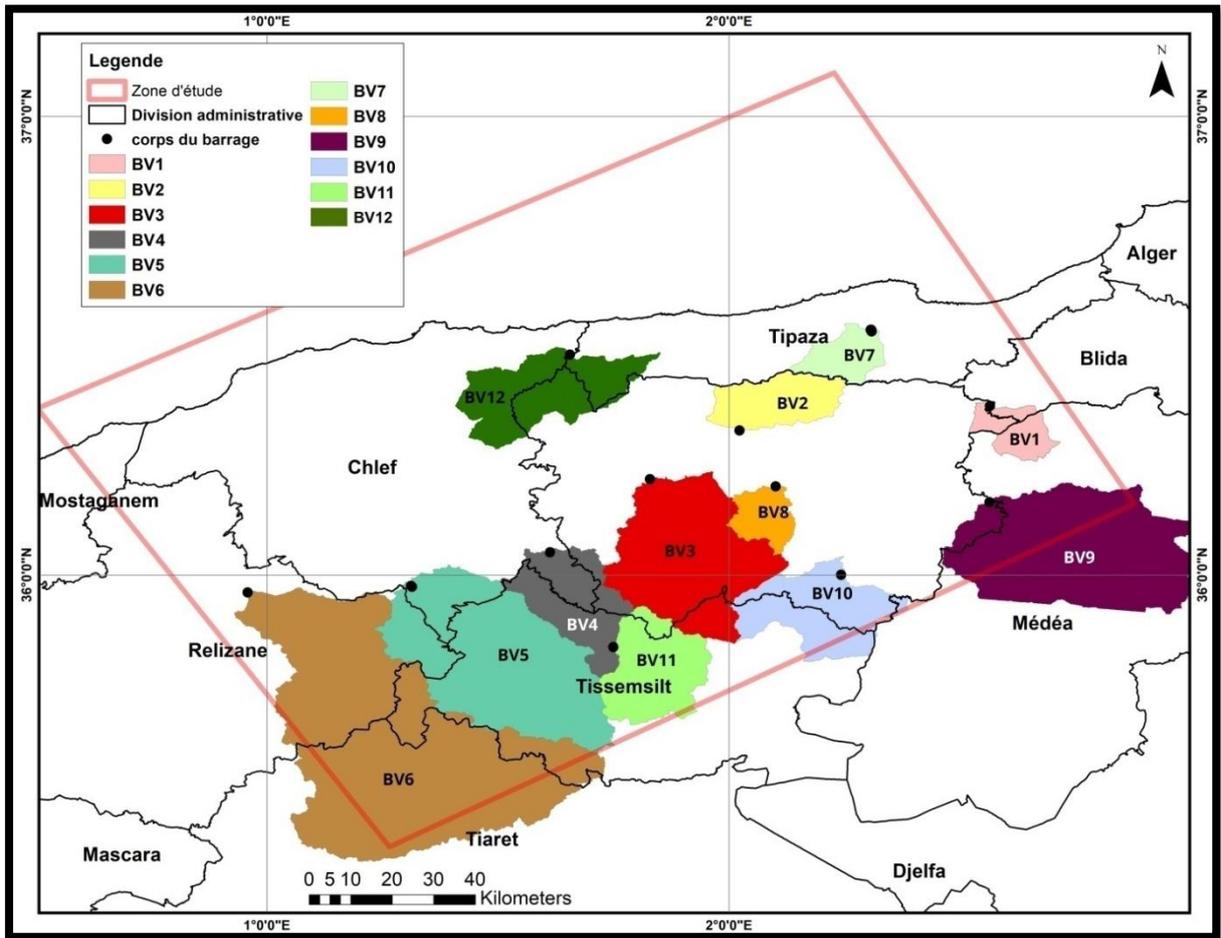


Figure IV-1 : Délimitation des bassins versants de la zone d'étude (SRTM GDEM, 2014)(avec BV : bassin versant)

IV.1.2.2 Paramètres hydrologiques et topographiques des bassins versants

Après avoir délimité les bassins versants, la prochaine étape consiste à calculer les paramètres hydrologiques et topographiques de chaque bassin.

Ce calcul présente une phase primaire, pour établir une vision générale sur les bassins et leurs comportements, notamment le calcul d'apport potentiel de pluie. Ces caractéristiques sont présentées dans le Tableau IV-2.

Tableau IV-2 :Caractéristiques des bassins versants de la zone d'étude

Caractéristiques	Symbole	Unité	BV1	BV2	BV3	BV4	BV5	BV6	BV7	BV8	BV9	BV10	BV11	BV12
Périmètre du bassin versant	P	Km	65.865	85.213	164.100	178.000	192.000	322.345	65.468	67.088	166.713	127.832	108.292	132.515
Surface du bassin versant	S	Km ²	149.770	271.091	867.004	839.028	1207.510	2363.020	158.059	142.000	1148.310	472.193	428.562	504.388
Indice de compacité de GRAVELIUS	Kg	/	1.507	1.449	1.560	1.721	1.547	1.857	1.458	1.576	1.378	1.647	1.465	1.652
Longueur de rectangle équivalent	L	Km	27.484	34.821	69.592	78.282	81.113	144.860	26.847	26.847	65.943	55.391	44.520	57.483
Largeur de rectangle équivalent	l	Km	5.450	7.785	12.458	10.718	14.887	16.312	5.887	5.887	17.414	8.525	9.626	8.775
Surface de rectangle équivalent	Seq	Km ²	149.777	271.091	867.004	839.028	1207.509	2363.019	158.059	158.059	1148.310	472.193	428.562	504.388
Dénivelée du bassin versant	$Dé$	m	475.000	722.000	855.000	665.000	666.000	744.000	996.000	321.000	570.000	888.000	540.000	690.000
Altitude moyenne	H_{moy}	m	530.464	744.246	649.202	842.077	733.291	624.015	479.926	458.711	779.754	1063.941	917.594	565.982
Longueur du talweg principale	Lb	Km	22.787	33.150	25.809	57.273	66.231	92.770	16.511	20.762	67.827	31.920	33.340	36.687
altitude max	H_{max}	m	1198.000	1551.000	1786.000	1956.000	1968.000	1271.000	1417.000	823.000	1500.000	1806.000	1785.000	1145.000
altitude min	H_{min}	m	256.000	269.000	198.000	293.000	173.000	70.000	80.000	273.000	3861.000	568.000	592.000	48.000
pente moyenne	I_{moy}	/	0.250	0.435	0.226	0.278	0.281	0.206	0.361	0.150	0.221	0.258	0.230	0.293
temps de concentration	tc	h	50.807	68.138	119.679	119.565	143.583	201.407	51.702	49.483	140.101	88.755	84.871	92.726

Chapitre V :
Suivi des réservoirs

V. Suivi des réservoirs

V.1 Introduction

Ce chapitre donne une présentation et interprétation des résultats obtenus, tout en les comparant avec des données externes (des jeux de données - considérées comme données de référence-, il s'agit d'informations récupérées à travers l'Agence Nationale des Barrage et Transfert-ANBT), en guise de validation. Le niveau de performance de l'approche développée est évalué par différents paramètres statistiques.

V.2 Données de validation

Les données utilisées pour la validation des résultats, sont des jeux de données récupérées de l'ANBT. Ce sont les courbes de hauteur-capacité-surface, obtenues grâce à des campagnes de mesures des levées bathymétriques et topographique (2004), des barrages de la zone d'étude, mise à part le réservoir de barrage **B12**, où le jeu de données est un scénario estimé pour le remplissage du réservoir, en vu de sa récente mise en eau 2015

V.3 Paramètres statistiques utilisés

Pour valider les résultats obtenus de notre approche, nous avons utilisé les paramètres statistiques suivants :

- ◆ Critère d'efficacité de Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe efficiency -NSE), qui est une grandeur statistique normalisée, qui détermine la magnitude relative de la variance résiduelle (Observée - Mesurée), comparativement à la variance des données mesurées.
- ◆ Pourcentage de biais (Percent Bias-PBIAS), qui mesure la tendance moyenne des valeurs simulées à être supérieures ou inférieures aux valeurs observées.
- ◆ Observations standard déviation ratio (rapport d'écart type d'observations- RSR-RMSE-).

Les expressions permettant le calcul de ces paramètres sont données dans Tableau V-1.

Tableau V-1: Paramètres statistiques utilisés pour la validation (Sorooshian et al., 1993)

Paramètre	Expression	Variable
NSE	$NSE = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{obs}^{moyen})^2}$	Y_{obs} : Résultats observés utilisés pour la validation.
PBIAS	$PBIAS = 100 \cdot \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})}{\sum (Y_{obs})}$	Y_{sim} : Nos résultats simulés.
RSR	$RSR = \sqrt{\frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{obs}^{moyen})^2}}$	Y_{obs}^{moyen} : Moyenne des résultats observés.

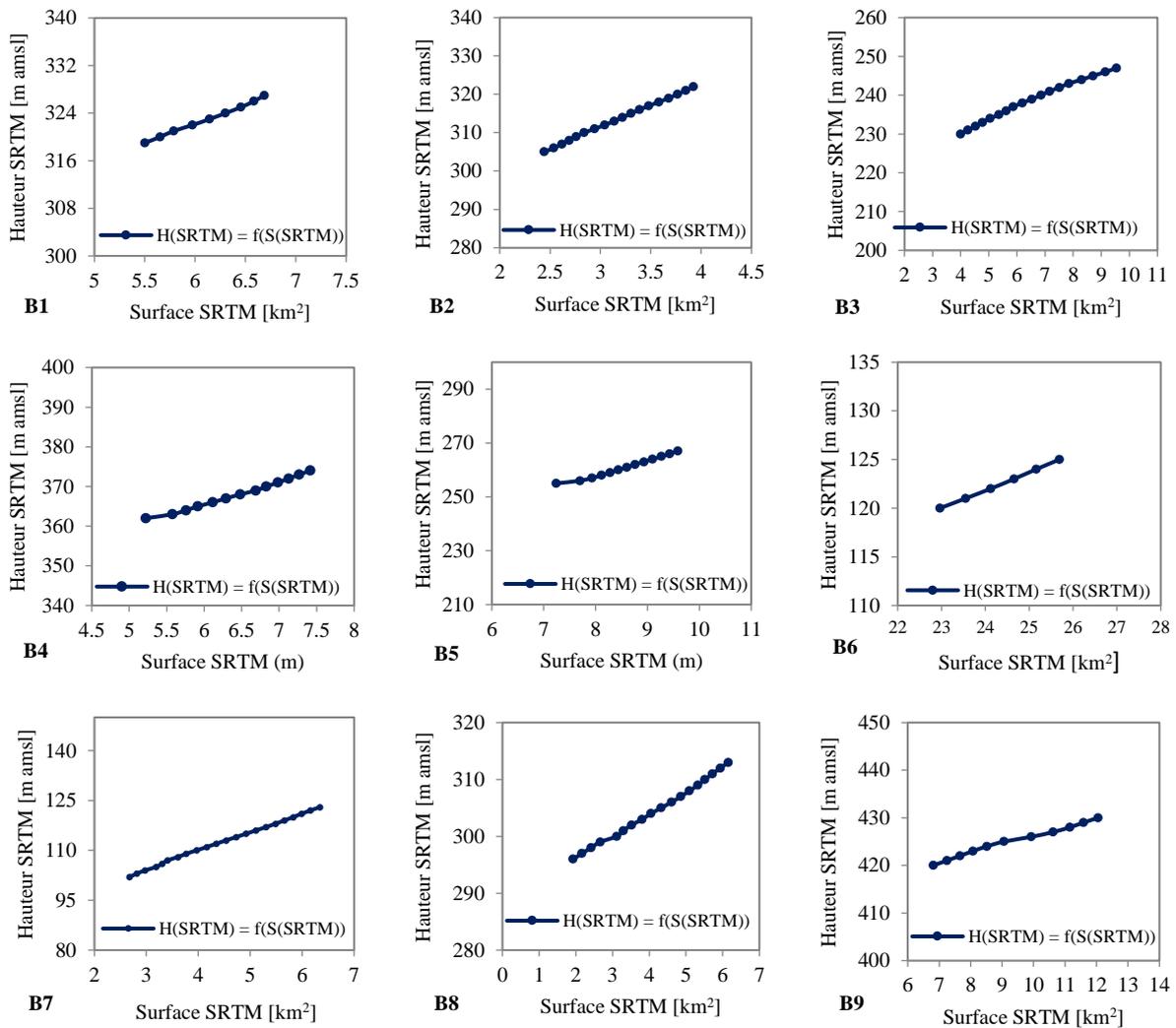
L'estimation du niveau de performance en utilisant ces paramètres statistiques se fait sur la base des critères donnés dans Tableau V-2.

Tableau V-2 :Niveaux de performance(Moriasi et al., 2007)

Niveau de performance	Code couleur	<i>NSE</i>	<i>RSR</i>	<i>PBIAS</i> [%]
Très bien	●	$0.75 \leq NSE \leq 1.00$	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$ PBIAS \leq 10$
Bien	●	$0.65 \leq NSE \leq 0.75$	$0.50 \leq RSR \leq 0.60$	$10 \leq PBIAS \leq 15$
Satisfaisant	●	$0.50 \leq NSE \leq 0.65$	$0.60 \leq RSR \leq 0.70$	$15 \leq PBIAS \leq 25$
Insatisfaisant	●	$NSE \leq 0.50$	$RSR \geq 0.70$	$ PBIAS \geq 25$

V.4 Courbes hauteurs-surfaces obtenues

Comme premiers résultats, nous allons présenter les courbes hauteurs-surfaces estimées des jeux de données SRTM, puis les valider avec les données de l'ANBT. Celle-ci sont données dans Figure IV-1.



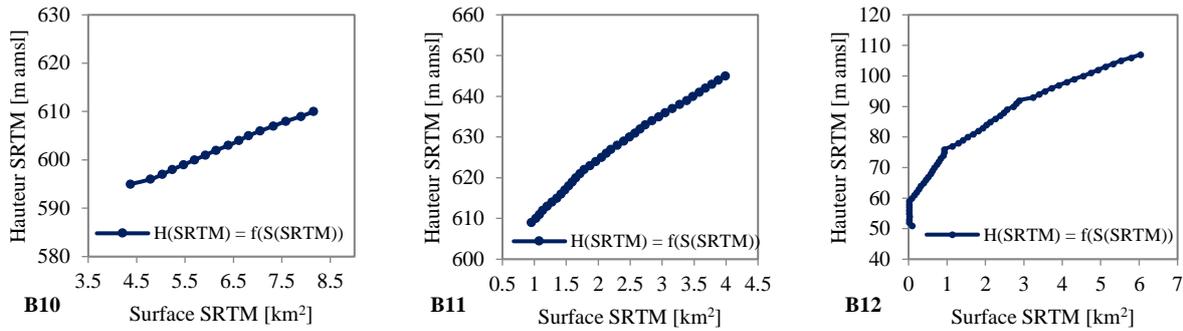


Figure V-1: Courbes hauteur-capacité pour les bassins de la zone d'étude obtenues par l'approche développée (avec *Surface SRTM*: surface estimée à partir des courbes hauteur-surface dérivées des images SRTM, *Hauteur SRTM*: hauteur d'eau dans le réservoir estimé à partir des courbes hauteur-surface dérivées des images SRTM)

Après avoir établi les courbes hauteur-capacité pour chaque bassin, nous allons présenter les valeurs extrêmes des hauteurs et des surfaces pour chaque bassin (Tableau V-3).

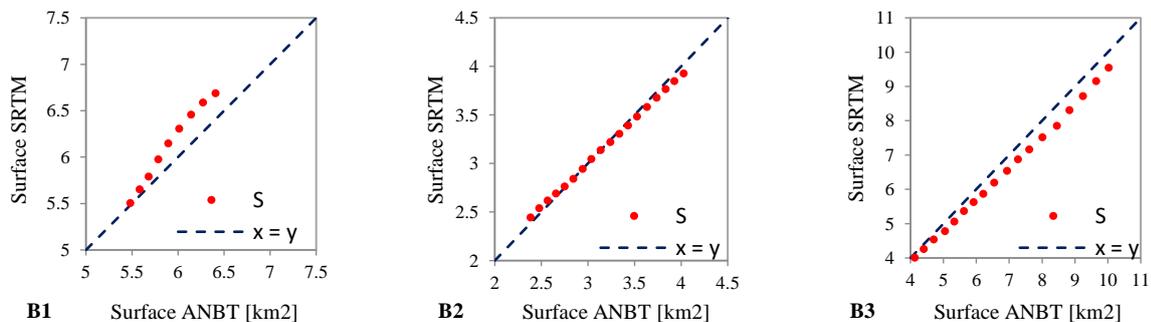
Tableau V-3 : Valeurs extrêmes hauteur-surface des réservoirs de barrages

Réservoir	Surface [Km ²]		Hauteur [m]		Réservoir	Surface [Km ²]		Hauteur [m]	
	Min	Max	Min	Max		Min	Max	Min	Max
B1	5.550	6.686	319	327	B7	2.675	6.342	102	123
B2	2.442	3.924	305	322	B8	1.928	6.152	296	313
B3	4.001	9.544	230	247	B9	6.813	12.046	420	430
B4	5.220	7.415	362	374	B10	4.377	8.156	595	610
B5	7.244	9.587	255	267	B11	0.954	3.988	609	645
B6	20.512	22.965	120	141	B12	0.092	6.034	51	107

On remarque qu'à l'exception de **B12**, l'ensemble des courbes des réservoirs des barrages, ne commencent pas par l'origine, en raison du manque des données de bathymétrie, car les images SRTM sont datées de (2014) i.e. post remplissage des réservoirs.

V.4.1 Validation des courbes hauteurs-surfaces obtenues

Pour valider les courbes hauteur-surface obtenues, nous avons réalisé une comparaison (en termes de surface), entre les courbes dérivées des données SRTM, et courbes de l'ANBT (voir Figure V-2).



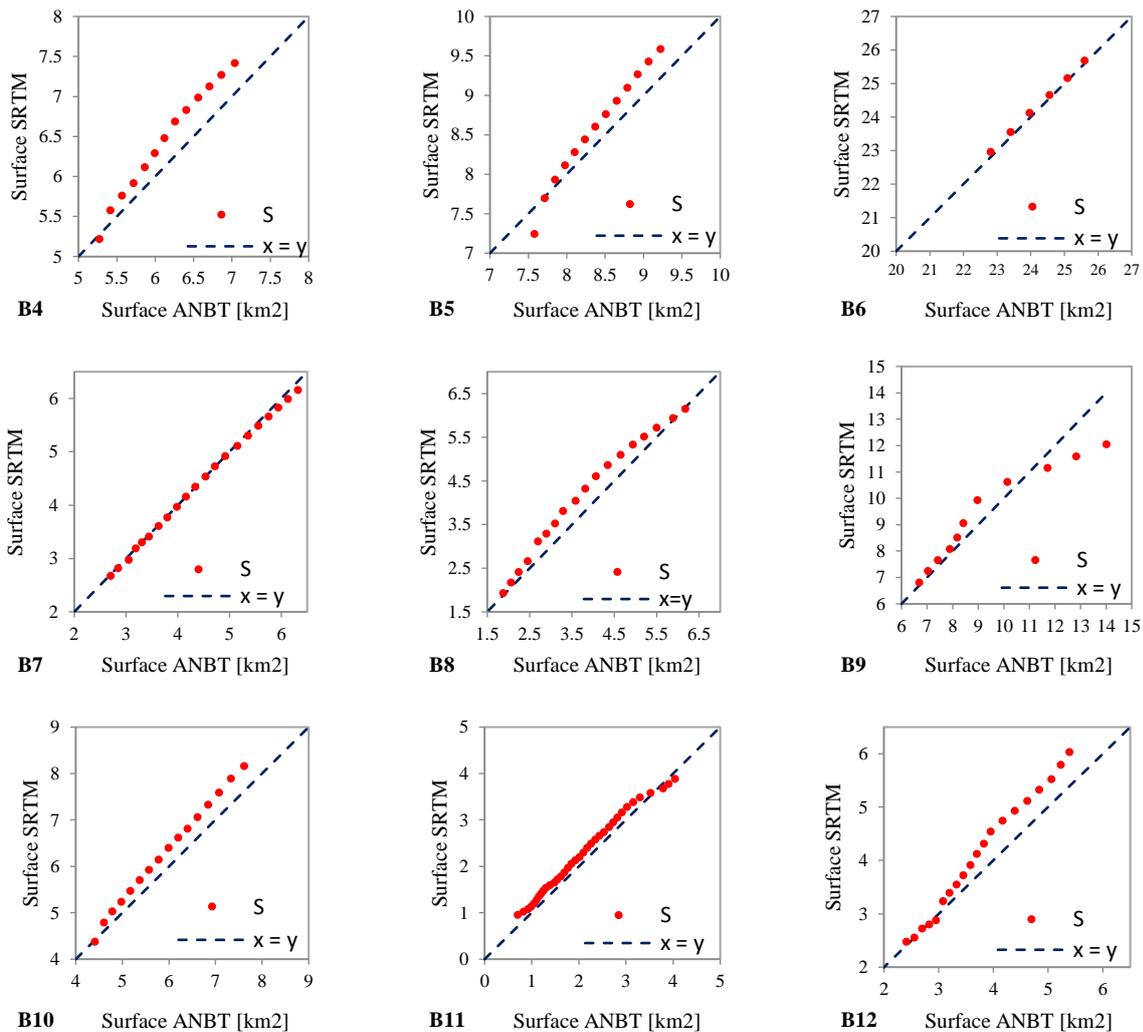


Figure V-2: Comparaison entre les courbes hauteurs-surfaces dérivées des images SRTM et les courbes de l'ANBT (avec *S*: Surface d'eau dans le réservoir, *Surface SRTM*: surface estimée à partir des courbes hauteur-surface dérivées des images SRTM, *Surface ANBT*: surface estimée à partir des courbes hauteur-surface de l'ANBT)

V.4.2 Paramètres statistiques de la validation des surfaces SRTM/ANBT

Les paramètres statistiques de validation des surfaces SRTM par les surfaces des courbes de l'ANBT, sont présentés dans le Tableau V-4.

Tableau V-4: Paramètres statistiques de validation des surfaces SRTM

Réservoir	Paramètres statistiques			Réservoir	Paramètres statistiques		
	NSE	RSR	PBIAS		NSE	RSR	PBIAS
B1	0.752	0.497	-3.416	B7	0.995	0.066	1.168
B2	0.990	0.099	0.5370	B8	0.924	0.276	-8.228
B3	0.951	0.220	5.431	B9	0.876	0.352	0.624
B4	0.631	0.607	-4.847	B10	0.842	0.317	-6.037
B5	0.751	0.501	-2.166	B11	0.955	0.212	-8.067
B6	0.983	0.128	-0.536	B12	0.805	0.440	-8.527

● : Très bien ● : Bien ● : Satisfaisant ● : Insatisfaisant

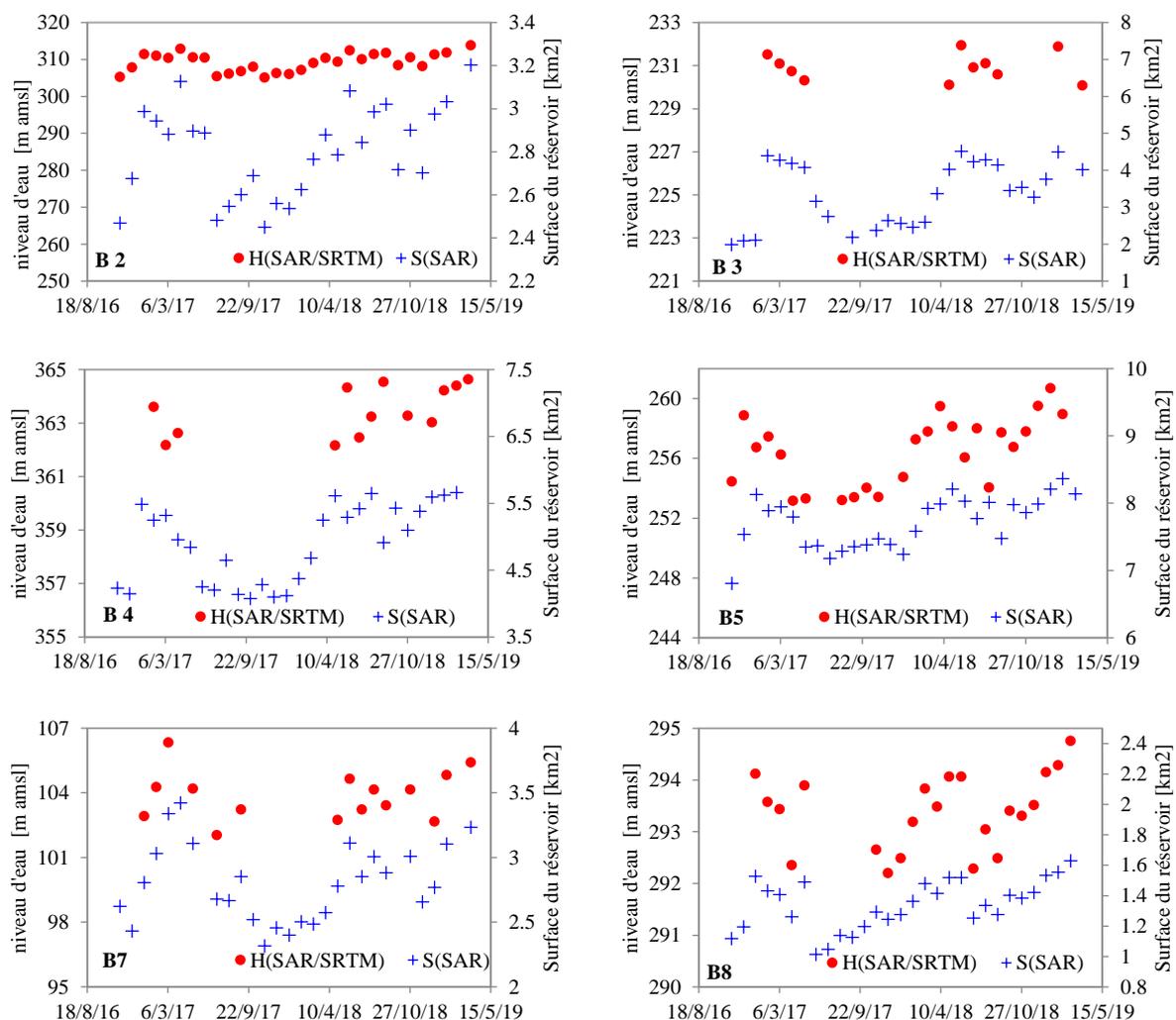
V.4.3 Discussion

Selon les paramètres statistiques calculés pour chaque réservoir, on constate que les courbes hauteur-surface obtenues à partir des images SRTM, présentent une très bonne corrélation avec celles de l'ANBT pour onze (11) des réservoirs de barrages, mais avec des petites différences de précision, soit sous forme de sous-estimation, ou bien de surestimation des valeurs calculées (voir valeurs PBIAS dans le Tableau V-4), appart pour le réservoir **B4**, qui présente un niveau de performance moins élevé que pour le reste des réservoirs. Ceci peut être due a un changement dans la topographie du réservoir entre les deux jeux de données (SRTM-2014, ANBT-2005).

V.5 Suivi de la variation de surface dans les réservoirs

Après avoir estimé les surfaces des réservoirs de barrages pour chaque date d'acquisition i , nous avons aboutis a des séries chronologiques de la variation de surface de chaque réservoir, présentées dans la Figure V-3.

Remarque : Pour le cas des réservoirs **B1** et **B6**, la hauteur d'eau pendant la période de suivi était inférieure aux valeurs minimales des hauteurs d'eau des images SRTM (2014).



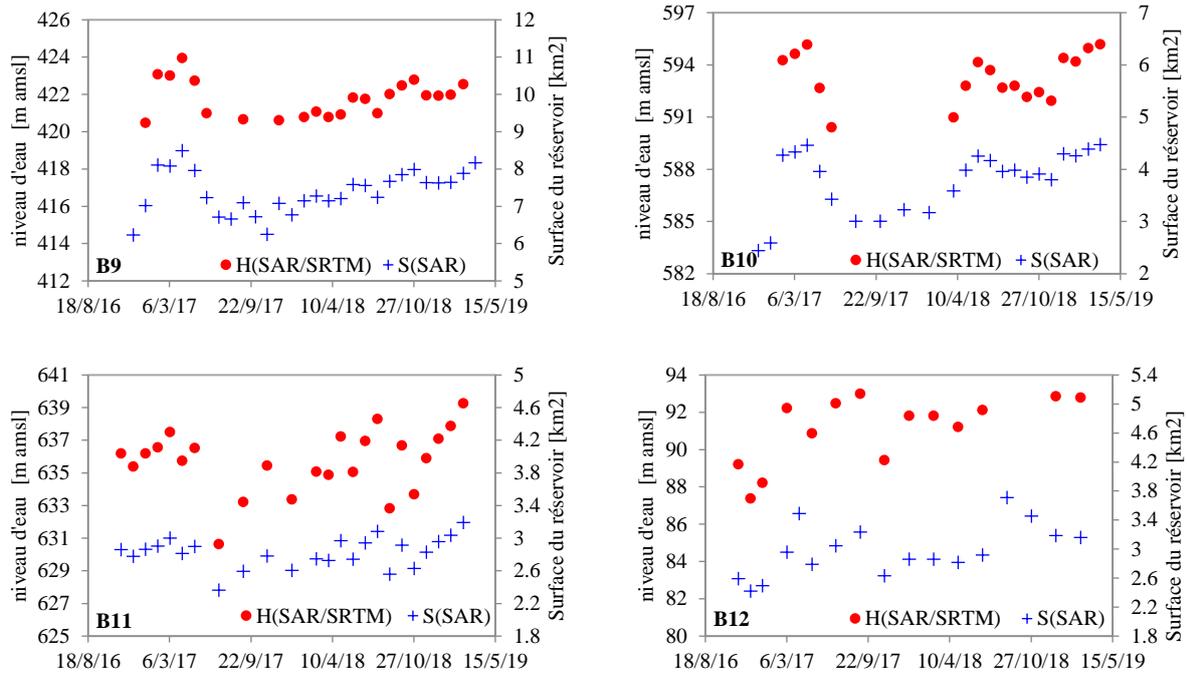


Figure V-3: Séries chronologiques de la variation de la surface et hauteur d'eau (avec S: Surface d'eau dans le réservoir, H: niveau d'eau dans le réservoir)

V.5.1 Discussion

On remarque globalement, une fluctuation saisonnière des surfaces dans les réservoirs étudiés qui peut être associée aux variations saisonnières climatologiques (précipitations, évapotranspiration). Les manques de données de surfaces (interruption des séries de temps) sont liés à la corruption de certaines images SAR source (réservoirs non visible sur l'image).

Pour le bassin **B3**, on peut constater qu'il existe une particularité dans son mode exploitation, car dans la période de suivi des bassins (de novembre 2016 jusqu'au mars 2019), nous avons remarqué que la surface maximale atteinte par le niveau d'eau égale à 3 fois la surface minimale repéré durant la même période, ce qui reflète une variation très importante dans le niveau d'eau dans le bassin.

Etant donné que le réservoir **B12** soit en phase de remplissage depuis 2014, on remarque une variation moins importante, et une tendance à une augmentation lente de la surface.

V.6 Suivi des niveaux d'eau dans les réservoirs

Les variations des niveaux d'eau pour les réservoirs de barrages, estimées par l'approche développée, sont présentées dans les séries chronologiques de la Figure V-3.

V.6.1 Discussion

On remarque globalement, une fluctuation saisonnière des niveaux d'eau dans les réservoirs étudiés. Ce qui peut également être associé aux variations saisonnières climatologiques (précipitations, évapotranspiration). On peut constater également, qu'il existe des manques de données des hauteurs d'eau, liés à la baisse des hauteurs d'eau en dessous du niveau minimale des images SRTM (2014), ce qui rend l'estimation des niveaux d'eau en utilisant les courbes hauteur-surface dérivées des produits SRTM impossible.

Pour les bassins **B2** et **B11**, nous avons constaté que la variation de la hauteur d'eau durant la période de détection est très importante (plus ou moins 8 mètres). Une telle variation dans le niveau d'eau dans les réservoirs, risquent d'engendrer :

- Des problèmes de stabilité dans le corps du barrage, car le changement brusque de la teneur en eau dans la structure du barrage, et provoque des fissurations et la diminution de la résistance du béton.
- Le changement très important dans la réserve d'eau dans un barrage, reflète le déséquilibre entre l'apport et les sorties (input et output), donc la gestion de cette ressource est mise en question d'après ce diagnostic.

La variation du niveau d'eau dans le réservoir, conduit à des variations de la teneur en eau ce qui peut affecter la stabilité des talus. Cela implique un possible changement dans la topographie et la bathymétrie du réservoir, et l'occurrence des phénomènes de glissement puis d'envasement par augmentation du volume solide présent dans le réservoir.

V.7 Suivi de la variation des volumes d'eau stockée dans les réservoirs

Les résultats de l'approche en terme de variation des volumes d'eau stockées dans les réservoirs de barrages de la zone d'étude, sont présentées pour les trois (03) profils (linéaire, concave et convexe), sous forme de séries chronologiques dans les Figure V-4, Figure V-5, Figure V-6, respectivement Figure V-3. L'apport potentiel (pluies potentielles) calculé, ainsi qu'une deuxième estimation de la variation des volumes d'eau en utilisant les courbes hauteur-capacité-surface de l'ANBT, sont également tracés sur la même figure.

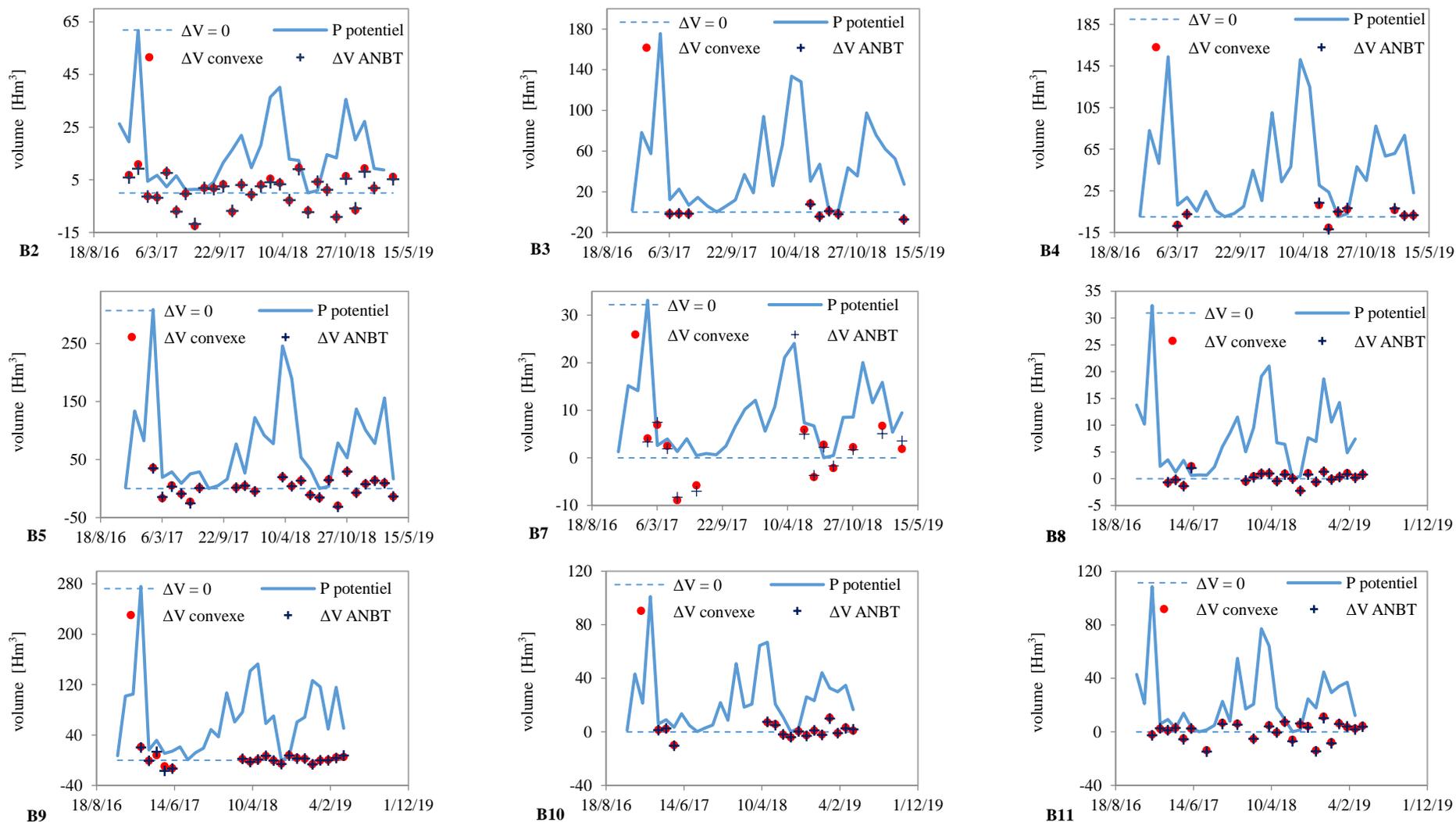


Figure V-4: Séries de temps de la variation de volume pour le profil convexe (avec: ΔV convexe : variation du volume dans le reservoir calculée en utilisant le modele convexe, ΔV ANBT: variation du volume calculée avec les courbes de capacité de l'ANBT, $P_{Potentielle}$: Pluies tombées sur le bassin)

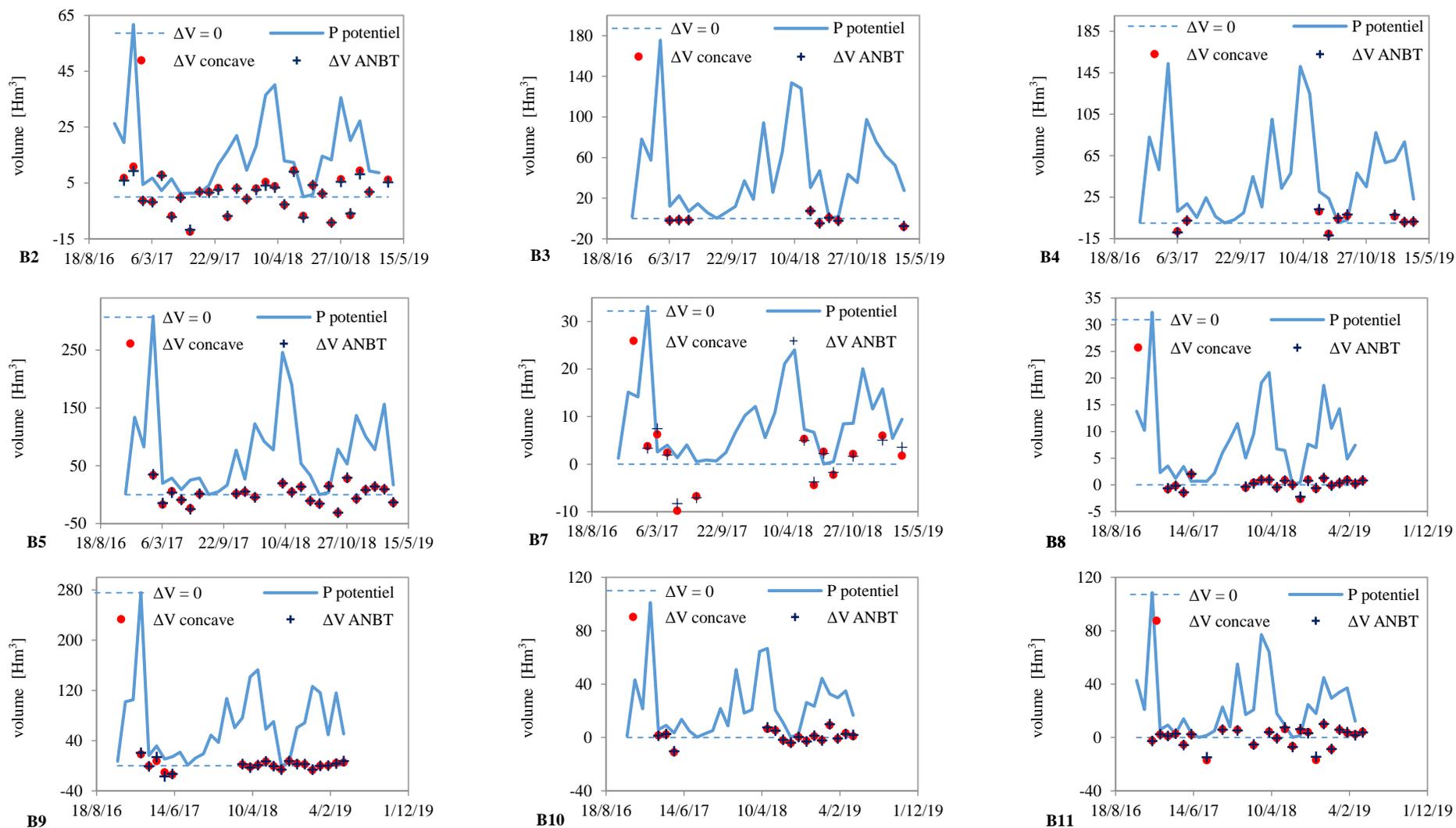


Figure V-5: Séries de temps de la variation de volume pour le profil concave (avec: ΔV concave : variation du volume dans le reservoir calculée en utilisant le modele concave, ΔV ANBT: variation du volume calculée avec les courbes de capacité de l'ANBT, PPotentielle : Pluies tombées sur le bassin)

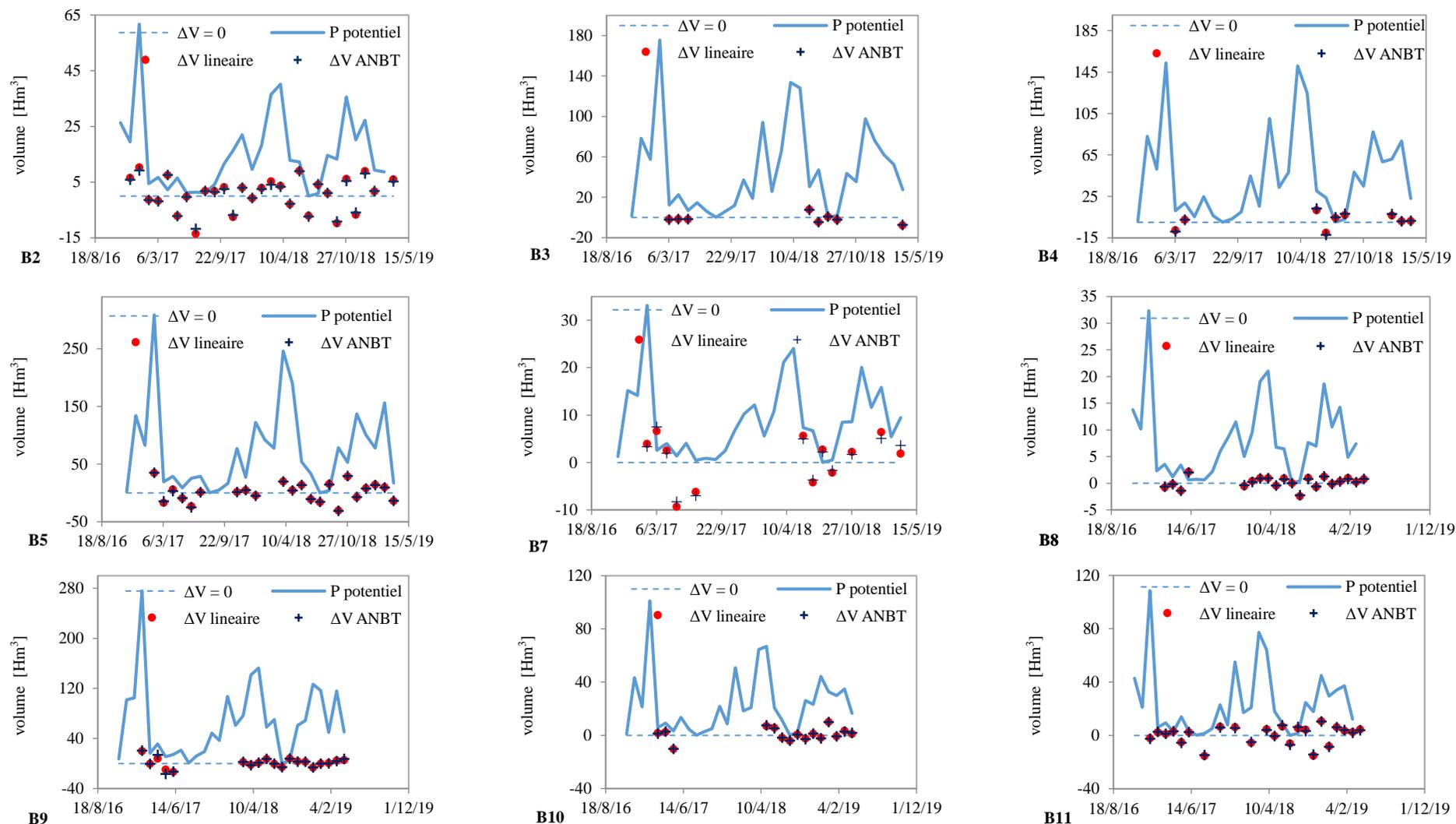


Figure V-6: Séries de temps de la variation de volume pour le profil linéaire (avec: ΔV linéaire : variation du volume dans le reservoir calculée en utilisant le modele linéaire, ΔV ANBT: variation du volume calculée avec les courbes de capacité de l'ANBT, $P_{Potentielle}$: Pluies tombées sur le bassin)

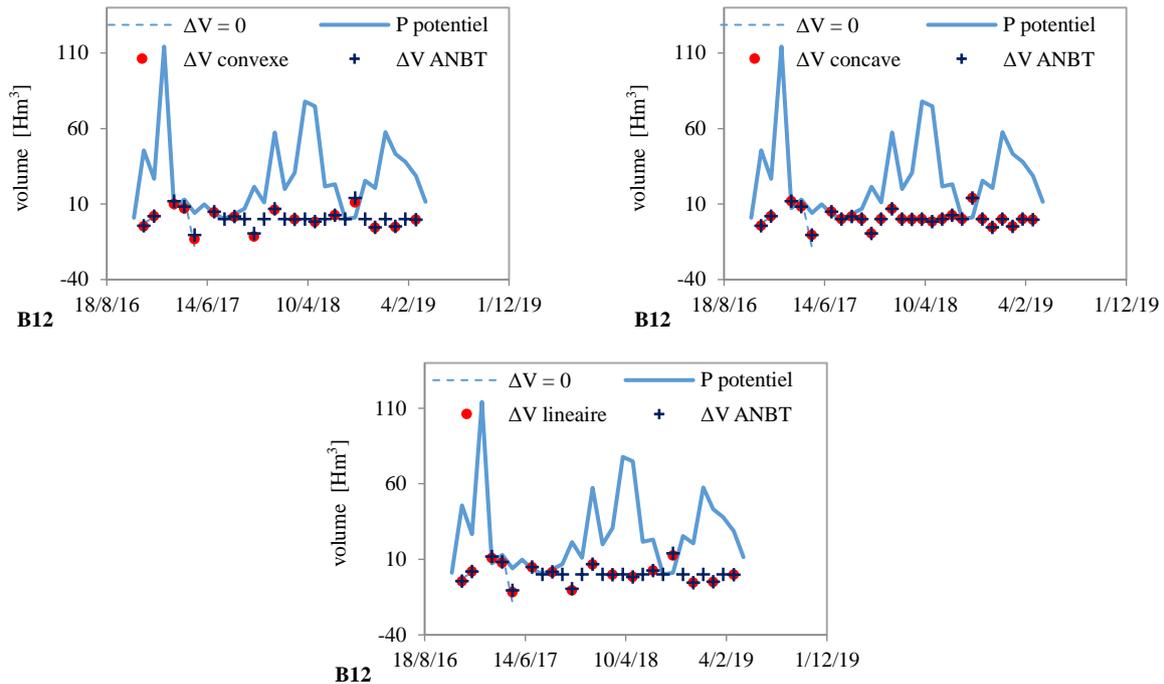


Figure V-7: Séries de temps de la variation de volume pour le réservoir B12 pour les 3 configurations

V.7.1 Discussion

D'après l'analyse globale des séries de temps, on constate que pour l'ensemble des réservoirs étudiés, la variation des volumes d'eau stockés dans les réservoirs est en corrélation avec l'apport potentiel total des pluies calculé. Cette corrélation peut justifier la variation saisonnière du volume (aspect observé également dans les résultats de suivi de la variation des surfaces d'eau et des niveaux d'eau dans les réservoirs).

Durant la période de détection, on observe deux pics remarquables de valeur de précipitations du Janvier 2017 et Avril 2018.

- ♦ Pour le bassin B2, on observe que pour les dates de 06/04/2017 et 30/07/2018, $\Delta V_{calculé}$ est supérieur à l'apport potentiel P_{pot} . Ceci peut être expliqué par l'occurrence de trois (03) phénomènes, soit :
 1. Un important apport associé à la résurgence des eaux souterraines, puisqu'il s'agit de périodes sèches (périodes d'étiages) notamment pour la deuxième date ;
 2. Un volume solide important transporté dans le bassin ;
 3. Un potentiel apport externe.

On observe aussi que, durant la période du 07/03/2017 au 30/11/2017, $\Delta V_{calculé}$ est négatif. Ceci implique que les entrées (apports) au réservoir sont moins importantes que les sorties (pertes). Ce qui signifie que la consommation/pertes est le facteur prédominant dans la variation du volume dans le réservoir.

- ♦ Pour le bassin B3, On observe que, durant la période du 01/11/2017 au 31/01/2018, $\Delta V_{calculé}$ est négatif, malgré l'importance de l'apport potentiel P_{pot} (voir Figure V-6). Ceci implique que les apports (entrées) au réservoir sont moins importantes que les sorties (pertes). Ce qui signifie que les pertes en générale et

éventuellement la consommation est le facteur prédominant dans la variation du volume dans le réservoir.

- ◆ Pour le bassin **B4**, on peut observer une interruption des séries de temps du 07/05/2017 au 01/05/2018. Une longue période, où le niveau d'eau a été en dessous du niveau de référence de 2014, ce qui permet de poser comme hypothèse, que ce bassin a été possiblement fortement surexploité pendant cette période.
- ◆ Pour le bassin **B5**, on observe que, durant la période du 30/11/2017 au 31/01/2018, $\Delta V_{calculé}$ est négatif, malgré l'importance de l'apport potentiel P_{pot} . Ceci implique que les entrées au réservoir sont moins importantes que les sorties. Ce qui nous conduit aux mêmes conclusions que le bassin **B3**.
- ◆ Pour le bassin **B7**, on observe que pour la date du 30/07/2018, $\Delta V_{calculé}$ est supérieur à l'apport potentiel P_{pot} . Ceci peut être expliqué par une possible occurrence de phénomènes, tel que :
 1. La résurgence des eaux souterraines, puisqu'il s'agit de périodes sèches (périodes d'étiages) notamment pour la deuxième date ;
 2. Un volume solide important transporté dans le bassin ;
 3. Un potentiel apport externe.

On observe aussi que, durant la période du 12/2017 au 31/01/2018, $\Delta V_{calculé}$ est négatif, malgré l'importance de l'apport potentiel P_{pot} . Ceci implique que les apports (entrées) au réservoir sont moins importantes que les sorties (pertes). Ce qui nous conduit aux mêmes conclusions que le bassin **B3**.

- ◆ Pour les bassins **B8** et **B9**, On observe que, durant la période du 12/2017 au 31/01/2018, $\Delta V_{calculé}$ est négatif, malgré l'importance de l'apport potentiel P_{pot} . Ceci implique que les apports (entrées) au réservoir sont moins importantes que les sorties (pertes). Ce qui nous conduit aux mêmes conclusions que le bassin **B3**.

Et pour la date du 30/07/2018 (période sèche), on remarque une diminution très importante dans le volume, atteignant 8 fois la variation moyenne durant la période de suivi. Ceci signifie une importante diminution des niveaux d'eau ; de ce fait, les propriétés géo mécaniques, tel que la teneur en eau des talus du bassin, ou la résistance de la structure du corps du barrage, sont susceptibles de subir des changements drastiques, pouvant créer des problèmes d'envasement et de réduction du volume liquide, ou de stabilité respectivement.

Pour le bassin **B10**, on remarque une fluctuation saisonnière, et une bonne corrélation avec la pluie potentielle, qui semble être le facteur prédominant dans les changements occurs dans ce bassin. Le volume présente de faibles variations, ce qui peut indiquer la possibilité d'une gestion de ce bassin qui se fait de manière à conservé approximativement le même volume stocké.

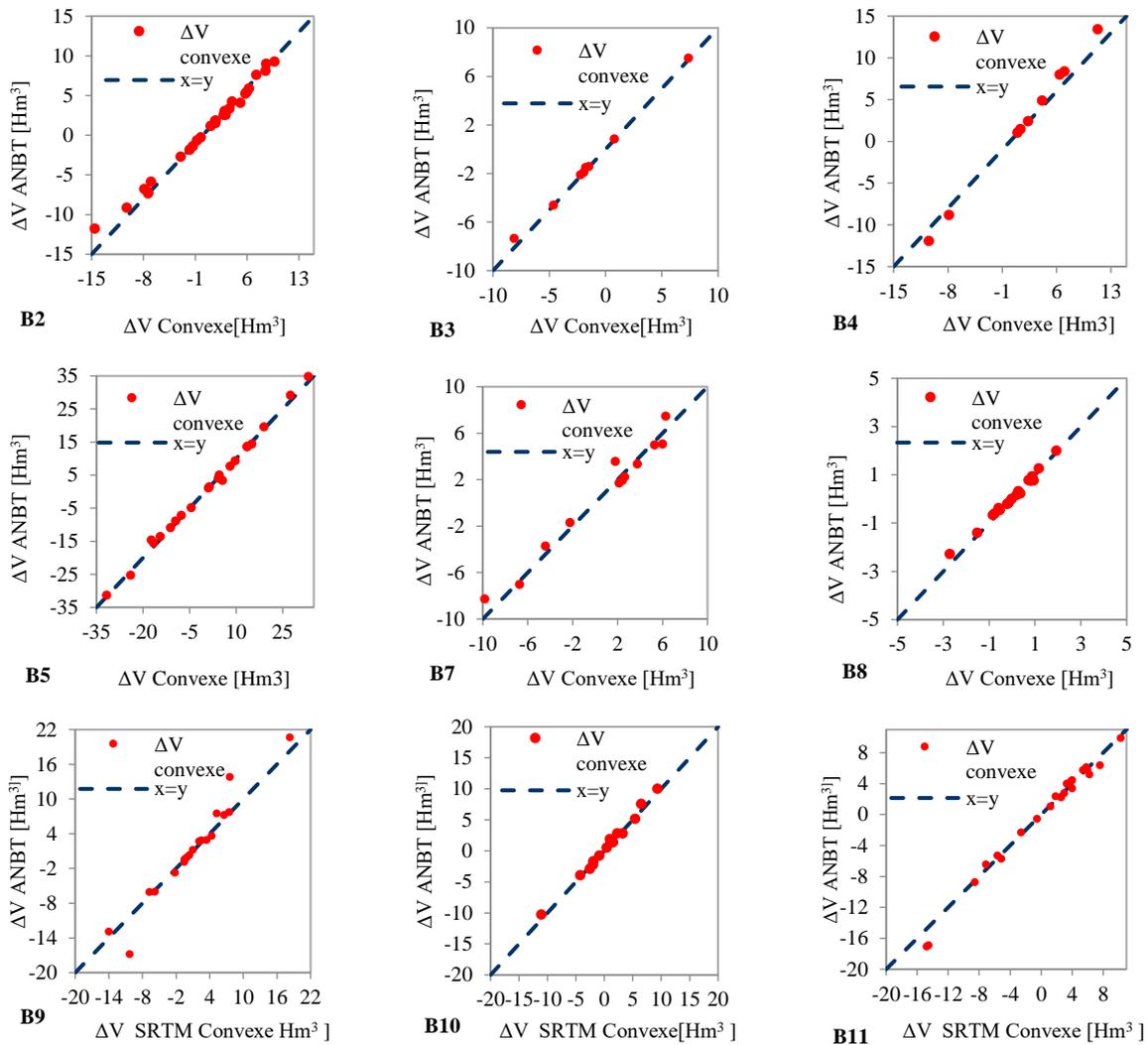
- ◆ Pour le bassin **B11**, on observe que pour les dates de 30/06/2018 et 29/08/2018, $\Delta V_{calculé}$ est supérieur à l'apport potentiel P_{pot} . Ceci peut être expliqué par :
 1. La résurgence des eaux souterraines, puisqu'il s'agit de périodes sèches (périodes d'étiages) notamment pour la deuxième date;
 2. Un volume solide important transporté dans le bassin;
 3. La disponibilité d'une autre source d'alimentation vers ce barrage (transfert, etc.).
- ◆ Pour le bassin **B12**, d'après les informations reçues de l'ANBT, ce barrage est en cours de remplissage, ce qui est en accord avec les résultats du suivi par télédétection,

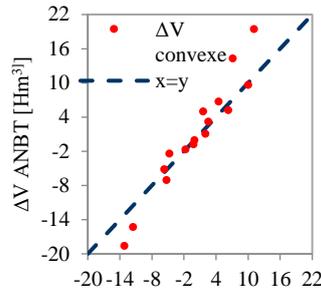
qui montrent une faible variation des volumes d'eau dans le réservoir particulièrement pour l'année 2019.

V.7.2 Validation

Pour valider les résultats des variations de volumes d'eau dans le temps, nous allons comparer les données de (ΔV) estimées par l'approche développée à celles estimées par une approche hybride (similaire à celle développée, mais qui utilise les courbes hauteur-capacité-surface fournit par l'ANBT). Les courbe Q-Q issues de cette comparaison sont données dans les Figure V-8, Figure V-9 et Figure V-10 pour les trois (03) profils (convexe, concave et linéaire) respectivement.

A-profil convexe

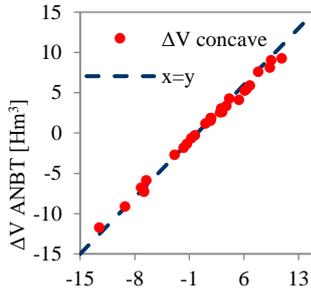




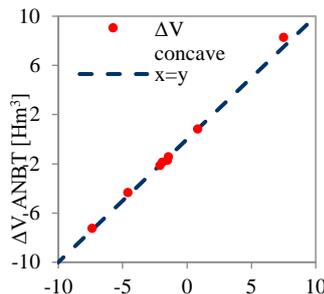
B12 ΔV SRTM Convexe [Hm³]

Figure V-8: Comparaison entre la variation de volume calculée par l'approche développée et celle estimée en tilsant les courbes hauteur-capacité-surface de l'ANBT- Profil convexe

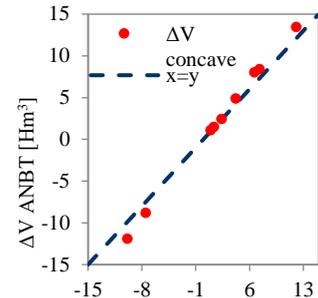
B-profil concave :



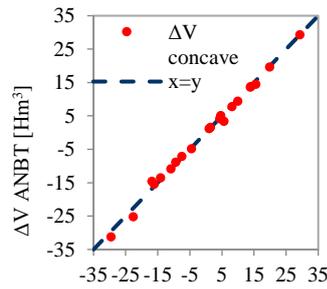
B2 ΔV Concave [Hm³]



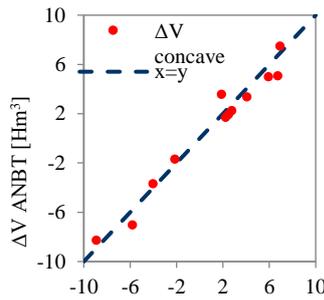
B3



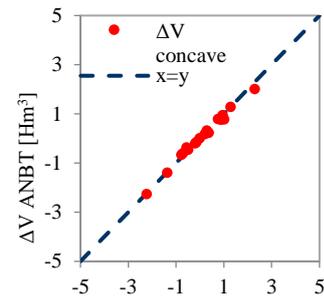
B4



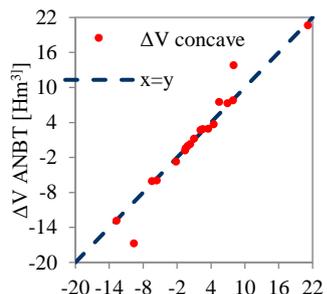
B5



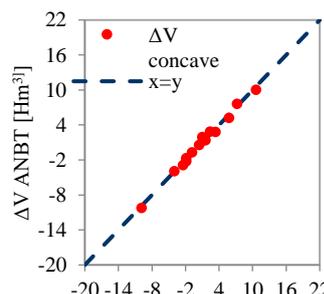
B7



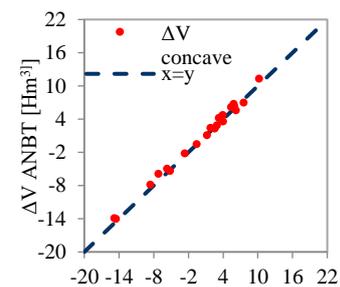
B8



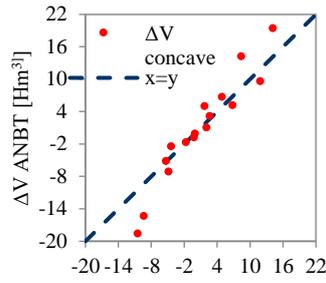
B9



B10



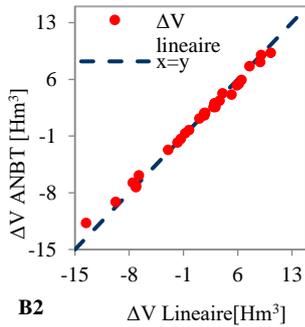
B11



B12 ΔV SRTM Concave [Hm³]

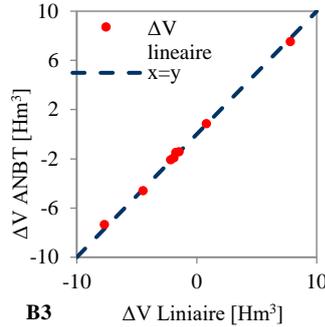
Figure V-9: Comparaison entre la variation de volume calculée par l'approche développée et celle estimée en utilisant les courbes hauteur-capacité-surface de l'ANBT- Profil concave

C-Profil linéaire



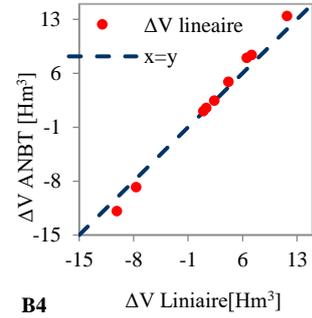
B2

ΔV Linéaire [Hm³]



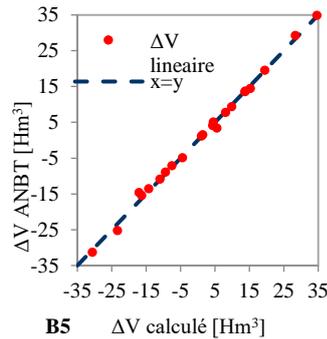
B3

ΔV Linéaire [Hm³]



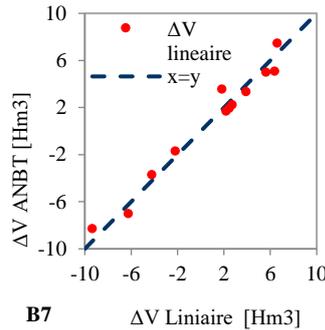
B4

ΔV Linéaire [Hm³]



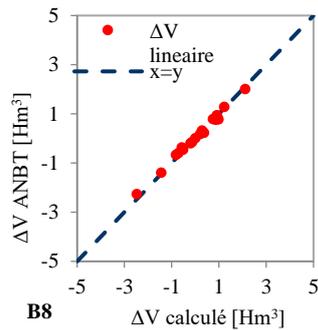
B5

ΔV calculé [Hm³]



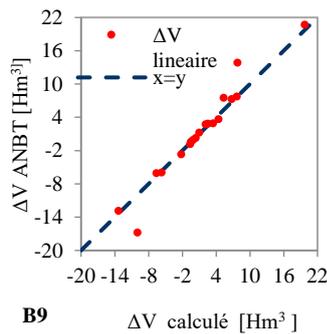
B7

ΔV Linéaire [Hm³]



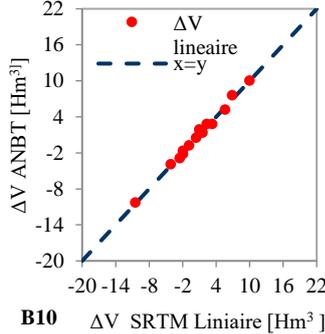
B8

ΔV calculé [Hm³]



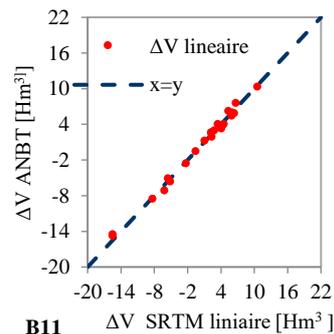
B9

ΔV calculé [Hm³]



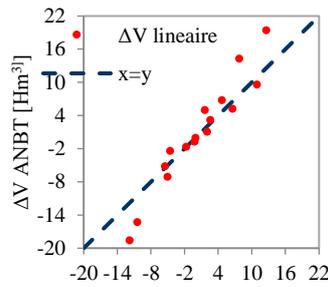
B10

ΔV SRTM Linéaire [Hm³]



B11

ΔV SRTM linéaire [Hm³]



B12 ΔV SRTM linéaire [Hm³]

Figure V-10: Comparaison entre la variation de volume calculée par l'approche développée et celle estimée en utilisant les courbes hauteur-capacité-surface de l'ANBT- Profil linéaire

V.7.2.1 Paramètres statistiques de la validation des variations de volume SRTM/ANBT

Les paramètres statistiques de validation des variations de volumes ΔV_{SRTM} par les (ΔV) de l'ANBT, pour l'ensemble des configurations (convexe, concave, linéaire), sont présentés dans les Tableau V-5 Tableau V-6 Tableau V-7.

Tableau V-5: Paramètres statistiques de validation des variations de volumes : cas convexe

Réservoir	Paramètres statistiques			Réservoir	Paramètres statistiques		
	NSE	RSR	PBIAS		NSE	RSR	PBIAS
B1	0.987	0.112	-36.58	B7	0.995	0.066	1.168
B2	0.949	0.224	8.102	B8	0.924	0.276	-8.228
B3	0.979	0.144	6.500	B9	0.876	0.352	0.624
B4	0.995	0.064	-24.33	B10	0.842	0.317	-6.037
B5	0.961	0.197	-23.97	B11	0.955	0.212	-8.067
B6	0.987	0.112	-36.58	B12	0.805	0.440	-8.527

● : Très bien ● : Bien ● : Satisfaisant ● : Insatisfaisant

Tableau V-6: Paramètres statistiques de validation des variations de volumes : cas concave

Réservoir	Paramètres statistiques			Réservoir	Paramètres statistiques		
	NSE	RSR	PBIAS		NSE	RSR	PBIAS
B2	0.983	0.130	14.551	B8	0.978	0.145	29.252
B3	0.994	0.072	-13.22	B9	0.930	0.264	14.30
B4	0.977	0.152	19.275	B10	0.988	0.108	27.383
B5	0.996	0.063	20.77	B11	0.983	0.129	73.62
B7	0.964	0.187	24.855	B12	0.865	0.366	79.68

● : Très bien ● : Bien ● : Satisfaisant ● : Insatisfaisant

Tableau V-7: Paramètres statistiques de validation des variations de volume : cas linéaire

Réservoir	Paramètres statistiques			Réservoir	Paramètres statistiques		
	NSE	RSR	PBIAS		NSE	RSR	PBIAS
B2	0.988	0.108	-9.52	B8	0.987	0.114	0.275
B3	0.997	0.046	-2.595	B9	0.933	0.258	0.282
B4	0.728	0.521	9.887	B10	0.993	0.084	9.116
B5	0.996	0.057	-4.279	B11	0.993	0.083	0.439
B7	0.965	0.184	-1.060	B12	0.869	0.361	17.354

● : Très bien ● : Bien ● : Satisfaisant ● : Insatisfaisant

V.7.2.2 Discussion

A Configuration convexe

Sur la base des paramètres statistiques calculés pour la configuration convexe, on constate que l'approche tend vers la surestimation de la variation de volume pour tous les réservoirs de barrage sauf pour le cas des réservoirs **B3** et **B4**.

B Configuration concave

Sur la base des paramètres statistiques calculés pour la configuration concave, on constate que l'approche tend vers la sous-estimation de la variation de volume pour tous les réservoirs de barrage sauf pour le cas de réservoir **B3**.

C Configuration linéaire

Sur la base des paramètres statistiques calculés pour la configuration linéaire, on remarque que l'approche donne de meilleures estimations de la variation de volume par rapport aux deux autres configurations (voir les valeurs de PBIAS dans Tableau V-7).

D'après les résultats de la comparaison, on peut clairement constater que le profil linéaire donne la meilleure approximation pour la variation du volume d'eau stockée dans les réservoirs des barrages de la zone d'étude, et également, nous avons pu apprécier la fiabilité d'approche développée dans ce projet, à travers la comparaison des différents paramètres calculés avec aux données de l'ANBT.

V.8 Conclusion

Il est possible de constater que les variations des volumes d'eau dans les différents bassins sont sujets à des fluctuations saisonnières durant la période de suivi, ce qui reflète d'importantes contributions liées aux variations saisonnières des facteurs climatologiques (e.g. apports des précipitations et pertes associées à l'évapotranspiration).

Nous avons également pu donner une série d'hypothèses sur les possibles causes de dégradation des réservoirs, à partir des résultats obtenus, tel que la variation drastique des niveaux d'eau, pouvant provoquer des dégâts considérables, notamment sur la structure du barrage, ainsi que la forme et la topographie du bassin lui-même, comme pour les bassins **B2** et **B11**.

Cette approche nous a aussi permis d'avoir une idée, aussi bien quantitative que qualitative, sur le comportement des paramètres de mesures de capacité (l'évolution de H , S et ΔV), ce qui appuie nos hypothèses adoptées pour cerner les différents problèmes de gestion de la ressource en eau.

Conclusion générale

La bonne gestion des ressources hydriques est une nécessité incontestable pour assurer la sécurité hydrique dans une région en stress tel que l'Algérie. A cette égare, il se doit de passer par l'identification et l'évaluation des paramètres les plus influents sur les changements occurrents sur la ressource, et bien cerner leurs évolutions spatiotemporelles, afin de bien comprendre leurs comportements et permettre une possibilité de prévisions et une amélioration de leurs gestion.

Cette étude vise à proposer une méthodologie basée sur l'exploitation des données issues de la télédétection afin de réaliser un suivi chronologique à grande échelle des grands réservoirs.

Pour ce faire, les produits de télédétection exploités dans le cas de ce projet sont les images SAR, les produit SRTM et les jeux données pluviométriques acquis de NASA POWER Data Access. La zone d'étude choisie est située dans le Centre Ouest du Nord Algérien. Ce choix est motivé par la présence d'un nombre important de réservoirs d'eau, ainsi que la disponibilité des images radar couvrant cette zone.

Le suivi a été fait en analysant les paramètres suivants : niveau et surface d'eau, et la variation du volume d'eau stockée dans les réservoirs, en combinant les différents jeux de données de télédétection. Dans cette étude, il a été question, en premier lieu, d'aboutir à un modèle de variation Hauteur-Surface des différents bassins, depuis les produits SRTM. Parallèlement, les images SAR ont servi à l'estimation de l'étendu des surfaces des plans d'eau des réservoirs étudiés, pour chaque date durant la période de suivi. Une analyse spatiale a permis ensuite, de générer des séries de temps de la variation des paramètres étudiés dans les réservoirs sur une période de deux (02) ans. Puis, en guise de vérification de la cohérence des résultats, il a été sujet de comparer les résultats obtenus à des données fournies par l'ANBT (sous forme de courbes hauteur-capacité-surface).

Les résultats obtenus lors de cette étude ont permis d'avoir un historique sur l'évolution des paramètres étudiés pendant la période de suivi, ce qui permet de faire des hypothèses sur le mode de gestion des barrages, et sur les problèmes qui y sont survenus, tel que les problèmes de transport solide, de stabilité des talus et de changement de la topographie du terrain, qui ont été soulignés comme conséquences possibles à la grande variation du changement de volume au seins des différents réservoirs.

Cette étude a démontré la fiabilité et l'utilité de la télédétection dans la gestion intégrée des ressources en eau de surface. Cette technique a permis de réaliser un suivi à grande échelle, tout en étant de faible cout.

Cette étude permet d'entrevoir plusieurs perspectives futures, qui réside dans :

- Envisager un pas de temps plus fin pour un suivi plus précis à l'échelle d'un réservoir.
- L'utilisation de l'imagerie optique, pour appuyer des résultats sur la topographie, ou bien pour fournir des informations supplémentaires sur la qualité des eaux, ou sur la cartographie d'autre paramètres pouvant influencer la physiologie des réservoirs.

- Introduire la télédétection dans les études de phénomènes extrêmes, qui ocurrent surtout dans le sud Algérien, tel que la propagation des crues, en effectuant une cartographie des zones inondées, et s'en servir comme outil de prévention.
- En vu des applications très nombreuses et variées des produits de la télédétection dans le domaine d'hydraulique, il est recommandé de pencher vers un apprentissage précoce de ces nouvelles technologies.

Bibliographie

- ANBT. Nos barrages [En ligne].2019, [consulté en Mars 2019]. Disponible sur: <http://anbt.dz/index.php/nos-barrages>.
- André, M. Laboratory of ecohydrology ECHO [En ligne].2005, [consulté en Mars 2019]. Disponible sur: <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre2/main.html>.
- Blog SIG and territoires. Outil et méthode/ hydrologie. [En ligne].2019. Disponible sur: <https://www.sigterritoires.fr/index.php/outils-et-methodes/hydrologie/>.
- Boutarfa, S., Bouchemakh, L. & Smara, Y. Comparative.Study of Speckle Filtering Methods In PolSar Radar Images [En ligne].Janvier 2015.
- Chanane, L. Geologie algerienne. Cours dispensé aux élèves de deuxième (2ème) années Génie Minier, 2008. ENP.
- Chandler, W.S. & Whitlock, C.H. NASA Climatological DATA for renewable energy assessment. International Solar Energy Conference, 16-18 Mars. pp.1-7, 2003.
- Chevalier, P. Les hyperfréquences : propriétés et applications,1999.
- Data Climate. CLIMAT-DATA.ORG [En ligne]. 2019. Disponible sur: <https://fr.climate-data.org/afrique/algerie/ain-defla-1121/>.
- Dierking, W., Hanssen, R., Johannessen, J. & Moreira, F. Sentinel-1 ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services. ESA Communications ESTEC, 2012 .PO Box 299, 2200 AG Noordwijk, The Netherlands.
- European space agency. [En ligne]. 2015. Disponible sur: <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>.
- Henry, P., Chastanet, K. & Fellah. Envisat multipolarized ASAR data for flood mapping, 2006. International Journal of Remote Sensing, pp.1921-29.
- Japan aerospace exploration agency [En ligne].1999.Disponible sur: http://iss.jaxa.jp/shuttle/flight/sts99/mis_srtm_e.html.
- Jong-Sen Lee,Jen-Hung Wen, Thomas L. Ainsworth, Kun-Shan Chen et Abel J. Chen, 2009. Improved Sigma Filter for Speckle Filtering of SAR Imagery. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, pp.202-12.
- khan academy [En ligne]. 2018.Disponible sur: <https://fr.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>.
- Kumar, D.N. In Kumar, D.N. Remote Sensing-Remote Sensing Systems. Bangalore, 2013.
- Moriasi, D.N. et al.Model evaluation guide lines for systematic, 2007. 50(3), pp.885-900.
- Musa, Z.N., Popescu, I. & Mynett, A. A review of applications of satellite SAR, optical,altimetry and DEM data for surface water modeling and mapping and parameter estimation, 2015. Hydrology and earth system sciences, pp.3755-69.

- Omar, H.S. Principe du Radar à Synthèse d'Ouverture RSO & Simulation d'une chaîne d'acquisition d'image, 2005. In 3rd International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications. Tunisia, 2005. Centre National des Techniques Spatiales.
- Owe, M., Brubaker, K., Ritchie, J. & Albert, R. Remote Sensing and Hydrology, 2000. Santa fe, New Mexico: IAHS, Wallingford, OX, UK, 2001.
- Podest, E. Applied Remote Sensing Training. [En ligne]. 2018. Disponible sur: <http://arset.gsfc.nasa.gov>.
- Poutarédy, O. image-bitmap-ou-vectorielle. [En ligne]. 2015 .Disponible sur: <http://arts-appliques.ac-orleans-tours.fr/php5/docs/gimp-poutaredy.pdf>.
- PROGRESS, B.d. Projet CREM, Etude d'évaluation du secteur de l'eau en Algerie, 2016. Alger.
- Ressources naturelles Canada. Science de la télédétection. [En ligne]. 2019 .Disponible sur: <https://www.rncan.gc.ca>.
- Schumann, G.J., Bates, P.D., Jeffrey, C. & Neale, C. Measuring and Mapping Flood Processes. In Hydro-Meteorological Hazards, Risks and Disasters. Elsevier, 2015 pp.35-64.
- Smith, L.C. Satellite Remote Sensing of River Innundation Area, Stage and Discharge. Hydrological Proscesses, 1997 pp.1427-39.
- Sorooshian, Duan, Q. & Gupta, V.K. Calibration of Rainfall-Runoff Models:Application of Global Optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting Model. Water resources research, 1993pp.1185-94.
- SRTM GDEM, 2014. [En ligne]. Modèle numérique d'altitude (MNA), SRTM GDEM is a prodect of NASA et NGA, aquisition date: 23/09/2014.
- Stackhouse, P.W., Zhang, T. & Westberg, D. POWER Release 8 (with GIS Applications) Methodology, 2018.Norfolk, VA: NASA Langley Research Center.

Annexes

Annexes

Barrage Bouroumi

B1

