



HAL
open science

Établissement de typologies de retenues par traitement de séries temporelles d'images Sentinel

Julien Kanmegne Mbakam

► **To cite this version:**

Julien Kanmegne Mbakam. Établissement de typologies de retenues par traitement de séries temporelles d'images Sentinel. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. dumas-03562613

HAL Id: dumas-03562613

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03562613v1>

Submitted on 9 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtenir

Le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

Par

Julien KANMEGNE MBAKAM

**Etablissement de typologies de retenues par traitement de séries
temporelles d'images Sentinel**

Soutenu le 07 septembre 2021

JURY

Monsieur Christophe CHARLET

Monsieur Denis FEURER

Monsieur Jérôme MOLENAT

Monsieur Jean-Stéphane BAILLY

Monsieur Jean-Charles PLESSIS

Président du jury

Maîtres de stage

Enseignant référent

Remerciements

Au terme de ce travail, il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma reconnaissance et ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation.

Je tiens d'abord à remercier mes maîtres de stage Monsieur Denis FEURER, Monsieur Jean-Stéphane Bailly et Monsieur Jérôme Molénat ; pour la confiance qu'ils m'ont accordée, pour l'encadrement, l'orientation, l'accompagnement et leur soutien tout au long de cette période de stage.

Je remercie Mon professeur référent Monsieur Jean-Charles PLESSIS pour sa disponibilité et sa bienveillance.

Mes remerciements vont également à tout le personnel du LISAH pour l'accueil chaleureux.

J'aimerais également remercier ma famille et mes amis pour leur soutien moral, les encouragements et les conseils.

Listes des abréviations

CA11 : Chambre d'Agriculture de l'Aude

CESBIO : Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère

CNES : Centre National des Etudes Spatiales

ESA : European Space Agency

GRD : Ground Range Detected

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

INRAE : Institut National de la Recherche Agronomique

LISAH : Laboratoire d'Étude des Interactions entre Sol-Agrosystème-Hydrosystème

MNDWI : Modified Normalized Difference Water Index

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MRVBF : MultiResolution index Valley Bottom Flatness

MSI : MultiSpectral Instrument

NDWI : Normalized Difference Water Index

ONEMA : Office Nationale des Eaux et des Milieux Aquatiques

PIR : Proche Infrarouge

SANDRE : Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau

USGS : United States Geological Survey

Table des matières

Remerciements.....	2
Listes des abréviations	3
Table des matières.....	4
Introduction.....	6
Partie I : Généralités et État de l’art	8
I.1. Principes de la télédétection.....	8
I.1.1. Définition	8
I.1.2. Télédétection RADAR et optique.....	8
I.1.2.1. Télédétection RADAR	8
I.1.2.2. Télédétection optique	11
I.2. Description des capteurs.....	12
I.2.1. Capteurs radar : l’exemple de SENTINEL-1	13
I.2.2. Capteurs optiques : l’exemple de SENTINEL-2	14
I.3. Notion de retenue d’eau	15
I.3.1. Définition	15
I.3.2. Rôle et typologie des retenues	15
I.4. Algorithme d’extraction et d’identification de pixel d’eau	17
Partie II : Site d’étude et base de données	20
II.1. Situation géographique de la zone d’étude	20
II.1.1. France.....	20
II.1.2 Tunisie.....	21
II.2. Données à disposition.....	22
II.2.1. Données satellites.....	22
II.2.1.1. Traitement des images radar.....	24
II.2.1.2. Traitement des images radar.....	25
II.2.2. Données auxiliaires.....	26
II.2.2.1. Données de la chambre d’agriculture de l’Aude	26
II.2.2.2. Base de données Sandre	27
II.2.2.3. Données d’altitude.....	27
Partie III : Méthodes de traitement des données	28
III.1. Plan de traitement.....	29

III.1.1.	Prétraitement des données.....	29
III.1.1.1.	Traitements des données auxiliaires	29
III.1.1.2.	Traitements des données satellitaires	29
III.1.1.3.	Analyse statistique.....	31
III.1.2.	Choix de la sous-zone d'intérêt.....	34
III.2.	Détection des retenues.....	35
III.2.1.	Méthode de détection.....	35
III.2.1.1.	Analyse multicritère	35
III.2.1.2.	Classification	36
III.2.1.2.1.	Principe d'une classification	36
III.2.1.2.2.	Arbre de décision CART.....	37
III.3.	Résultats.....	38
III.3.1.	Résultats qualitatifs.....	38
III.3.1.1	Quantification des faux négatifs.....	40
III.3.1.2	Quantification des faux positifs.....	41
III.3.2.	Résultats qualitatifs	42
III.3.2.1.	Détection des retenues à caractère agricole.....	42
III.3.2.2.	Détection des retenues : cas général.....	43
III.3.2.3.	Détections des retenues sur la base du nombre d'érosion.....	46
Partie IV :	Perspectives.....	49
IV.1.	Détection des plans d'eau : cas général	49
IV.2.	Etablissement d'une typologie des retenues.....	50
Conclusion	.....	51
Bibliographie.....	.....	52
Table des annexes .....	.....	55
Liste des figures .....	.....	62
Listes des tableaux .....	.....	63

Introduction

Les retenues d'eau peuvent jouer plusieurs rôles et peuvent être de plusieurs utilités en fonction des besoins. Elles existent depuis plusieurs siècles et ont servi pour le stockage de l'eau dans le but d'alimenter des moulins à eau, pour la production électrique, l'irrigation des cultures, etc. Au fil du temps, ces dernières n'ont pas vraiment eu des rôles différents et leur principal usage reste l'irrigation. Ces dernières années dans le monde et plus précisément dans les pays chauds comme la Tunisie et dans les zones où il fait chaud à certains moments de l'année (Sud de la France par exemple), on fait face à un phénomène climatique (aridification) qui met en péril plusieurs secteurs notamment l'agriculture. Pour adapter leurs pratiques agricoles, les agriculteurs ont opté pour la construction des réservoirs d'eau communément appelés "retenues d'eau". Pour soutenir les différents acteurs face à ces changements climatiques, le gouvernement français a également décidé de mettre sur pied des projets de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE) afin de mieux partager les ressources en eau entre les différents acteurs¹.

Le PTGE doit pouvoir répartir les volumes d'eau sur toute l'année ; ces volumes d'eau doivent être compatibles avec le schéma directeur d'aménagement et de gestion de l'eau (SDAGE), ils doivent pouvoir respecter les équilibres morphologiques, biologiques et hydrologiques. Le PTGE permet de réguler la croissance du nombre de retenues ; face à cette croissance, Il est nécessaire de connaître les impacts que peuvent avoir ces retenues d'eau sur l'hydrologie, l'environnement ou encore sur l'agriculture (accroissement des rendements, changement des pratiques). Une des limites pour le gestionnaire d'eau en France (les syndicats des eaux, les services de l'Etat, les collectivités territoriales) est l'absence d'inventaire exhaustif des petits plans d'eau et des retenues en particulier. Faute d'outils et de produits opérationnels et implémentables à grande échelle, les inventaires, reposant sur des enquêtes et les cartes de l'IGN, sont incomplets, les retenues les plus petites étant souvent absentes de ces inventaires alors qu'elles sont les plus nombreuses. D'où la nécessité de faire une étude dans le temps de ces retenues d'eau pour déterminer et connaître leurs caractéristiques (surface, volume, hauteur, localisation, type de connexion au réseau hydrographique, ...). Pour une surveillance continue de ces retenues d'eau, et des surfaces en eau en général, la télédétection

¹ Source : Financement des projets de retenue d'eau – Sénat
(<https://www.senat.fr/questions/base/2019/qSEQ190510260.html>)

se présente comme étant la solution la plus envisagée au vu des progrès réalisés au cours de ces dernières décennies. Un des enjeux pour les utilisateurs des images de télédétection est de fournir des méthodes et produits capables de détecter des masses d'eau faibles, avec des dynamiques fortes au cours du temps puisque certaines des retenues peuvent se remplir et se vider en quelques mois voire quelques semaines selon l'usage qui en fait et ses caractéristiques.

Il existe des missions d'observation de la Terre par télédétection qui utilisent des satellites, comme le programme *Copernicus* de l'Union Européenne avec les satellites Sentinel. La capacité des satellites d'observation de la Terre par la télédétection a augmenté ; ces satellites offrent des résolutions spatiales, spectrales et temporelles élevées à l'échelle mondiale sans frais pour l'utilisateur. Cette capacité permet aux scientifiques d'explorer plusieurs possibilités notamment la couverture des eaux de surfaces (*Buma, Lee et al., 2018; Souza et al., 2019*). Ces satellites donnent accès à un panel de produits de niveaux différents.

Pour caractériser les retenues d'eau par télédétection, diverses méthodes ont été mises sur pied en fonction du comportement (remplissage, vidange) de ces retenues ; certains travaux s'apparentent à ceux employés pour les surfaces en eau endoréiques (*Puech, 1993*) qui, pour caractériser la géométrie des retenues, lient hauteur d'eau, volume d'eau et surface en eau. Une méthode par photogrammétrie est utilisée pour déterminer la géométrie 3D des retenues d'eau qui s'assèchent intégralement (*Massuel et al., 2015*).

Ce stage s'inscrit dans le cadre du projet PRIMA ALTOS qui est un projet qui a pour but principal la gestion de l'eau et des terres agricoles en milieu méditerranéen. Pour répondre à une demande croissante de nourriture et d'eau, il faut mettre sur pied des solutions innovantes en matière de planification et de pratique d'utilisation des terres agricoles. Ces solutions doivent viser à mieux collecter, stocker, distribuer et utiliser les ressources en eau. Dans ce contexte, l'objectif général de nos travaux est d'évaluer l'intérêt de séries temporelles d'images optiques et/ou radar pour détecter et qualifier les retenues d'eau selon leur régime de remplissage/vidange. Ces travaux ont été réalisés sur les deux rives de la Méditerranée en France et en Tunisie qui sont les sites sur lesquels intervient le LISAH (le laboratoire de recherche d'accueil du stage). Ce mémoire est divisé en 4 parties : Dans la première partie, nous allons présenter les généralités sur la télédétection ; dans la deuxième partie, nous allons présenter le contexte de cette étude et les données à disposition ; dans la troisième partie, nous allons définir la méthodologie employée dans la délimitation des retenues et dans la quatrième et dernière partie, nous allons présenter les perspectives pour la suite des travaux.

Partie I : Généralités et État de l'art

I.1. Principes de la télédétection

I.1.1. Définition

La télédétection est un ensemble de techniques permettant de déterminer à distance les propriétés d'un objet (naturel ou artificiel). Le rôle de la télédétection est majeur car elle permet d'obtenir des renseignements notamment sur les caractéristiques d'ordre physiques de la surface terrestre (terre et eau) ; elle permet surtout de traiter ces informations par des méthodes statistiques visuelles ou informatiques (analyse multicritère), (*Lenco, 1978*).

Pour obtenir des informations afin de déterminer la nature des objets, la télédétection utilise les propriétés physiques de ces derniers ; ceci implique une interaction entre l'énergie transmise par le rayonnement électromagnétique et les objets. Pour la majorité des plateformes satellitaires, cette énergie est enregistrée par un capteur qui est ensuite transmise à une station de réception sous forme d'une image numérique. Ces données peuvent provenir de capteurs émanant de différentes sources (drones, satellites, avions, etc.), ils acquièrent des informations sur de larges surfaces.

I.1.2. Télédétection RADAR et optique

I.1.2.1. Télédétection RADAR

Le domaine des micro-ondes regroupe les systèmes passifs, qui captent les rayonnements émis par la surface de la Terre et les systèmes actifs composés de diffusiomètres et de radar. Le radar imageur (Radio Detection and Ranging - détection et estimation de la distance par ondes radio) est un système actif qui émet des impulsions dans des longueurs d'ondes centimétriques et qui mesure l'énergie rétrodiffusée. Avec l'imagerie radar, il y a l'avantage que les observations peuvent se faire de jour comme de nuit et au travers des nuages.

Les radars actifs sont généralement constitués d'une antenne émettrice qui envoie une impulsion d'onde électromagnétique vers une cible, et d'une antenne réceptrice qui récupère l'onde rétrodiffusée par la cible.

La topographie de la surface terrestre est représentée sur l'image numérique grâce à la mesure du temps de décalage qu'il y a entre l'onde émise et celle reçue ; ce décalage est d'autant plus grand que les objets sont lointains. A l'issue d'une série de traitements complexes (Synthèse d'ouverture), une image est générée par le système où le sol est la résultante en amplitude et phase de tous les échos générés par tous les points éclairés par l'impulsion émise. La synthèse d'ouverture consiste à affiner virtuellement l'ouverture de l'antenne permettant ainsi d'améliorer la résolution azimutale.

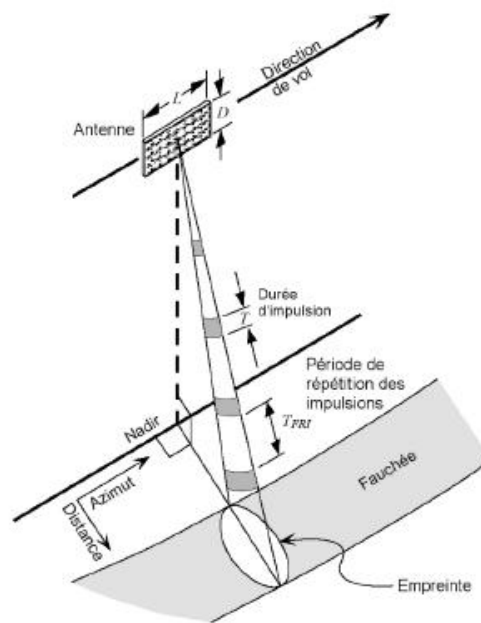


Figure 1 : Géométrie d'acquisition radar, source :Olmsted, 1993

Les images ont une résolution spatiale qui peut aller de quelques mètres pour certains à 1 km pour d'autres. Les longueurs d'ondes utilisées par le radar vont de 0.8 cm à 1.3 cm, elles sont divisées en bandes. Ces bandes ont des caractéristiques précises et sont utilisées dans différents systèmes et sont utiles pour diverses opérations :

- Bandes Ka, K et Ku : ce sont de très petites longueurs d'onde, elles sont très peu utilisées de nos jours ;
- Bande X : elle est très utilisée dans les radars aéroportés pour la reconnaissance militaire et la cartographie ;
- Bandes C : on la retrouve dans plusieurs systèmes aéroportés et spatioportés
- Bande S : elle est intégrée dans le satellite russe ALMAZ ;

- Bande L : cette bande est utilisée par les satellites SEASAT (américain), JERS-1 (japonais) ;
- Bande P : elle a la plus grande longueur d'onde radar.

Tableau 1 : Bandes radar, fréquences et longueurs d'onde

Bande	Fréquence (GHz)	Longueur d'onde (cm)
Ka	26.5 – 40	0.75 – 1.1
K	18 – 26.5	1.1 – 1.67
Ku	12.5 – 18	1.67 – 2.4
X	8 – 12.5	2.4 – 3.75
C	4 – 8	3.75 – 7.5
S	2 – 4	7.5 – 15
L	1 – 2	15 – 30
P	0.3 – 1	30 – 100

Le signal est caractérisé par trois paramètres, en plus de la résolution spatiale :

- La polarisation : Elle caractérise l'orientation des ondes ; elle est généralement définie par deux lettres désignant la polarisation de l'onde émise (pour la première lettre) et la polarisation de l'onde reçue (pour la deuxième lettre). Elle peut être horizontale dans ce cas elle est désignée par la lettre H (c'est lorsque la direction de l'onde électromagnétique est perpendiculaire au plan d'incidence) ou alors verticale désignée par la lettre V (c'est lorsque la direction de l'onde électromagnétique est parallèle au plan d'incidence). En faisant une combinaison, on peut avoir une polarisation identique c'est-à-dire HH ou VV dans ce cas on parle de parallèle et sinon on a une polarisation orthogonale, HV ou VH.
- L'angle d'incidence : c'est l'angle entre l'onde émise et la normale à la surface du sol.
- La fréquence ou longueur d'onde : elle joue un rôle dans l'interaction des ondes micro-ondes avec la surface terrestre. Elle a un impact sur la profondeur de pénétration de l'onde dans le milieu observé mais également sur le concept de la rugosité de la surface observée. Et donc ce qu'on peut déduire c'est que plus la

fréquence diminue, plus la longueur d'onde augmente et plus la profondeur de la pénétration est importante ; il faut également noter que la profondeur de pénétration est aussi liée à l'humidité du milieu.

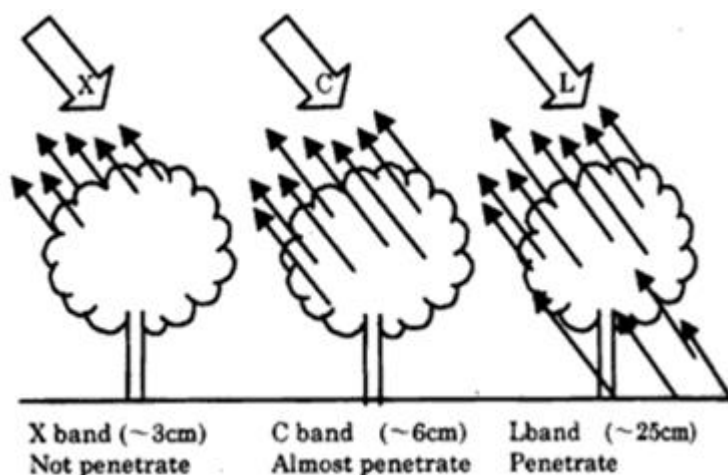


Figure 2 : Capacité de pénétration du signal radar en fonction de la longueur d'onde²

I.1.2.2. Télédétection optique

Les capteurs imageurs enregistrent une partie du rayonnement solaire qui est réfléchi par la surface de la terre. La détection se fait dans une plage spectrale précise : le visible (0.4 μm - 0.7 μm), le proche infrarouge (0.7 μm - 1.3 μm), le moyen infrarouge (1.3 μm - 3 μm) et l'infrarouge thermique (3 μm - 50 μm). La détection se fait uniquement en journée pour le domaine du visible car le rayonnement capté est celui du soleil ; dans le domaine de l'infrarouge thermique, la détection se fait de jour comme de nuit car la nuit c'est l'énergie dégagée par la Terre qui est enregistrée par les capteurs.

Lorsque les faisceaux issus du soleil atteignent des surfaces en eau, ils sont réfléchis dans toutes les longueurs d'ondes du spectre visible. Cependant, les faisceaux ne sont pas totalement réfléchis ; une partie est réfractée et une partie du flux réfracté est absorbée par l'eau et l'autre est rétrodiffusée.

² Source : https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/223142/1/SAR_Remote_Sensing.pdf

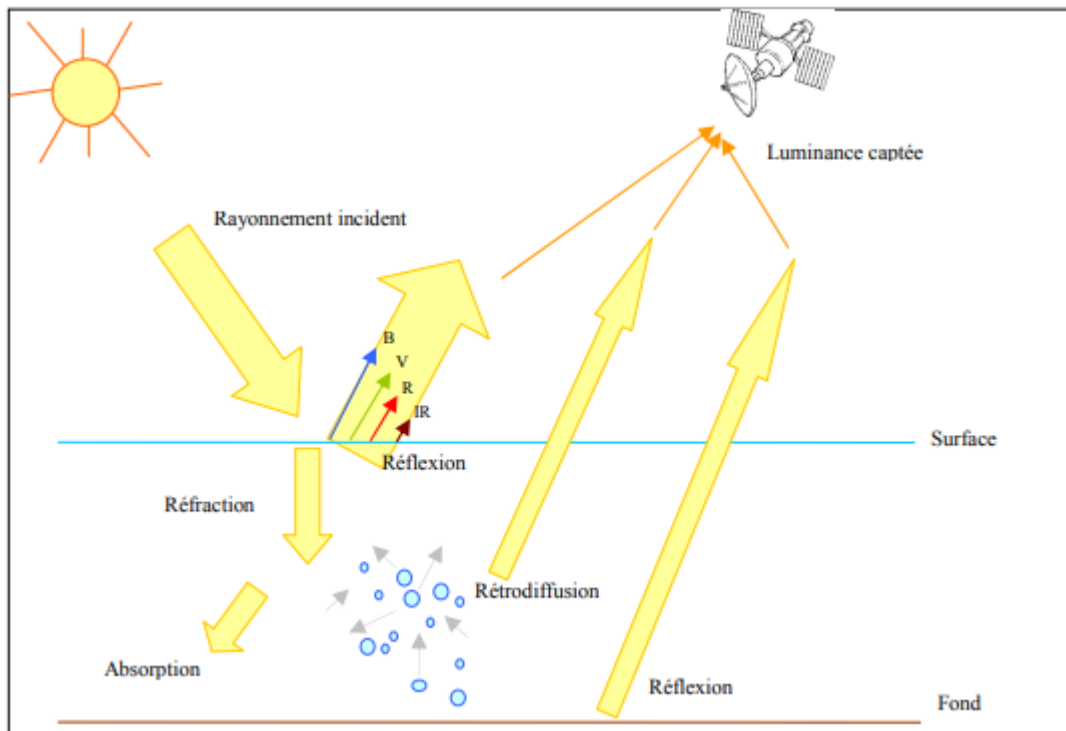


Figure 3 : Interaction du rayonnement solaire avec les surfaces en eau, L. CHAMAILLE

Ce qui est détecté par les capteurs c'est-à-dire la luminance, est une combinaison de la luminance due à la réflexion de la surface de l'eau, celle dispersée dans l'eau et celle due à la réflexion du fond. Sur les images numériques en sortie, après détection, les surface d'eau apparaissent dans des teintes sombres.

I.2. Description des capteurs

Il existe deux domaines d'acquisition de données par les capteurs : le domaine passif et le domaine actif.

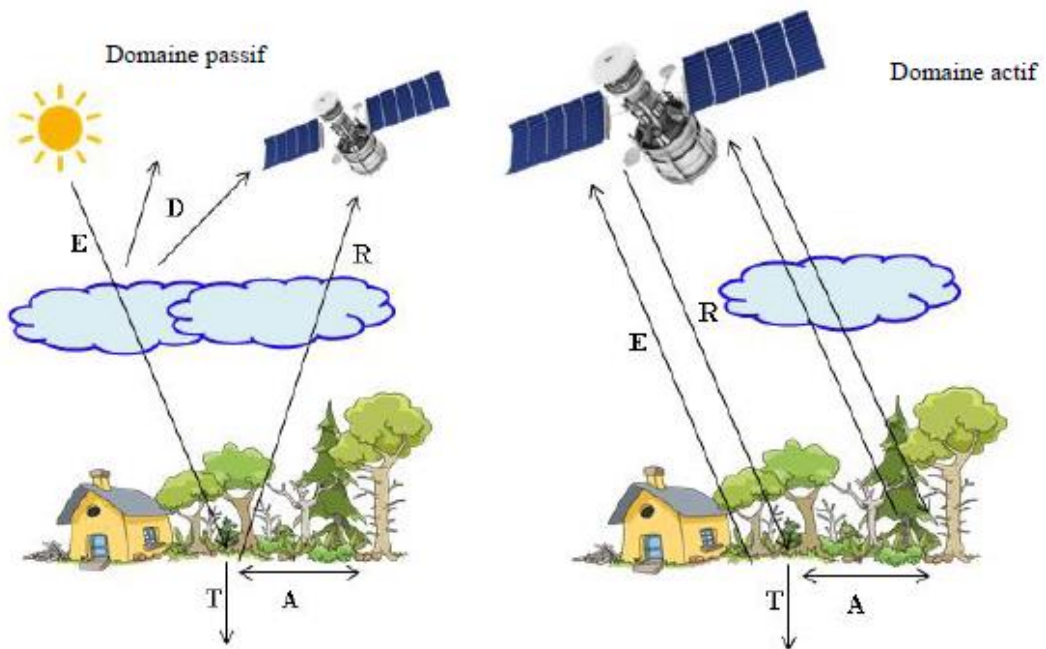


Figure 4 : Fonctionnement capteurs passifs et actifs (E : rayonnement, R : Réfléchi, T : Transmis, A : Absorbé), source : KEMAVO Anounou

Pour développer ces deux différents domaines, nous allons nous concentrer principalement sur les satellites SENTINEL car les données utilisées dans nos travaux sont issues de ces satellites.

I.2.1. Capteurs radar : l'exemple de SENTINEL-1

SENTINEL-1 est la première mission qui a été lancée dans le cadre du programme *Copernicus*. Cette mission est basée sur une constellation de deux satellites : SENTINEL-1A lancé le 3 avril 2014 et SENTINEL-1B lancé le 25 avril 2016, tous les deux partagent le même plan d'orbite. Ils ont une orbite héliosynchrone c'est-à-dire l'altitude et l'inclinaison de l'orbite sont choisis de façon que l'angle entre le plan d'orbite et la direction du soleil demeure quasiment constant ; en configuration opérationnelle, ils ont une période de revisite de six jours.

Ces satellites utilisent des longueurs d'ondes (ou fréquences) différentes ; la principale étant la bande C. Cette différence de longueur d'onde permet au radar de voir à travers les nuages et permet d'obtenir des images quelles que soient les conditions météorologiques. Les capteurs RSO disposent leur propre source d'énergie ; on parle là de capteur actif. Cette particularité permet au RSO d'observer la surface de la Terre à toute heure du jour et de la nuit.

Les capteurs SENTINEL-1 possèdent quatre modes d'acquisition d'images : StripMap, Interferometric Wide Swath, Extra Wide Swat, Wave.

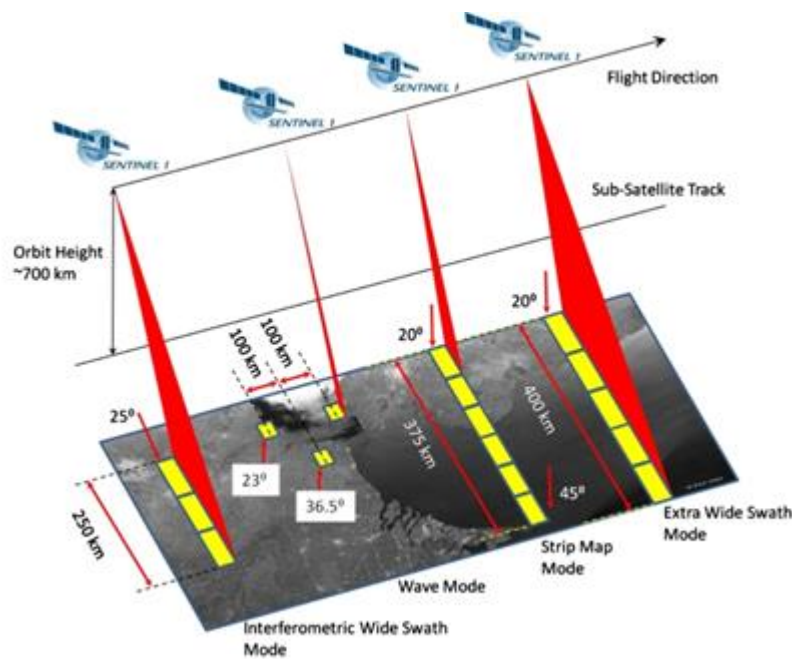


Figure 5 : Différents modes d'acquisition d'images Sentinel-1, Source : European Space Agency³

I.2.2. Capteurs optiques : l'exemple de SENTINEL-2

Deuxième série du programme *Copernicus*, SENTINEL-2 est également composée de deux satellites, SENTINEL-2A lancé le 23 juin 2015 et SENTINEL-2B lancé le 7 mars 2017. Ils ont pour mission de fournir l'imagerie optique (multispectrales) haute résolution permettant l'observation des sols (végétation, fleuves, zones côtières, etc.). Comme les satellites SENTINEL-1, ils ont une orbite héliosynchrone mais avec une inclinaison de 98.5°. Les satellites Sentinel-2 sont munis d'un instrument unique qui est l'imageur multispectral (MSI) qui utilise la technique pushbroom⁴; il fonctionne dans treize bandes spectrales allant du visible au moyen infrarouge. Les bandes du visible (bleu, vert, rouge) et du proche infrarouge ont une résolution de 10 m ; trois bandes (bande 1, bande 9, bande 10) sont destinées aux corrections atmosphériques avec une résolution de 60 m et les six autres bandes restantes ont une résolution

³ https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/document-library/-/asset_publisher/xlslt4309D5h/content/sentinel-2-user-handbook

⁴ Le principe de l'acquisition « pushbroom » est d'acquérir ligne par ligne le spectre et de balayer dans une direction perpendiculaire afin de reconstituer le cube hyperspectral.

de 20 m. MSI est composé d'un ensemble de capteurs optiques passifs donc la collecte des données repose sur la réflexion de la lumière solaire sur la surface terrestre.

I.3. Notion de retenue d'eau

I.3.1. Définition

Les définitions et les appellations varient en fonction du rôle que joue la retenue. De façon générale, une retenue représente « toute installation ou ouvrage permettant de stocker de l'eau (réserve, stockage d'eau, plan d'eau, étang, retenues collinaires, retenues de substitution) quel que soit leur mode d'alimentation (par un cours d'eau, une nappe, par une résurgence karstique ou par ruissellement) et quelle que soit leur finalité (agricole, soutien à l'étiage, maintien de la sécurité des personnes, autres usages économiques) » (*Guide juridique construction de retenues, Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 2011*).

A la différence des grands barrages, il n'existe pas de typologie admise ou réglementaire des retenues d'eau, néanmoins, il est communément admis que les retenues ont une capacité volumique inférieure à 1 millions de m³. La plupart d'entre elles ont un volume qui ne dépasse pas les 100 000 m³. Les profondeurs varient entre 2 et 5 m ; ce qui renvoie à des surfaces maximums d'environ 200 ha.

Le terme « retenue d'eau » est employé différemment selon le contexte dans lequel il est utilisé et peut être remplacé par « retenue de substitution », « bassin de rétention », « retenue collinaire », etc. certains parlent de « réservoir ». Il faut être en mesure de pouvoir faire une différence entre l'ouvrage et la fonction. Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes concentrés sur les ouvrages dont la fonction principale est le stockage de l'eau.

I.3.2. Rôle et typologie des retenues

Il existe une grande diversité de retenues par leurs usages, leur lien avec le cours d'eau, leur forme, leur taille, etc. Selon les travaux d'expertise scientifique collective menés par l'INRAE et ONEMA, on distingue 5 grands types de retenues en fonction de leur mode d'alimentation et de leur position par rapport au cours d'eau (figure 6). Et si l'on y ajoute certains critères comme le type d'alimentation et d'exutoire, l'existence ou non de restitution au cours d'eau, on peut distinguer jusqu'à 23 types de retenues.

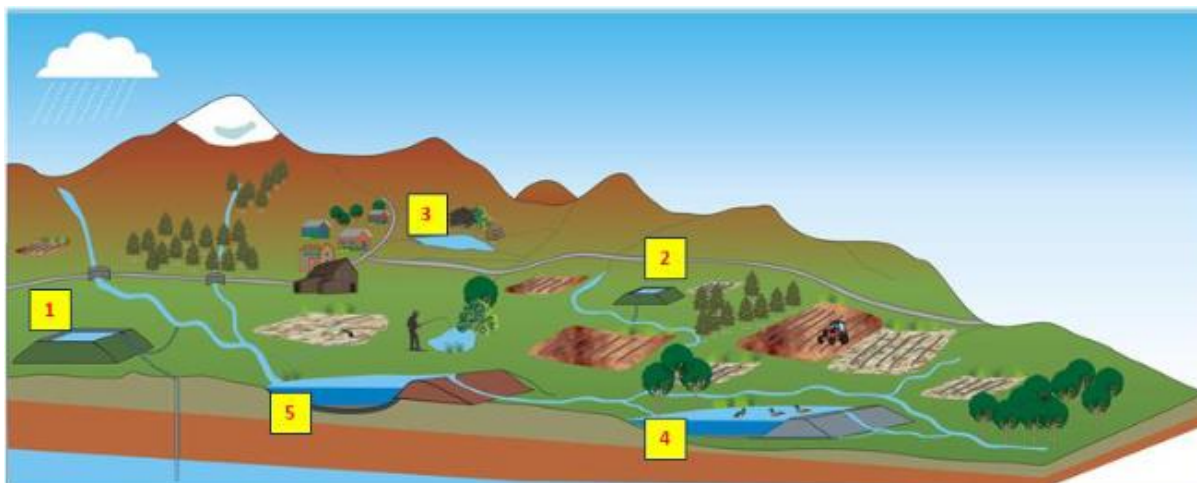


Figure 6 : Emplacement des retenues selon leur type d'alimentation, source : Synthèse de rapport, ESCo

Cette diversité de retenues est dominée par une présence abondante de petites retenues, le plus souvent, à caractère agricole. A l'échelle mondiale, ces retenues se compteraient par millions (Thompson, 2012) ; les USA compteraient 2.5 millions de petites retenues agricoles, l'Australie environ 2 millions. Ces dernières décennies, les retenues ont vu leur nombre s'accroître ; il a été multiplié par 2 à 10 en Australie (Schreider et al., 2002), aux USA, il y a eu une augmentation de 1 à 3% par an (Thompson, 2012). Il existe plusieurs facteurs pouvant expliquer cette croissance du nombre de retenues ; on peut évoquer en particulier le changement climatique et plus précisément la sécheresse. Ceci pousse les agriculteurs à mettre sur pied des moyens leur permettant de pouvoir sécuriser leur ressource en eau de manière à irriguer leurs cultures.

Selon les études menées par l'ESCo (1995-2000), en France les retenues présentent une grande hétérogénéité à l'échelle communale avec une densité de 0.2 retenue/km². Ces chiffres restent des estimations issues des extrapolations réalisées sur la connaissance partielle sur le nombre que les gestionnaires peuvent avoir.

Notre zone d'étude compte environ 5000 retenues dont les surfaces varient de quelques dizaines de mètres carrés à quelques centaines d'hectares.

I.4. Algorithme d'extraction et d'identification de pixel d'eau

Pour une meilleure gestion des ressources en eau, il est essentiel d'opter pour une surveillance continue des plans d'eau. Mais certains pays, notamment ceux qui ont des extensions continentales, ont un problème de manque de surveillance sur le terrain. Les récents progrès dans le domaine de la télédétection permettent de pouvoir compléter les données recueillies sur le terrain ; ceci permet de fournir des informations scientifiques liées à l'eau y compris la couverture des eaux de surface. Pour être en mesure de détecter des objets en eau comme des retenues d'eau, la première étape du processus est d'identifier les pixels qui sont en eau dans les images. Plusieurs approches avec différentes méthodes de détection ont vu le jour à différentes échelles (mondiales, régionales ou locales) c'est le cas de *Pekel et al. (2016)* avec la surveillance sur le long terme des plans d'eau à l'échelle mondiale.

La surveillance permanente des retenues d'eau est utile pour observer et déterminer leurs dynamiques (remplissage/vidange), ceci se fait grâce à des séries temporelles. Connaître cette dynamique n'est pas uniquement utile pour la gestion des eaux mais peut également aider à prévoir des catastrophes naturelles (*Schwatke et al., 2019*). Une étape importante est l'extraction et l'identification des pixels en eau c'est-à-dire de dissocier les pixels en eau des autres formes d'occupation du sol qui peuvent être de la végétation, de la glace, etc. La précision de ce travail dépend de la résolution spatiale du satellite (*Schwatke et al., 2019*).

Durant ces dernières décennies, une variété de produits en surface en eau a été disponibles utilisant des images optiques avec des résolutions différentes comme Sentinel-2 (10 m), Landsat (30 m) ou encore MODIS (250 m). *Schwatke et al. (2019)*, proposent une nouvelle approche d'extraction automatisée de surface en eau à haute résolution afin de voir la variation des surfaces et le niveau de l'eau de différentes retenues (32 retenues exactement) dans plusieurs zones dans le monde. Ils ont utilisé des images issues des satellites Landsat et Sentinel-2 qui présentent les meilleures résolutions spatiales.

Il est tout à fait possible de produire une cartographie de l'eau à partir du radar car il a l'avantage de ne pas être affecté par les conditions météorologiques ou par les nuages mais la détection de l'eau par les images optiques sont plus simples lorsqu'elles sont accessibles (*Shen*

et al., 2019). La séparation de l'eau de la couverture terrestre n'est pas une étape aussi simple que l'on puisse imaginer ; il y a les effets d'ombre ou de nuage et pour y remédier, il est judicieux de prendre les images à différentes dates, à différentes saisons ou alors utiliser des données auxiliaires comme des modèles numériques de terrain ou des cartographies préexistantes.

Pour la détection de l'eau, le seuillage est la méthode le plus souvent utilisée ou alors des algorithmes d'apprentissages déjà existants (*Cordeiro et al., 2021*). Ces algorithmes peuvent être des arbres de décision (*Acharya et al., 2016*), du random forests. La plupart de ces algorithmes reposent sur des indices de l'eau comme le NDWI (*McFEETERS, 1996*), MNDWI (*Xu, 2006*), MBWI, etc. Mais l'utilisation d'un unique indicateur (indice de l'eau) produit des résultats faibles par rapport à l'utilisation d'une combinaison d'indicateurs (*Bangira et al., 2019*).

L'algorithme proposé par le CNES est une méthode robuste d'extraction de l'eau à partir de capteurs optiques à haute résolution qui utilisent une combinaison de différents indices de l'eau (cités précédemment) et des bandes spectrales. La robustesse de cette méthode a été comparée à d'autres algorithmes d'identification tels que Sen2Cor (*Louis et al., 2019*), Fmask (*Zhu et al., 2012; Zhu et al., 2015*), et MAJA (*Hagolle et al., 2010*). Ils ont calculé des masques d'eau sur 16 tuiles Sentinel-2 qui couvrent 9 zones en France qui minimisent la présence de nuage à différentes saisons (été et printemps). Voici un extrait du résultat de la comparaison :

SCENE	FMask	Sen2Cor	MAJA	NDWI B12	MNDWI NDWI B12	MNDWI NDWI B12 MBWI
Bordeaux summer	0.982	0.951	0.773	0.980	0.984	0.984
Camargue winter	0.968	0.919	0.661	0.970	0.966	0.960
Camargue summer	0.977	0.960	0.738	0.977	0.969	0.912
Bordeaux winter	0.977	0.965	0.797	0.925	0.968	0.879
Chateauroux summer	0.573	0.329	0.069	0.869	0.832	0.936
Alsace summer	0.908	0.815	0.123	0.857	0.924	0.938
Alpes summer	0.672	0.886	0.704	0.947	0.937	0.942
Alsace winter	0.903	0.752	0.280	0.917	0.906	0.777

Figure 7 : Extrait du tableau comparatif entre les différents algorithmes d'identification et les différentes combinaisons de seuillage du CNES, source : (Cordeiro et al., 2021)

Sur cet extrait on peut voir 7 fois sur 8 que l'algorithme proposé par le CNES avec différentes combinaisons d'indices présente de meilleurs résultats avec des valeurs Kappa⁵ élevées et toujours supérieures à 0.8. De façon générale, les différentes combinaisons de seuillage ont obtenu des valeurs kappa moyen supérieures aux autres algorithmes (annexe 1).

Les petites retenues d'eau sont très peu surveillées en raison de leur taille, leur grand nombre et de leur dispersion géographique, empêchant ainsi d'évaluer leur potentiel agricole. Landsat a été récemment utilisé pour entreprendre une surveillance à long terme des plans d'eau de surface à l'échelle mondiale (Pekel et al., 2016). Lors de ces travaux, ils ont utilisé des images Landsat avec une résolution de 30 m pour étudier la dynamique des eaux de surface à l'échelle mondiale de 1984 à 2015. Les travaux de Pekel et al. (2016) présentent des limites qui sont liées à la résolution spatiale empêchant ainsi l'analyse des petits plans d'eau (Yamazaki

⁵ Kappa est un estimateur de la précision qui représente le taux de pixels qui n'ont pas été correctement classés par le hasard.

Source : Antoine Billey. Synergie des données Sentinel optiques et radar pour l'observation et l'analyse de la végétation du littoral du Pays de Brest. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2018. ffdumas-02092722

et al., 2016). Ces problèmes sont dus à la présence accrue de végétation inondée et des eaux peu profondes qui affectent le signal de réflectance.

Partie II : Site d'étude et base de données

II.1. Situation géographique de la zone d'étude

Nous avons travaillé sur la zone méditerranéenne en général et en particulier deux territoires nous ont intéressés, un en France et un en Tunisie. Ces régions géographiques ont été choisies pour plusieurs raisons comme les différentes collaborations avec diverses agences (le CNES, la chambre de l'agriculture de l'Aude) qui nous donneront accès à certaines données; on peut également mentionner la présence du laboratoire LISAH (organisme dans lequel le stage est effectué) qui fait des études dans ces zones et qui dispose des données utiles pour ce travail.

II.1.1. France

En France, on s'est intéressé au département de l'Aude. C'est un département de la région Occitanie qui se situe dans le sud. C'est un territoire de 6139 km² ; il est limitrophe des départements des Pyrénées-Orientales au sud, de l'Ariège à l'ouest, de la Haute-Garonne au nord-ouest, du Tarn au nord et de l'Hérault au nord-est. Le département est bordé par la mer Méditerranée sur 47 km.

Il y règne un climat méditerranéen avec des automnes orageux et des étés chauds et secs. Ce climat est contrasté avec dans le nord, la Montagne Noire et dans le sud, les pays de Sault (parties les plus en altitude) où les climats sont à dominante montagnarde avec de très fortes températures. Dans l'ouest, le climat est à dominante aquitaine avec d'importantes précipitations. L'est est marqué par un climat purement méditerranéen. Au centre, le climat est intermédiaire avec des expositions importantes aux vents. L'Aude est l'un des départements les plus venteux en France avec 300 à 350 jours de vent par an.

L'Aude est un pays agricole où domine la viticulture, la culture des céréales ou encore la culture d'oliviers. Face au changement climatique, il y a donc un enjeu ici de la gestion des ressources en eau pour pouvoir irriguer les cultures, pour répondre aux besoins des populations.



Figure 8 : Situation géographique du département de l'Aude, source : <https://www.occitanie.fr/departements-region-occitanie/le-departement-de-laude-11/>

II.1.2 Tunisie

La Tunisie est un Etat d'Afrique du Nord bordé au nord et à l'est par la mer Méditerranée ; cela représente environ 1500 km de côtes. Sa superficie est de 163 610 km² dont plus de 30% est occupée par le désert du Sahara. C'est un territoire dont la température varie en fonction de la latitude, de l'altitude et de la proximité ou de l'éloignement par rapport à la mer Méditerranée. Dans ce territoire, l'agriculture est l'une des activités importantes et joue un rôle important dans l'économie du pays. La superficie des terres agricoles est estimée à dix millions d'hectares qui sont réparties en terres labourables, parcours naturels et forêts.

Avec ses fortes températures, qui peuvent aller jusqu'à 50°C, la Tunisie est depuis plusieurs années le pays méditerranéen le plus touché par le réchauffement climatique ce qui favorise la pénurie en eau et expose les agriculteurs à des sécheresses récurrentes.



Figure 9 : Situation géographique de la Tunisie, source : Par Sting sur Wikipédia français — Transféré de Fr. Wikipédia à Commons., Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1570609>

II.2. Données à disposition

Un certain nombre de données a été mis à disposition en fonction des collaborations qu'a le LISAH avec d'autres organismes. Ces données ont été aussi choisies en fonction de leur accessibilité (gratuit et sans frais pour la plupart). On a travaillé avec des données sur l'année civile 2019.

II.2.1. Données satellites

Ces données sont constituées d'images radar et optique issues respectivement des satellites Sentinel 1 et 2. Le département de l'Aude est recouvert par 5 tuiles Sentinel (T31TCH, T31TDH, T31TDJ, T31TEH, T31TEJ) ; la plus grande partie du territoire se trouve sur la tuile T31TDH et les autres permettent de couvrir le restant.

Ces données ont été organisées comme suit :

- Données mensuelles : on a des images optiques et radar chaque mois de l'année 2019. Elles sont composées, pour chaque mois, de :
 - Optique_raw : nombre de détections d'eau sur les observations optiques ;
 - Optique_view : nombre d'observations optiques ;
 - Optique_cumul : ratio entre le nombre de détection d'eau et le nombre d'observations optiques ;
 - Radar_raw : nombre de détections d'eau sur les observations radar ;
 - Optique_view : nombre d'observations radar ;
 - Optique_cumul : ratio entre le nombre de détection d'eau et le nombre d'observations radar.
- Données annuelles : qui est une synthèse des données mensuelles. Elles sont composées de :
 - All_Optical_cumul : ratio entre le nombre de détection d'eau et le nombre d'observation optiques sur toute la période d'observation ;
 - All_Radar_cumul : ratio entre le nombre de détection d'eau et le nombre d'observation radar sur toute la période d'observation ;

Tableau 2 : Récapitulatif des données Sentinel

Données CNES			
Mensuelles		Annuelles	
Optique	Radar	Optique	Radar
Optique_raw.tif	Radar_raw.tif	all_Optical_cumul.tif	all_Radar_cumul.tif
Optique_view.tif	Optique_view.tif		
Optique_cumul.tif	Optique_cumul.tif		

Les images satellite utilisées ont été traitées par une équipe du CNES ; elle a eu recours à deux algorithmes distincts pour pouvoir traiter les images radar d'une part et les images optiques d'autre part.

II.2.1.1. Traitement des images radar

Les images utilisées dans ce travail sont les images Sentinel-2A. Ces images ont la particularité d'être corrigées des problèmes atmosphériques ; ce sont des produits du niveau 2A. Les produits du niveau 2A sont fournis par plusieurs agences qui utilisent différents algorithmes notamment :

- L'ESA qui utilise l'algorithme Sen2Cor ;
- Théia qui utilise l'algorithme MAJA ;
- USGS qui utilise l'algorithme FMask (Function of Mask).

L'algorithme qui a été proposé par l'équipe du CNES prenait en entrée les images corrigées MAJA de niveau 2A⁶. MAJA de Théia a été choisi parce que sa correction atmosphérique était de meilleure qualité par rapport aux autres algorithmes (*Baetens et al., 2019*). Pour éviter des pixels indésirables, des masques ont été produits et sont issus de différentes sources (*Cordeiro et al., 2021*) ; les catégories indésirables retenues sont : la neige, les nuages, l'ombre des nuages, l'ombre géographique et les eaux océaniques/côtières.

Par la suite un clustering est utilisé pour former des classes pixel en fonction de leur nature; c'est une méthode de classification ascendante hiérarchique (CAH) qui à chaque itération cherche à réduire le nombre de classes en les fusionnant quand cela est possible. Pour cela, deux conditions ont été utilisées dans cette classification ; il s'agit de :

- La distance métrique qui va renseigner la distance entre deux classes données ;
- Les critères de liaisons déterminent comment vont être calculées la distance entre les classes.

Avec ces deux critères répétés plusieurs fois, il se pose une question qui est de savoir à quel moment s'arrêter pour avoir le meilleur nombre de classes K ? Pour répondre à cette question, Cordeiro et al. (2021) ont utilisé l'indice de Calinsk-Harabasz (*Calinski et Harabasz, 1974*) pour déterminer K. L'ensemble des étapes de du traitement pour la détection des pixels en eau se résume dans la figure 10 :

⁶ Source : <https://theia.cnes.fr/>

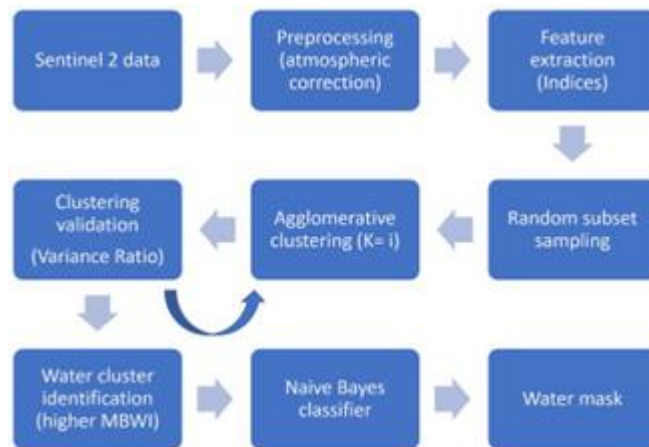


Figure 10 : Etapes de la méthode de détection proposée, source : Cordeiro et al., 2021

II.2.1.2. Traitement des images radar

Pour la partie radar, les images utilisées sont celles prises par le satellite Sentinel-1 disponibles à plusieurs niveaux de traitement. Les images qui ont été considérées sont celles du niveau 1 (level 1 GRD). Avant toute utilisation, ces images doivent être calibrées et ortho rectifiées. Elles ont été préalablement traitées par S1Tiling qui est une chaîne de traitement développée par le CNES en collaboration avec le CESBIO ; ce traitement se passe en trois étapes :

- 1^{ère} étape : il s'agit du téléchargement des données sur la plateforme PEPS du CNES. C'est une plateforme qui offre un accès libre aux différents produits Sentinel 1,2 et 3 ;
- 2^{ème} étape : Ortho-rectification et tuilage des produits S1 GRD sur la grille Sentinel-2. Cette étape est mise en place pour faciliter la superposition des images sentinel-1 et sentinel-2. Elle nécessite d'appliquer une calibration de l'image Sentinel-1 ; il existe 4 types de calibration en fonction du niveau de l'image. Pour les produits GRD la calibration qu'il convient d'utiliser est la calibration gamma⁷ qui est la plus sensible à l'angle d'incidence.
- 3^{ème} étape : Application du filtre du bruit de Speckle. Le but de ce filtrage est de supprimer le bruit et augmenter la lisibilité de l'image. Idéalement appliquer ce filtre consiste à estimer la réflectivité radar en fonction de l'observation bruitée

⁷ Source : <https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/S1-Radiometric-Calibration-V1.0.pdf>

mais aussi de tenir compte des paramètres statistiques de la scène estimée localement.

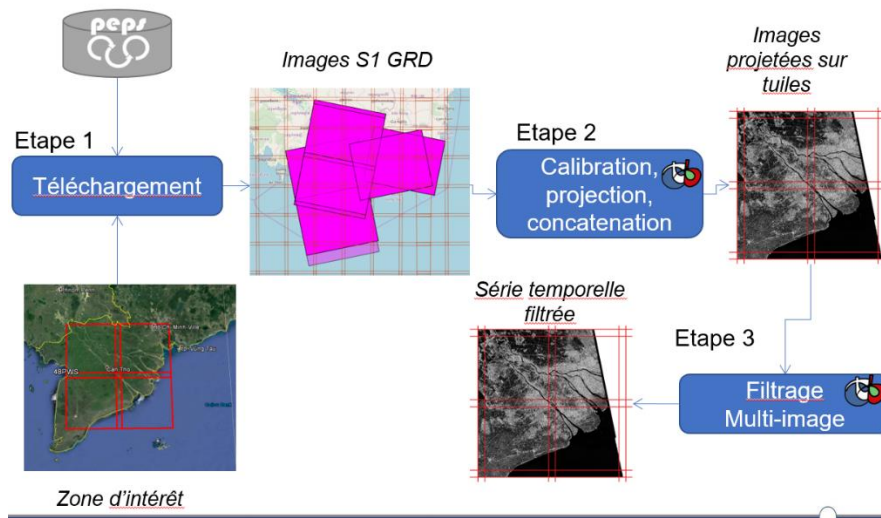


Figure 11 : Etapes de traitement de la chaîne S1Tiling, Source : <https://labo.obs-mip.fr/multitemp/s1tiling-ortho-rectification-a-la-demande-des-donnees-sentinel-1-sur-la-grille-sentinel-2/>

À partir de la cartographie des eaux de surface mondiales et de leurs changements (Pekel et al., 2016), les eaux permanentes (occurrence > 80%) ont été prises comme référence, avant d'appliquer un random forest sur les bandes VV, VH et la somme des deux bandes.

II.2.2. Données auxiliaires

Il s'agit ici des données qui viennent en complément des données satellitaires utilisées. Elles constituent pour certaines, des données de validation. Elles sont de nature numérique, vectorielle ou encore raster ; ces données sont en accès libre accès pour certaines et pour d'autres, leur disponibilité s'est faite grâce à des collaborations.

II.2.2.1. Données de la chambre d'agriculture de l'Aude

Grâce à une collaboration entre le LISAH et la chambre d'agriculture (CA11), nous avons pu entrer en possession de certaines données qui nous communiquent des informations sur la position des retenues à caractère agricole connues par la CA11. Cette base de données

renferme les points GPS en coordonnées cartésiennes et répartis sur l'ensemble de la zone d'étude (figure 12).

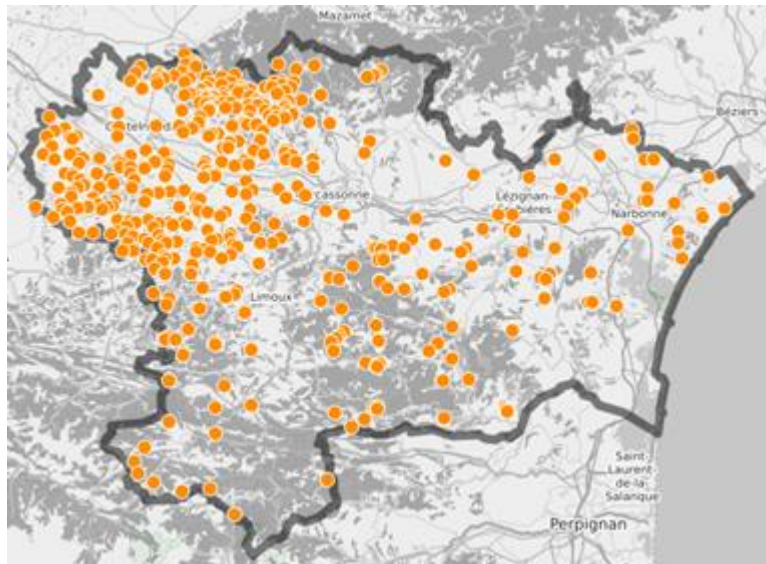


Figure 12 : Répartition des points GPS CA11 (retenues agricoles) sur la zone d'étude, source : http://umap.openstreetmap.fr/fr/map/site-aude_522794#10/43.0303/2.6340

II.2.2.2. Base de données Sandre

Notre étude allant dans un premier temps au-delà des retenues à caractère agricole, très vite la base de données fournie par le CA11 se voit être insuffisante au vu de tous les plans d'eau caractérisables sur images Sentinel ; Pour la compléter, nous avons choisi de télécharger l'ensemble des surfaces en eau en France⁸ contenu dans la base de données BD-Topage. Cette base de données est gérée et mise à disposition par le Sandre (Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau). Par analyse spatiale nous avons pu vérifier qu'elle contient des objets (polygones) qui incluent la totalité des retenues à caractère agricole connues de la CA11. Elle sera utilisée comme une donnée de calibration et validation dans notre travail.

II.2.2.3. Données d'altitude

Les données d'altitude sont données grâce à une mission nommée SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). C'est une mission qui a été effectuée en 11 jours du 11 au 22 février de

⁸ Source : <https://www.sandre.eaufrance.fr/>

l'année 2000 par la navette spatiale Endeavour (STS-99)⁹. Cette campagne d'observation a permis d'établir des modèles numériques de Terrain sur presque l'ensemble du globe terrestre (à peu près 80% des terres émergées).

Plusieurs données issues de cette campagne d'observation sont disponibles avec un libre accès. Ces produits sont de différents niveaux et se distinguent par leur résolution spatiale et la couverture géographique. Pour nos travaux, nous avons utilisé le SRTM1 qui a une résolution d'une seconde d'arc soit 30 m avec une couverture globale.

Tableau 3 : Récapitulatif des données de travail

Données	Fournisseurs	Format
Données satellitaires traitées (radar et optique)	CNES (<i>Santiago et al.</i>)	Raster (TIFF)
Coordonnées retenues à caractère agricole	CA11	Vectorielle (point)
Surface d'eau élémentaire	Sandre	Vectorielle (polygones)
Altitude (SRTM)	USGS	Raster (TIFF)

Partie III : Méthodes de traitement des données

Les traitements qui vont être présentés se classent en deux grandes étapes qui sont les objectifs visés :

- Première étape : la détection des retenues d'eau (dont ceux à caractère agricole) à partir des images sentinel
- Deuxième étape : pour les retenues détectées, établir une typologie de fonctionnement (remplissage/vidange) au vu de leur dynamique de surface en eau.

⁹ Source : <https://www.usgs.gov/>

III.1. Plan de traitement

III.1.1. Prétraitement des données

III.1.1.1. Traitements des données auxiliaires

La base de données Sandre est une couche vectorielle constituée de l'ensemble des plans d'eau de la métropole. Dans un premier temps, nous avons restreint la couche à l'étendue de notre zone d'étude ; chaque retenue dans cette base de données est caractérisée par plusieurs indicateurs notamment la surface, un identifiant, la nature, le statut, etc. Dans un deuxième temps, il était question de restreindre les objets d'étude ; nous nous sommes concentrés uniquement sur les retenues d'eau et l'indicateur le plus discriminant qui nous a aidé à faire cette restriction, était "la nature". Un numéro est attribué à chaque retenue en fonction de leur nature. Une nomenclature¹⁰ est faite par Sandre dans laquelle est décrite ce que représente chaque numéro (la description détaillée de chaque classe est présente en annexe 2) ; les retenues d'eau qui ont été conservées sont celles qui avaient un numéro nature parmi la liste suivante :

- « 2.1 » : plan d'eau – retenue ;
- « 2.1.1 » : plan d'eau – retenue - barrage ;
- « 2.2 » : plan d'eau – réservoir ;
- « 2.2.1 » : plan d'eau – réservoir – pisciculture ;
- « 2.2.2 » : plan d'eau – réservoir - bassin orage ;
- « 2.6 » : plan d'eau - marais ;
- « 2.8 » : plan d'eau – gravière ;
- « 2.10 » : plan d'eau - lagune ;
- « 2.11 » : plan d'eau – lac.

III.1.1.2. Traitements des données satellitaires

Avant toute chose, il est nécessaire de faire une reconnaissance des données. Pour ce travail préliminaire, le logiciel QGIS a été le plus utilisé notamment pour fusionner nos cinq tuiles Sentinel 1 et 2 respectivement pour le radar et l'optique. Les premières images Sentinel

¹⁰ Source : <https://www.sandre.eaufrance.fr/>

qui ont été utilisées étaient les images d'occurrence annuelles dans le but de connaître le comportement global de ce qui a été détecté.

Une première étape après la fusion des tuiles, consistait à faire un découpage des images suivant notre zone d'intérêt avant de faire une binarisation c'est-à-dire attribuer la valeur "1" à tous les pixels ayant une occurrence non nulle et la valeur "0" sinon (figure 13). Binariser l'image nous permet de mieux caractériser ce qui est présent sur les images à savoir ce qui peut être considéré comme retenue d'eau et ce qui ne l'est pas. Ce qui n'est pas considéré comme retenue d'eau (mais prenant une valeur non nulle) sera catégorisé comme du bruit ; donc il faudra déterminer ses caractéristiques c'est-à-dire connaître sa cause, ce que ça représente.

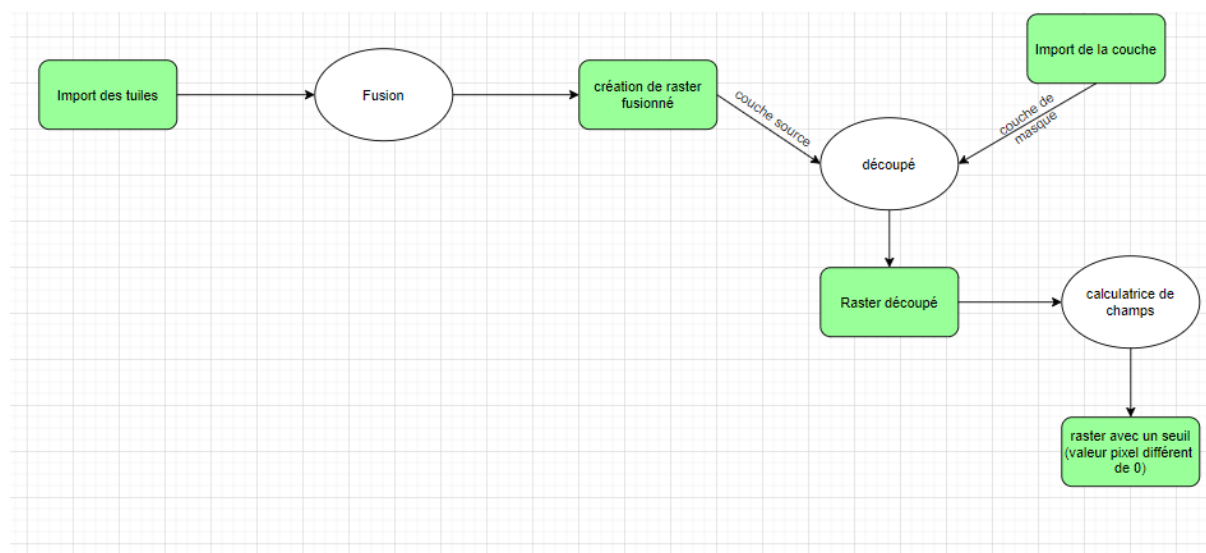


Figure 13 : Traitement de binarisation sous QGIS

Binariser les images optique et radar nous a permis de voir :

- Dans l'optique (figure 14) : Il apparaît un ensemble de pixels classés en eau qui semble s'apparenter à un réseau hydrographique. Ceci se justifie en partie par le fait que dans le traitement des images optiques, on a pris en compte le MERIT Hydro (c'est un jeu de données hydrographique mondial) dans l'algorithme de traitement. MERIT Hydro est une carte hydrographique haute résolution dérivée des données d'altitude MERIT DEM et de l'ensemble des données sur les masses d'eau¹¹.

¹¹ Source : http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/MERIT_Hydro/ page web du développeur Dai Yamazaki

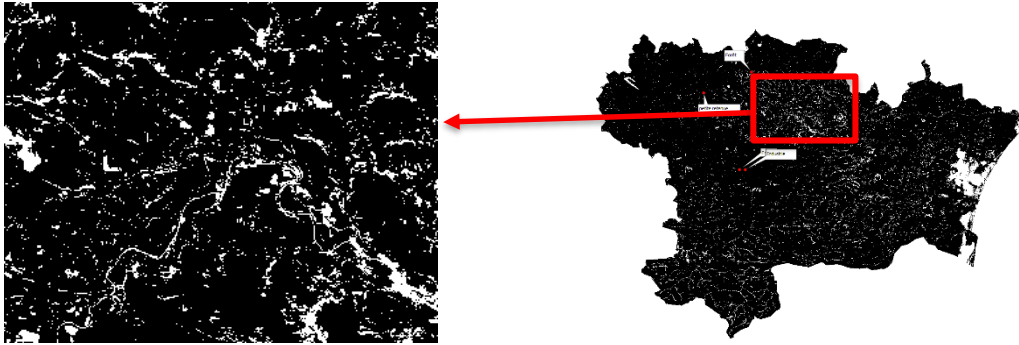


Figure 14 : Image optique binarisée

- Dans le radar (figure 15) : l'image radar apparaît plus bruitée que l'image optique parce que les ondes utilisées dans ce domaine sont beaucoup plus sensibles et pénètrent dans le sol. Le bruit a la forme d'un parcellaire agricole.

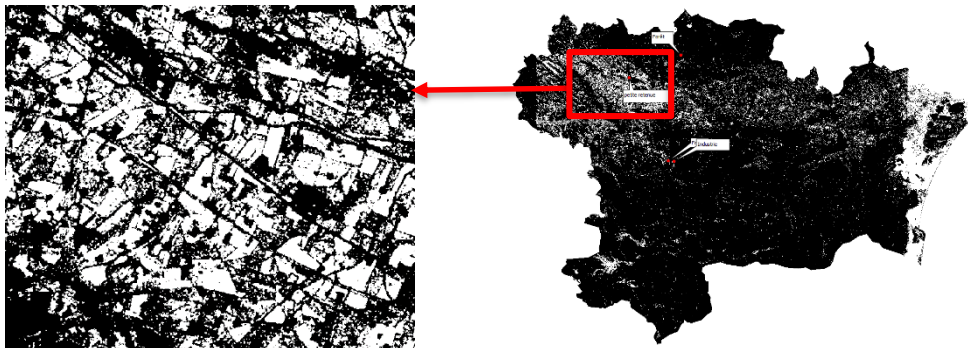


Figure 15 : Image radar binarisée

III.1.1.3. Analyse statistique

Dans la même lancée de reconnaissance des données, nous avons fait une analyse croisée entre nos différentes données afin de constituer notre propre base de données. Par analyse croisée, j'entends de faire des correspondances entre les différents jeux de données c'est-à-dire entre les données CA11 et Sandre, entre les données Sandre et les images satellitaires.

Cette analyse a permis donc de faire des statistiques pour connaître quelle retenue à caractère agricole correspond à une surface d'eau élémentaire de Sandre et également de

connaître quelle surface d'eau est détectée par l'optique ou par le radar ou par les deux et quelle surface d'eau ne l'est pas.

- Première analyse : Sandre – Image Sentinel

En se basant sur les valeurs d'occurrence de chaque pixel qui représentent la teneur en eau de chacun des pixels, on a extrait l'ensemble de ses valeurs correspondant à un polygone (qui représente les contours d'une retenue dans la base données). Il s'agit d'une superposition entre le raster d'occurrence annuelle et la couche vectorielle des polygones et on en a fait la somme pour chaque surface d'eau (figure 16).

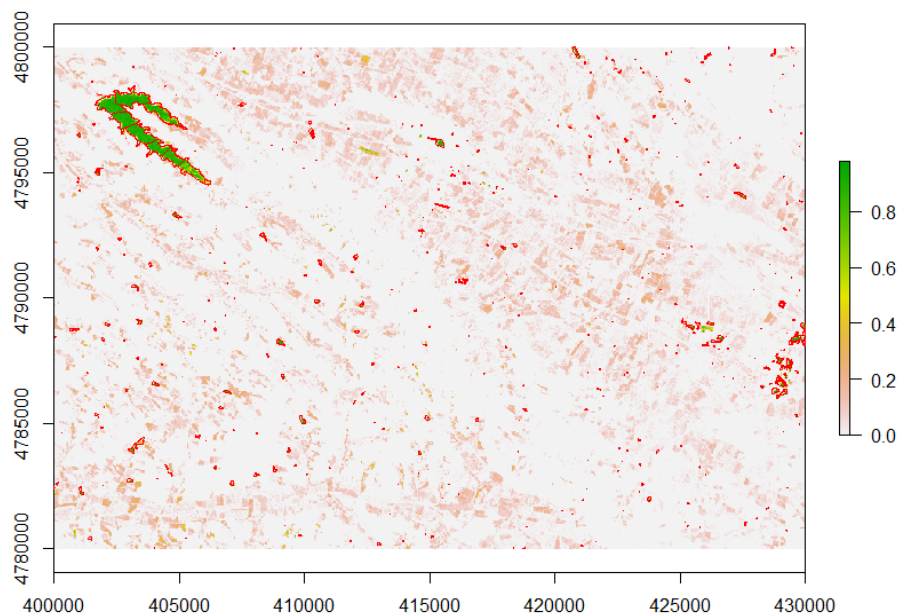


Figure 16 : Superposition entre le raster annuel d'occurrence et la couche vectorielle de la base données sandre (en rouge) ; valeurs d'occurrence : 0 (rouge) – 1 (vert)

Sur la figure 16, les contours rouges représentent les délimitations des polygones de la couche vectorielle ce qui permettent d'encadrer les pixels qui correspondent à des retenues. Pour chaque contour, on comptabilise le nombre de pixels qu'il renferme ; les retenues d'eau d'intérêt sont celles qui ont au moins un pixel avec une occurrence en eau non nulle. Ces retenues-là seront considérées comme retenues vues.

Un tableau a été fait où il est mentionné pour chaque polygone le nombre de pixels mais aussi la somme des valeurs de tous les pixels contenus en son sein (annexe 3), ceci a permis de faire les opérations suivantes et la figure 17 illustre les résultats obtenus :

- Les retenues d'eau vues en radar, sont celles qui ont une somme d'occurrence en eau radar différente de 0 ;
- Les retenues d'eau vues en optique, sont celles qui ont une somme d'occurrence en eau optique différente de 0 ;
- Les retenues d'eau vues en radar et en optique, sont celles qui ont une somme d'occurrence en eau radar et en optique différente de 0 ;
- Les retenues d'eau qui ne sont pas vues en radar, sont celles qui ont une somme d'occurrence en eau radar égale à 0 ;
- Les retenues d'eau qui ne sont pas vues en optique, sont celles qui ont une somme d'occurrence en eau optique égale à 0 ;
- Les retenues d'eau qui ne sont pas vues en radar et en optique, sont celles qui ont une somme d'occurrence en eau radar et en optique égale à 0.

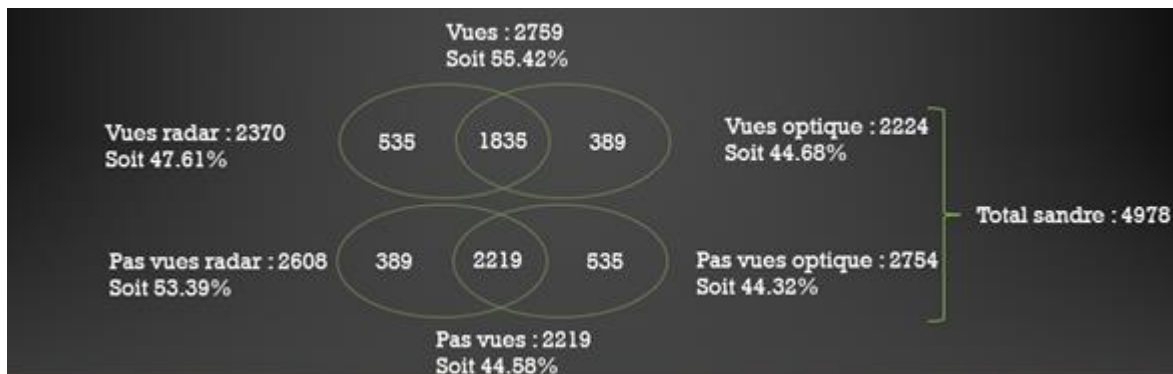


Figure 17 : Résultat statistique sur les objets sandre

A l'issue de cette analyse statistique on se rend compte qu'il y a 2219 retenues sandre sur 4978 soit environ 44% qui ne sont pas vues par le radar et par l'optique et donc elles ne seront pas utilisées pour la suite de notre travail car elles constituent « *un angle mort* » des données satellite.

- Deuxième analyse : Sandre – CA11

L'objectif de cette analyse était de voir quelles retenues répertoriées par la chambre d'agriculture de l'Aude correspondent aux retenues de la base de données sandre qui est plus générale. La base de données de la CA11 sont des points GPS qui représentent les coordonnées des retenues à caractère agricole. Ces points sont situés sur les rives des retenues pour certains ils sont plus ou moins proches en fonction l'accessibilité à la retenue. Un buffer de 50 m autour des polygones de la couche vectorielle a été utilisé pour récupérer les points GPS ; en résultat de cette opération on a une couche vectorielle dans laquelle on a l'information si oui ou non une retenue de la base de données de la CA11 est contenue dans la base de données sandre. Dans le jeu de données de la CA11, on a 473 points GPS ; l'intégralité de ces points correspondent à une retenue de la base de données de sandre, ça représente 100% des points. Si l'on regarde du côté inverse, parmi les 4978 retenues que comptent sandre, il y a 473 retenues qui sont à caractère agricole soit 9.50% des retenues. Dans la suite, la base de données que nous avons constituée (BD sandre + BD CA11) nous allons l'appeler de façon grossière "BD sandre".

III.1.2. Choix de la sous-zone d'intérêt

Avant de s'attaquer à la zone tout entière, nous avons choisi de restreindre notre zone d'étude à une sous-zone d'intérêt qui sera considérée comme notre « zone test » (figure 18). Elle a été choisie parce qu'elle est la partie de notre territoire d'étude qui la plus représentative du bruit. C'est une zone qui fait environ 600 km² (ce qui représente 6 millions de pixel) soit environ 1/10^{ème} de la superficie totale du département de l'Aude. Elle contient 557 retenues Sandre. Cette zone nous servira de « zone d'essai » pour affiner notre algorithme de traitement, avoir les premiers résultats.

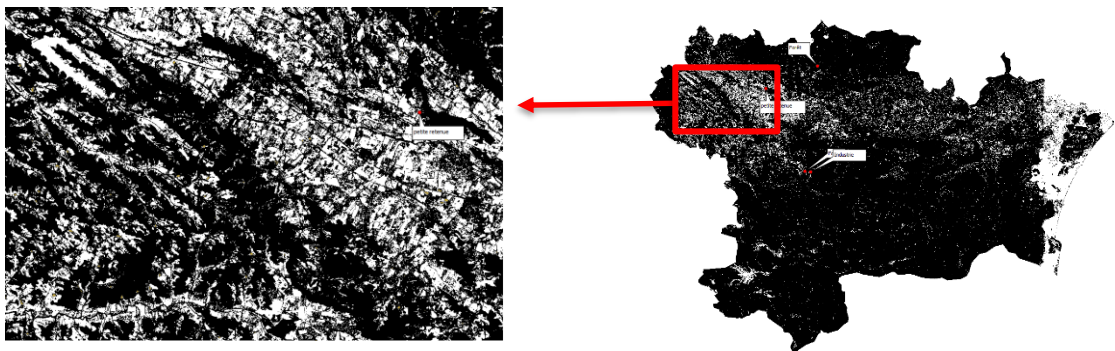


Figure 18 : Sous-zone d'intérêt

III.2. Détection des retenues

III.2.1. Méthode de détection

III.2.1.1. Analyse multicritère

Après avoir binarisé les images, on s'aperçoit de l'importante présence du bruit. La première analyse qui est faite est visuelle ; on s'aperçoit qu'il est difficile d'isoler l'information sur les retenues, du bruit (cf. la figure 18 précédente). Pour scinder ces deux parties, il est nécessaire de déterminer un (ou plusieurs) seuil qui pourrait les classer dans des classes différentes pour une meilleure exploitation de l'information. Avec ce seuil (ou une combinaison de seuils), on devrait pouvoir réduire au maximum le bruit et conserver au maximum les pixels contenant les informations sur les retenues. Dans un premier temps, nous avons travaillé à l'échelle pixel avec pour objectif de détecter les « cœurs » de retenues (c'est-à-dire au moins un pixel de retenue, théoriquement dans sa partie la plus profonde).

Pour caractériser chacune des retenues d'eau, plusieurs indicateurs ont été calculés (chacun d'eux représente un critère d'observation). Le choix de travailler avec plusieurs indicateurs a été fait parce qu'initialement on a travaillé sur trois images séparément (image optique, image radar et la moyenne des deux images), l'objectif était de trouver des seuils à partir des valeurs d'occurrence annuelles uniquement. Cette première analyse a montré que l'utilisation d'un seuil unique pour chaque image ne remplissait pas les conditions que nous avons fixées ; très vite on perdait beaucoup de pixels dans le seuillage (annexe 4).

Pour l'analyse multicritère, les indicateurs utilisés sont des indicateurs statistiques, spatiaux, géométriques ou géomorphologiques (sur hypothèse que les retenues ne sont pas situées n'importe où, mais plutôt dans des dépressions naturelles). Nous avons entre autres :

- Les occurrences annuelles et mensuelles en optique et en radar ;
- Les valeurs statistiques sur ces occurrences (médiane, moyenne, écart-type) ;
- Les valeurs d'altitudes issues du SRTM en optique et en radar : Avant toute opération, il faut noter que de base, notre image SRTM a une résolution de 30 m et pour qu'il soit compatible avec nos images optique et radar qui ont une résolution de 10 m, on a fait un sous-échantillonnage du SRTM ;

- Le MRVBF (MultiResolution indexValley Bottom Flatness) : c'est un indice qui permet d'identifier les fonds de vallée (figure 19). Il se calcule sur la base des valeurs d'altitude (MNT) ; nous avons ici utilisé le SRTM.

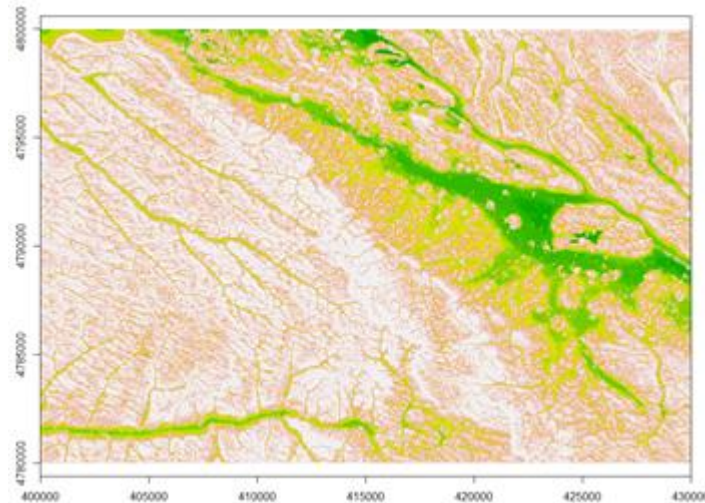


Figure 19 : Indice de planéité (MRVBF)

Au total il y a 36 indicateurs que nous avons mis dans un tableau. Chaque pixel de l'image optique et radar a 36 informations qui le caractérisent.

III.2.1.2. Classification

III.2.1.2.1. Principe d'une classification

Faire une classification consiste à regrouper les éléments d'une image en fonction de leur correspondance. Il s'agit de regrouper des pixels d'une image en catégorie (ou classe) en fonction des caractéristiques plus ou moins similaires entre eux.

Il existe deux grandes familles de classification :

- Classification supervisée : ici, l'utilisateur identifie les zones qu'il souhaite classer grâce à des connaissances qu'il possède sur ces zones. L'algorithme qui sera choisi par la suite par l'utilisateur va déterminer les caractéristiques spectrales de chaque classe et va classer le reste de l'image en fonction des correspondances trouvées ;
- Classification non supervisée : dans ce cas, l'algorithme se charge de classer directement l'image. L'utilisateur intervient uniquement pour définir au

préalable certains paramètres comme le nombre de classes qu'il souhaite obtenir, la variance au sein d'une classe, etc.

III.2.1.2.2. Arbre de décision CART

Dans le cadre de notre étude nous avons utilisé l'algorithme CART qui est un arbre binaire. Il permet d'obtenir des estimateurs par histogramme de la fonction cible. C'est une méthode qui repose sur le partitionnement récursif de l'espace des observations et est représentée par un arbre binaire de décision. À chaque itération, l'arbre se divise du sommet vers les feuilles en choisissant une variable d'entrée qui réalise le meilleur partage de l'ensemble des objets. Sur un nœud, pour choisir la variable de séparation, l'algorithme teste plusieurs variables d'entrées et sélectionne la variable qui maximise un critère donné. On distingue deux types d'arbre de décision :

- Les arbres de classification : qui permettent de prédire la classe de la variable cible ; la prédiction dans ce cas est une étiquette de classe ;
- Les arbres de régression qui permettent de prédire une quantité réelle ; ici la prédiction est une valeur quantitative continue.

Avant d'appliquer l'algorithme CART sur le tableau d'indicateurs, il faut définir la variable de décision. Une nouvelle colonne a été ajoutée au tableau ; elle est issue d'une opération faite sur la BD sandre. Si un pixel appartient à un polygone de la BD sandre alors il se voit attribuer l'étiquette "1" dans le tableau sinon on lui attribue l'étiquette "0". Il faut définir les paramètres de construction et d'élagage de l'arbre de décision ; nous avons constitué des feuilles de 1000 individus minimum. L'élagage de l'arbre se fera de façon automatique en fonction du nombre d'individus minimum que l'on a défini par feuille. Après classification CART, on obtient le résultat suivant (figure 20) :

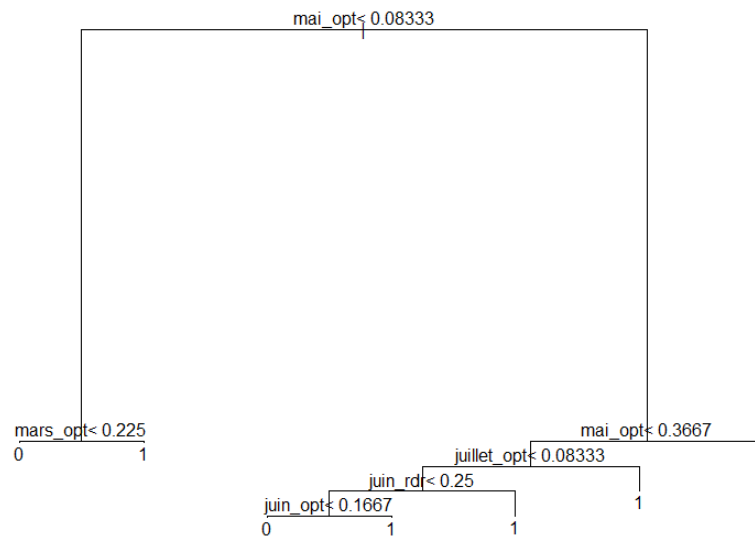


Figure 20 : Arbre de décision obtenu

Ce graphe donne deux informations :

- La première information c'est le poids de l'optique par rapport au radar. L'arbre possède 6 nœuds parmi lesquels on compte 5 nœuds qui sont des occurrences mensuelles optiques.
- La deuxième information qui est renvoyée par l'arbre c'est l'indicateur qui discrimine le mieux les pixels quantifiés dans la longueur des branches ; ici c'est l'occurrence optique du mois de mai. L'occurrence optique de mai apparaît deux fois sur l'arbre sur deux branches consécutives, ce qui montre une fois de plus le caractère prédominant des données optiques.

III..3. Résultats

III..3.1. Résultats qualitatifs

A l'issu de la classification, on obtient la matrice de confusion suivante :

Tableau 4 : Matrice de confusion

Résultat

Classes	0	1	Total	Erreur d'omission
0	5938528	1657	5940185	0.00027
1	9447	50368	59815	0.15
Total	5947975	52025	6000000	

Précision globale = $(5938528+50368) / 6000000 = 0.99$

La précision globale représente le taux de pixels bien classés. Cette précision est fortement impactée par les pixels contenus dans la classe « 0 » qui représentent 99% des pixels.

De cette matrice de confusion, ressortent certains indicateurs comme :

- La précision globale qui a été calculée précédemment ;
- Les erreurs de commission et d'omission qui vont permettre de quantifier les pixels mal classés.

Pour analyser cette matrice de confusion de façon visuelle, on a fait une cartographie (figure 21) de ces pixels pour voir ce que chaque pixel représente. Pour faire cette cartographie, il faut considérer quatre classes (deux classes pour les pixels bien classés et deux classes pour les pixels mal classés).

Tableau 5 : Classes de pixels

Avant classification	Après classification	Classe de cartographie	
0	0	0	Vrais négatifs
0	1	2	Faux positifs
1	0	1	Faux négatifs
1	1	3	Vrais positifs

La troisième colonne représente les classes utilisées pour cartographier les pixels ; on l'obtient en faisant le calcul suivant :

$$\text{Colonne 3} = \text{colonne 1} + (2 * \text{colonne 2})$$

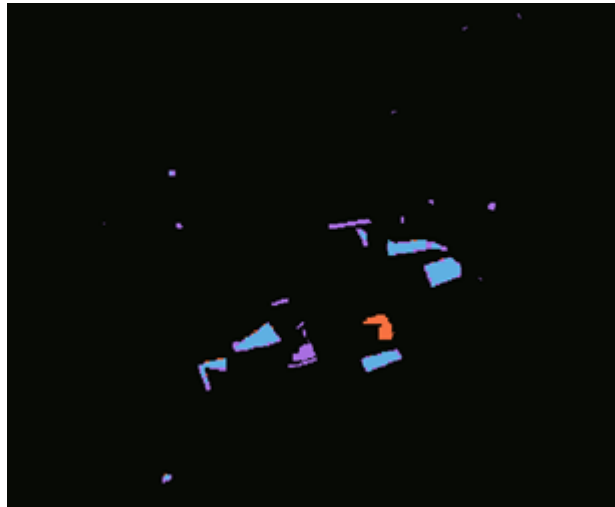


Figure 21 : Extrait de la carte des pixels après classification

- Les vrais positifs (en bleu) : que l'on parvient à mieux classer et qui représentent les « cœurs » de retenues ;
- Les vrais négatifs (en noir) ;
- Les faux négatifs (en violet) : on peut voir qu'ils représentent pour certains des bords de retenues et pour d'autres des retenues toute entières ;
- Les faux positifs (en orange) : qui représentent la sur-détection.

Dans la suite, on va se focaliser sur les pixels qui n'ont pas été bien classés c'est-à-dire les faux négatifs et les faux positifs.

III.3.1.1 Quantification des faux négatifs

Ce sont des pixels correspondant à un polygone sandre qui n'ont pas été bien classés. Comme sur la figure 21 précédente, ils sont de deux types : il y a ceux qui sont contigus aux pixels en eau bien classés (pixels bleus) et il y a ceux qui sont isolés. Pour chaque polygone de la couche vectorielle sandre, la valeur maximale de pixel a été extrait sachant qu'on ne peut avoir comme valeur maximale après classification, soit "0" pour les retenues non détectées,

soit “1” pour les retenues détectées. Parmi ces retenues détectées, seuls les pixels contenus dans la classe de cartographie “1” sont comptabilisés ; on obtient :

- 71.61% des faux négatifs sont contenus dans les retenues détectées ;
- 28.38% sont des pixels isolés ou appartenant à des retenues non détectées.

Par la suite, nous avons fait une vérification des résultats de la classification. Il y a une distinction entre la classification CART (qui permet de détecter les “cœurs de retenues”) que l’on a faite et l’algorithme de seuillage (qui détecte les pixels en eau) qu’a utilisé l’équipe du CNES. On a regardé les proportions de faux négatifs qui correspondent à des valeurs d’occurrence annuelle nulles/non nulles en optique et aussi en radar. On obtient que :

- 78.72% des faux négatifs correspondent à des valeurs d’occurrence radar nulles;
- 98.89% des faux négatifs correspondent à des valeurs d’occurrence optique nulles.

Ces chiffres montrent que la classification CART est essentiellement le reflet de la détection des pixels en eau faite par l’algorithme du CNES. Cela signifie que concernant les faux négatifs qui sont dans la classe “0” après classification, ils représentent des retenues qui initialement n’ont pas pu être détectées par l’algorithme du CNES, ils représentent ici les pixels isolés.

III.3.1.2 Quantification des faux positifs

Ils représentent la sur-détection autrement dit, ce sont des pixels qui, avant la classification ont été classés comme des pixels n’appartenant pas à une retenue de la BD sandre et qui après classification a été comme pixels appartenant à une retenue. Parmi les pixels que l’on cherche à détecter c’est-à-dire les pixels qui sont dans la classe “1” avant la classification et aussi les pixels qui sont en “1” après la classification ; les faux positifs représentent 2.7% de ces pixels.

L’objectif est de déterminer la nature des objets que représentent les faux positifs. À partir de la BD sandre brute (sans avoir fait le tri des retenues d’intérêt), une superposition a été faite entre cette couche et le raster d’occurrence annuelle, et comme sur la figure 22 suivante, on peut le constater que ces groupements de pixels ne sont pas répertoriés dans la BD sandre. Nous avons utilisé des images Google (figure 22) pour avoir une idée de la nature de

ces pixels et la conclusion est que ces pixels représentent pour la plupart des sablières et carrières qui ne sont pas des plans d'eau permanents.



Figure 22 : Mise en évidence des faux positifs par rapport à la base de données sandre

III.3.2. Résultats qualitatifs

Dans ce paragraphe, on va se concentrer sur les pixels détectés comme étant des pixels appartenant à une retenue. L'objectif de cette analyse est de comprendre pourquoi certaines retenues ne sont pas détectées.

III.3.2.1. Détection des retenues à caractère agricole

Dans un premier temps, les analyses ont été axées sur les retenues agricoles. Nous avons fait des intervalles de surfaces de 2500 m² à l'intérieur desquels on a fait un décompte du nombre de retenues (détectées et non détectées). Pour chaque intervalle, on détermine le pourcentage de retenues détectées (figure 23).

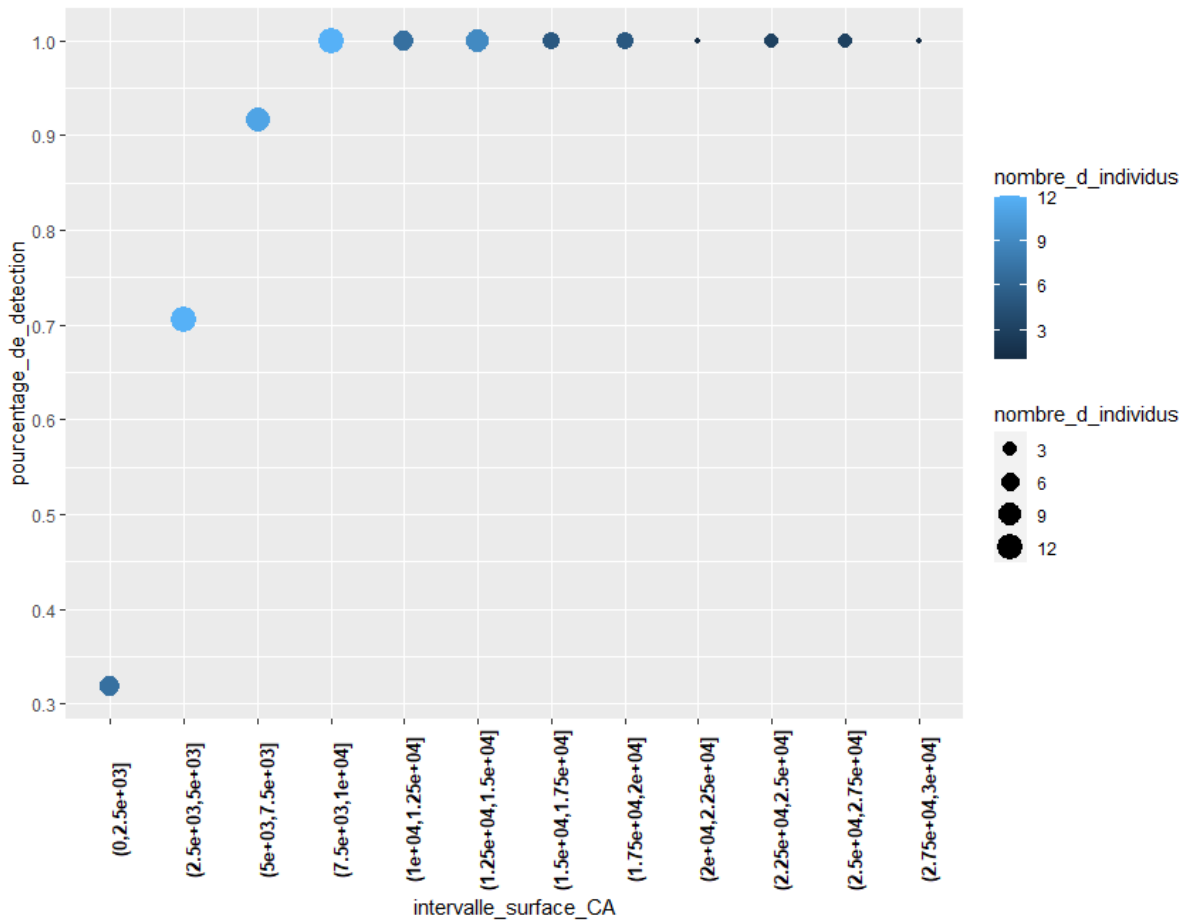


Figure 23 : Graphe donnant le pourcentage de détection des retenues à caractère agricole en fonction de la surface

Le graphe représente le taux de détection des retenues agricoles en fonction de la surface. La courbe qui en résulte est croissante et convergente vers un taux de détection de 1 à partir de l'intervalle [7500 ; 10000] m². On peut dire que 7500 m² est le "seuil de détection" des retenues agricoles. On s'aperçoit aussi que plus la surface est grande, plus le taux de détection augmente.

III.3.2.2. Détection des retenues : cas général

Ici, toutes les retenues ont été prises en compte. Le même procédé du paragraphe précédent a été appliqué. Les intervalles de surface ont une longueur de 5000 m² ; il est différent de ce qu'on a pris dans le cas des retenues agricoles pour des raisons de clarté dans l'affichage du graphe mais aussi parce que le nombre de retenues dans ce cas est plus grand (557 retenues contre 415). On peut voir le résultat sur la figure 24 suivante.

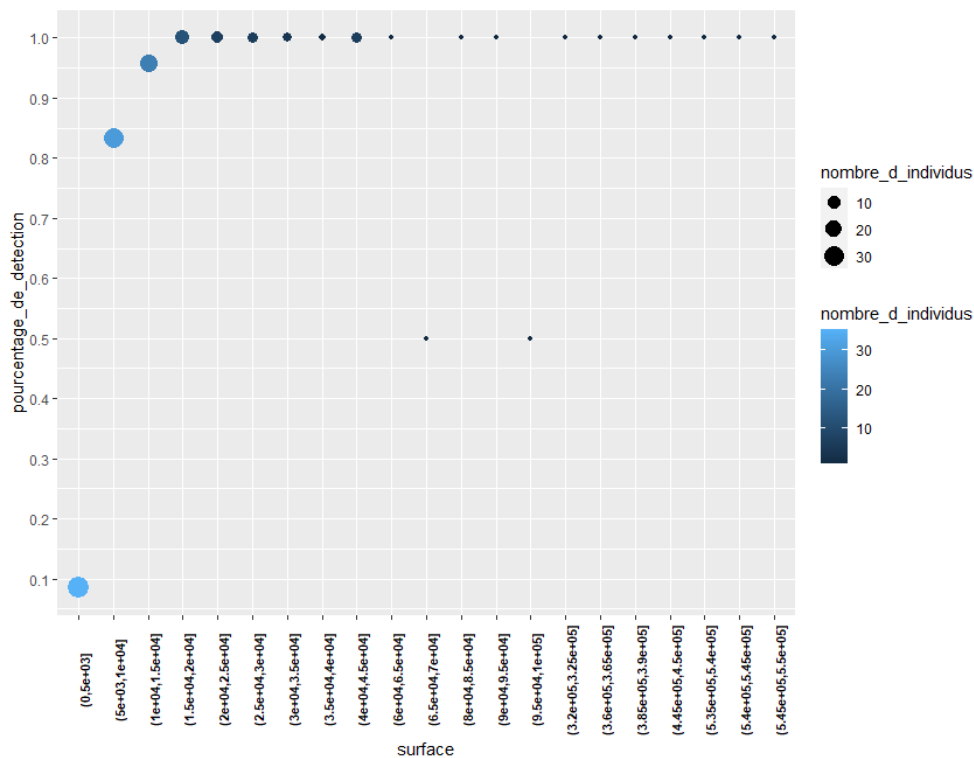


Figure 24 : Graphe donnant le pourcentage de détection des retenues de la BD sandre en fonction de la surface

L'allure de la courbe est similaire à la courbe de la figure 23 (cf. paragraphe III.3.2.1). Ici, le point de convergence est de 1 et il est atteint à l'intervalle [15000 ; 20000] m² ; dans ce cas de figure, le seuil de détection est de 15000 m². On peut voir deux intervalles de surface ([65000 ; 70000] et [90000 ; 95000]) qui ont un pourcentage de détection à 0.5 ; chacun de ces intervalles contient deux retenues d'eau. Ceci s'explique par le fait que certaines retenues d'eau se situent en limite de la sous-zone d'intérêt et la partie qui se trouve à l'intérieure de la sous-zone n'est pas en eau (annexe 5) ; ce qui explique que l'algorithme ne détecte qu'une seule retenue sur deux dans ces intervalles. En conclusion, toutes les retenues d'eau avec une surface supérieure ou égale à 15000 m² sont détectées mais pour celle ayant une surface inférieure à 15000 m², il y a une partie qui est détectée et une autre qui ne l'est pas.

Pour affiner le seuil de détection, on s'intéresse cette fois-ci aux retenues d'eau ayant une surface inférieure à 15000 m². Nous avons introduit un indicateur forme qui représente l'allongement. Cet allongement est donné par le coefficient de compacité de Gravelius (*Bendjoudi et al, 2002*) ; il est défini comme étant le rapport du périmètre d'un bassin donné à celui d'un cercle de même surface. Le coefficient de Gravelius est toujours supérieur à l'unité

dont la forme la plus compacte est le cercle. Il est d'autant plus grand que le bassin est allongé. Il est donné par la formule :

$$k_G = 0.28 * \frac{p}{\sqrt{A}}$$

Avec :

- P qui représente le périmètre de la retenue d'eau
- A qui représente la surface de la retenue d'eau

Cet indice de forme a été calculé pour chaque retenue d'eau et nous avons fait un graphe représentant la surface en fonction de cet indice comme le montre la figure 25.

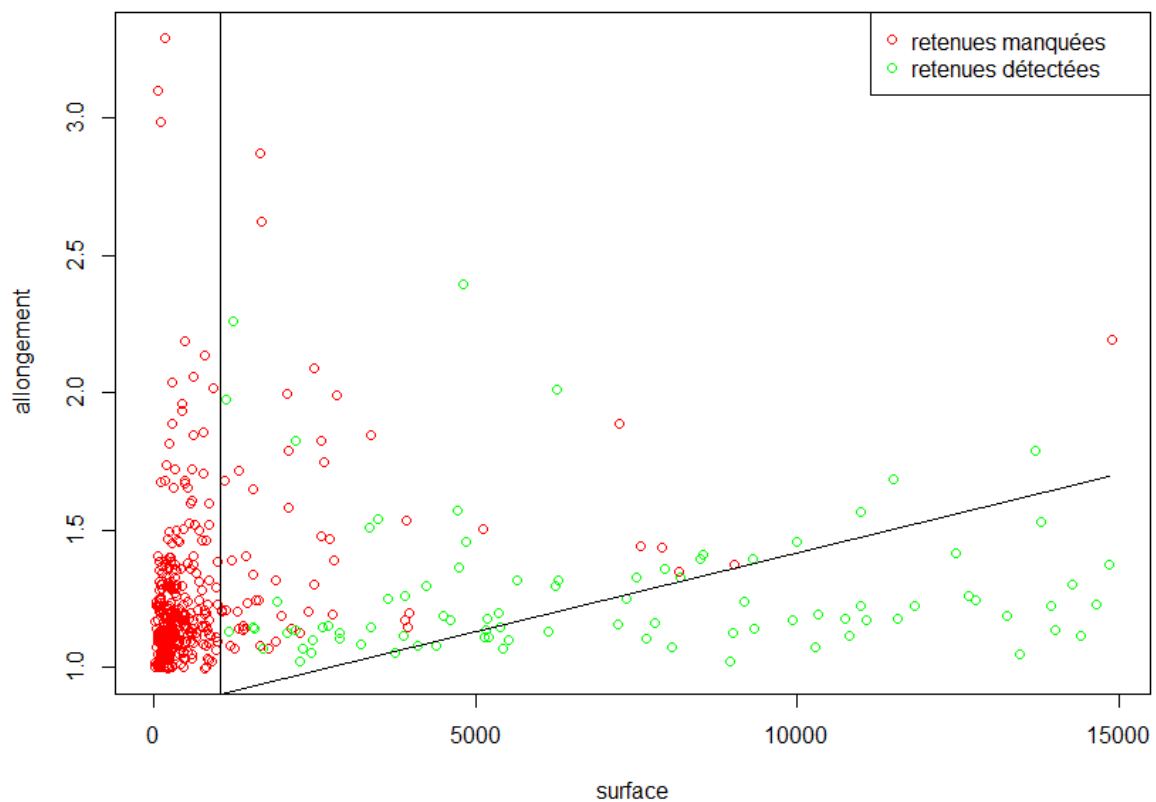


Figure 25 : Allongement (indice de compacité) en fonction de la surface

D'après ce graphe, les retenues peuvent être divisées en trois catégories :

- 1^{ère} catégorie : constituée de retenues d'eau qui ne sont pas détectées, avec des surfaces inférieures à 1000 m² ;

- 2^{ème} catégorie : constituée de retenues d'eau qui sont détectées ; ces retenues sont situées en dessous de la ligne oblique ;
- 3^{ème} catégorie : dans cette catégorie, on a un mélange de retenues d'eau qui sont détectées pour certains et pas détectées pour d'autres.

Ce que l'on peut dire c'est que les retenues commencent à être détectées à partir d'une surface supérieure ou égale à 1000 m². Plusieurs facteurs peuvent expliquer la non-détection de certaines retenues :

- La surface : Les retenues de moins de 1000 m² représentent 63.16% des retenues totales et 80.33% des retenues comprises dans l'intervalle [0 ; 5000] m²
- Le degré d'exposition : On peut se poser la question de savoir pourquoi certaines petites retenues sont détectées mais pas les retenues plus grandes. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'il y a certaines retenues qui ne sont pas bien exposées ; elles peuvent être situées en forêt, cachées par des arbres par conséquent elles ne sont pas atteintes par les rayonnements du satellite.
- La forme : Lorsqu'on observe le graphe de la figure 25, on constate que plus la forme de la retenue tend vers une plus compacte (indice se rapprochant de 1 donc une forme se rapprochant du cercle) plus sa probabilité de détection augmente. Dans l'intervalle [1000 ; 15000] m², 93.18% des retenues ont un indice de compacité inférieur ou égale à 1.7. Il faut associer ce facteur avec celui de l'exposition. Une condition pour qu'une retenue soit détectée c'est qu'il faut qu'elle ait un indice de compacité qui tend le plus vers 1 et qu'elle soit bien exposée pour recevoir les rayonnements du satellite.

III.3.2.3. Détections des retenues sur la base du nombre d'érosion

On a calculé la probabilité de détection des retenues. Pour ce faire, on a utilisé une méthode qui consiste à calculer le nombre d'érosions pour chaque retenue. Éroder un polygone c'est supprimer les pixels situés en bordure (figure 26).

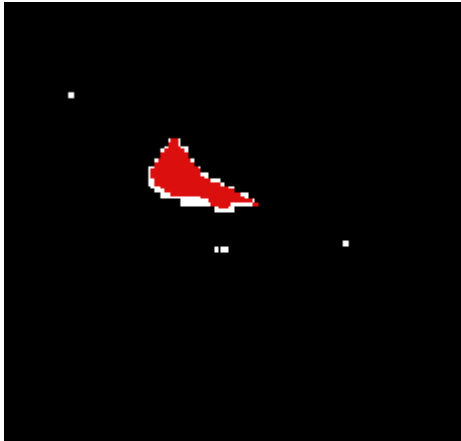


Figure 26 : Erosion d'un polygone ; en rouge c'est la surface après érosion

Pour chaque retenue d'eau contenue dans la BD sandre, nous avons fait des érosions successives jusqu'à ce que la retenue disparaisse. Dans un tableau, on regroupe les retenues (détectées et non détectées) en fonction de leur nombre d'érosions. La figure 27 nous montre la répartition des valeurs dans chaque classe d'érosion.

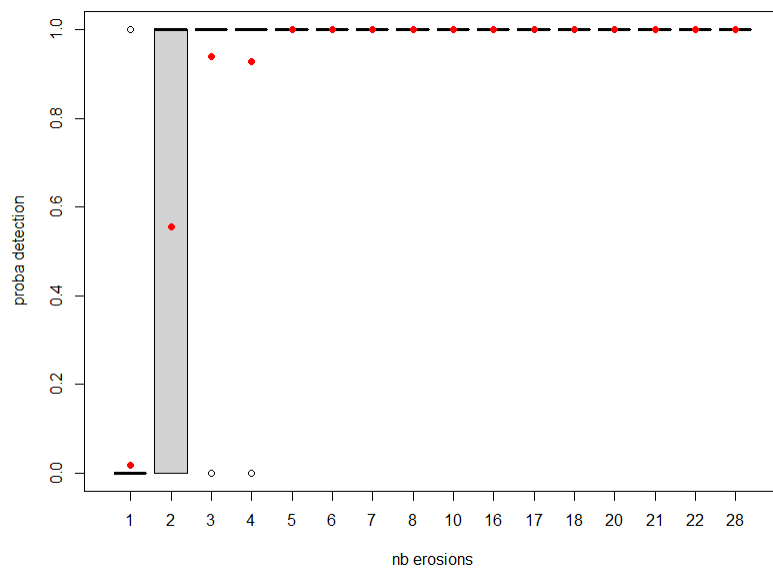


Figure 27 : Répartition des valeurs de détection dans chaque classe d'érosion (boxplot) ; les points rouges représentent la moyenne de chaque classe.

On voit qu'à une érosion la barre pointe à 0 ceci veut dire que les retenues non détectées sont très majoritaires dans cette classe, on compte également quelques retenues détectées puisqu'on voit des points à 1. Les retenues détectées représentent 1.38% des retenues de cette classe. Au bout d'une érosion, 360 retenues disparaissent soit 68.7%.

En se basant sur le modèle sphérique variogramme, on peut représenter la probabilité de détection des retenues d'eau en fonction du nombre d'érosions (figure 28).

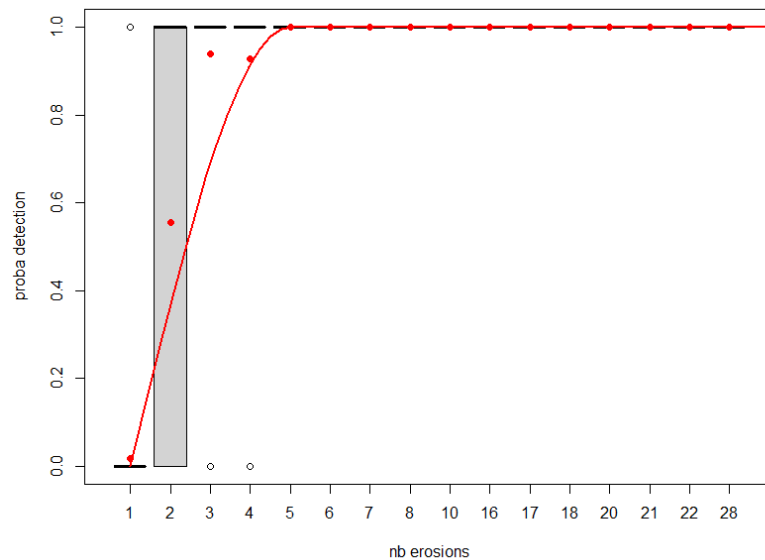


Figure 28 : probabilité de détection en fonction du nombre d'érosion

La probabilité de détection des retenues d'eau croît en fonction du nombre d'érosions. Plus le nombre d'érosion est grand, plus la surface de la retenue est grande et plus la probabilité de détection est élevée. Cette courbe croît et converge à partir d'un certain nombre qui est le seuil de détection (nombre d'érosion supérieure ou égale à 5). A partir de ce seuil, la probabilité de détection est de 1.

En somme :

- Nombre érosion =1 → P = 0 ;
- Nombre érosion =2 → P = 0.36 ;
- Nombre érosion =3 → P = 0.68 ;
- Nombre érosion =4 → P = 0.91 ;
- Nombre érosion =5 → P = 1.

Avec P qui désigne la probabilité de détection.

Partie IV : Perspectives

Cette partie portera sur les points qui n'ont pas pu être abordés durant la période de stage, les futurs traitements à faire pour la continuité du sujet.

IV.1. Détection des plans d'eau : cas général

Jusqu'ici, les précédents traitements et analyses ont été appliqués sur une sous-zone du département de l'Aude. L'objectif de futurs travaux est de passer de la sous-zone à toute l'étendue du département.

Grâce à la surface, on parvient à trouver un seuil de détection qui sépare grossièrement les retenues détectées de celles qui ne le sont pas. Pour améliorer ce seuil, un indice de compacité a été introduit. La conclusion a été que l'indice de compacité choisi ne permettait pas de pouvoir expliquer seul pourquoi dans cette gamme de surface, certaines retenues sont détectées et d'autres non. Ce qui amène à penser qu'à ce niveau une analyse multicritère est également envisageable. Nous avons associé surface et indice de compacité ; *Piombini et al., (2014)* répertorient différents indices de forme qui peuvent décrire la morphologie d'un bassin versant ; on peut citer l'indice de Miller, l'indice de Horton, on peut aussi avoir l'indice de Schumm (*Bendjoudi et al., 2002*), etc. Cette analyse multicritère concerne principalement le deuxième quadrant comme décrit dans le paragraphe III.3.2.2 (cf. figure 25) ; elle permettra de déterminer les caractéristiques de ces retenues et par la même occasion permettre d'établir une classification.

Les traitements appliqués sur l'Aude doivent également être appliqués sur la Tunisie à une différence près. Sur ce territoire, les données terrains ne sont pas aussi riches que sur le département de l'Aude. En France, on a eu accès à la base de données sandre qui a été d'une grande utilité mais sur la Tunisie ce ne sera pas le cas. Ce qui veut dire que le nombre d'indicateurs ne sera plus de 36 mais plutôt 24 qui vont correspondre aux valeurs d'occurrence mensuelle en optique (12 indicateurs optiques) et en radar (12 indicateurs radar). Avec l'absence des données de validation comme la BD sandre, pour la détection, une classification non supervisée est la plus adaptée dans ce cas de figure.

IV.2. Etablissement d'une typologie des retenues

Après avoir déterminé les différents seuils, il est question de faire une typologie des retenues qui ont pu être détectées. Cette typologie doit se faire en fonction de la variation de la surface de chaque retenue dans le temps. Elle va permettre de connaître le comportement de chaque retenue ; connaître à quel moment une retenue se remplit et/ou se vide.

Pour faire cette typologie, on peut se baser sur différents aspects :

- Erreur relative par rapport à la surface maximale : Pour chaque retenue, un rapport de surface doit être fait entre les surfaces mensuelles à chaque date et la surface maximale qui est la surface obtenue à partir de l'image optique d'occurrence annuelle ;
- Erreur relative par rapport à la surface médiane : Dans ce cas, le rapport devra être calculé entre les surfaces mensuelles à chaque date et la médiane des surfaces de la série temporelle pour chaque retenue.

Avec ces deux approches, on pourra faire une classification supervisée et voir quelles sont les dynamiques des retenues dans le temps et aussi voir quelles sont les retenues qui ont des dynamiques similaires.

Conclusion

L'observation continue des surfaces d'eau est essentielle dans la gestion des ressources en eau et ces dernières décennies, l'utilisation d'images satellites a augmenté avec une plus grande disponibilité des données avec une résolution spatiale et temporelle plus fine.

Cette étude avait pour objectif de détecter les retenues d'eau à partir des images Sentinel 1 et 2. Ces images ont été traitées par le CNES qui a proposé un algorithme de détection de pixel en eau. En comparaison avec des algorithmes comme MAJA, Sen2Cor et Fmask, les différentes approches de seuillage qui ont été testées présentent des résultats de précision plus élevés avec un écart-type plus faible ; ça montre une meilleure fiabilité de l'algorithme (annexe 1).

Pour la détection des retenues, nous avons vu qu'une analyse multicritère c'est-à-dire une combinaison des occurrences optique et radar était plus adaptée que l'utilisation séparée des occurrences ; elle nous a permis de trouver un premier seuil de détection à 15000 m². Un nouvel indicateur a été ajouté ; c'est celui de l'indice de forme qui a permis de scinder les retenues en trois groupes : un groupe de retenues détectées, un groupe de retenues non détectées (qui contient environ 63% de l'ensemble des retenues) et un dernier groupe qui est un mélange des deux premiers. Ce nouvel indicateur a permis d'affiner le seuil de détection à 1000 m².

En plus du seuil de surface, on a également déterminé un seuil qui est basé sur le nombre d'érosion d'une retenue. Il permet de calculer la probabilité pour qu'une retenue d'eau soit détectée ; ce seuil nous dit qu'à partir d'un nombre d'érosion supérieure ou égale à 5 la probabilité de détection est de 1. Intrinsèquement, le nombre d'érosion communique une information sur la surface de la retenue ; plus le nombre d'érosion est grand, plus la retenue a une grande surface.

Un groupe de retenues attire l'attention c'est l'ensemble des retenues compris entre 1000 m² et 15000 m². Dans cet intervalle, il est intéressant de comprendre pourquoi certaines retenues plus petites sont détectées alors que des retenues plus grandes ne le sont pas ; pourquoi certaines retenues moins compactes sont détectées alors que des retenues plus compactes ne le sont pas. L'indice de compacité utilisé est insuffisant pour trouver une solution. Une voie envisageable est d'opter pour une analyse multicritère en y associant d'autres indices comme l'indice de Miller, l'indice de Horton, etc.

Bibliographie

- Acharya, T. D. *et al.* (2016) 'Identification of Water Bodies in a Landsat 8 OLI Image Using a J48 Decision Tree', *Sensors*, 16(7), p. 1075.
- Baetens, L., Desjardins, C. and Hagolle, O. (2019) 'Validation of Copernicus Sentinel-2 Cloud Masks Obtained from MAJA, Sen2Cor, and FMask Processors Using Reference Cloud Masks Generated with a Supervised Active Learning Procedure', *Remote Sensing*, 11(4), p. 433.
- Bangira, T. *et al.* (2019) 'Comparing Thresholding with Machine Learning Classifiers for Mapping Complex Water', *Remote Sensing*, 11(11), p. 1351.
- BENDJOUDI, H. and HUBERT, P. (2002) 'The Gravelius compactness coefficient : critical analysis of a shape index for drainage basins', *Hydrological Sciences Journal*, 47(6), pp. 921–930.
- Buma, W., Lee, S.-I. and Seo, J. (2018) 'Recent Surface Water Extent of Lake Chad from Multispectral Sensors and GRACE', *Sensors*, 18(7), p. 2082.
- Caliński, T. and Harabasz, J. (1974) 'A dendrite method for cluster analysis', *Communications in Statistics*, 3(1), pp. 1–27.
- Cordeiro, M. C. R., Martinez, J.-M. and Peña-Luque, S. (2021) 'Automatic water detection from multidimensional hierarchical clustering for Sentinel-2 images and a comparison with Level 2A processors', *Remote Sensing of Environment*, 253, p. 112209.
- Hagolle, O. *et al.* (2010) 'A multi-temporal method for cloud detection, applied to FORMOSAT-2, VEN μ S, LANDSAT and SENTINEL-2 images', *Remote Sensing of Environment*, 114(8), pp. 1747–1755.
- Lenco, M. (1978) 'Apport de la télédétection à l'inventaire et à la gestion des ressources en eau', *Économie rurale*, 127(1), pp. 35–36.
- Louis, J. *et al.* (2019) 'Sentinel-2 Global Surface Reflectance Level-2a Product Generated with Sen2Cor', in *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 8522–8525.
- Massuel, S. *et al.* (2015) 'Vers l'amélioration du bilan hydrologique des retenues collinaires par la prise de vue aéroportée légère', p. 1.
- McFEETERS, S. K. (1996) 'The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features', *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), pp. 1425–1432.
- Olmsted, C. (1993) *Alaska SAR Facility Scientific SAR User's Guide by*. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Alaska-SAR-Facility-Scientific-SAR-User%E2%80%99s-Guide-by-Olmsted/1156e8affd68e8961f57ae30fd44646c87fba9f2> (Accessed : 17 August 2021).
- Pekel, J.-F. *et al.* (2016) 'High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes', *Nature*, 540(7633), pp. 418–422.
- Piombini, A., Leduc, T. and Woloszyn, P. (2014) 'Usage de la morphométrie dans la révélation des préférences de mobilité. Application aux cheminements piétons', *Revue internationale de géomatique*, 24, pp. 101–130.

Schreider, S. Y. *et al.* (2002) 'Detecting changes in streamflow response to changes in non-climatic catchment conditions : farm dam development in the Murray-Darling basin, Australia', *Journal of hydrology*. Available at : <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201600118578> (Accessed : 17 August 2021).

Schwatke, C., Scherer, D. and Dettmering, D. (2019) 'Automated Extraction of Consistent Time-Variable Water Surfaces of Lakes and Reservoirs Based on Landsat and Sentinel-2', *Remote Sensing*, 11(9), p. 1010.

Shen, X. *et al.* (2019) 'Inundation Extent Mapping by Synthetic Aperture Radar : A Review', *Remote Sensing*, 11(7), p. 879.

Souza, C. M. *et al.* (2019) 'Long-Term Annual Surface Water Change in the Brazilian Amazon Biome : Potential Links with Deforestation, Infrastructure Development and Climate Change', *Water*, 11(3), p. 566.

Thompson, J. C. (2012) 'Impact and Management of Small Farm Dams in Hawke's Bay, New Zealand'. Available at : <http://researcharchive.vuw.ac.nz/handle/10063/2142> (Accessed : 17 August 2021).

Xu, H. (2006) 'Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery', *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), pp. 3025–3033.

Yamazaki, D. and Trigg, M. A. (2016) 'The dynamics of Earth's surface water', *Nature*, 540(7633), pp. 348–349.

Zhu, Z., Wang, S. and Woodcock, C. E. (2015) 'Improvement and expansion of the Fmask algorithm : cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images', *Remote Sensing of Environment*, 159, pp. 269–277.

Zhu, Z. and Woodcock, C. E. (2012) 'Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery', *Remote Sensing of Environment*, 118, pp. 83–94.

Travaux universitaires

Puech, C. (1993) *Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants : application à des bassins en zone méditerranéenne et en zone tropicale sèche*. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier (Grenoble). Disponible sur: <http://www.theses.fr/1993GRE10175> (consulté le 22 August 2021).

CHAIMAILLE Lise, *Apport de la télédétection pour la détection de l'eau et la caractérisation des propriétés de l'eau*. Master 2 professionnel géomatique, Académie de Toulouse (Toulouse), 2008. Disponible sur https://agritrop.cirad.fr/548843/1/document_548843.pdf (consulté le 14 juin 2021)

Anounou Kemavo, *Potentialités des données de télédétection optique et radar libres d'accès pour l'évaluation et le suivi des écosystèmes forestiers tropicaux : Études de cas au Togo, en République Démocratique du Congo, en Guyane Française et en République Dominicaine*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est (Paris), 2018. Disponible sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02384384/document> (consulté le 14 juin 2021).

Site web

https://www.google.com/search?q=Suhet%2C+2015+Sentinel-2+User+Handbook&rlz=1C1VDKB_frFR955FR956&oq=Suhet%2C+2015+Sentinel-2+User+Handbook&aqs=chrome..69i57.3067j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8 (consulté le 14 juin 2021)

<https://dipankar005.wordpress.com/2016/02/07/sar-data-selection-and-differrent-sar-satellites/> (consulté le 18 juin 2021)

https://expertise-impact-cumule-retenu.es.inrae.fr/wp-content/uploads/2016/05/Rapport-de-synth%C3%A8se_27-05.pdf (consulté le 23 juillet 2021)

Table des annexes

Annexe 1 : Comparaison de la méthode de seuillage du CNES aux différents algorithmes (Fmask, Sen2Cor, MAJA)	56
Annexe 2 : Nomenclature et description des différentes classes de plans d'eau de la base de données Sandre	57
Annexe 3 : Comparaison de la méthode de seuillage du CNES aux différents algorithmes (Fmask, Sen2Cor, MAJA)	59
Annexe 4 : Seuillage sur les images optique, radar et moyenne (combinaison du radar et de l'optique).....	60
Annexe 5 : Retenues d'eau situées (avec les bordures rouges) en limite de la sous-zone d'intérêt	61

Annexe 1 : Comparaison de la méthode de seuillage du CNES aux différents algorithmes (Fmask, Sen2Cor, MAJA)

SCENE	FMask	Sen2Cor	MAJA	NDWI B12	MNDWI B12	NDWI B12	MNDWI B12	NDWI B12	MBWI
Bordeaux summer	0.982	0.951	0.773	0.980	0.984		0.984		
Camargue winter	0.968	0.919	0.661	0.970	0.966				0.960
Camargue summer	0.977	0.960	0.738	0.977	0.969				0.912
Bordeaux winter	0.977	0.965	0.797	0.925	0.968				0.879
Chateauroux summer	0.573	0.329	0.069	0.869	0.832				0.936
Alsace summer	0.908	0.815	0.123	0.857	0.924				0.938
Alpes summer	0.672	0.886	0.704	0.947	0.937				0.942
Alsace winter	0.903	0.752	0.280	0.917	0.906				0.777
Chateauroux winter	0.837	0.705	0.025	0.887	0.843				0.901
Bretagne summer	0.512	0.352	0.124	0.884	0.756				0.859
Marmande	0.772	0.678	0.014	0.866	0.915				0.919
Gironde	0.950	0.892	0.738	0.811	0.846				0.798
Bretagne winter	0.751	0.657	0.042	0.856	0.813				0.794
Ariège winter	0.443	0.673	0.149	0.749	0.721				0.780
Ariège summer	0.239	0.352	0.088	0.608	0.545				0.405
Mean	0.764	0.726	0.355	0.874	0.862				0.852
Std	0.223	0.217	0.317	0.094	0.115				0.137

Annexe 2 : Nomenclature et description des différentes classes de plans d'eau de la base de données Sandre

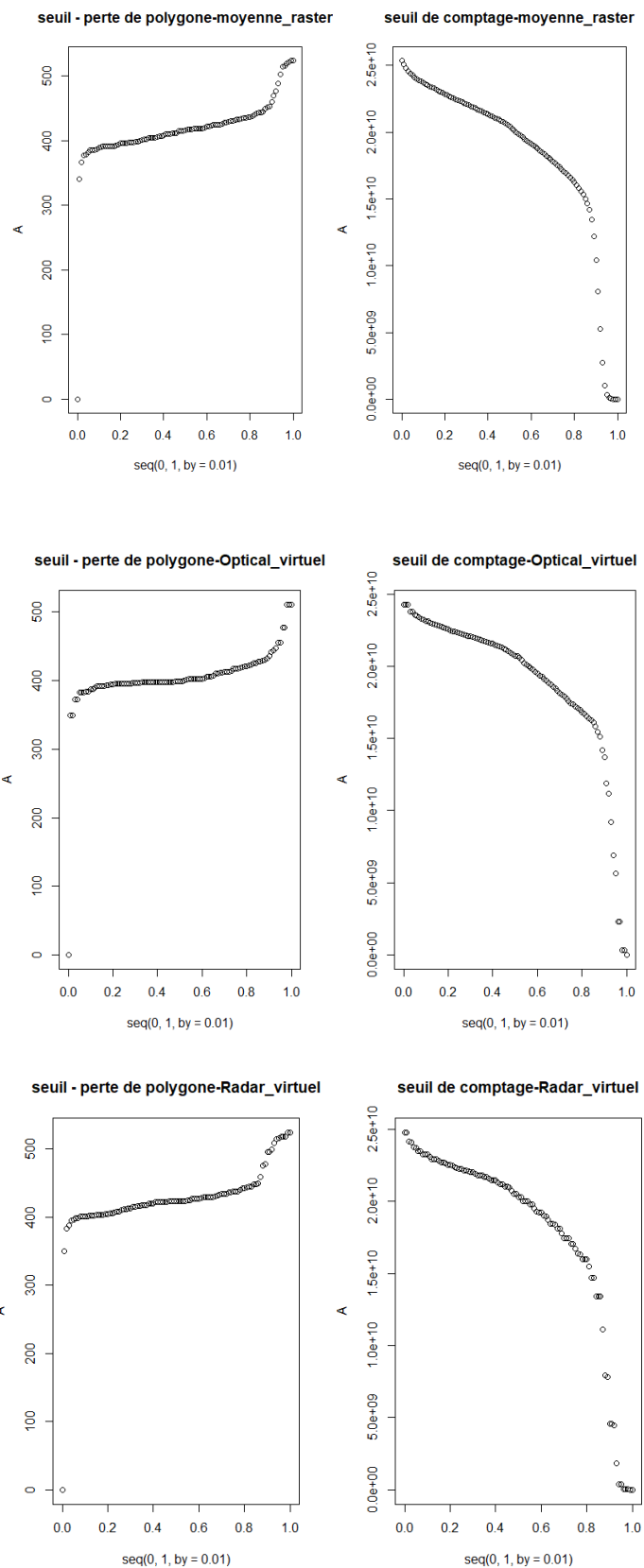
Date de création de la nomenclature		02/10/2014				
Date de dernière mise à jour de la nomenclature		23/04/2021				
Nom de la nomenclature		Nature d'un objet hydrographique				
Définition de la nomenclature		Nature d'un objet hydrographique (concerne les cours d'eau, tronçon hydrographique, plan d'eau surface élémentaire).				
Element						
Code de l'élément	Mnémonique de l'élément	Libellé de l'élément	Statut de l'élément	Définition de l'élément	Date de création de l'élément	Date de mise à jour de l'élément
0	Inconnue	Inconnue	Validé	Nature de l'objet hydrographique inconnue.	02/10/2014	02/10/2014
1.1	Écoulement canalisé	Écoulement canalisé	Validé	Tout ou partie d'un cours d'eau ou d'un tronçon dont le lit et/ou les berges ont été aménagés pour garder son écoulement dans un chenal à des fins multiples (défense des berges, lutte contre les inondations, navigation, etc.)	02/10/2014	12/11/2017
1.2	Écoulement karstique	Écoulement karstique	Validé	Voie d'eau naturelle à écoulement pérenne ou intermittent traversant des terrains fissurés en général calcaires et pouvant subir des pertes ou bénéficier d'apports dus à des résurgences	02/10/2014	12/11/2017
1.3	Écoulement endoréique	Écoulement endoréique	Validé	Eaux de surface n'atteignant pas la mer ou l'océan mais alimentant un plan d'eau sans exutoire ou bien absorbées au cours de leur écoulement par infiltration et/ou évaporation	02/10/2014	12/11/2017
1.4	Écoulement phréatique	Écoulement phréatique	Validé	Cours d'eau ou tronçon dont la source et/ou les apports intermédiaires sont directement et uniquement liés au niveau de la nappe.	02/10/2014	12/11/2017
1.5	Écoulement naturel	Écoulement naturel	Validé	Voie empruntée préférentiellement par l'écoulement gravitaire des eaux météoriques provenant notamment du ruissellement, d'émergences, de la fonte des glaces, d'un étang ou de régions gorgées d'eau. Le terme cours d'eau désigne à la fois le lit et l'écoulement des eaux dans ce lit. Un cours d'eau peut être à écoulement pérenne, intermittent ou saisonnier. Il possède un régime hydrologique naturel.	02/10/2014	22/04/2021
1.6	Canal	Canal	Validé	Voie d'eau artificielle à surface libre	02/10/2014	01/10/2014
1.7	Conduit forcé, aqueduc	Conduit forcé, aqueduc	Validé	Tuyau ou chenal artificiel conçu pour le transport de l'eau (usage hydroélectrique, industriel,...)	02/10/2014	01/10/2014
1.8	Conduit buse	Conduit buse	Validé	Ouvrage constitué d'au moins un conduit transversal, généralement fait de béton ou de métal, laissant circuler l'eau sous une route, une voie ferrée ou une autre structure	02/10/2014	01/10/2014
2.1	Plan d'eau - retenue	Plan d'eau - retenue	Validé	Comprend les retenues collinaires, Etangs, Mares	02/10/2014	01/10/2014
2.1.1	PE - retenue - barrage	PE - retenue - barrage	Validé	Ouvrage construit pour empêcher ou limiter un mouvement quelconque ; en particulier, ouvrage construit pour retenir les eaux soit en vue de leur utilisation pour la production d'énergie électrique, l'irrigation des cultures ou l'alimentation des collectivités (barrage-réservoir), soit simplement en vue d'en régulariser l'écoulement (barrage de retenue ou de régulation).	02/10/2014	01/10/2014
2.1.2	PE - retenue - digue	PE - retenue - digue	Validé	La digue est un ouvrage linéaire, généralement de grande longueur, longitudinal par rapport au sens de l'écoulement de l'eau, surélevé par rapport au terrain naturel et destiné à s'opposer au passage de l'eau ou à la canaliser.	02/10/2014	01/10/2014

2.1.3	PE - retenue - bassinport	PE - retenue - bassin portuaire	Validé	Ensemble de darses (bassin rectangulaire destiné principalement à l'accostage des cargos) d'un port qui est fermé, il se trouve dans une impasse	02/10/2014	01/10/2014
2.2	Plan d'eau - réservoir	Plan d'eau - réservoir	Validé	Plan d'eau artificiel possédant le plus souvent un usage spécifique. Il comprend les bassins d'élevage piscicole, bassins d'épurations, bassins de décantation, bassins de filtrage, bassins de lagunage, bassins de rétention, bassins ostréicole, crassonniers, excréteurs de crues, réservoirs d'eau à ciel ouvert. Il comprend également les bassins d'orage, bassins de stockage incendie. Ces réservoirs ne possèdent pas d'usage irrigation.	02/10/2014	21/04/2021
2.2.1	PE - réservoir - piscicult	PE - réservoir - pisciculture	Validé	Réservoir à usage piscicole	02/10/2014	01/10/2014
2.2.2	PE- réservoir - bassinorage	PE - réservoir - bassin orage	Validé	Réservoir recueillant les eaux drainées par la voirie lors d'un orage.	02/10/2014	01/10/2014
2.3	Plan d'eau - estuaire	Plan d'eau - estuaire	Validé	Embouchure de fleuve ou de rivière soumise à la marée et qui forme une indentation profonde unique du littoral.	02/10/2014	01/10/2014
2.4	Plan d'eau - delta	Plan d'eau - delta	Validé	Construction fluviomarine de forme générale triangulaire, plus ou moins saillante par rapport à la côte, créée par les alluvions à l'embouchure d'un fleuve, dont le cours se sépare en plusieurs défluent avant d'atteindre la mer.	02/10/2014	01/10/2014
2.5	Plan d'eau - mare	Plan d'eau - mare	Validé	Etendue d'eau superficielle de petite taille et de faible profondeur, permanente ou saisonnière. Les mares de l'estran abritent une flore et une faune d'une grande variété et notamment des juvéniles de nombreuses espèces de poissons. Petite étendue d'eau dormante, permanente ou temporaire, généralement de formation naturelle, plus petite qu'un étang.	02/10/2014	01/10/2014
2.6	Plan d'eau - marais	Plan d'eau - marais	Validé	Au sens de la codification hydrographique, désigne un territoire sans relief significatif irrigué ou drainé par un réseau dense de canaux et/ou de bras et pouvant comporter des plans d'eau. Commentaires: exemples: marais vendéens, waterings.	02/10/2014	01/10/2014
2.7	Plan d'eau - mangrove	Plan d'eau - mangrove	Validé	Zone forestière amphibie composée essentiellement de palétuviers, qu'on trouve sur les sédiments vaseux des littoraux tropicaux.	02/10/2014	01/10/2014
2.8	Plan d'eau - gravière	Plan d'eau - gravière	Validé	Masse d'eau créée par l'extraction de granulats dans la plaine alluviale d'un cours d'eau et alimentée principalement par la nappe alluviale. Au sens de la codification hydrographique, les gravières ne sont généralement plus en exploitation. De même, il pourra s'agir d'un ensemble de plans d'eau faisant partie d'une même exploitation.	02/10/2014	01/10/2014
2.9	PE - mine (exhaure)	Plan d'eau - mine (exhaure)	Validé	Masse d'eau utilisée dans les mines et milieux souterrains	02/10/2014	01/10/2014
2.10	Plan d'eau - lagune	Plan d'eau - lagune	Validé	Masse d'eau continentale en communication avec le milieu marin.	02/10/2014	01/10/2014
2.11	Plan d'eau - lac	Plan d'eau - lac	Validé	Masse d'eau continentale accumulée naturellement ; suffisamment profond, il comporte une stratification thermique stable.	02/10/2014	01/10/2014

Annexe 3 : Comparaison de la méthode de seuillage du CNES aux différents algorithmes (Fmask, Sen2Cor, MAJA)

	gid	surface	Opt_count	Opt_sum	Opt_mean	Opt_median	Opt_stdev	Opt_min	Opt_max	Perimetre
1	55930	2000,418	20,000000000000...	0	0	0	0	0	0	223,556
2	55934	1914,081	19,000000000000...	1,159090943634...	0,061004786507...	0,045454546809...	0,044274536064...	0	0,136363640427...	211,894
3	55936	3328,144	35,000000000000...	2,727356832474...	0,077924480927...	0,088888891041...	0,039350024772...	0	0,155555561184...	309,227
4	55937	3354,167	35,000000000000...	1,248671948909...	0,035676341397...	0,019607843831...	0,037538836852...	0	0,088888891041...	353,892
5	96033	11274,962	113,000000000000...	18,04428884200...	0,159683972053...	0,127659574151...	0,144224256136...	0	0,425531923770...	419,853
6	107378	264,967	2,000000000000...	0	0	0	0	0	0	110,673
7	55886	15875,039	158,000000000000...	111,5384615361...	0,705939629975...	0,961538434028...	0,393068639772...	0	1,000000000000...	512,164
8	55887	6331,207	64,000000000000...	18,15384642779...	0,283653850434...	0,230769239366...	0,234396572794...	0	0,807692289352...	322,973
9	55889	5228,141	50,000000000000...	19,89285721257...	0,397857144251...	0,339285716414...	0,371497936001...	0	1,000000000000...	281,534
10	55908	989,256	9,000000000000...	0	0	0	0	0	0	134,377
11	64694	1205,290	12,000000000000...	0,928571466356...	0,0773809552971	0,053571430966...	0,05615465154647	0	0,178571432828...	144,632
12	80519	127,033	1,269140510766...	0	0	0	0	0	0	55,624
13	87094	88,838	0,887677936024...	0	0	0	0	0	0	33,757
14	87095	85,345	0,852776320390...	0	0	0	0	0	0	33,088
15	89021	244,415	2,000000000000...	0	0	0	0	0	0	59,688
16	89687	259,868	3,000000000000...	0	0	0	0	0	0	67,624
17	89691	122,003	1,219288342565...	0	0	0	0	0	0	55,272
18	92963	87,555	0,874860066598...	0	0	0	0	0	0	33,569
19	93019	260,523	3,000000000000...	0	0	0	0	0	0	67,803
20	93376	151,349	1,512302104329...	0	0	0	0	0	0	44,099
21	93457	740,047	7,000000000000...	0	0	0	0	0	0	123,566
22	95927	27,472	0,274507843323...	0	0	0	0	0	0	21,707
23	890618	11593,121	115,000000000000...	0,353623203933...	0,003074984382...	0	0,012711088292...	0	0,066666670143...	417,309
24	55796	9650,390	93,000000000000...	59,72092980891...	0,642160535579...	0,906976759433...	0,379995966611...	0	0,976744174957...	395,278
25	55849	369,355	4,000000000000...	0,090909093618...	0,022727273404...	0,022727273404...	0	0,022727273404...	0,022727273404...	72,402
26	55866	8678,342	89,000000000000...	29,35714304633...	0,329855539846...	0,190476194024...	0,349809689008...	0	0,952380955219...	493,236
27	67915	1035,234	9,000000000000...	0	0	0	0	0	0	136,023
28	71889	1443,869	14,000000000000...	0	0	0	0	0	0	150,953
29	85237	88,450	0,883878940625...	0,017056852355...	0,019297724576...	0,023255813866...	0,010296740404...	0	0,023809524253...	42,316
30	87161	272,853	4,000000000000...	0	0	0	0	0	0	59,847
31	87158	769,416	7,000000000000...	0	0	0	0	0	0	109,045
32	87177	932,236	10,000000000000...	0	0	0	0	0	0	181,356
33	89771	2265,406	23,000000000000...	0	0	0	0	0	0	235,156
34	90169	60,448	0,604045045797...	0	0	0	0	0	0	30,438

Annexe 4 : Seuillage sur les images optique, radar et moyenne (combinaison du radar et de l'optique)



Annexe 5 : Retenues d'eau situées (avec les bordures rouges) en limite de la sous-zone d'intérêt



Liste des figures

Figure 1 : Géométrie d'acquisition radar, source :Olmsted, 1993.....	9
Figure 2 : Capacité de pénétration du signal radar en fonction de la longueur d'onde	11
Figure 3 : Interaction du rayonnement solaire avec les surfaces en eau, L. CHAMAILLE	12
Figure 4 : Fonctionnement capteurs passifs et actifs (E : rayonnement, R : Réfléchi, T : Transmis, A : Absorbé), source :	13
Figure 5 : Différents modes d'acquisition d'images Sentinel-1, Source : European Space Agency	14
Figure 6 : Emplacement des retenues selon leur type d'alimentation, source : Synthèse de rapport, ESCo	16
Figure 7 : Extrait du tableau comparatif entre les différents algorithmes d'identification et les différentes combinaisons de seuillage du CNES, source : (Cordeiro et al., 2021)	19
Figure 8 : Situation géographique du département de l'Aude, source : https://www.occitanie.fr/departements-region-occitanie/le-departement-de-laude-11/	21
Figure 9 : Situation géographique de la Tunisie, source : Par Sting sur Wikipédia français — Transféré de fr. Wikipédia à Commons., Domaine public, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1570609	22
Figure 10 : Etapes de la méthode de détection proposée, source : Cordeiro et al., 2021	25
Figure 11 : Etapes de traitement de la chaîne SITiling, Source : https://labo.obs-mip.fr/multitemp/s1tiling-ortho-rectification-a-la-demande-des-donnees-sentinel-1-sur-la-grille-sentinel-2/	26
Figure 12 : Répartition des points GPS CA11 (retenues agricoles) sur la zone d'étude, source : http://umap.openstreetmap.fr/fr/map/site-aude_522794#10/43.0303/2.6340	27
Figure 13 : Traitement de binarisation sous QGIS	30
Figure 14 : Image optique binarisée.....	31
Figure 15 : Image radar binarisée	31
Figure 16 : Superposition entre le raster annuel d'occurrence et la couche vectorielle de la base données sandre (en rouge) ; valeurs d'occurrence : 0 (rouge) – 1 (vert).....	32
Figure 17 : Résultat statistique sur les objets sandre.....	33
Figure 18 : Sous-zone d'intérêt	34
Figure 19 : Indice de planéité (MRVBF).....	36
Figure 20 : Arbre de décision obtenu.....	38
Figure 21 : Extrait de la carte des pixels après classification	40
Figure 22 : Mise en évidence des faux positifs par rapport à la base de données sandre	42
Figure 23 : Graphe donnant le pourcentage de détection des retenues à caractère agricole en fonction de la surface	43
Figure 24 : Graphe donnant le pourcentage de détection des retenues de la BD sandre en fonction de la surface.....	44
Figure 25 : Allongement (indice de compacité) en fonction de la surface	45
Figure 26 : Erosion d'un polygone ; en rouge c'est la surface après érosion	47
Figure 27 : Répartition des valeurs de détection dans chaque classe d'érosion (boxplot) ; les points rouges représentent la moyenne de chaque classe.	47
Figure 28 : probabilité de détection en fonction du nombre d'érosion.....	48

Listes des tableaux

Tableau 1 : Bandes radar, fréquences et longueurs d'onde	10
Tableau 2 : Récapitulatif des données Sentinel	23
Tableau 3 : Récapitulatif des données de travail	28
Tableau 4 : Matrice de confusion.....	38
Tableau 5 : Classes de pixels	39